

José Júlio de Cerqueira Pituba
Marcelo Henrique Stoppa
organizadores

TECNOLOGIAS EM PESQUISA: Engenharias



José Júlio de Cerqueira Pituba
Marcelo Henrique Stoppa
(organizadores)

Tecnologias em pesquisa: Engenharias

Blucher

Tecnologias em pesquisa: Engenharias

© 2017 José Júlio de Cerqueira Pituba e Marcelo Henrique Stoppa (organizadores)

Editora Edgard Blücher Ltda.

Conselho editorial

Alexandre Lima Marques da Silva (Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas – UFAL)

Carlos Alberto Pereira dos Santos (Departamento de Matemática – UnB)

Carlos Humberto Martins (Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá – UEM)

José Aguiomar Foggiatto (Departamento Acadêmico de Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR)

José Julio de Cerqueira Pituba (Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Goiás – UFG)

Marcelo H. Stoppa (Instituto de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – UFG)

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar

04531-934 – São Paulo – SP – Brasil

Tel.: 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br

www.blucher.com.br

Segundo Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed.
do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,
Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer
meios sem autorização escrita da editora.

Todos os direitos reservados pela editora
Edgard Blücher Ltda.

FICHA CATALOGRÁFICA

Tecnologias em pesquisa : engenharias [livro eletrônico] /
organização de José Júlio de Cerqueira Pituba, Marcelo
Stoppa. – São Paulo : Blucher, 2017.
422 p. : PDF ; il. color.

ISBN 978-85-803-9223-4 (e-book)

ISBN 978-85-803-9222-7 (impresso)

1. Engenharia – Pesquisa 2. Matemática aplicada
3. Gestão de projetos 4. Engenharia mecânica 5. Materiais
5. Estruturas I. Pituba, José Júlio de Cerqueira.

17-0100

CDD 620

Índices para catálogo sistemático:
1. Engenharias : Pesquisa

Sobre os organizadores

Marcelo Henrique Stoppa

Possui graduação em Licenciatura Plena em Matemática pela Universidade Federal de Goiás (1991), mestrado em Matemática Pura pela Universidade Federal de Goiás (1996), doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia (2003) e Pós-Doutorado em Mecatrônica também pela Universidade Federal de Uberlândia (2015). É professor associado da Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão. Tem experiência em áreas de Matemática e Engenharia Mecânica, com ênfase em Matemática Aplicada, Vibrações de Sistemas Mecânicos, Robótica Educacional, Automação, Controle e Máquinas Móveis e Tecnologia Assistiva. Faz parte do corpo docente do Mestrado Profissional em Gestão Organizacional (UFG) na linha de pesquisa Inovação, Desenvolvimento e Tecnologia e do Mestrado Acadêmico em Modelagem e Otimização (UFG). Atualmente é Coordenador de Inovação, Transferência e Tecnologia da Regional Catalão (UFG) e Coordenador do Centro de Empreendedorismo e Incubação de Empresas – Athenas (UFG-Catalão).

José Julio de Cerqueira Pituba

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Alagoas (1995), Mestre em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) pela Universidade de São Paulo (1998), Doutor em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) pela Universidade de São Paulo (2003), realizou estágio de Pós-Doutorado na Swansea University – Reino Unido (2011-2012). Atualmente é Professor Associado do Curso de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Goiás (DECIV/FENG/UFG), Assessor da Coordenação de Pesquisa e Pós-graduação e

membro permanente do corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil (Mestrado) da UFG na área Engenharias I. Também é membro permanente do corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Exatas e Tecnológicas (Doutorado) da UFG na área de Materiais. É Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq e membro do Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON) e da Associação Brasileira de Métodos Computacionais em Engenharia (ABMEC). Foi membro do Conselho Regional de Engenharia Arquitetura e Agronomia – SP (CREASP) e Professor da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP). Tem experiência na área de Engenharia de Estruturas com ênfase em Mecânica das Estruturas.

Apresentação

O presente livro reúne vários trabalhos apresentados e selecionados por pares durante o IV Seminário de Pesquisa, Pós-graduação e Inovação realizado em setembro de 2016 na Regional Catalão da Universidade Federal de Goiás. Os artigos relatam resultados de pesquisas desenvolvidas e em desenvolvimento na área de Engenharias, a qual apresenta-se como uma das vocações da Regional Catalão, afirmação embasada na quantidade e qualidade dos trabalhos que compõem este livro. De uma maneira geral, os trabalhos abrangem pesquisas relacionadas à previsão do comportamento mecânico de novos materiais e sua integridade estrutural, de estruturas sujeitas a vibrações, estudos de projetos e simulações numéricas empregadas nas indústrias automobilística e mineradora, estudo de protótipos com vistas à reabilitação de mãos, entre outros. Dentro desse contexto, procurou-se um título que refletisse o que se apresenta aqui e, por se tratar de uma área ampla como a área de Engenharias, optou-se pelo título “Tecnologias em Pesquisa: Engenharias”.

Por outro lado, com o intuito de fornecer um entendimento dos artigos aqui apresentados, as contribuições foram divididas em três sessões, a saber: I- Modelagem Numérica e suas Aplicações nas Engenharias, II- Gestão de Projetos e seus Impactos em Indústrias e Cidades, III- Comportamento Mecânico de Materiais e Estruturas.

A primeira sessão aborda o emprego de métodos numéricos e simulações de problemas da Engenharia. Essa sessão inicia com o Capítulo 1 intitulado “Krigagem Ordinária Aplicada à Estimativa de um Inventário Mineral de Calcário”, onde os autores utilizam técnicas geoestatísticas para estimar quantidades de minérios. Já o Capítulo 2 apresenta um estudo sobre a aplicação de conceitos de Estabilidade para resolver problemas de empacotamento de contêineres. Ainda na sessão I, o Capítulo 3 trata das incertezas oriundas da imprecisão de projetos

de sistemas mecânicos, apresentando uma proposta de simulação para contornar o problema. O Capítulo 4 apresenta, por sua vez, um algoritmo para solucionar da maneira mais eficiente possível o problema de empacotamento de contêineres buscando rapidez na logística para o transporte. Por outro lado, o Capítulo 5 trata do problema anterior, porém foca no caso tridimensional, onde outras variáveis se faz presente. O Capítulo 6 aborda a resolução do problema integrado de localização de instalações e roteamento de veículos capacitado, utilizando algoritmos artificiais buscando minimizar o custo das operações de logística. Por outro lado, o Capítulo 7 apresenta uma aplicação de um modelo regressão para a obtenção de medidas de mão para a confecção de próteses através de impressora 3D. O Capítulo 8 está voltado para a verificação formal de sistemas digitais embarcados, onde segundo os autores, uma metodologia prática é proposta. Por fim, o Capítulo 9 apresenta um método alternativo para verificar quantitativamente a degradação ambiental de uma área provocada por atividades de mineração.

A segunda sessão trata de problemas relacionados à gestão de projetos, sua qualidade e seus impactos na produtividade de indústrias automobilísticas e mineradoras, atividades importantes na região de Catalão. Ou por outro lado, os impactos de projetos de Engenharia em áreas urbanas. A sessão é iniciada com o Capítulo 10, onde os autores aplicam conceitos de Engenharia de Produção em indústrias. O mesmo ocorre no Capítulo 11, porém as ferramentas utilizadas são diferentes do capítulo anterior, assim como o objeto de estudo. Já o Capítulo 12 trata da avaliação do desempenho fabril em termos de tempo entre falhas, observando as características críticas de paradas de modo a minimizar o impacto na produtividade da indústria. No Capítulo 13, os autores trabalham com a representação de todo o sistema produtivo de maneira fácil de modo a ser possível aplicar uma modelagem computacional do sistema. O Capítulo 14 trata da avaliação o desempenho de processos garantindo a qualidade para tanto faz uma análise de processos multivariados. Os Capítulos 15, 16 e 17 apresentam modelagens conceituais e computacionais de problemas de Engenharia de Produção em indústrias automobilísticas. O Capítulo 18 apresenta a resolução de problemas de programação da produção utilizando uma ferramenta computacional. Por fim, o Capítulo 19 traz um estudo interessante sobre os impactos de implantação de um projeto de via férrea na zona urbana de Catalão, evidenciando os problemas encontrados e as possíveis soluções para minimizar tais impactos.

A terceira e última sessão apresenta estudos sobre modelagem computacional de estruturas e de materiais, novos ou já existentes na área de Engenharia. Tais estudos visam prever o comportamento desses materiais e estruturas de modo a estimar o nível de segurança de utilização. O Capítulo 20, primeiro capítulo da sessão, apresenta a proposta de critérios de plastificação de materiais porosos utilizando uma formulação matemática de interesse atual do meio de pesquisa na

área de Mecânica Computacional. Já os Capítulos 21 e 22 apresentam a aplicação de técnicas numéricas de otimização aplicadas a vigas de concreto armado sob flexão e a um sistema dinâmico com absorvedor linear, respectivamente. O Capítulo 23, por sua vez, apresenta um estudo paramétrico de emprego de um modelo de dano para a simulação do comportamento de vigas de concreto com fibras. No Capítulo 24, os autores estudam a integridade estrutural utilizando técnicas de otimização de modo a realizar o monitoramento de estruturas de maneira mais eficiente. Já no Capítulo 25, os autores apresentam um modelo para um dispositivo para reabilitação dos dedos da mão gerando uma estrutura que possibilita realizar movimentos de flexão/extensão, respeitando os limites de cada articulação. No Capítulo 26 os autores empregam técnicas de otimização com o objetivo de minimizar problemas decorrentes da vibração em estruturas para ferrovias. Finalizando a sessão, o Capítulo 27 apresenta um estudo numérico para verificar a possibilidade de substituição de parte da armadura de vigas de concreto armado por fibras metálicas.

Espera-se que o presente livro sirva de base para alguns pesquisadores da área de Engenharias nos temas abordados aqui e, ao mesmo tempo, ajude-os no aprofundamento do conhecimento para a formação de novos pesquisadores e realização de novas pesquisas e produções na área.

É oportuno neste momento, agradecer às agências de fomento CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e FAPEG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás), as quais através de apoio financeiro via chamadas de financiamento Edital 03/2016 PAEP/CAPES, processo 88881.121761/2016-01 e CHAMADA PÚBLICA Nº 02/2016 – SELEÇÃO PÚBLICA DE PROPOSTAS PARA APOIO À REALIZAÇÃO DE EVENTOS CIENTÍFICOS, TECNOLÓGICOS E DE INOVAÇÃO DE ABRANGÊNCIA NACIONAL OU INTERNACIONAL, NO ESTADO DE GOIÁS, processo/FAPEG – 201610267000918, permitiram a elaboração deste livro.

Por fim, esclarecemos que as ideias expressas nos capítulos aqui publicados são de inteira responsabilidade dos autores e autoras, assim como o uso culto da Língua Portuguesa, bem como cumprimento das normas técnicas – ABNT.

José Júlio de Cerqueira Pituba
Marcelo Henrique Stoppa
Catalão, 11 de novembro de 2016

Conteúdo

Apresentação.....	5
-------------------	---

Parte 1

Modelagem numérica e suas aplicações nas engenharias

1. Krigagem ordinária aplicada à estimativa de um inventário mineral de calcário	15
--	----

Paulo Elias Carneiro Pereira, Marcos Napoleão Rabelo, Isabela Oliveira, Jorge Henrique Queiroz de Assunção

2. Estabilidade horizontal de carga no problema de carregamento de um único contêiner	31
---	----

Liliane de Azevedo Oliveira, Vinícius da Silva Loti, Thiago Alves de Queiroz

3. Projeto ótimo robusto de um sistema de dois graus de liberdade utilizando polinômio do caos	45
--	----

Layane Rodrigues de Souza Queiroz, Romes Antonio Borges

4. Modelo para resolver o problema de roteamento com restrições de empacotamento.....	61
---	----

Lorrany Cristina da Silva, Liliane de Azevedo Oliveira, Thiago Alves de Queiroz

5. Modelo de programação por restrições para o problema de empacotamento ortogonal tridimensional.....	75
--	----

Oliviana Xavier do Nascimento, Liliane de Azevedo Oliveira, Thiago Alves de Queiroz

6. Heurística baseada na vida de algas com aplicação no problema de localização e roteamento 87
Kamyla Maria Ferreira, Thiago Alves de Queiroz
7. Aplicação de modelo de regressão na antropometria da mão 107
Bruno Alves Maia, Bruno Rodrigues de Oliveira, Guilherme Ferreira Neto, Marcelo Henrique Stoppa
8. Verificação formal de sistemas digitais embarcados 121
Nayara de Souza Silva, Vaston Gonçalves da Costa, Marcelo Henrique Stoppa
9. Avaliação da degradação ambiental em áreas mineradas: um método quantitativo alternativo 135
Jainer Diogo Vieira Matos, Antonio Nilson Zamunér Filho, Marília Gabriela Alencar de Moraes

Parte 2 Gestão de projetos

10. A utilização do conceito PMI na gestão de um projeto de sistema de coletores de dados em uma siderúrgica 153
Igor Carneiro Nicolau, Larissa Juliana Patrocínio, César Augustus Adorno Ferreira Lima, Hélio Yochihiro Fuchigami
11. Aplicação do problema de open shop em uma linha de inspeção automotiva 169
Ludimila Aparecida Louzada, Pedro Henrique Pedrosa de Melo, Ruvier Rodrigues Pereira
12. Aplicação das fases definir e medir da metodologia DMAIC: uma avaliação de manutenção corretiva 185
Josana Barcelar Batista Andrade, Thiago Rodrigues Andrade, Rogério Santana Peruchi
13. Modelagem conceitual IDEF-SIM do base stock control system aplicado em uma empresa automobilística 201
Sara Aparecida da Silva Vaz, Stella Jacyszyn Bachega
14. Análise de processos multivariados: aplicada aos índices de desempenho 215
Débora Alves Coelho, Maíza Biazon de Oliveira, Rogério Santana Peruchi

15. Modelagem conceitual do sistema de emissão de ordens polca com uso da técnica IDEF-SIM 231
Daniel Ribeiro Gomes, Natália Cibele de Sousa Santos, Stella Jacyszyn Bachega
16. Simulação computacional do sistema de emissão de ordens CONWIP aplicada em uma empresa automobilística 247
Amanda Cristie Nobre, Stella Jacyszyn Bachega
17. Modelo conceitual do sistema de emissão de ordens GKCS com uso da técnica IDEF-SIM 261
Jarbas Ancelmo da Silva Júnior, Stella Jacyszyn Bachega
18. Utilizando o solver para resolver problemas de programação da produção com o método de programação inteira 273
Gislene da Silva Fonseca, Nayara Macedo Vinhal, José dos Reis Vieira de Moura Junior
19. Impactos de ferrovias em áreas urbanas: estudo de caso em Catalão – GO 283
Natália Cristina de Araújo, Thaynara Silva Rabelo, Marília Gabriela Alencar de Moraes

Parte 3

Comportamento mecânico de materiais e estruturas

20. Proposta de superfícies de plastificação para materiais dúcteis porosos dentro de uma abordagem multi-escala..... 301
Wanderson Ferreira dos Santos, José Julio de Cerqueira Pituba
21. Otimização estrutural de vigas de concreto armado submetidas à flexão simples 317
Christiano Michel Fernandes Freitas, Pedro Henrique Pedrosa de Melo, Ruvier Rodrigues Pereira
22. Otimização por colônia de formigas aplicada ao sistema dinâmico com absorvedor linear 333
Daniela de Oliveira Albanex, Sémebber Silva Lino, Sérgio F. da Silva
23. Análise paramétrica de vigas de concreto com fibras metálicas . 349
Wanderlei Malaquias Pereira Junior, José Júlio de Cerqueira Pituba

24. Otimização da faixa de frequência no estudo da integridade de estruturas utilizando os métodos de busca aleatória e colônia de formigas 365
João Paulo Moreira Bento, Bruno Pereira Barella, Romes Antônio Borges, José dos Reis Vieira de Moura Júnior
25. Modelo de dispositivo para reabilitação de dedos da mão..... 379
Bruno Rodrigues de Oliveira, Bruno Alves Maia, Guilherme Ferreira Neto, Marcelo Henrique Stoppa
26. Otimização de um modelo de via férrea com vistas à minimização de vibrações 395
Gabriel Gomes Silva, Romes Antônio Borges
27. Considerações sobre a substituição da armadura por fibras metálicas em vigas de concreto 409
Wanderlei Malaquias Pereira Junior, José Júlio de Cerqueira Pituba

Parte 1
Modelagem numérica e suas
aplicações nas engenharias

Krigagem ordinária aplicada à estimativa de um inventário mineral de calcário

Paulo Elias Carneiro Pereira¹

Marcos Napoleão Rabelo²

Isabela Oliveira³

Jorge Henrique Queiroz
de Assunção⁴

Resumo: Os estudos econômicos que culminarão na tomada de decisão sobre a implantação ou não do empreendimento mineiro são baseados em um modelo, denominado inventário mineral, o qual é obtido a partir de informações amostrais, interpoladas para os locais não amostrados através de técnicas de estimativa. As técnicas geoestatísticas vem sendo utilizadas como uma abordagem mais precisa em relação às técnicas tradicionais por considerar e quantificar a continuidade dos teores, além de fornecer os erros de estimação (variância de krigagem). Neste trabalho foi utilizada a Krigagem Ordinária (KO) para a estimativa de um depósito mineral de calcário no município de Indiara, estado de Goiás. A análise do modelo obtido evidenciou uma boa caracterização do minério (calcários). Já os materiais classificados como estéril não foram adequadamente caracterizados. Os resultados mostraram também uma grande parcela de Recursos Inferidos (baixo nível de confiança geológica), evidenciando, portanto, necessidade de amostragem adicional.

Palavras-chave: Calcário. Inventário Mineral. Krigagem Ordinária.

-
- 1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: paulo_elias_carneiro@ufg.br.
 - 2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização. Contato: rabelo@dmate.ufpe.br.
 - 3 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: isabela_ufg@hotmail.com.
 - 4 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: jorge_hqa@hotmail.com.

Introdução

Um empreendimento mineiro tem início com a fase de Exploração Mineral, a qual compreende um conjunto de atividades com o intuito de primeiramente localizar um depósito mineral (descoberta) e subsequentemente avaliá-lo quanto à viabilidade de sua extração (MARJORIBANKS, 2010). O estudo de viabilidade econômica de um empreendimento mineiro é baseado em um inventário mineral de teores (recurso mineral), o qual contém estimativas da quantidade (tonelagem) e da qualidade (teores dos elementos/minerais) do material a ser eventualmente extraído (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004).

A problemática geral na elaboração de inventários minerais é, a partir de um conjunto limitado de informações (amostras) e do conhecimento geológico da área, obter valores de uma ou mais variáveis geológicas (teores) nos locais não amostrados, processo conhecido como inferência espacial. Tal estimativa/interpolação é sempre necessária, visto que a amostragem não é realizada em pontos muito próximos entre si, essencialmente devido a fatores de ordem econômica (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

O processo de estimativa de inventários minerais envolve a definição de controles da mineralização, análises estatísticas e/ou geoestatísticas da base de dados, e aplicação de uma técnica de interpolação de teores adequada (GLACKEN; SNOWDEN, 2001). O objetivo final é obter um modelo contendo teores e toneladas de materiais que podem eventualmente ser lavrados (ROSSI; DEUTSCH, 2014).

As técnicas para estimativa de recursos minerais variam desde técnicas puramente determinísticas, ditas tradicionais, às técnicas geoestatísticas. As técnicas tradicionais, tais como método dos polígonos de influência, vizinho mais próximo e inverso da potência das distâncias, utilizam conceitos de área de influência ao redor dos furos de sondagem (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004). Entretanto, em tais métodos, o estabelecimento da área de influência se baseia em análises puramente subjetivas. Portanto, o problema reside na forma de se determinar o alcance amostral efetivo da área de influência, ou seja, quantificar até que ponto o teor de uma amostra influencia os demais teores (HUSTRULID et al., 2013).

De acordo com Sinclair e Blackwell (2004), a aplicação de procedimentos geoestatísticos para a estimativa de inventários minerais minimiza os problemas relativos aos métodos tradicionais, principalmente quanto à subjetividade na determinação da área de influência das amostras, que é, neste caso, estabelecida quantitativamente por meio da função variograma.

O variograma é uma função dada por uma curva, a qual representa o grau de similaridade entre teores separados por variadas distâncias. Tal curva geralmente é crescente com o aumento da distância que separa pares de amostras,

de tal forma que quanto mais distantes as amostras entre si, maior a diferença entre seus teores (MATHERON, 1963). Os variogramas fornecem informações quantitativas sobre a distribuição espacial de teores, as quais são utilizadas para a estimativa nos locais não amostrados por meio da Krigagem.

O problema geral a ser resolvido na Krigagem é fornecer a melhor estimativa de um ponto ou bloco de valor (teor) desconhecido a partir de um conjunto restrito de amostras, onde tal estimativa é feita por meio de uma combinação linear de amostras vizinhas, cujos pesos são estabelecidos por meio de informações obtidas com os variogramas (SINCLAIR; BLACKWELL, 2004). O procedimento de estimativa por Krigagem resulta em um modelo geológico de blocos contendo, em cada bloco, o teor estimado da(s) variável(is) geológica(s) em estudo. O modelo geológico constituído de teores e tonelagens é denominado *inventário mineral*.

Este trabalho é referente à etapa de estabelecimento do inventário mineral de um depósito de calcário, ou seja, estimativa de teores e tonelagens, realizada por ocasião do projeto de pesquisa intitulado “Estimativa de recursos minerais e otimização de cava aplicados a um estudo de caso de uma mina de calcário”, vinculado ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização da Universidade Federal de Goiás, Regional Catalão. O objetivo central do projeto é determinar a cava matemática ótima para o empreendimento mineiro em estudo a partir de um modelo geológico e de teores baseado em uma abordagem geoestatística. Portanto, seguindo-se esta abordagem (geoestatística), este trabalho utiliza o procedimento de Krigagem Ordinária para o estabelecimento do inventário mineral de um depósito de calcário, e avalia a aderência de tal estimativa em relação aos dados amostrais, realizada a partir de três procedimentos comparativos: (i) teor estimado do bloco em relação ao teor médio ponderado das amostras contidas no bloco; (ii) estatísticas dos teores estimados em relação às respectivas estatísticas amostrais, e; (iii) quantis dos teores estimados em relação aos quantis dos teores amostrais (gráfico Q-Q).

1 Contexto do Trabalho

Os procedimentos realizados neste trabalho objetivam estabelecer os teores e tonelagens (inventário mineral) de um depósito de calcário situado a aproximadamente 15 km do centro urbano do município de Indiara, Goiás, nas margens da BR-060.

O estudo (projeto de pesquisa) teve início com a modelagem da estrutura física dos corpos geológicos em subsolo por meio de uma abordagem geoestatística (Krigagem Indicadora). Tal técnica determinou a probabilidade de cada domínio (tipo de rocha) prevalecer em cada local do depósito, obtendo-se um

modelo de blocos dotado, em cada bloco, do código do domínio de maior probabilidade de ocorrência. Tal modelo, representando o formato dos corpos geológicos em subsolo, foi utilizado neste trabalho para a determinação do inventário mineral, ou seja, modelo geológico de teores e tonelagens, do depósito mineral em estudo.

O modelo geológico de teores e tonelagens, baseado em técnicas geoestatísticas (Krigagem), será utilizado em etapas futuras do projeto de pesquisa para a elaboração da cava matemática ótima para o empreendimento, que maximize o Valor Presente Líquido (VPL) da extração.

2 Metodologia

As informações amostrais utilizadas consistem em 455 amostras, obtidas de 15 furos de sondagem rotativa e 13 trincheiras/canaletas, com comprimento amostral predominante de 5 metros, coincidente com a metade da altura média das bancadas na geometria atual da mina. As informações analíticas disponíveis são derivadas de análises químicas por fluorescência de raios X dos óxidos CaO e MgO. Além de tais informações químicas, foi também disponibilizada pela empresa detentora da área a descrição geológica das amostras retiradas nos furos de sondagem rotativa.

A classificação das unidades litológicas (domínios geológicos), neste caso, é baseada fundamentalmente nos teores de CaO e MgO (Tabela 1.1), de tal forma que tais domínios são classificados em Calcário Calcítico (CLC), Calcário Magnesiano (MAG), Calcário Dolomítico (DOL), Calcário Impuro (CLI) e Vulcânicas ou Metavulcânicas (VMV), sendo o penúltimo referente ao calcário com intercalações de rochas não carbonáticas e o último, às rochas não carbonáticas.

O modelo geológico de blocos utilizado, com blocos de 10 m x 10 m x 5 m, foi resultante de uma modelagem geoestatística por Krigagem Indicadora, onde se estimou a probabilidade de ocorrência de cada domínio geológico, em cada local do depósito. Tal modelo de blocos, consistindo de uma representação física dos formatos dos corpos geológicos em subsolo, foi a base para a estimativa dos teores dos óxidos CaO e MgO em cada domínio.

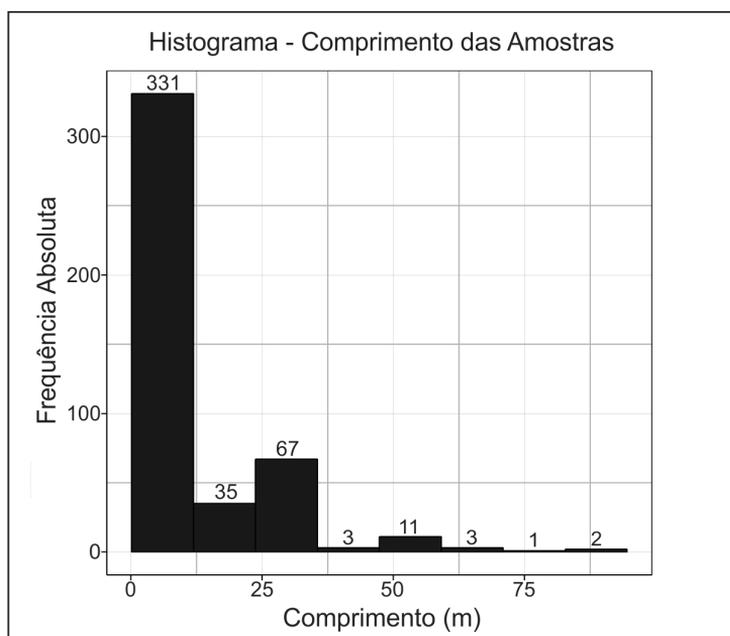
Os procedimentos realizados consistiram primeiramente em uma análise estatística dos óxidos CaO e MgO em cada unidade/domínio para se ter conhecimento sobre a distribuição estatística de cada um, e ainda verificar a presença ou não de *outliers* (valores errantes, muito altos ou baixos). Esta última análise identificou dois *outliers*, ambos na unidade DOL, os quais foram retirados. Portanto, as etapas subsequentes foram realizadas a partir de 453 amostras.

Tabela 1.1 Critérios de classificação das unidades litológicas/categorias

Domínio/Categoria	Critérios Químicos
CLC	Impureza < 25%; CaO + MgO > 38% e MgO < 5%
MAG	Impureza < 25%; CaO + MgO > 38%; MgO ≥ 5% e MgO ≤ 12%
DOL	Impureza < 25%; CaO + MgO > 38% e MgO > 12%
CLI	Impureza ≥ 25% e ≤ 50%
VMV	Impureza > 50%

Fonte: Autoria própria (2016)

O suporte da amostragem, ou seja, tamanho das amostras, mostrou variações significativas (Figura 1.1). Portanto, foi feita uma padronização do suporte amostral (comprimento das amostras), procedimento conhecido como compositagem, onde todas as amostras foram padronizadas ao tamanho de um metro (1 m). O objetivo de tal procedimento (compositagem) foi regularizar os comprimentos amostrais a um valor constante para se evitar acentuação dos erros de estimativa, já que os procedimentos de estimação consideram o suporte dos dados constante.

**Figura 1.1** Histograma do comprimento das amostras mostrando das frequências absolutas

Fonte: Autoria própria (2016)

A Tabela 1.2 e a Tabela 1.3 mostram uma comparação entre as principais estatísticas dos dados originais e dos dados regularizados para os óxidos CaO e MgO, respectivamente. Observa-se que não houve alterações significativas na média amostral após a compositagem das amostras. As maiores alterações se deram nas unidades CLI e VMV para a variável CaO e na unidade CLI para a variável MgO. Tais unidades representam apenas uma pequena fração do total amostrado, onde os domínios CLI e VMV equivalem a 10,15% e 11,48% do total amostrado, respectivamente. Além disso, a variação dos teores, representada pelo desvio padrão, não foi alterada substancialmente.

Tabela 1.2 Comparativo entre dados originais e regularizados em relação à média e ao desvio padrão para a variável CaO

Domínio	Média (%)		Desvio Padrão (%)	
	Original	Compositagem	Original	Compositagem
CLC	45,24	45,42	2,89	2,69
CLI	33,64	31,10	5,54	7,10
MAG	37,97	38,68	4,47	3,48
DOL	30,49	30,75	2,55	2,48
VMV	16,82	17,62	8,68	7,71

Fonte: Autoria própria (2016)

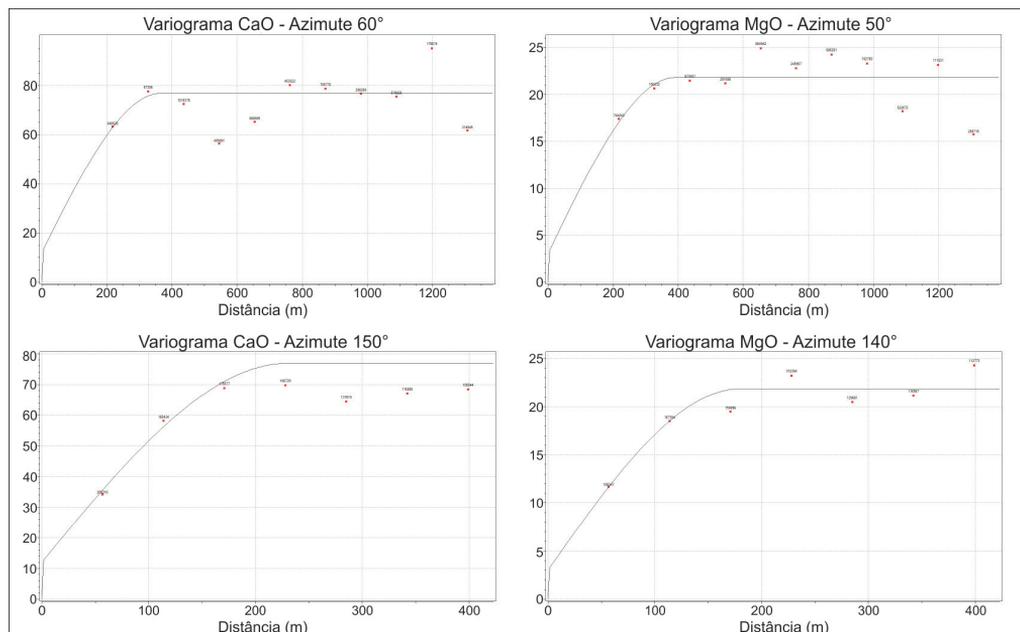
Tabela 1.3 Comparativo entre dados originais e regularizados em relação à média e ao desvio padrão para a variável MgO

Domínio	Média Amostral (%)		Desvio Padrão (%)	
	Original	Compositagem	Original	Compositagem
CLC	1,59	1,71	1,37	1,30
CLI	3,18	4,62	3,98	3,74
MAG	8,23	8,16	2,17	1,98
DOL	14,04	14,12	1,48	1,73
VMV	1,12	1,84	0,89	1,33

Fonte: Autoria própria (2016)

O procedimento convencional na elaboração dos variogramas é calculá-los para cada variável (CaO e MgO) e para cada domínio geológico de forma separada. Em casos de similaridade estatística e/ou de gênese entre domínios geológicos é possível agrupá-los em um domínio de estimativa e tratá-los então como um único domínio. Portanto, devido à similaridade na formação geológica (gênese) dos domínios CLC, MAG e DOL, tais unidades foram agrupadas em uma só, denominada “Calcários” (CALC). Os demais (CLI e VMV) foram tratados de forma separada. Entretanto, não foram calculados variogramas de cada variável e para cada domínio de forma separada por duas razões: (i) indisponibilidade de amostras, particularmente das unidades CLI e VMV, para cálculo dos variogramas, e; (ii) baixa contribuição dos domínios CLI e VMV no total amostrado, já que representam 10,15% e 11,48% do total de amostras, respectivamente.

Os variogramas foram então calculados a partir do total de amostras, onde, para cada óxido, foram calculados três variogramas perpendiculares entre si, dois no plano horizontal e um no plano vertical (inclinação = 90°). Todos os ajustes variográficos foram feitos por uma única estrutura esférica (Figura 1.2).



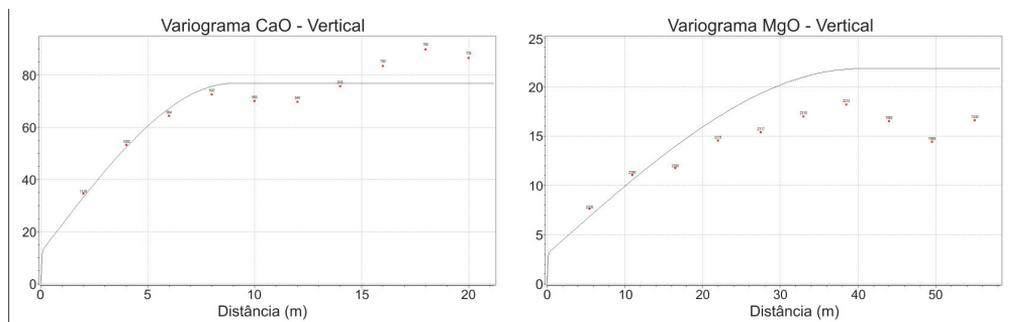


Figura 1.2 Variogramas experimentais (pontos) e ajuste teórico (linha contínua) das variáveis CaO (coluna esquerda) e MgO (coluna direita)

Fonte: Autoria própria (2016)

As estimativas dos domínios foram realizadas de forma separada, cada um a partir somente das suas respectivas amostras, uma vez que os domínios dos calcários (CALC), do “calcário impuro” (CLI) e das rochas não carbonáticas (VMV) se tratam de domínios de estimativa distintos. Portanto, embora os variogramas tenham sido calculados a partir do total de amostras, as estimativas foram realizadas de forma separada, a partir dos parâmetros variográficos obtidos.

A classificação dos recursos minerais foi feita a partir do volume de busca utilizado. Desta forma, foram gerados três volumes de busca: um com eixos correspondentes de 2/3 do respectivo alcance variográfico, atribuído ao Recurso Medido; um com eixos correspondentes aos respectivos alcances totais, atribuído ao Recurso Indicado; e outro com eixos maiores que os respectivos alcances variográficos, atribuído ao Recurso Inferido.

3 Resultados e Discussão

A quantificação do inventário mineral quanto aos teores e tonelagens em cada domínio geológico (Tabela 1.4) mostrou que aproximadamente 70,37% dos recursos minerais seriam atribuídos ao Calcário Calcítico, o que condiz de forma aproximada com a amostragem, onde 51% do total amostrado é atribuído a este domínio. A tonelagem total efetivamente classificada quanto ao domínio geológico foi de 234.613.829,19 toneladas, com teores médios de CaO e MgO de 40,38% e 3,97%, respectivamente. Tais resultados evidenciam que o calcário predominante no depósito mineral é, de fato, o Calcítico.

A avaliação quanto às categorias de recursos minerais (Tabela 1.5) evidenciou que 42,60% do total dos recursos são da categoria Inferido, referente à categoria com o menor grau de confiança geológica. As demais categorias exibiram proporções similares. A categoria de maior confiança (Recurso Medido)

correspondeu à 30,12% do total, e a de confiança intermediária (Recurso Indicado), a 27,28%. A quantidade de material classificado como Recurso Inferido seria reduzida com um aporte maior de informações amostrais, já que, de fato, haveria uma melhoria no estabelecimento das continuidades geológica e de teores.

Tabela 1.4 Quantificação das tonelagens e teores médios do inventário mineral quanto aos domínios geológicos

Domínios	Massa (t)	CaO (%)	MgO (%)
CLC	165.096.536,92	43,22	3,20
MAG	24.259.839,77	38,76	7,42
DOL	18.080.618,43	35,93	8,58
CLI	12.830.541,99	32,53	3,52
VMV	14.597.871,34	20,85	1,34
Total	234.613.829,19	40,38	3,97

Fonte: A autoria própria (2016)

Tabela 1.5 Quantificação das tonelagens e teores médios do inventário mineral quanto às categorias de recursos minerais

Recurso	Massa (t)	CaO (%)	MgO (%)
Medido	71.495.516,82	41,13	4,08
Indicado	64.743.475,30	41,10	4,13
Inferido	101.118.872,17	41,51	4,07
Total	237.357.864,29	41,31	4,09

Fonte: A autoria própria (2016)

A análise comparativa visual entre os teores estimados e amostrais indicou uma proximidade substancial entre o modelo estimado e a situação real. Na Figura 1.3 pode-se observar que o teor estimado de CaO (valor em azul) é 3,48% maior que o teor médio ponderado das amostras dentro do bloco (valores em vermelho). Tal diferença se deve ao fato de que outras amostras, tanto acima quanto abaixo do bloco, colaboraram com a estimativa do mesmo.

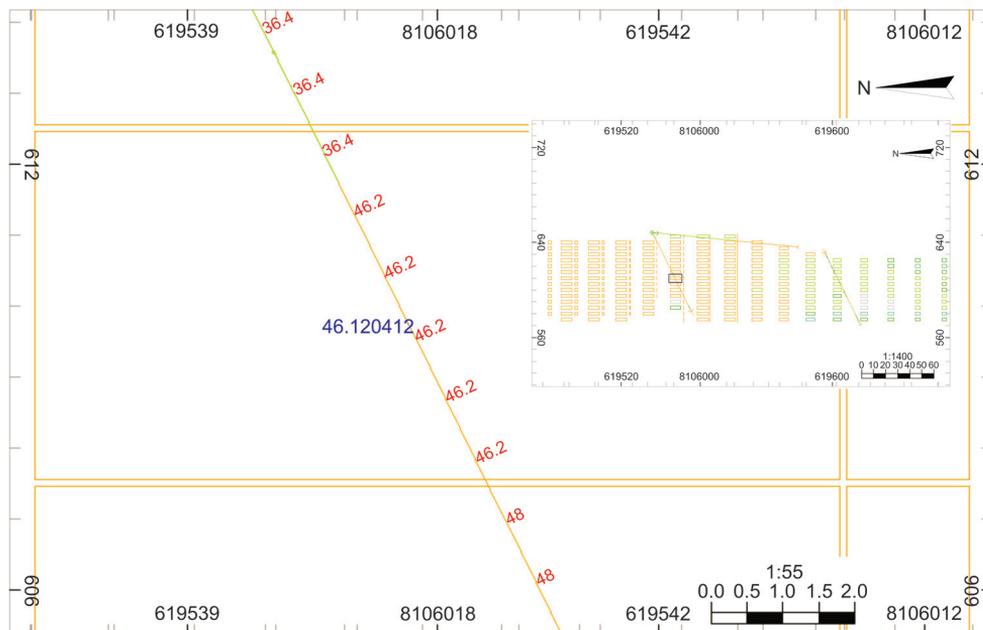


Figura 1.3 Exemplo de uma seção transversal do modelo geológico estimado mostrando um bloco e amostras passantes (furo de sondagem)

Fonte: Autoria própria (2016)

A comparação entre as estatísticas (média e variância) dos teores amostrais e as do modelo de teores mostraram desvios significativos. Quanto à variável CaO (Tabela 1.6), o maior desvio da média foi na unidade VMV, com um aumento de 18,35%, seguido pelo domínio DOL, com um aumento de 16,83%, ambos em relação aos dados amostrais. Quanto à variância, houve um aumento geral em relação aos dados amostrais, exceto no domínio CLI. Comparando-se estatísticas de teores amostrais e estimados para a variável MgO (Tabela 1.7), nota-se que há diferenças substanciais entre os teores médios estimados e reais. Tal diferença chega a um aumento de 87,13% em relação ao teor médio amostral na unidade CLC. Já as demais unidades mostraram uma diminuição em relação ao teor médio amostral. Quanto à variância, houve um aumento em relação à estatística amostral, exceto nos domínios CLI e VMV.

Comparando-se os resultados (média e variância) do modelo de cada domínio geológico com os respectivos limites inferior e superior obtidos por testes de hipóteses ao nível de confiança de 95%, nos quais se considerou os dados amostrais como sendo a população (parâmetros μ e σ^2), nota-se que, no caso da variável CaO, 50% dos indicadores estatísticos não estão em conformidade com os limites estabelecidos pelo teste de hipóteses, e no caso do MgO, este valor é de

80%, evidenciando não conformidade com os dados amostrais. Entretanto, 60% de tais valores não conformes se encontram muito próximos dos limites inferior ou superior.

As diferenças estatísticas, tanto em relação à variável CaO quanto à variável MgO, podem ser devido, em parte, à presença de blocos de um domínio na estimativa de um outro domínio nos limites dos contatos geológicos, consequência do corte do modelo de blocos por um sólido triangulado (*wireframe*), onde o bloco de um domínio, por possuir o seu centroide fora do sólido do respectivo domínio, é excluído deste e atribuído ao domínio vizinho.

Tabela 1.6 Comparativo entre estatísticas amostrais e do modelo para a variável CaO

Domínio	Parâmetros	Amostras	Modelo	Limite Inferior	Limite Superior
CLC	Média (%)	45,42	43,21	44,87	45,62
	Variância (% ²)	7,24	18,16	7,00	10,10
MAG	Média (%)	38,68	38,76	36,96	38,99
	Variância (% ²)	12,10	15,37	14,86	28,18
DOL	Média (%)	30,75	35,93	29,74	31,24
	Variância (% ²)	6,16	32,55	4,49	10,25
CLI	Média (%)	31,10	32,53	32,00	35,29
	Variância (% ²)	50,38	32,71	21,00	48,64
VMV	Média (%)	17,62	20,86	14,41	19,24
	Variância (% ²)	59,49	102,30	52,91	115,85

Fonte: Autoria própria (2016)

Os desvios também podem ser consequência dos parâmetros de estimativa utilizados, especificadamente números mínimo e máximo de amostras, totais e por octante. Neste caso, como o domínio dos calcários (CALC) contém três tipos de calcário, inevitavelmente ocorrem interferências de um tipo de calcário na estimativa de outro, e vice-versa. Tais interferências podem ser reduzidas adotando-se parâmetros que priorizem estimativas mais localizadas, ou seja, realizadas somente com as amostras mais próximas ao bloco a ser estimado, e/ou desmembrando o domínio dos calcários em três domínios isolados, cada um associado a um tipo de calcário.

Tabela 1.7 Comparativo entre estatísticas amostrais e do modelo para a variável MgO

Domínio	Parâmetros	Amostras	Modelo	Limite Inferior	Limite Superior
CLC	Média (%)	1,71	3,20	1,42	1,77
	Variância (% ²)	1,69	7,08	1,57	2,26
MAG	Média (%)	8,16	7,42	7,74	8,72
	Variância (% ²)	3,90	6,74	3,50	6,65
DOL	Média (%)	14,12	8,57	13,60	14,47
	Variância (% ²)	3,01	13,40	1,50	3,43
CLI	Média (%)	4,62	3,52	2,00	4,36
	Variância (% ²)	13,95	8,64	10,91	25,17
VMV	Média (%)	1,84	1,34	0,87	1,37
	Variância (% ²)	1,78	1,64	0,56	1,22

Fonte: Autoria própria (2016)

O gráfico Q-Q (*Q-Q Plot*) da variável CaO entre dados estimados e amostrais (Figura 1.4-A) torna exposto que somente há correspondência entre modelo e realidade em teores de CaO acima de 40% aproximadamente. Conforme a diminuição do teor, há um distanciamento substancial do modelo em relação à realidade. Já em teores elevados, acima de 40%, há boa compatibilidade entre teores reais e estimados, a qual se torna maior com o aumento do teor. A baixa precisão das estimativas em faixas de teores baixos está atribuída à pequena parcela de amostras dos respectivos domínios em relação ao total amostrado, particularmente nos domínios CLI e VMV, os quais representam 10,15% e 11,48% do total de amostras, respectivamente.

O fato de haver uma baixa precisão da estimativa em teores baixos de CaO, particularmente nos domínios CLI e VMV, não impacta na análise econômica futura, já que se tratam de domínios de material estéril (não aproveitável), de tal forma que uma alta precisão nestes domínios não se faz essencial. Do contrário, os calcários necessitam de uma estimativa precisa por se tratarem de minério. De acordo com a Figura 1.4-A, os domínios dos calcários se encontram razoavelmente bem caracterizados, principalmente o domínio do Calcário Calcítico, ao qual estão atribuídos os teores mais elevados de CaO.

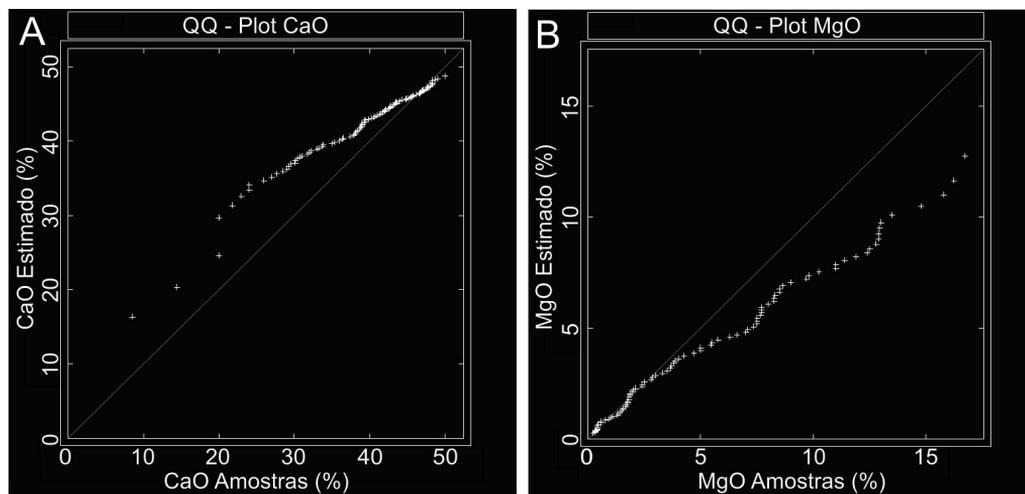


Figura 1.4 Gráficos Q-Q das variáveis CaO (A) e MgO (B)

Fonte: A autoria própria (2016)

A análise do Gráfico Q-Q da variável MgO (Figura 1.4-B) mostrou uma boa compatibilidade entre os teores de MgO reais e estimados até teores na faixa de 4% aproximadamente, dentro da faixa de teores de MgO do Calcário Calcítico (MgO máximo de 5%), com uma deterioração progressiva da similaridade dos quantis com o aumento do teor. Tal fato está vinculado à mesma causa da imprecisão em faixas de teores baixos observada no Gráfico Q-Q da variável CaO (Figura 1.4-A).

Portanto, pelos gráficos Q-Q, observa-se que o domínio do Calcário Calcítico se encontra bem definido no modelo geológico estimado, principalmente devido à grande quantidade de amostras desta unidade em relação ao total. Já as demais unidades, particularmente a CLI e a VMV, não estão bem caracterizadas, consequência da pequena parcela destes domínios no total amostrado.

Conclusões

A elaboração de inventários minerais é uma das principais atividades na etapa de Exploração Mineral, visto que as informações contidas no modelo estimado são a base para os estudos de viabilidade econômica do empreendimento. Uma boa caracterização das zonas mineralizadas e arredores quanto à continuidade geológica e aos teores associados pode ser obtida por meio de uma amostragem adequada e uso de técnicas de estimativa que fornecem resultados precisos.

A análise dos resultados da estimativa por Krigagem Ordinária evidenciaram que, embora o domínio do calcário calcítico esteja a princípio razoavelmente bem

caracterizado, como observado no gráfico Q-Q (Figura 1.4), os testes de hipóteses mostraram que há divergências substanciais entre o modelo e os dados amostrais, não só no calcário calcítico, mas nos demais domínios, principalmente no que tange à variável MgO, onde a média do modelo se mostrou em conformidade com os limites somente nos domínios CLI e VMV. Portanto, pretende-se, como trabalhos futuros, realizar as estimativas com outros parâmetros e/ou tratar o domínio dos calcários (CALC) como três domínios isolados com o intuito de aproximar mais o modelo aos dados amostrais. Tal procedimento poderá reduzir as interferências das amostras de um calcário em outro e vice-versa, aumentando a qualidade da estimativa. Além disso, pretende-se realizar testes de inferência com outras distribuições estatísticas com o intuito de se verificar a compatibilidade dos estimadores (média e variância).

Observa-se ainda que embora não seja essencialmente necessário um refinamento da estimativa nos domínios CLI e VMV, por se tratarem de material estéril, e portanto não aproveitáveis comercialmente, recomenda-se também a coleta de amostras adicionais, o que certamente: (i) melhorará a qualidade das estimativas; (ii) fornecerá um melhor delineamento dos contatos geológicos, e; (iii) diminuirá a quantidade de material classificado como Recurso Inferido, aumentando, portanto, as reservas de minério *in situ*.

Referências

- GLACKEN, I. M.; SNOWDEN, D. V. Mineral Resource Estimation. In: EDWARDS, A. C. (Ed.). **Mineral Resource and Ore Reserve Estimation – The AusIMM Guide to Good Practice**. Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2001. p. 189-198.
- HUSTRULID, W.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. Orebody description. In: _____. **Open Pit Mine Planning & Design**. 3. ed., vol. 1. Boca Raton: CRC Press, 2013. cap. 3, p. 186-289.
- MARJORIBANKS, R. Prospecting and the Exploration Process. In: _____. **Geological Methods in Mineral Exploration and Mining**. 2. ed. Berlin: Springer, 2010. cap. 1, p. 1-12.
- MATHERON, G. Principles of Geostatistics. **Economic Geology**, vol. 58, 1246-1266. 1963.
- ROSSI, M. E.; DEUTSCH, C. V. Definition of Estimation Domains. In: _____. **Mineral Resource Estimation**. Dordrecht: Springer, 2014. cap. 4, p. 51-65.

SINCLAIR, A. J.; BLACKWELL, G. H. Kriging. In: _____. **Applied Mineral Inventory Estimation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. cap. 10, p. 215-241.

SINCLAIR, A. J.; BLACKWELL, G. H. Mineral Inventory: An Overview. In: _____. **Applied Mineral Inventory Estimation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. cap. 1, p. 1-30.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. Conceitos Básicos. In: _____. **Geoestatística: Conceitos e Aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. cap. 1, 19-32.

Estabilidade horizontal de carga no problema de carregamento de um único contêiner

Liliane de Azevedo Oliveira¹
Vinícius da Silva Loti¹

Thiago Alves de Queiroz¹

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo sobre o Problema de Carregamento de um único Contêiner levando em consideração a restrição de estabilidade horizontal de carga. Para tratar esta restrição, busca-se determinar a força de atrito estático, a qual limita o máximo de força horizontal que pode ser aplicada em cada caixa de forma a romper a sua inércia. Uma vez que a caixa rompe a inércia, então ela começa a se movimentar contribuindo para provocar a instabilidade no empacotamento. O propósito deste trabalho é apresentar uma forma de tratar a estabilidade horizontal no Problema de Carregamento de um único Contêiner considerando as leis da estática de corpos rígidos.

Palavras-chave: Problema de Carregamento de Contêineres. Estabilidade Horizontal de Carga. Equilíbrio Estático de Corpos Rígidos.

Introdução

Este trabalho está relacionado aos problemas de logística que recaem sobre problemas de otimização combinatória. Um problema de otimização busca maximizar (ou minimizar) uma função objetivo sujeita a restrições relacionadas ao problema sendo resolvido. A resposta encontrada é um ótimo global quando é o valor de máximo (ou de mínimo) comparado ao valor de todas as outras soluções (SPADOTTO, 2008). Nos problemas de otimização combinatória, o número de

1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: lilianeazevedoliveira@hotmail.com, vini.lot@gmail.com, taq@ufg.br.

soluções geralmente é finito, porém há um número de ordem exponencial de soluções que precisam ser avaliadas (KRASNOGOR, 2002).

Entre os problemas de otimização combinatória, tem-se os Problemas de Empacotamento, em que é preciso empacotar itens (caixas, paletes, barras, etc.) em um ou mais recipientes, de forma a, por exemplo, maximizar a ocupação do espaço. Problemas de empacotamento são comuns em aplicações práticas, especialmente aquelas ligadas ao setor de logística que lida diariamente com o recebimento e despacho de mercadorias, que são organizadas dentro de recipientes (ARENALES et al., 2007). Dentre os problemas de empacotamento, tem-se os Problemas de Carregamento em Contêineres (PCC), que requerem um uso adequado do contêiner devido ao seu custo ou por exigir mais viagens para o transporte das mercadorias.

Como é comum ter restrições em problemas de empacotamento para que não haja danos aos itens transportados, este trabalho investiga, em particular, a restrição de estabilidade de carga na versão horizontal. A estabilidade vertical (também chamada de estabilidade estática) está relacionada à capacidade de as caixas paradas resistirem à atuação da aceleração da gravidade. Assim, esta restrição requer que o empacotamento resultante permaneça inerte após ser finalizado. A estabilidade horizontal (também chamada de estabilidade dinâmica) está relacionada à capacidade das caixas de resistirem à atuação da inércia pela ação de alguma força lateral.

Certamente o item que provoca o desequilíbrio no empacotamento precisa ser removido ou empacotado em outra posição. Para a garantia da estabilidade horizontal de carga, a literatura, conforme aponta Junqueira e Queiroz (2015), tem adotado comumente o uso de um fator de suporte para as faces dos itens, o qual indica a porcentagem de cada face que precisa estar suportada por algum outro item. Por outro lado, poucos trabalhos têm usado os princípios de equilíbrio de corpos materiais no empacotamento, tal que os itens precisam obedecer às condições de equilíbrio estático de corpos rígidos (HIBBELER, 2010).

Hoje é possível reconhecer quatro trabalhos que levam em consideração as condições de equilíbrio para lidar com a restrição de estabilidade vertical de carga e que, assim, propuseram uma abordagem exata para resolvê-la, diferente de usar a aproximação por fator de suporte. Por outro lado, não há qualquer trabalho que resolve a estabilidade horizontal de forma exata, ou seja, a partir das condições de equilíbrio mecânico.

O primeiro trabalho a apresentar um estudo de estabilidade vertical baseado na estática dos corpos rígidos foi feito por Silva, Soma e Maculan (2003), depois seguido de Queiroz e Miyazawa (2014) e as contribuições de Ramos, Oliveira e Lopes (2016) e Ramos et al. (2016). Em todos eles, para a garantia de que um item seja estável, torna-se necessário obedecer três condições de estabilidade: o item deve estar totalmente apoiado sobre o piso do contêiner; o item deve ter o seu centro de massa projetado diretamente sobre um item abaixo e em contato direto com ele; e,

o centro de massa do item deve estar dentro da região definida pelos limites de seus itens abaixo e em contato direto. Para tanto, as equações de equilíbrio estático de corpos rígidos devem ser atendidas, isto é, a soma de forças e momentos em cada item deve resultar em zero, para evitar uma translação ou rotação do item.

A importância de se levar em conta a estabilidade de carga é para garantir que o empacotamento não venha a se desmanchar depois de pronto e, assim, não haja danos à carga. Somada ao critério de otimização, que busca maximizar a ocupação do recipiente, tem-se a busca por um conjunto de itens que melhor ocupam o volume do recipiente ao mesmo tempo em que permaneçam em equilíbrio estático. No que tange à restrição de estabilidade, este trabalho traz a proposta de uma abordagem baseada no equilíbrio estático de corpos rígidos para tratar a estabilidade horizontal, além de apresentar como a literatura comumente vem tratando a estabilidade horizontal por meio do fator de suporte.

O presente trabalho está organizado da seguinte forma: a próxima seção traz uma descrição do problema em conjunto com uma formulação por programação linear inteira; a Seção 2 apresenta a restrição de estabilidade horizontal de carga e a abordagem considerada para tratá-la; a Seção 3 mostra, por meio de um exemplo, como a abordagem proposta pode ser aplicada na verificação da estabilidade horizontal; por fim, conclusões e direções para a continuação da pesquisa são apresentadas.

1 Descrição do Problema

O Problema de Carregamento de um único Contêiner (PCuC), como ilustra a Figura 2.1, requer um recipiente, ou contêiner, e um conjunto de caixas, do qual se deve alocar um subconjunto dentro do contêiner sem que haja sobreposição e seja respeitada as dimensões do contêiner.

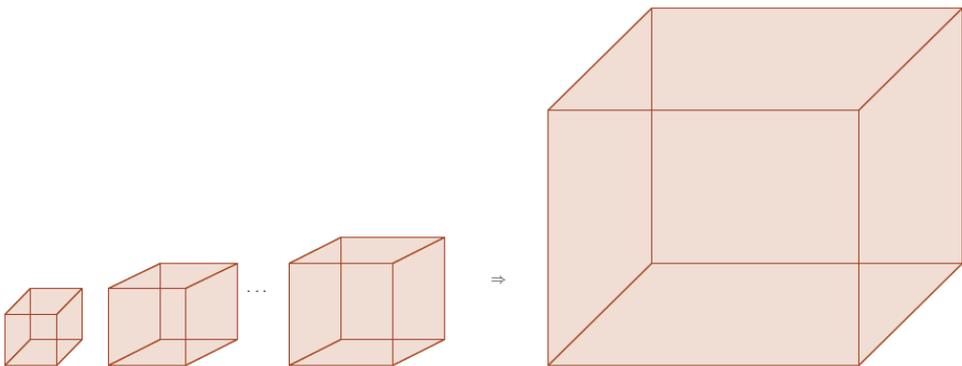


Figura 2.1 Problema de Carregamento de um único Contêiner.

Assim, o objetivo no PCuC é encontrar a melhor disposição das caixas de maneira a maximizar o volume interno ocupado do contêiner. Ao considerar a estabilidade de carga, busca-se também que a carga chegue ao seu destino final sem danos (JUNQUEIRA; MORABITO; YAMASHITA, 2012; BORTFELDT; HOMBERGER, 2013). De forma geral, o contêiner tem medidas de comprimento (L), largura (W) e altura (H) conhecidas. Cada caixa do tipo k tem um comprimento (l_k), largura (w_k), altura (h_k), volume ou valor (v_k) e uma disponibilidade máxima (b_k). Admite-se que as dimensões das caixas e do contêiner são inteiras e que as caixas só podem ser empacotadas: ortogonalmente, ou seja, com os seus lados paralelos aos lados do contêiner; com orientação fixa, isto é, as caixas não giram em torno de nenhum de seus eixos; as caixas não podem ter sobreposição; e, devem respeitar as dimensões do contêiner após empacotadas.

De acordo com Junqueira (2013), o qual considera a tipologia de Wäscher, Haubner e Schumann (2007) para diferenciar os problemas de empacotamento, tem-se que existem diferentes versões para o PCuC, o qual envolve três dimensões (3D), empacotamento de caixas retangulares (R) e o objetivo de maximizar, a saber: 3D-R-IIPP (*Identical Item Packing Problem*), em que as caixas são iguais; 3D-R-SLOPP (*Single Large Object Placement Problem*), em que há poucas caixas diferentes; 3D-R-SKP (*Single Knapsack Problem*), em que há caixas muito diferentes entre si.

Assim, a diferença entre as versões do PCuC ocorre praticamente pelas dimensões das caixas, enquanto as caixas são assumidas como corpos rígidos. Um corpo rígido é aquele em que a distância entre quaisquer de seus dois pontos permanece constante mesmo sofrendo a ação de forças externas. Embora na realidade as caixas transportadas não sejam totalmente rígidas, assume-se que as deformações sofridas são pequenas e, assim, podem ser desprezadas.

1.2 Formulação matemática para o PCuC

Inicialmente, adota-se um sistema de coordenadas cartesianas em que a origem está no canto inferior frontal esquerdo do contêiner e (p, q, r) são as coordenadas onde é colocado o canto inferior frontal esquerdo de cada caixa. As possíveis posições ao longo do comprimento L , largura W e altura H , podem ser indicadas pelos conjuntos:

$$X = \{p \in \mathbb{Z} | 0 \leq p \leq L - \min_{1 \leq k \leq n} (l_k)\},$$

$$Y = \{q \in \mathbb{Z} | 0 \leq q \leq W - \min_{1 \leq k \leq n} (w_k)\},$$

$$Z = \{r \in \mathbb{Z} | 0 \leq r \leq H - \min_{1 \leq k \leq n} (h_k)\},$$

em que X , Y e Z indicam as direções do comprimento, largura e altura, respectivamente.

As variáveis de decisão do modelo são dadas por:

$$x_{kpqr} = \begin{cases} 1, & \text{se uma caixa do tipo } k \text{ é empacotada com seu canto inferior frontal esquerdo} \\ & \text{na posição } (p, q, r), \text{ com } 0 \leq p \leq L - l_k, 0 \leq q \leq W - w_k \text{ e } 0 \leq r \leq H - h_k; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Além disso, tem-se que:

$$X_k = \{p \in X \mid 0 \leq p \leq L - l_k, \quad k = 1, \dots, n\}, \quad (1)$$

$$Y_k = \{q \in Y \mid 0 \leq q \leq W - w_k, \quad k = 1, \dots, n\}, \quad (2)$$

$$Z_k = \{r \in Z \mid 0 \leq r \leq H - h_k, \quad k = 1, \dots, n\}. \quad (3)$$

De acordo com Junqueira et al. (2012), o PCuC pode ser formulado como:

$$\max \sum_{k=1}^n \sum_{p \in X_k} \sum_{q \in Y_k} \sum_{r \in Z_k} v_k x_{kpqr} \quad (4)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k=1}^n \sum_{\{p \in X_k \mid p' - l_k + 1 \leq p \leq p'\}} \sum_{\{q \in Y_k \mid q' - w_k + 1 \leq q \leq q'\}} \sum_{\{r \in Z_k \mid r' - h_k + 1 \leq r \leq r'\}} x_{kpqr} \leq 1, \quad p' \in X, q' \in Y, r' \in Z. \quad (5)$$

$$\sum_{p \in X_k} \sum_{q \in Y_k} \sum_{r \in Z_k} x_{kpqr} \leq b_k, \quad k = 1, \dots, n. \quad (6)$$

$$x_{kpqr} \in \{0, 1\}, \quad p \in X_k, q \in Y_k, r \in Z_k. \quad (7)$$

A função objetivo (4) busca pela solução com o máximo valor empacotado no contêiner que respeita as restrições impostas. As restrições em (5) garantem a não sobreposição dos itens empacotados, de forma que qualquer ponto (p', q', r') da malha só pode ser sobreposto por no máximo um item k empacotado em (p, q, r) . As restrições (6) limitam o número máximo de réplicas de cada caixa k a serem empacotadas no contêiner. Por fim, as restrições em (7) definem o domínio das variáveis de decisão, impondo que elas são binárias.

2 Estabilidade Horizontal

2.1 Estabilidade com fator de suporte

No caso da estabilidade horizontal, as faces laterais das caixas precisam ser suportadas por faces laterais de outras caixas de forma a evitar o deslocamento na situação em que o veículo de carga está em movimento ou alguma força externa atue nas laterais do empacotamento. Assim, conforme Junqueira, Morabito e Yamashita (2012), define-se um fator de suporte $\beta \in [0,1]$ e $\gamma \in [0,1]$, respectivamente, para assegurar o suporte das faces laterais esquerda e frontal das caixas conforme as eqs. (8) e (9), respectivamente.

$$\sum_{\varepsilon} \sum_{\kappa} \sum_{\xi} W_{kj}^{[2]} H_{kj}^{[2]} x_{k(p'-l_k)qr} \geq \beta w_j h_j x_{jp'q'r'}, \quad j = 1, \dots, n, \quad p' \in X_j \setminus \{0\}, q' \in Y_j, r' \in Z_j, \quad (8)$$

sendo $\varepsilon = \{k = 1, \dots, n \mid p' - l_k \geq 0\}$, $\kappa = \{q \in Y_k \mid q' - w_k + 1 \leq q \leq q' + w_j - 1\}$, $\xi = \{r \in Z_k \mid r' - h_k + 1 \leq r \leq r' + h_j - 1\}$, $W_{kj}^{[2]} = \min(q + w_k, q' + w_j) - \max(q, q')$, $H_{kj}^{[2]} = \min(r + h_k, r' + h_j) - \max(r, r')$ e β que indica a fração mínima da área da face lateral esquerda da caixa j que deve estar apoiada pelas áreas das faces laterais direitas de caixas k .

$$\sum_{\rho} \sum_{\varrho} \sum_{\sigma} L_{kj}^{[2]} H_{kj}^{[2]} x_{kp(q'-w_k)r} \geq \gamma l_j h_j x_{jp'q'r'}, \quad j = 1, \dots, n, \quad p' \in X_j, q' \in Y_j \setminus \{0\}, r' \in Z_j, \quad (9)$$

sendo $\rho = \{k = 1, \dots, n \mid q' - w_k \geq 0\}$, $\varrho = \{p \in X_k \mid p' - l_k + 1 \leq p \leq p' + l_j - 1\}$, $\sigma = \{r \in Z_k \mid r' - h_k + 1 \leq r \leq r' + h_j - 1\}$, $L_{kj}^{[2]} = \min(p + l_k, p' + l_j) - \max(p, p')$, $H_{kj}^{[1]} = \min(r + h_k, r' + h_j) - \max(r, r')$ e γ que indica a fração mínima da área da face lateral da frente da caixa j que deve estar apoiada pelas áreas das faces laterais do fundo das caixas k .

As restrições (8) referem-se à estabilidade horizontal em relação ao eixo x , em que as caixas devem ter uma porcentagem de sua face esquerda frontal suportada por outras caixas. Por sua vez, as restrições (9) referem-se à estabilidade horizontal em relação ao eixo y , em que as caixas devem ter uma porcentagem de sua face lateral frontal suportada por outras caixas.

2.2 Estabilidade horizontal com equilíbrio de corpos materiais

Os conceitos e definições a seguir são baseados no trabalho de Blum, Griffith e Neumann (1970). As forças de reação surgem na superfície de contato e atuam nos pontos de contatos. Na Física, a noção de contato está diretamente relacio-

nada à interação que surge quando objetos se tocam em algum ponto, como representado na Figura 2.2.

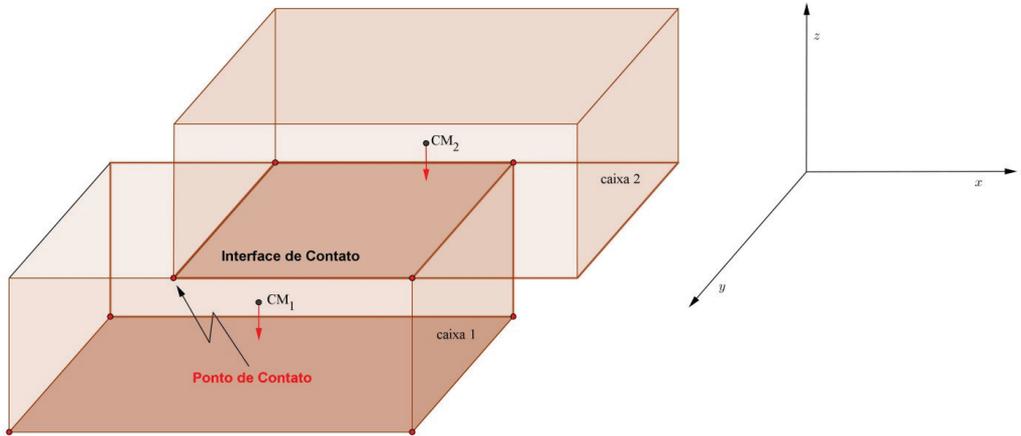


Figura 2.2 Pontos de contato e Interface de contato.

Para determinar as forças que surgem numa superfície de contato para um dado empacotamento, aplicam-se as equações de equilíbrio estático de corpos rígidos. A saber:

$$\sum \vec{f}_i = 0, \sum \vec{M}_i^x = 0, \sum \vec{M}_i^y = 0, \quad (10)$$

em que \vec{f}_i são as forças desconhecidas para cada vértice i , enquanto \vec{M}_i^x e \vec{M}_i^y são os momentos com respeito aos eixos x e y , respectivamente.

Se existem η caixas, então existem 3η equações para $3m$ forças desconhecidas, sendo geralmente $m \geq \eta$. Se $m = \eta$, o sistema é chamado de estaticamente determinado, mas geralmente $m > \eta$.

Ao lidar com a estabilidade horizontal surge a força de atrito devido ao contato entre as caixas ou das caixas com o recipiente. A força de atrito é a força que se opõe ao movimento de um corpo, sendo paralela à superfície de contato (que é a região onde há a interação entre os corpos). O atrito entre as superfícies depende da força normal, que é a componente vertical da força de contato, tal que quanto maior for a força normal, maior será a força de atrito.

Além das equações em (10) para modelar o empacotamento, uma restrição deve ser obedecida por todos os vértices das interfaces de contato para a força de atrito. Em outras palavras, cada componente da força de atrito deve satisfazer:

$$|f_x^i|, |f_y^i| \leq \mu f_n^i, \quad \forall i \text{ que é vértice de interface} \quad (11)$$

em que f_x^i , f_y^i e f_n^i são, respectivamente, as componentes da força de atrito em x e y , e a força normal, com um exemplo dado na 1.3. O μ_s é o coeficiente de atrito estático, que depende das superfícies em contato.

Um empacotamento é considerado estável quando as forças normais são positivas. A força normal surge quando um corpo está em contato com algum outro corpo. De acordo com a Terceira Lei de Newton, para toda ação existe uma reação, então se o corpo comprime uma superfície de contato, ou seja, se ele aplica força sobre a superfície, tem-se a respectiva reação da superfície sobre o corpo, denominada de força normal.

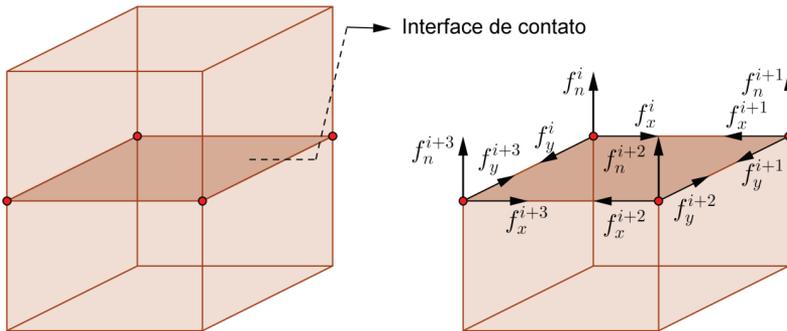


Figura 2.3 Força normal f_n^i e força de atrito estático f_x^i e f_y^i .

Vale destacar que a força normal não é a força de reação da força peso, mas sim a reação da compressão que é exercida sobre a superfície de contato e ela tem direção perpendicular a superfície de contato, por isso acaba coincidindo com a reação da força peso no caso de problemas de empacotamento de forma ortogonal. Além disso, as forças de atrito devem obedecer à condição estabelecida em (11) para que não haja movimento na direção horizontal das caixas.

3 Resultado analítico

Na Figura 2.4 há um empacotamento de caixas em um contêiner. A partir deste empacotamento é possível obter as equações de forças e momentos. A solução deste resulta nas forças normais atuantes em cada ponto de contato (pontos em vermelho na figura). As caixas menores possuem massa de 64 kg e a caixa maior possui massa de 320 kg, sendo assim, o peso das caixas menores e o da maior são 627,20 N e 3136 N, respectivamente. Para este empacotamento, as equações de forças e momentos são:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 + f_7 + f_8 + f_9 + f_{10} + f_{11} + f_{12} - f_{13} - f_{14} - f_{15} - f_{16} - 3136 = 0 \\ -2f_1 + 2f_2 + 2f_3 - 2f_4 - 2f_5 + 2f_6 + 2f_7 - 2f_8 - 2f_9 + 2f_{10} + 2f_{11} - 2f_{12} + 2f_{13} - 2f_{14} - 2f_{15} + 2f_{16} = 0 \\ -6f_1 - 6f_2 - 10f_3 - 10f_4 + 2f_5 + 2f_6 - 2f_7 - 2f_8 + 10f_9 + 10f_{10} + 6f_{11} + 6f_{12} - 10f_{13} - 10f_{14} - 6f_{15} - 6f_{16} = 0 \\ f_{13} + f_{14} + f_{15} + f_{16} - \frac{3136}{5} = 0 \\ -2f_{13} + 2f_{14} + 2f_{15} - 2f_{16} = 0 \\ 2f_{13} + 2f_{14} - 2f_{15} - 2f_{16} = 0 \end{array} \right.$$

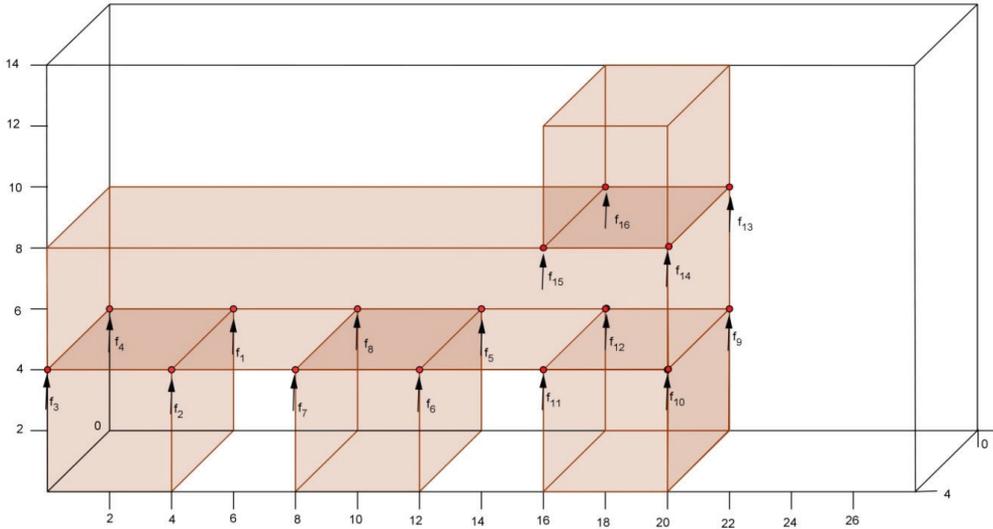


Figura 2.4 Empacotamento de caixas em um contêiner.

Resolvendo o sistema anterior, encontra-se uma solução aproximada para as forças normais, ou seja:

$$\begin{array}{llll} f_1 = 259,84 \text{ N}; & f_5 = 331,52 \text{ N}; & f_9 = 403,20 \text{ N}; & f_{13} = 156,80 \text{ N}; \\ f_2 = 259,84 \text{ N}; & f_6 = 331,52 \text{ N}; & f_{10} = 403,20 \text{ N}; & f_{14} = 156,80 \text{ N}; \\ f_3 = 224,00 \text{ N}; & f_7 = 295,68 \text{ N}; & f_{11} = 367,36 \text{ N}; & f_{15} = 156,80 \text{ N}; \\ f_4 = 224,00 \text{ N}; & f_8 = 295,68 \text{ N}; & f_{12} = 367,36 \text{ N}; & f_{16} = 156,80 \text{ N}. \end{array}$$

Como não há presença de forças normais negativas, conclui-se que este empacotamento é estável verticalmente, o que é visível na Figura 2.4.

Uma vez conhecida a força normal que atua nos pontos de contato das caixas na 1.4, pode-se descobrir a força de atrito em cada ponto. Neste trabalho, a obtenção das forças de atrito se divide em dois casos. O primeiro caso exemplifica a situação em que o coeficiente de atrito estático entre as caixas é o mesmo. Já o segundo caso exemplifica a situação em que o coeficiente de atrito é diferente.

3.1 Caso 1

Suponha que as caixas da 1.5 são todas feitas de madeira. De acordo com Robortella, Avelino e Edson (1997) o coeficientes de atrito estático (μ_s) entre madeira-madeira é de 0,5. A partir disso, obtém-se o atrito em cada ponto de contato utilizando a relação dada na eq. (11).

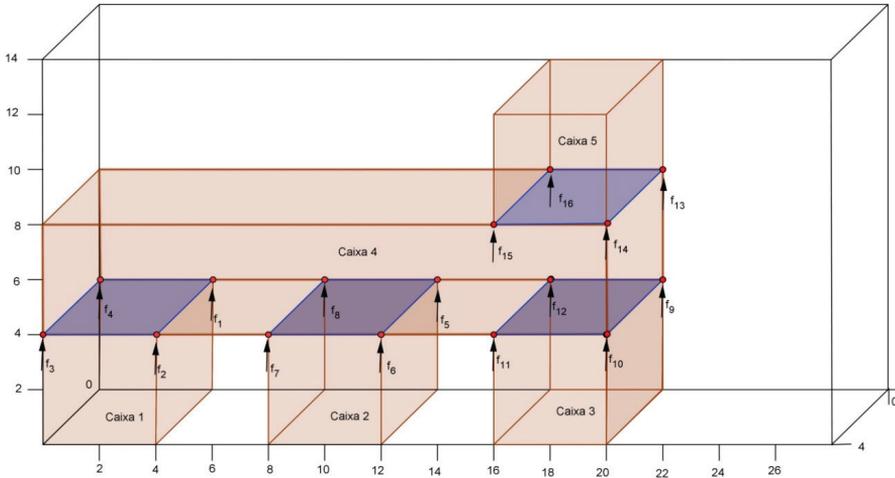


Figura 2.5 Caso em que o coeficiente de atrito estático é igual entre as caixas.

Assim, a força de atrito estático para cada ponto de contato é igual a:

$$f_x^1 = f_y^1 = 129,2;$$

$$f_x^2 = f_y^2 = 129,2;$$

$$f_x^3 = f_y^3 = 112,00;$$

$$f_x^4 = f_y^4 = 112,00;$$

$$f_x^5 = f_y^5 = 165,76;$$

$$f_x^6 = f_y^6 = 165,76;$$

$$f_x^7 = f_y^7 = 147,84;$$

$$f_x^8 = f_y^8 = 147,84;$$

$$f_x^9 = f_y^9 = 201,60;$$

$$f_x^{10} = f_y^{10} = 201,60;$$

$$f_x^{11} = f_y^{11} = 257,15;$$

$$f_x^{12} = f_y^{12} = 257,15;$$

$$f_x^{13} = f_y^{13} = 78,4;$$

$$f_x^{14} = f_y^{14} = 78,4;$$

$$f_x^{15} = f_y^{15} = 78,4;$$

$$f_x^{16} = f_y^{16} = 78,4.$$

Supondo que as caixas 1, 2 e 3 são fixas, então a caixa 4 ao sofrer uma força de 1881,6 N fica na situação de iminência do movimento, isto é, se aumentar um pouco o módulo da força a caixa entrará em movimento. Já para colocar a caixa 5 na situação de iminência do movimento, deve-se aplicar uma força de 313,6 N. Logo, as caixas 4 e 5 só podem receber uma força horizontal limitada a 1881,6 N

e 313,6 N, respectivamente, caso contrário, elas rompem a inércia e passam a se movimentar, fazendo com que o empacotamento seja instável.

3.2 Caso 2

Este caso assume que os coeficientes de atrito estático entre as caixas, com representação na 1.6, variam da seguinte forma: a superfície em azul representa um coeficiente igual a 0,5, a verde de 0,6, a amarela de 0,7 e a rosa de 1,0. Esta variação do coeficiente de atrito estático é para mostrar que nas situações reais de empacotamento, os itens podem ser feitos de materiais diferentes, tal que os coeficientes de atrito estático também variam.

Assim, conhecendo a intensidade da força normal e o valor do coeficiente de atrito estático, obtém-se a força de atrito que atua em cada ponto de contato usando a eq. (11).

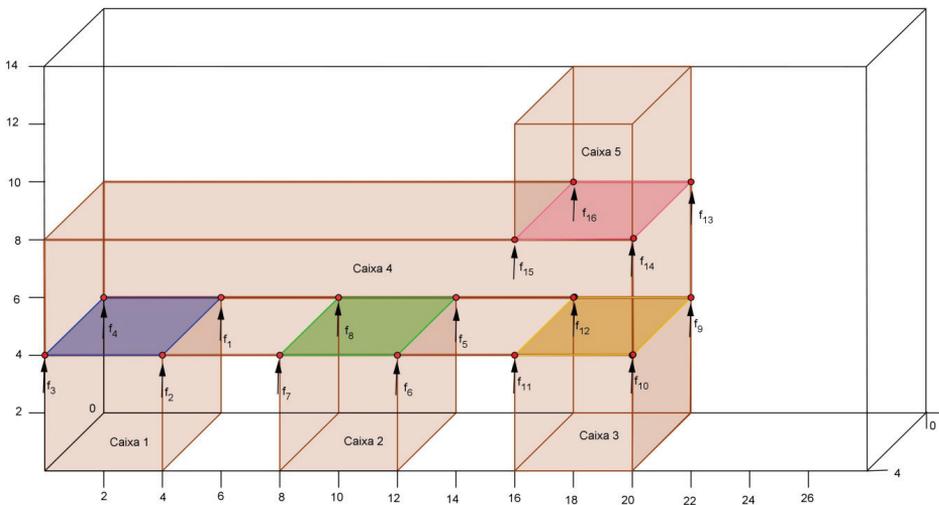


Figura 2.6 Caso com coeficiente de atrito estático diferente entre as caixas.

Segue que a força de atrito estático para cada ponto de contato é igual a:

$$f_x^1 = f_y^1 = 129,92$$

$$f_x^2 = f_y^2 = 129,92$$

$$f_x^3 = f_y^3 = 112,00$$

$$f_x^4 = f_y^4 = 112,00$$

$$f_x^5 = f_y^5 = 198,91$$

$$f_x^6 = f_y^6 = 198,91$$

$$f_x^7 = f_y^7 = 177,40$$

$$f_x^8 = f_y^8 = 177,40$$

$$f_x^9 = f_y^9 = 282,24$$

$$f_x^{10} = f_y^{10} = 282,24$$

$$f_x^{11} = f_y^{11} = 257,15$$

$$f_x^{12} = f_y^{12} = 257,15$$

$$f_x^{13} = f_y^{13} = 156,80$$

$$f_x^{14} = f_y^{14} = 156,80$$

$$f_x^{15} = f_y^{15} = 156,80$$

$$f_x^{16} = f_y^{16} = 156,80$$

Assim como no Caso 1, supondo que as caixas 1, 2 e 3 são fixas, então a caixa 4 está na iminência de movimento ao receber uma força horizontal de intensidade igual a 2315,24 N. Por sua vez, a caixa 5 precisa receber uma força horizontal superior a 627,20 N para que rompa a sua inércia. Esses valores limites de resistência são obtidos a partir da soma da força de atrito estático que atuam nos pontos da superfície de contato que está localizada na face inferior de cada caixa.

Considerações finais

O problema de carregamento de um único contêiner foi considerado neste trabalho no contexto da restrição de estabilidade horizontal de carga. Esta restrição, que é de suma importância durante o transporte, tem sido explorada na literatura apenas por meio do fator de suporte, sendo que não se conhece qualquer trabalho que trata da estabilidade horizontal utilizando as condições de equilíbrio de corpos rígidos.

A partir da modelagem do empacotamento usando as equações de equilíbrio estático de corpos rígidos para obter as forças normais em cada ponto de contato, tem-se que a estabilidade horizontal requer que seja verificada uma condição relacionada ao cálculo da força de atrito.

Logo, ao contrário do fator de suporte, que envolve apenas uma aproximação por suporte de área, o cálculo das forças de atrito permite saber a quantidade de força necessária para movimentar as caixas do empacotamento. Trabalhos futuros visam testar a abordagem aqui desenvolvida em instâncias da literatura, além de comparar com o uso do fator de suporte.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro dado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG).

Referências

- ARENALES, M. *et al.* *Pesquisa Operacional*. Rio de Janeiro: Campus, 2007.
- BLUM, M.; GRIFFITH, A.; NEUMANN, B. *A stability test for configurations of blocks*. TR-AI Memo AIM-188, Massachusetts Institute of Technology, 1970.
- BORTFELDT, A.; HOMBERGER, J. Packing first, routing second a heuristic for the vehicle routing and loading problem. *Computers & Operations Research*, v. 40, n. 3, p. 873–885, 2013.
- HIBBELER, R. C. *Statics & Mechanics of Materials*. Prentice Hall, 2010.
- JUNQUEIRA, L.; MORABITO, R.; YAMASHITA, D. S. Three-dimensional container loading models with cargo stability and load bearing constraints. *Computers & Operations Research*, v. 39, n. 1, p. 74–85, 2012.
- JUNQUEIRA, L. *Modelos e algoritmos para problemas integrados de roteamento e carregamento de veículos*. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, Brasil, 2013.
- JUNQUEIRA, L. E QUEIROZ, T. A. Condições de equilíbrio e balanceamento em problemas de empacotamento: levantamento e discussão. *In: XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Porto Seguro-BA, Brasil, p. 1–12, 2015.
- KRASNOGOR, N. *Studies on the theory and design space of memetic algorithms*. Tese (Doutorado) — Faculty of computing, engineering and mathematical sciences, University of the West of England, United Kingdom, 2002.
- QUEIROZ, T. A.; MIYAZAWA, F. K. Order and static stability into the strip packing problem. *Annals of Operations Research*, v. 223, n. 1, p. 137–154, 2014.

- RAMOS, A. G.; OLIVEIRA, J. F.; LOPES, M. P. A physical packing sequence algorithm for the container loading problem with static mechanical equilibrium conditions. *International Transactions in Operational Research*, v. 23, n. 1–2, p. 215–238, 2016.
- RAMOS, A. G.; OLIVEIRA, J. F.; GONÇALVES, J. F.; LOPES, M. P. A container loading algorithm with static mechanical equilibrium stability constraints. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 91, p. 565–581, 2016.
- ROBORTELLA, A. E. Curso de Física. São Paulo: Ática, 1997.
- SILVA, J. L. C.; SOMA, N. Y.; MACULAN, N. A greedy search for the three-dimensional bin packing problem: the packing static stability case. *International Transactions in Operational Research*, v. 10, n. 2, p. 141–153, 2003.
- SPADOTTO, A. F. *Desenvolvimento de programa computacional aplicado ao empacotamento do palhão de cana-de-açúcar*. Dissertação (Mestrado) — Dissertação de Mestrado – Agronomia, Universidade Estadual Paulista, São Paulo-SP, Brasil, 2008.
- WÄSCHER, G.; HAUBNER, H.; SCHUMANN, H. An improved typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, v. 183, n. 3, p. 1130–1109, 2007.

Projeto ótimo robusto de um sistema de dois graus de liberdade utilizando polinômio do caos

Layane Rodrigues de Souza
Queiroz¹

Romes Antonio Borges¹

Resumo: Sistemas mecânicos podem estar sujeitos a incertezas oriundas da imprecisão dos seus parâmetros durante o projeto. Este trabalho lida com o projeto de um sistema mecânico de dois graus de liberdade em que as massas são parâmetros incertos e tal que se busca determinar a constante de rigidez das molas para que a primeira frequência natural seja máxima e o desvio da resposta aleatória seja mínimo. Para lidar com as incertezas, aplica-se o método do Polinômio do Caos homogêneo, de forma que o problema de otimização resultante é resolvido por um algoritmo genético básico. As simulações numéricas mostram que o sistema pode ser projetado adequadamente quando se tem um pequeno desvio para os parâmetros incertos.¹

Palavras-chave: Sistemas discretos de 2 g.d.l., quantificação de incertezas, otimização, polinômio do caos.

Introdução

Em muitas situações, o projeto requer a determinação de parâmetros ótimos a fim de diminuir os custos envolvidos ou melhorar o nível de segurança. Por outro lado, o sistema geralmente sofre com incertezas que podem surgir, por exemplo, a partir da imprecisão dos parâmetros.

De forma similar, é comum que o sistema projetado esteja sujeito a diferentes níveis de vibração, o que pode ocasionar falhas e, assim, impactar no seu nível de

1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: spinellyh@hotmail.com, romes@ufg.br.

segurança. Uma saída é considerar o uso de Absorvedores Dinâmicos de Vibrações (ADVs), que são afixados na estrutura com o intuito de absorver a sua energia vibratória. Embora os ADVs tenham baixo custo, eles precisam ser projetados para atuar em condições extremas (MÉNDEZ, 2014).

A modelagem de um ADV básico envolve uma estrutura com massa e rigidez, enquanto modelos mais elaborados consideram a inclusão de um elemento de amortecimento no absorvedor, o que permite obter amplitudes em menor escala para grandes faixas de frequência. Vale (2006) considerou o emprego de um ADV constituído de amortecimento viscoelástico para o controle de vibrações em reatores nucleares, enquanto Barros (2009) trabalhou no projeto ótimo de um ADV multimodal envolvendo a associação de vigas com discos circulares, em que foi feito um ensaio em uma carcaça de compressor hermético a fim de validar a proposta.

Outra forma de lidar com os níveis de vibração de um sistema consiste em maximizar a sua primeira frequência natural e/ou distanciar as frequências. Nesta linha, Wang et al. (2006) lidaram com o projeto de uma viga sob diferentes condições de contorno com o objetivo de determinar a posição ótima do suporte e a sua rigidez visando a maximização das frequências de vibração da viga. Rajasekaran et al. (2008) trabalharam com a movimentação de plataformas marinhas (ou *offshores*) por guindastes objetivando determinar a posição dos suportes nos guindastes para que a frequência de vibração seja máxima. Picelli et al. (2015) desenvolveram um algoritmo evolucionário para otimizar a topologia de sistemas com estrutura acústica, em que se buscou maximizar a primeira frequência natural do sistema.

Assim, este trabalho tem por objetivo projetar um sistema mecânico de dois graus de liberdade com incertezas nas massas. Para o projeto, considera-se a resolução de um problema de otimização que busca determinar a rigidez das molas de forma a maximizar a primeira frequência natural, enquanto minimiza o seu desvio padrão. A resolução do problema de otimização é feita por meio de um algoritmo genético básico.

Ao considerar que as massas do sistema de dois graus de liberdade são elementos com características incertas, tem-se que elas são tratadas como variáveis aleatórias e, assim, devem ser propagadas pelo sistema com o intuito de analisar o impacto nas frequências de vibração. O impacto na frequência é mensurado a partir de estatísticas que representam o seu valor esperado (média) e a sua variância (GHANEM; SPANOS, 1991).

Entre os métodos empregados para a quantificação de incertezas, este trabalho considera o método do Polinômio do Caos homogêneo, sendo as incertezas tratadas como processos estocásticos de segunda ordem no espaço de Hilbert (GHANEM; SPANOS, 1991). O Polinômio do Caos homogêneo usa a base de polinômios ortogonais de Hermite cuja função peso reflete a função densidade de probabilidade de variáveis aleatórias gaussianas usadas para representar as incertezas.

O Polinômio do Caos permite separar, na resposta do sistema, a parte estocástica, que fica concentrada apenas na base de polinômios utilizada, da determinística, que contém os coeficientes da expansão e permite determinar as estatísticas mencionadas. Assim, o valor médio da resposta é obtido a partir do primeiro coeficiente da expansão, enquanto a variância é dada pela soma ponderada dos coeficientes ao quadrado dos outros termos da expansão (GHANEM; SPANOS, 1991).

Ghanem e Spanos (1991) apresentaram um desenvolvimento detalhado do Polinômio do Caos homogêneo com aplicação em diferentes problemas da engenharia. Xiu e Karniadakis (2002) propuseram uma generalização do Polinômio do Caos para considerar o uso dos polinômios ortogonais de Askey, pois assim as variáveis podem seguir outras distribuições de probabilidade. Kewlani et al. (2012) aplicaram o Polinômio do Caos para quantificar o impacto na resposta aleatório do movimento de um veículo sujeito a incertezas. Por sua vez, Guerine et al. (2016) aplicaram o Polinômio do Caos homogêneo para simular o comportamento dinâmico não linear de um sistema de engrenagens com incertezas no atrito.

1 Polinômio do Caos Homogêneo

O método do Polinômio do Caos (PC) foi proposto inicialmente para resolver equações diferenciais estocásticas. A expansão em PC permite criar uma relação robusta entre a resposta do sistema e as variáveis aleatórias, uma vez que determina o valor médio e a variância da resposta aleatória associada ao sistema com incertezas.

O PC foi definido com base em uma expansão dos polinômios de Hermite para processos estocásticos de segunda ordem (isto é, aqueles com variância finita) em termos de variáveis aleatórias gaussianas ortonormais independentes considerando o espaço de Hilbert L^2 . O desenvolvimento do PC homogêneo é feito adiante com base em Ghanem e Spanos (1991). Para a resposta do sistema representada por um processo estocástico $X(w)$ de segunda ordem, em que w representa um evento aleatório, a expansão em PC é dada por:

$$\begin{aligned} X(w) = & a_0 \Gamma_0 + \sum_{i_1=1}^{\infty} a_{i_1} \Gamma_1(\xi_{i_1}(w)) + \sum_{i_1=1}^{\infty} \sum_{i_2=1}^{i_1} a_{i_1 i_2} \Gamma_2(\xi_{i_1}(w), \xi_{i_2}(w)) \\ & + \sum_{i_1=1}^{\infty} \sum_{i_2=1}^{i_1} \sum_{i_3=1}^{i_2} a_{i_1 i_2 i_3} \Gamma_3(\xi_{i_1}(w), \xi_{i_2}(w), \xi_{i_3}(w)) \\ & + \sum_{i_1=1}^{\infty} \sum_{i_2=1}^{i_1} \sum_{i_3=1}^{i_2} \sum_{i_4=1}^{i_3} a_{i_1 i_2 i_3 i_4} \Gamma_4(\xi_{i_1}(w), \xi_{i_2}(w), \xi_{i_3}(w), \xi_{i_4}(w)) + \dots \end{aligned}$$

sendo que os $a_{ij...}$ representam os coeficientes da expansão; $\Gamma_p(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \dots, \xi_{i_n})$ representa o polinômio do caos de ordem p e de dimensão $n = \infty$, que é ortogonal em termos das variáveis aleatórias gaussianas independentes dadas em $\xi = (\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \dots, \xi_{i_n})$. Por conveniência, omite-se "w" das variáveis em ξ .

A Eq. (1) pode ser rescrita a partir de uma indexação baseada em termo resultando em:

$$X(w) = \sum_{j=0}^{\infty} \hat{a}_j \Phi_j(\xi), \quad (2)$$

em que existe uma relação biunívoca entre os termos Γ_p com Φ_j , assim como entre os $a_{i...}$ e os coeficientes \hat{a}_j .

Os polinômios em $\Phi = \{\Phi_1, \Phi_2, \dots\}$ formam uma base ortogonal completa em termo das variáveis aleatórias independentes em ξ , de forma que produto interno coincide com o valor esperado E no espaço de Hilbert, isto é:

$$\langle \Phi_r, \Phi_s \rangle = E[\Phi_r, \Phi_s] = \int_C \Phi_r(\xi) \Phi_s(\xi) \rho(\xi) d\xi, \quad (3)$$

em que $\rho(\xi)$ representa a função peso e C é o suporte (intervalo de ortogonalidade). Os polinômios são ortogonais quando o produto interno é nulo, isto é, a integral resulta em zero para $r \neq s$.

A função peso assume a forma da função de distribuição de probabilidade das variáveis aleatórias ξ sendo consideradas. No caso do PC homogêneo, em que o C representa o intervalo $(-\infty, \infty)$, a função peso dos polinômios ortogonais de Hermite é dada por (XIU et al., 2003):

$$\rho(\xi) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^n}} e^{-\frac{1}{2}\xi^T \xi}, \quad (4)$$

que também representa a função densidade de probabilidade de variáveis aleatórias gaussianas n-dimensionais.

Na expansão do PC homogêneo, o polinômio do caos Γ_p , de ordem p e dimensão n , é obtido calculando-se o polinômio de Hermite n-dimensional (GHANEM; SPANOS, 1991) como:

$$\Gamma_p(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n) = (-1)^n \left(e^{\frac{1}{2}\xi^T \xi} \right) \left(\frac{\partial^n}{\partial \xi_1 \partial \xi_2 \dots \partial \xi_n} e^{-\frac{1}{2}\xi^T \xi} \right). \quad (5)$$

Do ponto de vista aplicado, a Eq. (2), que contém uma expansão infinita, é substituída por uma finita, ao mesmo tempo que se usa um número finito de variáveis aleatórias. Assim, a expansão finita em PC homogêneo passa a ser:

$$X(w) = \sum_{j=0}^N \hat{a}_j \Phi_j(\xi). \quad (6)$$

sendo N o número de termos da expansão para um polinômio de ordem máxima p e a dimensão de ξ sendo $n < \infty$. O valor de N é obtido calculando:

$$N = \frac{(n+p)!}{n!p!} - 1. \quad (7)$$

Segundo Machado (2012), dada a aplicação do PC homogêneo em sistemas com incertezas, cada parâmetro incerto $\alpha(w)$ pode ser expresso na forma de uma expansão de Karhunen-Loeve da seguinte forma:

$$\alpha(w) = \sum_{i=1}^{\infty} \xi_i(w) g_i, \quad (8)$$

sendo g_i funções determinísticas associadas a covariância do processo $\alpha(w)$.

Os coeficientes \hat{a}_j da Eq. (6) podem ser obtidos a partir da substituição de $X(w)$ e dos parâmetros incertos, da Eq. (8), na equação do sistema com incertezas, em seguida multiplicando o resultado por cada Φ_j e tomando o produto interno, além de considerar as propriedades de ortogonalidade. Isto resulta em um sistema de $N + 1$ equações, em que surgem coeficientes do tipo $\langle \xi_i \Phi_j, \Phi_r \rangle$ calculados a partir da resolução da integral na Eq. (3).

Por fim, as estatísticas da resposta aleatória do sistema com incertezas, isto é, o seu valor médio e a sua variância são obtidas, respectivamente, por (GHANEM; SPANOS, 1991):

$$\mu_X = \hat{a}_0, \quad (9)$$

$$\sigma_X^2 = \sum_{j=1}^N \hat{a}_j^2 \langle \Phi_j^2 \rangle. \quad (10)$$

2 Consideração de Incertezas em um Sistema Mecânico

Seja um sistema mecânico de dois graus de liberdade conforme apresenta a 1.1. Assume-se que $x_1(t)$ e $x_2(t)$ representam o deslocamento na direção horizontal para as massas m_1 e m_2 , respectivamente, em que não há atrito entre a base horizontal fixa e as massas. As molas que conectam a massa m_1 na base vertical fixa, e a massa m_2 na massa m_1 possuem rigidez k_1 e k_2 , respectivamente.

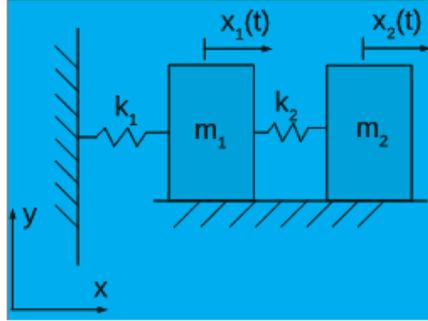


Figura 3.1 Sistema mecânico de dois graus de liberdade.

Observando a Fig. 1, tem-se um sistema de dois graus de liberdade sem força externa cuja equação de movimento é dada na Eq. (11).

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Considera-se a solução da Eq. (11) na forma $x_1(t) = X_1 e^{i\omega t}$ e $x_2(t) = X_2 e^{i\omega t}$, que representa um movimento harmônico, tal que ω é uma constante a ser determinada (INMAN, 2013). Assim, chega-se em:

$$\begin{bmatrix} k_1 + k_2 - m_1 \omega^2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - m_2 \omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad X_1 \neq 0 \text{ e } X_2 \neq 0. \quad (12)$$

Para que a Eq. (12) tenha uma solução diferente de zero, a matriz de coeficientes deve satisfazer:

$$\det \begin{bmatrix} k_1 + k_2 - m_1 \omega^2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - m_2 \omega^2 \end{bmatrix} = 0, \quad (13)$$

que resulta no seguinte polinômio característico, para $\omega^2 = \lambda$, ou seja:

$$m_1 m_2 \lambda^2 - (m_1 k_2 + m_2 k_1 + m_2 k_2) \lambda + k_1 k_2 = 0. \quad (14)$$

A resolução da Eq. (14) permite obter as frequências em que as massas m_1 e m_2 oscilam, chamadas de frequências naturais (Inman, 2013). Ao assumir que as massas do sistema estão sujeitas a incertezas, sendo representadas em termos de variáveis aleatórias gaussianas independentes, parte-se para a aplicação da expansão em PC homogêneo.

A partir da Eq. (8), os parâmetros incertos podem ser escritos na forma de uma expressão de Karhunen-Loeve finita, em que se assume apenas uma variável aleatória, resultando respectivamente em:

$$\tilde{m}_1 = \bar{m}_1 + \sum_{i=1}^1 \xi_i g_i = m_1 + \xi_1 \sigma_{m_1}, \quad (16)$$

sendo que \bar{m}_1 e \bar{m}_2 representam as médias e correspondem aos respectivos valores reais m_1 e m_2 ; $g_1 = \sigma_{m_1}$ e $g_2 = \sigma_{m_2}$ representam os respectivos desvio padrão para as massas; e, ξ_1 e ξ_2 são as variáveis aleatórias independentes que representam as incertezas das respectivas massas.

O próximo passo consiste em considerar as incertezas no sistema, ou seja, substituir as Eqs. (15) e (16) na Eq. (14) resultando em:

$$(m_1 + \xi_1 \sigma_{m_1})(m_2 + \xi_2 \sigma_{m_2})\lambda^2 - ((m_1 + \xi_1 \sigma_{m_1})k_2 + (m_2 + \xi_2 \sigma_{m_2})k_1 + (m_2 + \xi_2 \sigma_{m_2})k_2)\lambda + k_1 k_2 = 0. \quad (17)$$

Uma vez que há incertezas no sistema da 1.1, a sua resposta aleatória passa a ser representada por uma expansão em PC finita. Assume-se $n=2$ variáveis aleatórias e um polinômio de ordem máxima $p=2$, resultando em $N=5$ e tal que:

$$\lambda = \sum_{j=0}^5 \lambda_j \Phi_j(\xi_1, \xi_2) = \lambda_0 \Phi_0 + \lambda_1 \Phi_1 + \lambda_2 \Phi_2 + \lambda_3 \Phi_3 + \lambda_4 \Phi_4 + \lambda_5 \Phi_5. \quad (18)$$

Para obter os polinômios de Hermite em função de ξ_1 e ξ_2 , aplica-se a Eq. (5), o que resulta em: $\Phi_0 = 1$, $\Phi_1 = \xi_1$, $\Phi_2 = \xi_2$, $\Phi_3 = \xi_1^2 - 1$, $\Phi_4 = \xi_1 \xi_2$ e $\Phi_5 = \xi_2^2 - 1$, com $\langle \Phi_0 \rangle = 1$, $\langle \Phi_1 \rangle = \langle \Phi_2 \rangle = \langle \Phi_3 \rangle = \langle \Phi_4 \rangle = \langle \Phi_5 \rangle = 0$, $\langle \Phi_0^2 \rangle = \langle \Phi_1^2 \rangle = \langle \Phi_2^2 \rangle = \langle \Phi_4^2 \rangle = 1$ e $\langle \Phi_3^2 \rangle = \langle \Phi_5^2 \rangle = 2$.

O próximo passo consiste em fazer a projeção da Eq. (17), após a substituição da resposta dada na Eq. (18), sobre o espaço aleatório com a base de polinômios de Hermite. Em outras palavras, o resultado da substituição da Eq. (18) na Eq. (17) é multiplicado por cada polinômio da base Φ e, em seguida, toma-se o produto interno. Segue que um conjunto de $N + 1$ equações algébricas são obtidas representando um conjunto de polinômios característicos aleatórios, isto é, para cada $r = 0, 1, \dots, 5$, tem-se:

$$\left\langle \Phi_r, (m_1 + \xi_1 \sigma_{m_1})(m_2 + \xi_2 \sigma_{m_2}) \left(\sum_{j=0}^5 \lambda_j \Phi_j \right)^2 - ((m_1 + \xi_1 \sigma_{m_1})k_2 + (m_2 + \xi_2 \sigma_{m_2})k_1 + (m_2 + \xi_2 \sigma_{m_2})k_2) \sum_{j=0}^5 \lambda_j \Phi_j + k_1 k_2 \right\rangle = \langle \Phi_r, 0 \rangle. \quad (19)$$

Embora o conjunto de equações obtido a partir da Eq. (19) seja acoplado, ele é determinístico, uma vez que a aleatoriedade do sistema foi deslocada para a base de polinômios em Φ . Diante disto, tais equações podem ser resolvidas (neste caso numericamente por envolver termos não lineares) visando obter as estatís-

ticas da resposta aleatória. Em outras palavras, o valor médio e a variância das duas frequências obtidas a partir da Eq. (19) são expressas, respectivamente, por:

$$\begin{cases} \mu_{\lambda_{[1]}} = \lambda_{0,[1]} \\ \mu_{\lambda_{[2]}} = \lambda_{0,[2]} \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} \sigma_{\lambda_{[1]}}^2 = \lambda_{1,[1]}^2 + \lambda_{2,[1]}^2 + 2\lambda_{3,[1]}^2 + \lambda_{4,[1]}^2 + 2\lambda_{5,[1]}^2 \\ \sigma_{\lambda_{[2]}}^2 = \lambda_{1,[2]}^2 + \lambda_{2,[2]}^2 + 2\lambda_{3,[2]}^2 + \lambda_{4,[2]}^2 + 2\lambda_{5,[2]}^2 \end{cases} \quad (21)$$

O objetivo é maximizar o valor esperado (i.e., a média) da primeira frequência $\lambda_{[1]}$ na Eq. (20) e, ao mesmo tempo, minimizar o seu desvio padrão, obtido a partir da variância $\sigma_{\lambda_{[1]}}^2$ na Eq. (21). Logo, busca-se determinar o valor de k_1 e k_2 para a aleatoriedade propagada nas frequências naturais do sistema na 1.1, sendo conhecidas as massas m_1 e m_2 e os seus respectivos desvios padrões σ_{m_1} e σ_{m_2} . Para tanto, considera-se o seguinte problema de otimização multiobjetivo:

$$\begin{cases} \text{Maximizar } f_1 = \mu_{\lambda_{[1]}} \\ \text{Minimizar } f_2 = \sigma_{\lambda_{[1]}} \end{cases} \quad (22)$$

$$\text{Sujeito a: } \begin{cases} 1500 \leq k_1 \leq 2500 \\ 300 \leq k_2 \leq 800 \end{cases} \quad (23)$$

Lobato (2008) apresenta métodos para lidar com problemas de otimização multiobjetivo, de forma que neste trabalho aplica-se o método da Soma Ponderada resultando na função da Eq. (24).

$$\text{Minimizar } F = -\frac{Wf_1}{f_1^o} + \frac{(1-W)f_2}{f_2^o} \quad (24)$$

O fator de ponderação é definido como $0 \leq W \leq 1$, tal que cada valor de W permite fornecer uma solução para f_1 e f_2 e, assim, é possível construir a curva de Pareto das soluções. Como a localização do ponto ótimo não depende apenas de W , considera-se um coeficiente $c_i = \frac{1}{f_i^o}$, para $i = 1, 2$, sendo f_i^o o valor ideal obtido da otimização individual da função objetivo f_i com as restrições na Eq. (23).

3 Algoritmos genéticos

O método de otimização Algoritmos genéticos é uma técnica que utiliza-se de estratégias fundamentadas na teoria da evolução Darwiniana, descrita por Darwin (1859), para resolver, em geral, problemas de otimização. Segundo

Darwin (1859), os melhores indivíduos sobrevivem as gerações e conseguem produzir bons descendentes.

Com base nisso, Holland (1975) estabeleceu os princípios básicos para a construção de um Algoritmo Genético (AG) com aplicação em problemas de otimização. O AG utiliza uma população de indivíduos, representada geralmente por cromossomos, em que cada cromossomo contém uma solução do problema. Os melhores cromossomos, isto é, com as melhores soluções, conforme a função de aptidão, são escolhidos para a fase de reprodução e seguem com alta probabilidade para a nova geração, da próxima iteração. Deste modo, com o decorrer das gerações (iterações do algoritmo), a tendência é que a população passe a ter cada vez mais indivíduos com melhores valores de função objetivo.

Em linhas gerais, o AG realiza uma busca global pela melhor solução do problema, sendo capaz de evitar ótimos locais. Basicamente, para uma dada população gerada inicialmente de modo aleatório, escolhem-se os indivíduos com melhor valor de função de aptidão para aplicar os operadores genéticos de cruzamento e mutação. A partir disso, uma nova população, que combina os melhores indivíduos da população atual com os indivíduos descendentes, é criada. Esses passos são repetidos até que se alcance algum critério de parada.

A operação de cruzamento consiste em gerar indivíduos descendentes a partir da combinação dos melhores indivíduos da população atual selecionados com alta probabilidade. A probabilidade é calculada de acordo com o valor que cada indivíduo recebe da função de aptidão. Deste modo, realiza-se a combinação entre as partes genéticas de dois indivíduos aptos, o que geralmente resulta em indivíduos descendentes de boa qualidade. O número de indivíduos que passam pelo cruzamento é determinado por meio da probabilidade de cruzamento. Por sua vez, o operador de mutação consiste em realizar a mudança de um (ou mais) valor contido no cromossomo. A escolha da posição onde mudar o valor é feita de forma aleatória, tal que a mudança ocorre a partir de uma probabilidade de mutação, que deve ter valor pequeno a fim de que não haja pioras significativas na solução.

4 Simulações numéricas

A resolução do problema de otimização definido na Eq. (24) sujeito as restrições na Eq. (23) é feita por um Algoritmo Genético básico², denominado por AG, disponibilizado pelo *Grupo de Control Predictivo y Optimización*, da Universidade Politécnica de Valência, para o *software* Matlab. Detalhes da implementação e funcionamento do AG podem ser obtidos em Ferragud (1999).

2 <http://cpoh.upv.es/en/research/software/item/249-basic-ga.html>

A partir de um estudo de sensibilidade dos parâmetros do AG, chegou-se nos seguintes valores: $N = 50$ (tamanho da população), $N_{ger} = 100$ (número de gerações), $P_c = 0,7$ (probabilidade de cruzamento) e $P_m = 0,05$ (probabilidade de mutação). Os valores adotados para os parâmetros correspondem a $m_1 = 100$ e $m_2 = 30$. Dois cenários são analisados, para o desvio padrão das massas variando no intervalo [5%, 10%] do respectivo valor nominal, ou seja, avaliam-se os cenários $C_1 = \{\sigma_{m_1} = 5; \sigma_{m_2} = 3\}$ e $C_2 = \{\sigma_{m_1} = 10; \sigma_{m_2} = 1,5\}$, que representam os dois extremos permitidos para o desvio padrão das massas.

A resolução do problema de otimização definido anteriormente pelo AG resulta para o cenário C_1 na Tabela 3.1, com os resultados para distintos valores de W , e na Fig. 3.2, com a curva de Pareto. De forma similar, a Tabela 3.2 e a Fig. 3.3 trazem os resultados para os diferentes W e a curva de Pareto, respectivamente, para o Cenário C_2 . Vale ressaltar que em C_1 , os valores ideais de cada função objetivo foram $f_1^o = 14,95$ e $f_2^o = 0,08$, enquanto que para C_2 o resultado obtido foi de $f_1^o = 14,93$ e $f_2^o = 0,02$.

Os resultados obtidos na 1.1 mostram que a medida que o valor de W se aproxima de 1, consegue-se aumentar satisfatoriamente o valor da primeira frequência natural, o que requer que as variáveis de projeto tenham valores iguais ao seus limitantes superiores, porém o desvio padrão associado a aleatoriedade da resposta aumenta consideravelmente. O processo inverso ocorre quando W se aproxima de 0, o que também pode ser visto na Fig. 3.2.

Para $W = 0$ é possível comparar o valor esperado da primeira frequência natural, obtida com o emprego do PC homogêneo, com o valor determinístico, obtido a partir da resolução da Eq. (14), obtendo, respectivamente, $\mu_{\lambda_{[1]}} = 7,26 \pm 0,08$ e $\lambda_1 = 7,22$. Este resultado condiz com o tamanho da expansão assumida para o PC, uma vez que expansões com mais termos conseguem representar melhor as incertezas do sistema.

Tabela 3.1 Soluções da curva de Pareto considerando o cenário C_1 .

W	k_1	k_2	f_1	f_2	Nº Avaliações
0,00	1500,00	300,00	7,26	0,08	5050
0,05	1500,00	300,00	7,26	0,08	5050
0,10	1500,00	300,00	7,26	0,08	5050
0,15	1500,00	385,82	8,25	0,08	5050
0,20	1500,00	404,61	8,42	0,08	5050
0,25	1500,00	420,62	8,55	0,08	5050

Continua

Tabela 3.1 Soluções da curva de Pareto considerando o cenário C_1 . (Continuação)

W	k_1	k_2	f_1	f_2	Nº Avaliações
0,30	1500,00	435,77	8,67	0,08	5050
0,35	1500,00	450,88	8,78	0,08	5050
0,40	1500,00	466,49	8,88	0,08	5050
0,45	1500,00	483,07	8,99	0,08	5050
0,50	1500,00	501,16	9,10	0,08	5050
0,55	1500,00	521,37	9,21	0,08	5050
0,60	1500,00	544,59	9,33	0,09	5050
0,65	1500,00	572,12	9,45	0,09	5050
0,70	1500,00	606,05	9,59	0,09	5050
0,75	1500,00	650,02	9,75	0,09	5050
0,80	1736,26	785,34	11,39	0,12	5050
0,85	2129,72	800,00	13,37	0,17	5050
0,90	2500,00	800,00	14,95	0,23	5050
0,95	2500,00	800,00	14,95	0,23	5050
1,00	2500,00	800,00	14,95	0,23	5050

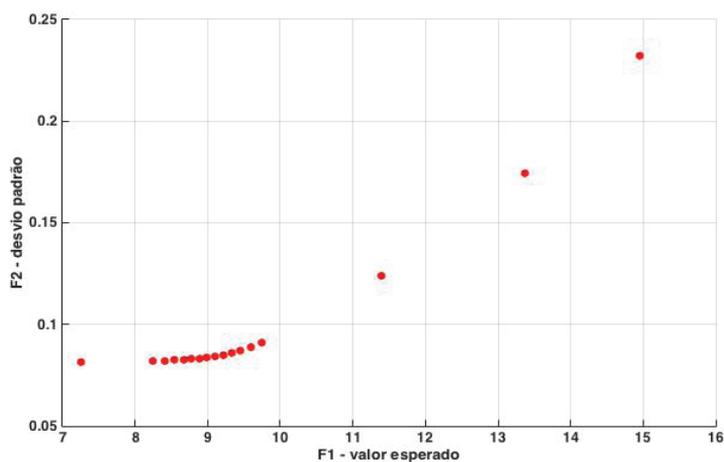


Figura 3.2 Curva de Pareto do cenário C_1 para a primeira frequência natural do sistema com incertezas.

Os resultados para o cenário C_2 estão na Tabela 3.3, com a curva de Pareto na Fig. 3.3. Observa-se que há uma diferença com relação aos resultados do cenário C_1 , em especial no que diz respeito ao número de pontos distintos na curva de Pareto. Note que agora houve pouca variação em f_2 .

Tabela 3.2 Soluções da curva de Pareto considerando o cenário C_2 .

W	k_1	k_2	f_1	f_2	Nº Avaliações
0,00	1500,00	300,00	7,23	0,03	5050
0,05	1500,00	300,00	7,23	0,03	5050
0,10	1500,00	300,00	7,23	0,03	5050
0,15	1500,00	300,00	7,23	0,03	5050
0,20	1500,00	300,00	7,23	0,03	5050
0,25	1500,00	300,00	7,23	0,03	5050
0,30	1500,00	300,00	7,23	0,03	5050
0,35	1500,00	300,00	7,23	0,03	5050
0,40	1500,00	300,00	7,23	0,03	5050
0,45	1500,00	300,00	7,23	0,03	5050
0,50	1500,00	300,00	7,23	0,03	5050
0,55	1500,00	300,00	7,23	0,03	5050
0,60	1500,00	300,00	7,23	0,03	5050
0,65	1500,00	300,00	7,23	0,03	5050
0,70	1500,00	300,00	7,23	0,03	2550
0,75	1500,00	300,00	7,23	0,03	5050
0,80	1500,00	313,72	7,42	0,03	5050
0,85	2002,69	425,62	9,99	0,05	5050
0,90	2500,00	566,25	12,90	0,08	5050
0,95	2500,00	689,68	14,12	0,11	5050
1,00	2500,00	800,00	14,93	0,14	5050

Ao analisar o cenário C_2 , percebe-se que o aumento no desvio padrão associado a massa m_1 traz menor impacto na curva de Pareto ao comparar com o

cenário C_1 , em que o desvio padrão de m_1 assume seu menor valor. A Tabela 3.2 mostra que para $W \leq 0,8$ não houve variação com relação aos objetivos, ao contrário da Tabela 3.1, em que isto ocorreu somente para $W \leq 0,1$ e $W \geq 0,9$.

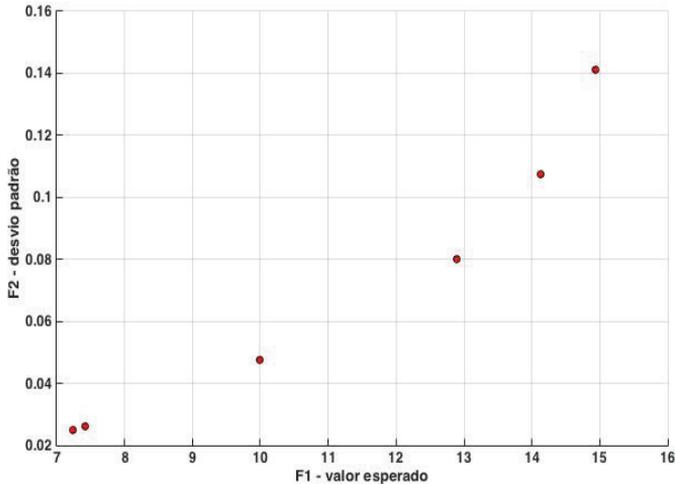


Figura 3.3 Curva de Pareto do cenário C_2 para a primeira frequência natural do sistema com incertezas.

É importante mencionar que os cenários analisados consideram que o desvio padrão das massas, isto é, σ_{m_1} da massa m_1 , e σ_{m_2} da massa m_2 , podem variar até 10% do respectivo valor nominal. Acredita-se que a solução do PC deve divergir da solução determinística quando se aumenta o valor do desvio padrão desses parâmetros incertos, ao mesmo tempo que o desempenho do PC pode ser melhorado ao aumentar a ordem máxima assumida para a expansão ou considerando mais variáveis aleatórias independentes para os parâmetros incertos.

Conclusões

Ao considerar a otimização das frequências naturais de um sistema mecânico, este trabalho lidou com a aplicação do método do Polinômio do Caos para obter as estatísticas das soluções aleatórias associadas a primeira frequência natural do sistema sendo projetado. O projeto assume que as massas estão sujeitas a incertezas e, assim, possuem um desvio padrão máximo conhecido (gerando dois cenários de teste), enquanto se busca determinar os valores das rigidez que permite maximizar a primeira frequência ao mesmo tempo que minimizar o seu desvio padrão.

A partir da aplicação de um AG básico, os parâmetros encontrados para cada cenário de teste permitiram projetar um sistema de dois graus de liberdade com

alto valor para a primeira frequência natural, porém tendo o seu valor reduzido a medida que o projetista busca diminuir o desvio padrão da resposta aleatória.

Assim, os resultados mostram, para ambos os cenários, que o ganho com o aumento da frequência traz prejuízos em relação ao aumento do seu desvio padrão. A vantagem da construção da curva de Pareto é que o projetista pode selecionar o conjunto de valores que melhor representam a realidade do projeto, mesmo com a presença de incertezas.

Como trabalhos futuros pretende-se trabalhar com métodos mais sofisticados para a otimização multiobjetivo e acrescentar outras considerações para o projeto de estruturas reais.

Referências

- BARROS, M. B. *Proposição, avaliação numérica e experimental de um absorvedor dinâmico de vibrações multimodal*. Dissertação (Mestrado – Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2009.
- DARWIN, C. *On the origin of species by means of natural selection*. London: Murray, v. 247, 1859.
- FERRAGUD, F. X. B. *Control predictivo basado en modelos mediante técnica de optimización heurística. Aplicación a procesos no lineales y multivariáveis*. Tese (Doutorado), Universidade Politécnica de Valência, Valência - Espanha, 1999.
- GHANEM, R. G.; SPANOS, P. D. *Stochastic Finite Elements: a Spectral Approach*. Springer-Verlag, 1991.
- GUERINE, A. et al. A polynomial chaos method for the analysis of the dynamic behavior of uncertain gear friction system. *European Journal of Mechanics – A/Solids*, v. 59, p. 76-84, 2016.
- HOLLAND, J. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- INMAN, D. J. *Engineering Vibration*, 4th Edition. Pearson Education Inc, 2013.
- KEWLANI, G.; CRAWFORD, J.; IAGNEMMA, K. A polynomial chaos approach to the analysis of vehicle dynamics under uncertainty. *Vehicle System Dynamics*, v. 50, n. 5, p. 1-26, 2012.

- LOBATO, F. S. *Otimização Multi-objetivo para o Projeto de Sistemas de Engenharia*. Tese (Doutorado – Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2008.
- MACHADO, M. R. *Quantificação de Incertezas e Análise de Confiabilidade em Problemas Mecânicos*. Dissertação (Mestrado – Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2012.
- MÉNDEZ, Y. A. D. *Um Estudo dos Absorvedores Dinâmicos de Vibrações Multimodais*. Dissertação (Mestrado – Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – Campus de Ilha Solteira, Ilha Solteira-SP, 2014.
- PICELLI, P. et al. Evolutionary topology optimization for natural frequency maximization problems considering acoustic-structure interaction. *Finite Elements in Analysis and Design*, v. 106, n. C, p. 56-64, 2015.
- Rajasekaran, S.; Anneta, D.; Choob, Y. S. Optimal locations for heavy lifts for offshore platforms. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, v. 9, n. 6, p. 605-627, 2008.
- VALE, A. R. M. *Controle de vibrações em reatores elétricos através de absorvedores dinâmicos viscoelásticos*. Dissertação (Mestrado – Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2006.
- XIU, D. et al. Performance Evaluation of Generalized Polynomial Chaos. In Sloom, P. M. A., Abramson, D., Bogdanov, A. V., Gorbachev, Y. E., Dongarra, J. J., & Zomaya, A. Y., eds, *International Conference on Computational Science (ICCS 2003)*, p. 346-354, 2003.
- XIU, D.; KARNIADAKIS, G. E. The Wiener-Askey polynomial chaos for stochastic differential equations. *SIAM Journal on Scientific Computing*, v. 24, n. 2, p. 619-644, 2002.
- WANG, D.; FRISWELL, M. I.; LEIC, Y. Maximizing the natural frequency of a beam with an intermediate elastic support. *Journal of Sound and Vibration*, v. 291, p. 1229-1238, 2006.

Modelo para resolver o problema de roteamento com restrições de empacotamento

Lorrany Cristina da Silva¹

Thiago Alves de Queiroz¹

Liliane de Azevedo Oliveira¹

Resumo: Apresenta-se um algoritmo exato do tipo *branch-and-cut* com rotinas de separação para o Problema de Roteamento de Veículos Capacitado com restrições de Empacotamento Bidimensional na versão irrestrita. O algoritmo resolve uma formulação de programação linear inteira relacionada diretamente com o roteamento de veículos, enquanto cortes são inseridos com relação as rotas inviáveis para o empacotamento e para evitar sub-rotas. O algoritmo utiliza o *framework* de otimização do *Gurobi Optimizer*, em que experimentos computacionais foram realizados em instâncias da literatura, além da comparação de resultados.

Palavras-chave: Problema de Roteamento de Veículos com Restrições de Carregamento. Empacotamento Bidimensional. Programação Linear Inteira.

Introdução

Este trabalho resolve o problema de roteamento de veículos com restrições de empacotamento bidimensional definido por Iori, Salazar-González e Vigo (2007) como *Vehicle Routing Problem with Two-Dimensional Loading Constraints* (2L-CVRP). O 2L-CVRP busca por rotas de custo total mínimo para que uma dada frota de veículos de mesma capacidade inicie no depósito, visite clientes e retorne para o depósito, tal que todo cliente seja atendido por uma única rota e uma única vez. Cada rota consiste na alocação de itens retangulares dos clientes

1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade de Matemática e Tecnologia, Laboratório de Pesquisas Avançadas em Matemática Industrial. Contato: cristina_lorrany@yahoo.com.br, lilianeazevedoliveira@hotmail.com, taq@ufg.br.

visitados dentro do veículo, sem que haja a sobreposição entre os itens e os itens estejam inteiramente contidos no veículo. A consideração da versão bidimensional, isto é, por itens retangulares, aparece no contexto de itens que não podem ser empilhados devido a sua fragilidade.

O 2L-CVRP é um problema NP-difícil, pois surge a partir da combinação de dois subproblemas NP-difíceis (GAREY; JOHNSON, 1979), e é comum em empresas de transporte de cargas, tal que há a necessidade por estratégias eficientes de resolução para evitar o uso incorreto dos veículos. O 2L-CVRP foi introduzido por Iori, Salazar-González e Vigo (2007), que apresentaram um modelo de programação linear inteira para resolver a versão sequencial de forma exata por um algoritmo do tipo *Branch-and-Cut* (B&C).

A abordagem mais recente, ao nosso conhecimento, que resolve o problema em estudo usando um algoritmo exato foi apresentada por Hokama, Miyazawa e Xavier (2016). Os autores apresentaram um algoritmo B&C com a proposta de uso de rotinas de separação, já investigadas na literatura, para lidar com o roteamento, além de terem proposto rotinas para lidar com o empacotamento sobre uma malha de pontos. A heurística para o 2L-CVRP mais recente encontrada foi apresentada por Wei et al. (2015), que propuseram uma heurística de busca em vizinhança variável para resolver a versão irrestrita e sequencial do 2L-CVRP.

O estudo de variantes do 2L-CVRP também são encontradas na literatura, em que Malapert et al. (2008) resolveram a versão com restrições de coleta e entrega associada ao carregamento bidimensional (*Two-Dimensional Pickup and Delivery Routing Problem with Loading Constraints* - 2L-PDP). Já Muñoz (2011) lidou com uma variante que considera o custo de movimentação da carga (*Capacitated Vehicle Routing Problem with Two-dimensional Loading Constraints and Handling Costs* - 2L-CVRP-H). Martinez e Amaya (2013) abordaram a versão com janela de tempo, múltiplas viagens e carregamento de itens circulares (*Vehicle Routing Problem with Multi-Trips, Time Windows and Two-Dimensional Circular Loading Constraints* – VRPM-TW-CL).

Por sua vez, Côté, Potvin e Gendreau (2013) consideraram o 2L-CVRP com demanda estocástica, enquanto Khebbache-Hadji et al. (2013) propuseram um modelo para versão com janela do tempo. Leung et al. (2013) e Dominguez et al. (2016) consideraram o 2L-CVRP com frota heterogênea.

Neste trabalho adapta-se a formulação de programação linear inteira proposta por Martinez e Amaya (2013) para resolver o 2L-CVRP irrestrito, em que são adicionadas restrições para eliminar sub-rotas e respeitar a capacidade dos veículos. A resolução do empacotamento em cada rota é feita usando uma relaxação do problema de empacotamento em bins e pela resolução do problema de empacotamento ortogonal bidimensional. Essa abordagem ocorre pelo fato do

empacotamento no 2L-CVRP ser um dos gargalos do problema, assim adiciona-o como planos de corte.

A próxima seção define o 2L-CVRP e descreve a formulação juntamente com as adaptações propostas. Na Seção 2 mostram-se os resultados obtidos com o modelo e as devidas comparações com a literatura. E por fim, na última seção as considerações finais são apresentadas.

1 Formulação para o 2L-CVRP

Dado um grafo não direcionado completo $G = (V^+, E)$, em que V^+ é o conjunto com $n + 2$ vértices, em que os vértices 0 e $n + 1$ correspondente ao depósito (as rotas iniciam e terminam no depósito) e aos clientes são $j = 1, 2, \dots, n$, e E é o conjunto de arestas definido como $E = \{(i, j) : i, j \in V^+, i \neq j, i \neq n + 1, j \neq 0\}$. A cada aresta $(i, j) \in E$ é atribuído um custo não negativo $C_{ij} = C_{ji}$ para percorrê-la. Um conjunto K de veículos idênticos com capacidade de carga P está disponível no depósito, sendo o número de rotas igual ao número de veículos disponíveis. As dimensões retangulares da base do contêiner dos veículos são: L (largura) e A (comprimento) com área total $At = LA$.

Cada cliente j possui um conjunto M_j de itens retangulares, em que o item m do cliente j possui largura l_j^m , comprimento a_j^m e peso p_j^m com $m = 1, 2, \dots, |M_j|$. A área total dos itens pertencentes ao cliente j é $at_j = \sum_{m=1}^{|M_j|} l_j^m \cdot a_j^m$, e o peso total é dado por $pt_j = \sum_{m=1}^{|M_j|} p_j^m$, sendo que a soma do peso total e da área dos itens dos clientes de uma rota não podem exceder a capacidade e as dimensões do veículo, respectivamente. Considera-se que cada cliente só deve ser visitado por um veículo uma única vez com todos os seus itens entregues por completo, ou seja, não é permitida a entrega fracionada.

Ao empacotar os itens, deve-se respeitar as dimensões da base retangular do veículo, sem que haja sobreposição e considerando a orientação fixa, ou seja, os itens não podem ser rotacionados. Além disso, investiga-se a versão irrestrita do 2L-CVRP, a qual considera que o empacotamento dos itens não precisa respeitar a ordem de descarregamento em relação a rota, ou seja, pode ocorrer o remanejamento da carga durante o descarregamento dos itens.

1.1 Modelo adaptado para o 2L-CVRP

Como comentado anteriormente, Martinez e Amaya (2013) apresentaram um modelo de programação linear inteira para VRPM-TW-CL, que pode ser considerada uma versão do 2L-CVRP em que os itens são circulares, há múltiplas viagens e janela de tempo. Assim, adapta-se modelo de tais autores para lidar com a parte de roteamento do 2L-CVRP, em que se assume o uso dos K veículos

disponíveis, a inserção de restrições para eliminar sub-rotas, que foram obtidas de Kara (2010), e planos de corte para resolver o empacotamento bidimensional que surge em cada rota.

Seja w_{ijk} a variável binária que recebe valor 1 se a aresta $(i, j) \in E$ for atravessada pelo o veículo k , caso contrário recebe 0. Seja a variável z_{jk} recebendo o valor 1 se o cliente j é visitado pelo veículo k , caso contrário vale 0. A variável u_j indica a ordem em que o cliente j é visitado na rota. Dado um conjunto S_{inv} de rotas com empacotamento inviável (começam em 0 e terminam em $n + 1$), a formulação para o 2L-CVRP é dada como:

Minimizar

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} \cdot w_{ijk} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in V^+} w_{ijk} = z_{ik}, \quad \forall i \in V \setminus \{0, n+1\}, \quad \forall k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} z_{jk} = 1, \quad \forall j \in V \setminus \{0, n+1\} \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V^+, i \neq h} w_{ihk} = \sum_{j \in V^+, j \neq h} w_{hjk}, \quad \forall k \in K, \quad \forall h \in V \setminus \{0, n+1\} \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V^+ \setminus \{0, n+1\}} w_{0jk} = 1, \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V^+ \setminus \{0, n+1\}} w_{i(n+1)k} = 1, \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$u_i - u_j + P \cdot w_{ijk} + (P - pt_i - pt_j) \cdot w_{ijk} \leq P - pt_j, \quad \forall i, j \in V \setminus \{0, n+1\}, \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{j \in V^+ \setminus \{0, n+1\}} z_{jk} \cdot pt_j \leq P, \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$j \in V^+ \setminus \{0, n+1\} z_{jk} \cdot at_j \leq At, \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$i, j \in S w_{ijk} \leq S - 2, \quad \forall S \in S_{inv}, \quad \forall k \in K \quad (10)$$

$$j \in S z_{jk} \leq S - 2, \quad \forall S \in S_{inv}, \quad \forall k \in K \quad (11)$$

$$w_{ijk} \in \{0,1\}, \quad \forall i,j \in E, \forall k \in K \quad (12)$$

$$z_{jk} \in \{0,1\}, \quad \forall j \in V + \{0, n+1\}, \forall k \in K \quad (13)$$

$$p_{tj} \leq u_j \leq P, \quad \forall j \in V + \{0, n+1\} \quad (14)$$

A função objetivo (1) busca minimizar o custo total associado a construção das rotas. As restrições (2) garantem que haja uma aresta saindo do cliente i para algum cliente j , caso o cliente i esteja na rota feita pelo veículo k , enquanto as restrições em (3) asseguram que o cliente seja visitado uma única vez. As restrições de (4) a (6) estão relacionadas com conservação de fluxo para cada rota e, assim, permitem a utilização do número igual ao de veículos disponíveis. As restrições em (7) servem para eliminar sub-rotas e foram derivadas a partir de Kara (2010), enquanto as restrições (8) e (9) asseguram, respectivamente, que o peso e a área total de carga do veículo não sejam excedidos. As restrições em (10) e (11) garantem rotas satisfazendo o empacotamento dos itens dos clientes. Por fim, as restrições de (12) a (14) expressam o domínio das variáveis, tal que $w_{ijk} = 0$ para toda rota k com $p_{ti} + p_{tj} > P$.

O modelo apresentado permite rota com um único cliente, ou seja, pode-se ter rota do tipo depósito – cliente – depósito, pois as restrições em (5) e (6) são de igualdade, o que obriga a usar todos os veículos disponíveis e, assim, podendo resultar em rotas únicas. Além disso, ao considerar o depósito em 0 e $n + 1$, mesmo as variáveis w_{ijk} que são binárias não impedem que haja rotas com apenas um cliente.

2 Resolução do 2L-CVRP

O modelo apresentado na seção anterior para o 2L-CVRP é resolvido pelo algoritmo B&C do pacote de otimização *Gurobi Optimizer* com as restrições (10) e (11) sendo inseridas via planos de corte, o que resulta inicialmente na realização do roteamento de veículos sem observar a viabilidade do empacotamento. Assim, ao obter uma solução inteira para o modelo, que resulta em um conjunto de rotas, cada rota é analisada para checar a viabilidade do seu empacotamento, sendo as desigualdades em (10) e (11) inseridas para cada rota detectada como inviável.

Para checar a viabilidade do empacotamento, deve-se resolver o problema de empacotamento ortogonal bidimensional (*Two-dimensional Orthogonal Packing Problem* - 2OPP). A viabilidade consiste em checar se os itens dos clientes na rota podem ser organizados sem sobreposição, contidos inteiramente dentro da base do veículo e os lados dos itens devem estar ortogonais (paralelos) aos lados da base do veículo.

As restrições em (15) e (17) fornecem uma formulação para o 2OPP, que compõe a rotina de separação que checa as desigualdades em (10) e (11) para uma dada rota S . Seja $ympq$ uma variável binária que recebe valor 1 se o item m é empacotado por seu canto inferior esquerdo na posição (p,q) , e 0 caso contrário. Seja M o total de itens em uma dada rota S , lm e am a largura e o comprimento do item m em S , respectivamente, e, $minL$ e $minA$ a menor largura e o menor comprimento entre os itens na rota. Essa formulação considera o recipiente discretizado em uma malha de pontos inteira.

$$m \in M, p=0, 1, \dots, L-lm; \quad t-lm+1 \leq p \leq tq=0, 1, \dots, A-am; \quad u-am+1 \leq q \leq u, ympq \leq 1, \\ t=0, 1, \dots, L-minL, \quad u=0, 1, \dots, A-minA \quad (15)$$

$$\{p=0, 1, \dots, L-lm\} \{q=0, 1, \dots, A-am\} ympq=1, \quad \forall m \in M \quad (16)$$

$$ympq \in \{0, 1\}, \quad \forall m \in M; \quad p=0, 1, \dots, L-lm; \quad q=0, 1, \dots, A-am \quad (17)$$

As restrições em (15) garantem que cada ponto (t, u) da malha só pode ser coberto por um único item empacotado em algum outro ponto (p, q) . Já as restrições (16) impõem que todos os itens da rota devem ser empacotados e as restrições em (17) representam o domínio das variáveis.

Antes de resolver o 2OPP, checa-se primeiro a viabilidade do empacotamento a partir da resolução da relaxação nas eqs. (18) a (20) para o *One-dimensional Contiguous Bin Packing Problem* – CBP (SILVA; QUEIROZ; TOLEDO, 2016). Essa relaxação verifica se o empacotamento é inviável e, assim o sendo, adiciona as desigualdades em (10) e (11). Considerando os clientes em S , seja emt uma variável binária que recebe 1 se o item m é empacotado na posição t , e 0 caso contrário. Seja $Dm(S,t)$ os pontos t' da forma que o item m empacotado em t' cobre a coordenada t .

$$m \in M \{t' \in DmS, t: t-am+1 \leq t' \leq t\} am \cdot emt' \leq A, \quad t=0, 1, \dots, A \quad (18)$$

$$t=0, 1, \dots, A-am; \quad emt=1, \quad \forall m \in M \quad (19)$$

$$emt \in \{0, 1\}, \quad \forall m \in M, t=0, 1, \dots, A-am \quad (20)$$

As restrições em (18) garantem que a soma do comprimento dos itens que cobrem a coordenada t seja menor ou igual a A . As restrições em (19) asseguram que todos os itens sejam empacotados em algum ponto na direção do comprimento e as restrições em (20) representam o domínio das variáveis. As restrições (18) a (20) também são consideradas para a largura L .

Assim, a rotina de separação consiste em: para cada solução inteira encontrada pelo B&C, resolve-se primeiramente a formulação relaxada para o CBP. Se a solução é inviável, insere-se diretamente as desigualdades em (10) e (11). Caso a solução seja viável, o 2OPP é resolvido para comprovar se a rota de fato tem empacotamento válido ou se é preciso inserir as desigualdades.

3 Resultados Computacionais

O algoritmo foi codificado em linguagem C++ e os testes computacionais foram realizados em um computador com processador Intel Core i7-4790K de 4.0 GHz, 32 GB de memória RAM e sistema operacional Linux Ubuntu 14.04 LTS. O *framework* do algoritmo B&C utilizado está presente no pacote de otimização *Gurobi Optimizer* na versão 6.5.1.

Experimentos computacionais foram realizados para validar o modelo com 30 instâncias de Iori, Salazar-González e Vigo (2007)². As instâncias possuem o número de clientes variando entre 15 a 21 e o número total de itens M de 15 a 56. As comparações são realizadas com Azevedo (2009) por resolver o 2L-CVRP irrestrito usando um algoritmo B&C também. O custo C_{ij} de cada aresta foi obtido fazendo o cálculo da distância Euclidiana entre os clientes e pegando apenas o valor inteiro.

A Tabela 4.1 traz as informações de cada instância: o nome, a classe, a quantidade de clientes (n), a quantidade total de itens (M); a quantidade de veículos disponíveis (K); os resultados de Azevedo (2009): número de cortes inseridos no empacotamento, tempo gasto em segundos e o valor da solução; os resultados encontrados: número de cortes inseridos pelo CBP e o 2OPP, o tempo total gasto em segundos, na otimização, pelo CBP, pelo 2OPP e pelo roteamento, e o valor da solução obtido. Além disso, tem-se também o GAP (em porcentagem) retornado pelo *Gurobi* e a diferença (em porcentagem) da solução encontrada com a de Azevedo (2009).

Para as 30 instâncias, a formulação foi capaz de encontrar GAP igual a zero para 10 delas. No total, para 22 instâncias teve-se uma diferença percentual de 0%, porém, para 12 delas o GAP ainda é maior do que zero, o que significa que o *Gurobi* não conseguiu provar a otimalidade dentro do tempo limite imposto. Para três instâncias, a diferença percentual teve um valor negativo (solução melhor do que a de Azevedo (2009)), uma vez que se permite rota única, enquanto Azevedo (2009) apenas permite rotas com mais de dois clientes. Além disso, vale destacar que foram encontradas duas soluções (uma ótima e a outra viável) para instâncias que Azevedo (2009) não conseguiu resolver.

2 <http://www.or.deis.unibo.it/>

O tempo computacional gasto por Azevedo (2009) foi, em média, de 372,92 segundos, enquanto a formulação desenvolvida precisou de um tempo de 4.909,51 segundos, em média. Os tempos são reportados apenas para conhecimento, pois as máquinas usadas nos experimentos são diferentes. Notou-se que na maioria das instâncias, o tempo computacional utilizado para o roteamento foi significativamente maior de que o tempo gasto com a parte de empacotamento. Isso ocorre pelo fato do roteamento ser resolvido para só depois ser considerado o empacotamento via planos de corte.

Em média, Azevedo (2009) inseriu 519,93 cortes para o empacotamento, já nos resultados encontrados foi inserido apenas um corte após resolver o 2OPP dada as 30 instâncias. Esse fato se explica pela resolução da relaxação do CBP inicialmente, que é mais rápida e inseriu em média 7,53 cortes por instância.

Tabela 4.1 Comparação com os resultados de Azevedo (2009).

Ins-tância (n x m)	Clas-se	n	M	K	Cort. Emp. Azev.	Tempo Azev.	Solu-ção Azev.	Cor-tes CBP	Cortes 2OPP	Tempo	Tempo CBP	Tempo 2OPP	Tempo Rot.	Solu-ção Encon-trada	GAP (%)	Dife-ren-ça (%)
EO16-03m	1	15	15	3	0	0,63	273	0	0	16,48	0	0,36	16,12	273	0	0
	2	15	24	3	78	4,8	273	3	0	45,12	0,14	24,95	20,03	273	0	0
	3	15	31	3	75	20,11	279	9	0	248,7	7,95	209,1	31,65	279	0	0
	4	15	37	4	0	0,08	277	0	0	85,35	0,42	75,54	9,39	277	0	0
	5	15	45	4	-	5,400	-	0	0	19,58	0,16	13,93	5,49	274	0	-
EO16-05m	1	15	15	5	0	0,36	329	0	0	347,8	0,01	1,23	346,56	329	0	0
	2	15	25	5	0	0,36	329	1	0	592,2	0,15	16,91	575,14	329	0	0
	3	15	31	5	124	7,72	347	6	0	835,7	0,49	17,21	818	347	0	0
	4	15	40	5	0	0,45	329	1	0	681,6	0,59	82,62	598,39	329	0	0
	5	15	48	5	0	16,33	329	0	0	412,9	0,26	11,04	401,6	329	0	0
EO21-04m	1	20	20	6	0	1,76	351	0	0	7,200	0,24	2,95	7,196,81	351	4,56	0
	2	20	29	5	10,245	42,59	381	146	0	7,200	1,36	187,4	7,011,24	381	9,45	0
	3	20	46	5	3,954	223,45	387	7	0	7,200	10,37	22,42	7,167,21	383	10,7	-1,04
	4	20	44	5	-	5,400	-	7	0	7,200	6,18	118,3	7,075,52	360	4,44	-
	5	20	49	5	0	0,22	369	0	0	7,200	0,51	21,86	7,177,63	354	3,67	-4,24
EO21-06m	1	20	20	4	0	0,26	423	0	0	7,200	0,01	1,45	7,198,54	423	13	0
	2	20	32	6	0	0,24	423	8	0	7,200	0,34	27,71	7,171,95	423	13,47	0
	3	20	43	6	0	0,32	423	0	0	7,200	0,37	31,45	7,168,18	423	12,53	0
	4	20	50	6	43	54,49	488	4	0	7,200	3,29	182,2	7,014,51	488	16,67	0

Continua

Tabela 4.1 Comparação com os resultados de Azevedo (2009). (Continuação)

Ins-tância (n xm)	Clas-se	n	M	K	Cort. Emp. Azev.	Tempo Azev.	Solu-ção Azev.	Cor-tes CBP	Cortes 2OPP	Tempo	Tempo 2OPP	Tempo Rot.	Solu-ção Encon-trada	GAP (%)	Dife-ren-ça (%)
	5	20	62	6	0	1,13	423	0	0	7.200	0,87	7.198,26	423	12,29	0
E022-O4g	1	21	21	4	0	0,14	367	0	0	7.200	0,02	7.197,96	367	4,9	0
	2	21	31	4	0	0,12	367	0	0	7.200	0,1	7.168,55	367	3,81	0
	3	21	37	4	12	0,38	373	8	0	7.200	135,2	7.062,53	373	4,56	0
	4	21	41	4	6	3,32	377	11	0	7.200	11,63	6.710,17	377	5,83	0
	5	21	57	5	0	0,11	389	0	0	7.200	0,57	7.165,04	381	3,41	-2,1
E022-O6m	1	21	21	6	0	1,05	488	0	0	7.200	0,01	7.198,56	488	19,45	0
	2	21	33	6	4	1,35	488	2	0	7.200	0,19	7.179,5	489	20,45	0,2
	3	21	40	6	11	3,74	489	8	1	7.200	0,92	6.545,48	491	19,15	0,41
	4	21	57	6	6	1,13	489	5	0	7.200	12,72	6.796,28	497	21,13	1,61
	5	21	56	6	0	1	488	0	0	7.200	0,8	7.163,84	488	18,65	0
				Média:	519,93	372,92		7,53		4.909,51					

Considerações finais

Neste trabalho foi abordado o problema de roteamento de veículos capacitado com restrições de empacotamento bidimensional (2L-CVRP), o qual surgiu a partir da integração de dois outros problemas de otimização combinatória. Neste estudo foi apresentado um modelo adaptado a partir da formulação de Martinez e Amaya (2013), em que se adicionam restrições de capacidade, eliminação de sub-rotas e rotinas de separação para checar a viabilidade do empacotamento. A vantagem em checar a viabilidade do empacotamento antes de realizar o empacotamento é permitir a redução do esforço computacional, o que é fundamental para abordagens exatas.

Os experimentos computacionais foram realizados em 30 instâncias da literatura e os resultados comparados com Azevedo (2009). O modelo desenvolvido conseguiu a solução ótima para 10 instâncias (GAP e diferença iguais a zero), além de encontrar solução viável para todas as demais instâncias dentro do tempo computacional imposto, sendo que Azevedo (2009) não encontrou solução para duas delas. Também, o modelo conseguiu obter solução melhor para 3 instâncias uma vez que permitiu rotas com um único cliente.

Trabalhos futuros devem focar na resolução da versão sequencial do problema, pelo qual não é permitido remanejamento de itens. Também, devem ser investigados outros modelos da literatura para resolver o problema.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG).

Referências

- AZEVEDO, B. L. P. *Uma abordagem exata para o problema de roteamento de veículos capacitados com restrições bidimensionais de carregamento*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, Brasil, 2009.
- CÔTÉ, J. F.; POTVIN, J. Y.; GENDREAU, M. *The vehicle routing problem with stochastic two-dimensional items*. Technical Report CIRRELT 2013-84, 2013.

- DOMINGUEZ, O. et al. Using biased randomization for solving the two-dimensional loading vehicle routing problem with heterogeneous fleet. *Annals of Operations Research*, v. 236, n. 2, p. 383-404, 2016.
- GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. *Computers and Intractability: A guide to the theory of NP-completeness*. San Francisco: Freeman, 1979.
- HOKAMA, P.; MIYAZAWA, F. K.; XAVIER, E. C. A branch-and-cut approach for the vehicle routing problem with loading constraints. *Expert Systems with Applications*, v. 47, p. 1-13, 2016.
- IORI, M.; SALAZAR-GONZÁLEZ, J.; VIGO, D. An exact approach for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. *Transportation Science*, v. 41, n. 2, p. 253-264, 2007.
- KARA, I. Tightening Bounding Constraints of the Miller-Tucker-Zemlin Based Formulation of the Capacitated Vehicle Routing Problems and Some Extensions, In: *Proceeding of the 2nd International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems*, Panait, C. et al., WSEAS Press, Constança, Romênia, p.137-142, 2010.
- KHEBBACHE-HADJI, S. et al. Heuristics and memetic algorithm for the two-dimensional loading capacitated vehicle routing problem with time windows. *Central European Journal of Operations Research*, v. 21, n. 2, p. 307-336, 2013.
- LEUNG, S. C. H. et al. A meta-heuristic algorithm for heterogeneous fleet vehicle routing problems with two-dimensional loading constraints. *European Journal of Operational Research*, v. 225, n. 2, p. 199-210, 2013.
- MALAPERT, A. A. et al. Two-dimensional pickup and delivery routing problem with loading constraints. In: *Proceedings of the First CPAIOR Workshop on Bin Packing and Placement Constraints (BPPC'08)*, p. 1-46, 2008.
- MARTINEZ, L.; AMAYA, C. A. A vehicle routing problem with multi-trips and time windows for circular items. *Journal of the Operational Research Society*, v. 64, n. 11, p. 1630-1643, 2013.
- MUÑOZ, A. L. *Solución al problema de ruteo de vehículos con restricciones de capacidad y reordenamiento de carga en los sitios de demanda*. Dissertação

(Mestrado) — Escuela de Ingenieria, Pontificia Universidad Catolica de Chile, Santiago, Chile, 2011.

SILVA, L. C.; QUEIROZ, T. A.; TOLEDO, F. M. B. Abordagem para o problema de roteamento de veículos com empacotamento bidimensional. In: XLVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Vitória – ES, p. 1-12, 2016.

WEI, L. et al. A variable neighborhood search for the capacitated vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints. *European Journal of Operational Research*, v. 243, n. 3, p. 798-814, 2015.

Modelo de programação por restrições para o problema de empacotamento ortogonal tridimensional

Oliviana Xavier do Nascimento¹
Liliane de Azevedo Oliveira¹

Thiago Alves de Queiroz¹

Resumo: O Problema de Empacotamento Ortogonal em três dimensões (largura, altura e profundidade) tem por objetivo decidir se todas as caixas de um conjunto cabem dentro de um recipiente sem que elas se sobreponham. Para este problema, o presente trabalho apresenta um modelo de programação por restrições que o resolve. O modelo não busca pela melhor solução para o problema e sim por uma que seja viável. Além disso, utiliza-se um mecanismo, baseado nos pontos de discretização, para diminuir o número de variáveis do modelo que é testado sobre várias instâncias da literatura.

Palavras-chave: Problema de Empacotamento Ortogonal Tridimensional. Programação por Restrições. Pontos de Discretização.

Introdução

Os problemas de empacotamento visam, como o próprio nome sugere, empacotar itens dentro de recipientes. Tais problemas podem ser tratados em uma ou mais dimensões e sob variados escopos. Dentre estes problemas há um tipo que se propõem a decidir se um conjunto de itens pode ser empacotado sem que os itens ocupem a mesma posição no recipiente, ou seja, sem que ocorra sobreposição,

¹ Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: olivianaxn@gmail.com, lilianeazevedoliveira@hotmail.com, taq@ufg.br.

com os itens inteiramente contidos no recipiente e com os itens empacotados com os seus lados paralelos aos lados do recipiente. Este é chamado de Problema de Empacotamento Ortogonal (OPP).

O OPP e suas versões bi- e tridimensional são problemas recorrentes no contexto industrial. Eles aparecem no carregamento de mercadorias em contêineres, caminhões e outros veículos de carga, no empilhamento de caixas sobre paletes, no corte de bobinas de papel, placas de madeira (indústria moveleira) ou placas e barras de aço (indústria siderúrgica). Isso justifica o estudo do OPP e de suas versões do ponto de vista aplicado.

No OPP a decisão com relação a um conjunto de itens ser empacotado é tomada verificando se existe, para a cada item, um ponto no recipiente no qual ele é empacotado satisfazendo as restrições impostas. Se estes pontos existirem, há uma solução viável para o caso em questão, se não, ele é considerado inviável.

Neste artigo, o OPP é tratado na sua versão tridimensional (3OPP), que considera largura, altura e profundidade e os itens como sendo caixas. O 3OPP é resolvido por meio de um modelo de programação por restrições, sendo antes realizado um teste para verificar se o volume total das caixas excede o volume do recipiente. Além disso, foram utilizados os pontos de discretização de Herz (1972) para diminuir o número de variáveis do problema.

A técnica de programação por restrições se fundamenta em variáveis e restrições. As variáveis representam as decisões do problema e as restrições determinam os valores que tais variáveis podem receber. Assim, esta técnica procura uma atribuição de valores para as variáveis que satisfaça todas as restrições definidas. Sobre a programação por restrições, Tavares (2000) pontuou que ela é uma técnica que se mostrou eficaz para a resolução de problemas intratáveis quando se recorreu a outras técnicas.

No que diz respeito a complexidade computacional, o 3OPP é NP-completo, o que significa a pouca provável existência de um algoritmo determinístico cujo o tempo de solução seja uma função polinomial do tamanho da entrada (GAREY; JOHNSON, 1979). Assim, usar a programação por restrições para resolver o problema é uma alternativa perante às formulações inteiras que geralmente demandam muito tempo para encontrar uma solução.

Em uma formulação inteira para o 3OPP, as variáveis estão relacionadas com todas as posições onde os itens podem ser empacotados e o método de resolução percorre uma árvore de enumeração para achar uma solução viável. Já em um modelo de programação por restrições, observa-se diretamente o domínio assumido para as variáveis que representam as posições para empacotar os itens. Diferente do método de resolução usado pela programação inteira, na programação por restrições não se lida com variáveis reais.

Na literatura o 3OPP foi resolvido por Fekete, Schepers e Veen (2007). Tais autores propuseram uma abordagem válida tanto para duas quanto para três dimensões, sendo baseada em grafos de intervalo utilizados para obter classes de empacotamentos viáveis. Clautiaux et al. (2008) e Mesyagutov, Scheithauer e Belov (2012) resolveram a versão bidimensional do OPP usando programação por restrições e os resultados foram bons quando comparados com outros resultados da literatura.

Este artigo está organizado da seguinte maneira: na Seção 1, o 3OPP é caracterizado, além de ser definido o teste de viabilidade, o modelo de programação por restrições e a estrutura do algoritmo usado para resolvê-lo. A Seção 2 mostra como foram realizados os experimentos computacionais, em que instâncias foram adaptadas da literatura, além de apresentar e discutir os resultados. Por fim, apresentam-se as conclusões e direções para trabalhos futuros.

1 O Problema de Empacotamento Ortogonal Tridimensional

O Problema de Empacotamento Ortogonal Tridimensional, o 3OPP, considera como instância I um par (V, R) , no qual $V = \{1, \dots, m\}$ é um conjunto de caixas que devem ser empacotadas em R , sendo $R = (L, P, A)$ um recipiente de largura L , profundidade P e altura A . Cada caixa i de V possui largura l_i , profundidade p_i e altura a_i , com $l_i, p_i, a_i \in \mathbb{N}$. O sistema de referência adotado se dá em termos dos eixos x , y e z , que representam, respectivamente, largura, profundidade e altura.

Dada uma instância do 3OPP, o objetivo é verificar se todas as caixas de V podem ser empacotadas em R sem que ocorra sobreposição entre quaisquer caixas, além disso as caixas devem estar todas contidas em R e devem ser organizadas de maneira ortogonal aos lados de R . Se isso é verificado, então há uma solução para a instância I .

1.1 Teste de inviabilidade

De acordo com Belov et al. (2009), se o volume total dos itens excede o volume do recipiente, o empacotamento não é possível. Ainda de acordo os autores, esta verificação consiste em um limitante para o problema e permite verificar rapidamente se o empacotamento é inviável.

Isso é importante, pois, não existindo empacotamento possível e tal fato podendo ser identificado de maneira bastante rápida, evita-se a resolução do modelo de programação por restrições.

1.2 Modelo de programação por restrições

A principal restrição envolvendo o 3OPP é a que garante a não sobreposição das caixas. Em um modelo de programação por restrições para o problema, esta restrição pode ser definida sobre as variáveis X_i , Y_i e Z_i . Elas representam o ponto (X_i, Y_i, Z_i) onde a caixa i é empacotada com relação a seu canto inferior frontal esquerdo. A essas variáveis são associados os respectivos domínios: $Dom(X_i) = \{0, 1, 2, \dots, L - l_i\}$, $Dom(Y_i) = \{0, 1, 2, \dots, P - p_i\}$ e $Dom(Z_i) = \{0, 1, 2, \dots, A - a_i\}$. Tais domínios garantem que as caixas não ultrapassem os limites definidos pelas dimensões do recipiente.

Os domínios podem ser reduzidos usando os pontos de discretização de Herz (1972), obtidos a partir da combinação cônica entre as dimensões dos itens. Com este mecanismo, pontos redundantes para empacotar os itens podem ser descartados dos domínios das variáveis de decisão. O modelo de programação por restrições possui, então, uma restrição definida para cada par de caixas i e j , qual seja:

$$\begin{aligned} X_i + l_i &\leq X_j \vee X_j + l_j \leq X_i \vee \\ Y_i + p_i &\leq Y_j \vee Y_j + p_j \leq Y_i \vee \\ Z_i + a_i &\leq Z_j \vee Z_j + a_j \leq Z_i \end{aligned} \quad (1)$$

A restrição (1) garante que a caixa i é empacotada a esquerda, atrás ou abaixo da caixa j (e vice-versa). Deste modo, a restrição (1), uma vez definida para todo par de caixas i e j , evita que as caixas se sobreponham no recipiente.

1.3 Algoritmo proposto

O algoritmo para resolver o 3OPP primeiro considera uma instância para o problema e computa os pontos de discretização de Herz (1972), que contribuem para diminuir o número de variáveis. Em seguida, realiza-se o teste de inviabilidade, baseado no volume das caixas e do recipiente. Caso o volume total das caixas seja maior que o volume do recipiente, não existe solução para a instância considerada. Caso ocorra o contrário, o modelo de programação por restrições é chamado para resolver o problema e, se existe um conjunto de pontos (X_i, Y_i, Z_i) tais que as caixas são empacotadas sem gerar sobreposição com quaisquer outras caixas, diz-se que há uma solução viável para a instância, caso contrário, a instância é considerada inviável. A Figura 5.1 ilustra o algoritmo.

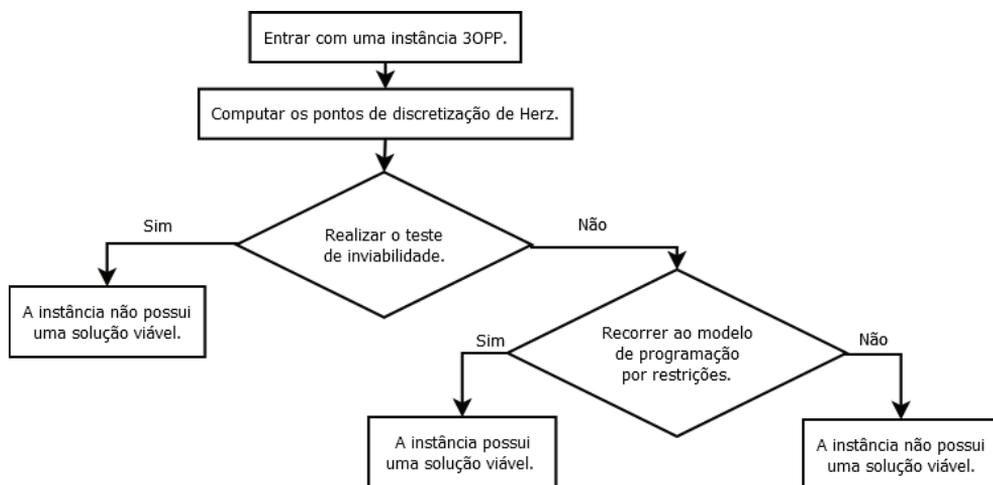


Figura 5.1 Algoritmo para resolver o 3OPP.

2 Experimentos Computacionais

O algoritmo apresentado para o 3OPP foi codificado na linguagem C++ e usando as classes e bibliotecas do IBM ILOG CPLEX Optimization Studio (IBM, 2014). Os experimentos ocorreram em um computador com processador Intel Core i5-3570 de 3,40 GHz, 8 GB de memória RAM e sistema operacional Linux.

Os experimentos foram realizados com instâncias contendo 10 e 20 caixas, recipientes de tamanho 10, 20 e 30 e caixas pequenas e grandes em relação ao tamanho do recipiente. Estas instâncias foram usadas por Junqueira, Morabito e Yamashita (2012) para resolver o problema de Carregamento em um Único Contêiner. Como aqui o problema tratado é o 3OPP, foram considerados, nas instâncias, somente os parâmetros que dizem respeito a este problema, que são: o número de itens, o tamanho do recipiente e o tamanho dos itens.

Na identificação das instâncias, n10, n20 e n30 representam que o tamanho do recipiente considerado na instância possui tamanho 10, 20 e 30, respectivamente; m10 e m20 representam o número de itens, sendo eles 10 e 20; b2d1 representa que as caixas são pequenas em relação ao recipiente e b2d2 que as caixas são grandes.

As Tabelas de 1 a 5 trazem os resultados para um conjunto de 50 instâncias adaptadas para o 3OPP, nas quais as caixas são consideradas pequenas em relação ao tamanho do recipiente. Elas mostram o nome da instância, se existe uma solução viável para a instância e o tempo, em segundos, gasto para obter a resposta. Os resultados obtidos mostram que todas as instâncias são viáveis, sendo resolvidas muito rapidamente.

Tabela 5.1 Resultados para instâncias com recipiente de tamanho 10 e 10 caixas pequenas.

Instância	Viável?	Tempo (s)
n10m10b2d1-01	Sim	0,012
n10m10b2d1-02	Sim	0,012
n10m10b2d1-03	Sim	0,013
n10m10b2d1-04	Sim	0,012
n10m10b2d1-05	Sim	0,011
n10m10b2d1-06	Sim	0,011
n10m10b2d1-07	Sim	0,013
n10m10b2d1-08	Sim	0,011
n10m10b2d1-09	Sim	0,013
n10m10b2d1-10	Sim	0,012

Tabela 5.2 Resultados para instâncias com recipiente de tamanho 10 e 20 caixas pequenas.

Instância	Viável?	Tempo (s)
n10m20b2d1-01	Sim	0,031
n10m20b2d1-02	Sim	0,024
n10m20b2d1-03	Sim	0,023
n10m20b2d1-04	Sim	0,048
n10m20b2d1-05	Sim	0,029
n10m20b2d1-06	Sim	0,025
n10m20b2d1-07	Sim	0,029
n10m20b2d1-08	Sim	0,032
n10m20b2d1-09	Sim	0,031
n10m20b2d1-10	Sim	0,034

Tabela 5.3 Resultados para instâncias com recipiente de tamanho 20 e 10 caixas pequenas.

Instância	Viável?	Tempo
n20m10b2d1-01	Sim	0,014
n20m10b2d1-02	Sim	0,012
n20m10b2d1-03	Sim	0,016
n20m10b2d1-04	Sim	0,013
n20m10b2d1-05	Sim	0,01
n20m10b2d1-06	Sim	0,015
n20m10b2d1-07	Sim	0,015
n20m10b2d1-08	Sim	0,012
n20m10b2d1-09	Sim	0,012
n20m10b2d1-10	Sim	0,012

Tabela 5.4 Resultados para instâncias com recipiente de tamanho 20 e 20 caixas pequenas.

Instância	Viável?	Tempo
n20m20b2d1-01	Sim	0,033
n20m20b2d1-02	Sim	0,036
n20m20b2d1-03	Sim	0,093
n20m20b2d1-04	Sim	0,033
n20m20b2d1-05	Sim	0,03
n20m20b2d1-06	Sim	0,041
n20m20b2d1-07	Sim	0,052
n20m20b2d1-08	Sim	0,049
n20m20b2d1-09	Sim	0,025
n20m20b2d1-10	Sim	0,034

Tabela 5.5 Resultados para instâncias com recipiente de tamanho 30 e 10 caixas pequenas.

Instância	Viável?	Tempo
n30m10b2d1-01	Sim	0,014
n30m10b2d1-02	Sim	0,011
n30m10b2d1-03	Sim	0,012
n30m10b2d1-04	Sim	0,011
n30m10b2d1-05	Sim	0,013
n30m10b2d1-06	Sim	0,011
n30m10b2d1-07	Sim	0,015
n30m10b2d1-08	Sim	0,015
n30m10b2d1-09	Sim	0,013
n30m10b2d1-10	Sim	0,013

As Tabelas de 6 a 10 trazem os resultados para um conjunto de 30 instâncias para o 3OPP, nas quais as caixas são consideradas grandes em relação ao tamanho do recipiente. Elas mostram o nome da instância, se existe uma solução viável e o tempo, em segundos, gasto para obter a resposta. Os resultados obtidos mostram que a maioria dessas instâncias são inviáveis, ou seja, não é possível empacotar todas as caixas.

Observa-se ainda que o tempo gasto para decidir que as instâncias são inviáveis foi menor do que o tempo gasto para mostrar a viabilidade do empacotamento. Isto se deve ao teste de inviabilidade, que evita resolver o problema pelo modelo de programação por restrições para os casos em que as caixas são grandes e excedem o volume do recipiente, assim resultando em um tempo menor de resolução.

Tabela 5.6 Resultados para instâncias com recipiente de tamanho 10 e 10 caixas grandes.

Instância	Viável?	Tempo
n10m10b2d2-01	Não	0,111
n10m10b2d2-02	Não	0,012
n10m10b2d2-03	Sim	0,018
n10m10b2d2-04	Sim	0,015

Continua

Tabela 5.6 Resultados para instâncias com recipiente de tamanho 10 e 10 caixas grandes. *(Continuação)*

Instância	Viável?	Tempo
n10m10b2d2-05	Sim	0,013
n10m10b2d2-06	Sim	0,022
n10m10b2d2-07	Sim	0,017
n10m10b2d2-08	Não	0,071
n10m10b2d2-09	Não	0,077
n10m10b2d2-10	Não	0,019

Tabela 5.7 Resultados para instâncias com recipiente de tamanho 10 e 20 caixas grandes.

Instância	Viável?	Tempo
n10m20b2d2-01	Não	<0,001
n10m20b2d2-02	Não	<0,001
n10m20b2d2-03	Não	<0,001
n10m20b2d2-04	Não	<0,001
n10m20b2d2-05	Não	<0,001
n10m20b2d2-06	Não	<0,001
n10m20b2d2-07	Não	<0,001
n10m20b2d2-08	Não	<0,001
n10m20b2d2-09	Não	0,011
n10m20b2d2-10	Não	<0,001

Tabela 5.8 Resultados para instâncias com recipiente de tamanho 20 e 10 caixas grandes.

Instância	Viável?	Tempo
n20m10b2d2-01	Não	<0,001
n10m20b2d2-02	Não	0,002
n10m20b2d2-03	Não	<0,001
n10m20b2d2-04	Não	<0,001

Continua

Tabela 5.8 Resultados para instâncias com recipiente de tamanho 20 e 10 caixas grandes. (Continuação)

Instância	Viável?	Tempo
n10m20b2d2-05	Não	<0,073
n10m20b2d2-06	Não	<0,001
n10m20b2d2-07	Não	<0,108
n10m20b2d2-08	Não	<0,001
n10m20b2d2-09	Não	<0,001
n10m20b2d2-10	Não	<0,001

Tabela 5.9 Resultados para instâncias com recipiente de tamanho 30 e 10 caixas grandes.

Instância	Viável?	Tempo
n30m10b2d2-01	Não	<0,001
n30m10b2d2-02	Não	<0,001
n30m10b2d2-03	Não	<0,001
n30m10b2d2-04	Não	<0,001
n30m10b2d2-05	Não	<0,001
n30m10b2d2-06	Não	<0,001
n30m10b2d2-07	Não	<0,001
n30m10b2d2-08	Não	<0,001
n30m10b2d2-09	Não	<0,001
n30m10b2d2-10	Não	<0,001

Tabela 5.10 Resultados para instâncias com recipiente de tamanho 30 e 10 caixas grandes.

Instância	Viável?	Tempo
n30m20b2d2-01	Não	<0,001
n30m20b2d2-02	Não	<0,001
n30m20b2d2-03	Não	<0,001
n30m20b2d2-04	Não	<0,001

Contunua

Tabela 5.10 Resultados para instâncias com recipiente de tamanho 30 e 10 caixas grandes. (Continuação)

Instância	Viável?	Tempo
n30m20b2d2-05	Não	<0,001
n30m20b2d2-06	Não	<0,001
n30m20b2d2-07	Não	<0,001
n30m20b2d2-08	Não	<0,001
n30m20b2d2-09	Não	<0,001
n30m20b2d2-10	Não	<0,001

Conclusões

Neste artigo foi usada uma abordagem para resolver o 3OPP que inicialmente checa se o volume total das caixas é maior do que o volume do recipiente, em um teste para detectar rapidamente casos inviáveis. Caso o volume total das caixas seja menor ou igual ao volume do recipiente, significa que a instância pode ser viável e isto é checado, em seguida, por meio de um modelo de programação por restrições. O modelo considera o domínio das variáveis reduzido por meio dos pontos de discretização de Herz (1972).

Os resultados computacionais foram satisfatórios, pois foi possível resolver todas as instâncias em pouco tempo computacional. Eles confirmam que realizar o teste de inviabilidade é um mecanismo que torna o modelo mais rápido para as instâncias inviáveis. Para os casos resolvidos neste artigo, a diferença de tempo entre os casos viáveis e inviáveis é bem pequena. Mas, dependendo da instância, realizar o teste de inviabilidade pode representar uma diferença de tempo considerável. Quanto ao modelo de programação por restrições, este se mostrou eficaz na resolução das instâncias consideradas, uma vez que retornou com a solução em pouco tempo de processamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG).

Referências

- BELOV, G. et al. One-dimensional relaxations and lp bounds for orthogonal packing. *International Transactions in Operational Research*, v.16, p. 745 – 766, 2009.
- CLAUTIAUX, F. et al. A new constraint programming approach for the orthogonal packing problem. *European Journal of Operational Research*, v. 95, n.3, p. 944-959, 2008.
- FEKETE, S. P.; SCHEPERS, J; VEEN, J.C. van der. An exact algorithm for higher-dimensional orthogonal packing. *Operations Research*, v. 55, n. 3, p. 569-587, 2007.
- GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. *Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness*. San Francisco: Freeman, 1979.
- HERZ, J. C. A recursive computational procedure for two-dimensional stock-cutting. *IBM Journal of Research Development*, p. 462-469, 1972.
- JUNQUEIRA, L.; MORABITO, R.; YAMASHITA, D. S. Three-dimensional container loading models with cargo stability and load bearing constraints. *Computers & Operations Research*, v. 39, n. 1, p. 74 – 85, 2012.
- MESYAGUTOV, M.; SCHEITHAUER, G.; BELOV, G. Lp bounds in various constraint programming approaches for orthogonal packing. *European Journal of Operational Research*, v. 39, n. 10, p. 2425-2438, 2012.
- TAVARES, J. A. *Geração de configurações de sistemas industriais com o recurso à tecnologia das restrições e computação evolucionária*. Tese (Doutorado) — Tese de doutorado em Informática. Universidade de Minho, Braga, Portugal, 2000.

Heurística baseada na vida de algas com aplicação no problema de localização e roteamento

Kamyla Maria Ferreira¹

Thiago Alves de Queiroz¹

Resumo: Este trabalho trata da resolução do problema integrado de localização de instalações e roteamento de veículos capacitado, em que tanto os veículos quanto os depósitos são limitados em capacidade. A resolução do problema é feita pela aplicação do algoritmo artificial de algas, com o objetivo de minimizar o custo total relacionado com as decisões de localizar os depósitos e determinar rotas para entregar mercadorias aos clientes. A heurística desenvolvida é composta por três fases, quais sejam: movimento helicoidal, operação de reprodução e operação de adaptação. Experimentos computacionais foram realizados para testar o desempenho do algoritmo, em que as análises foram feitas a partir da comparação com resultados da literatura.¹

Palavras-chave: Problema de Localização e Roteamento. Algoritmo Artificial de Algas. Heurística.

Introdução

O foco deste trabalho é estudar o problema integrado de localização e roteamento, uma vez que no ramo logístico torna-se importante tomar decisões que minimizem o custo total relacionado com a localização de depósitos e a determinação de rotas para a distribuição das mercadorias aos clientes. O Problema de Localização e Roteamento (PLR) é uma combinação de dois problemas de otimização, o Problema de Localização de Instalações e o Problema de Roteamento de

¹ Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: kamylamaarria@gmail.com; taq@ufg.br.

Veículos, os quais são considerados NP-difíceis conforme Garey e Johnson (1979) e, assim, segue que o PLR também é NP-difícil.

O problema de localização de instalações consiste em definir quais instalações (depósitos, armazéns, fábricas, centros de distribuição, etc.) devem ser abertas para atender a demanda de clientes, de modo que o custo total de abertura seja mínimo. O problema de roteamento de veículos almeja traçar rotas de veículos para realizar a entrega de mercadorias aos clientes, com o intuito de minimizar o custo total de percorrer as rotas para atender toda a demanda dos clientes. A junção desses dois problemas resulta no PLR, que possui aplicações na área de distribuição de mercadorias (PERL; DASKIN, 1985), coleta de resíduos (KULCAR, 1996), projeto de rede óptica (LEE et al., 2003), distribuição de bens de consumo (AKSEN; ALTINKEMER, 2008), fornecimento de alimentos perecíveis (GOVINDAN et al., 2014), entre outros.

A resolução do PLR por algoritmos exatos, que retornam a solução ótima, foi realizada nos trabalhos de Laporte e Nobert (1981), que propuseram um algoritmo *branch-and-bound*, Belenguer et al. (2011), que desenvolveram um algoritmo do tipo *branch-and-cut*, Contardo, Cordeau e Gendron (2014a), que utilizaram um algoritmo *branch-and-cut-and-price*, e Ponboon, Qureshi e Taniguchi (2016), que desenvolveram um algoritmo *branch-and-price*.

As heurísticas, que embora não garantam a solução ótima, mas consomem baixo tempo computacional, para resolver o PLR, podem ser encontradas em Yu et al. (2010) e Zhang et al. (2014), que propuseram heurísticas baseadas no método de Recozimento Simulado, Contardo, Cordeau e Gendron (2014b), que desenvolveram uma heurística híbrida envolvendo o GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) combinada com a resolução de modelos de programação inteira, Marinakis (2015), que utilizou uma heurística de exame de partículas, e Koç et al. (2016), que desenvolveram um algoritmo híbrido de busca evolucionária.

Embora o uso de heurísticas seja adequado para aplicações reais, elas possuem parâmetros de entrada, os quais influenciam na convergência para boas soluções. A obtenção dos parâmetros pode ser feita manualmente ou com base na utilização de métodos de configuração automática. Um método desenvolvido por López-Ibáñez et al. (2011), denominado *irace* (*Iterated Race for Automatic Algorithm Configuration*), encontra as configurações mais adequadas para os parâmetros a partir de um conjunto de instâncias, intervalos válidos para os parâmetros e da função a ser avaliada.

Vários estudos sobre PLR e suas variantes foram desenvolvidos recentemente. Conforme Prodhon e Prins (2014), entre os anos de 2007 e 2013 foram publicados cerca de 72 artigos sobre o PLR e suas diferentes versões. Diante disto, este trabalho busca contribuir com a literatura do PLR na sua variante capacitada, a

partir da aplicação do algoritmo artificial de algas, em que a calibração dos parâmetros é feita utilizando um método de configuração automática. Além disso, os resultados obtidos pela heurística devem ser comparados com outros da literatura a fim de mostrar a qualidade da heurística desenvolvida.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a próxima seção traz uma breve revisão da literatura sobre o PLR. A seção 2 caracteriza o PLR e mostra como o algoritmo artificial de algas foi adaptado para resolvê-lo. A seção 3 traz os experimentos computacionais sobre instâncias da literatura, sendo que conclusões e direções para trabalhos futuros são dados em seguida.

1 Estado-da-arte sobre o PLR

Laporte e Nobert (1981) abordaram o problema de localização e roteamento tratado por um algoritmo do tipo *branch-and-bound*. A formulação do problema foi através de um modelo linear inteiro, cuja versão consistia em definir uma única instalação sujeita a um número de veículos fixo. Além disso, o comprimento das rotas não possuía restrições. A validação do método foi dada por intermédio de um conjunto de instâncias randômicos variando de 20 a 50 cidades.

Tuzun e Burke (1999) estudaram a versão do PLR cujas rotas são capacitadas e os depósitos incapacitados, isto é, as demandas dos clientes em uma rota não podem ultrapassar a capacidade do veículo, enquanto que o depósito pode atender demandas ilimitadas. O problema foi resolvido por meio da abordagem de busca Tabu em duas fases sobre vários níveis de decisão. Os testes computacionais foram realizados em 36 instâncias, as quais são compostas por 100, 150 ou 200 clientes, com 10 ou 20 locais de depósitos.

Albareda-Sambola, Díaz e Fernández (2005) desenvolveram para o PLR um algoritmo de busca Tabu com rotinas para o aperfeiçoamento das rotas e realizar a diversificação com relação aos depósitos abertos. Os autores também resolveram uma formulação compacta para encontrar um conjunto de caminhos em uma rede auxiliar. Para realizar a validação do algoritmo, os autores geraram algumas instâncias aleatoriamente, contendo no máximo 30 clientes.

Escobar e Linfati (2012) resolveram o PLR capacitado por meio de uma heurística baseada no recozimento simulado e na busca granular. Os experimentos computacionais foram realizados em dois conjuntos de instâncias da literatura, sendo compostos por clientes variando no intervalo de 20 a 200 e os depósitos de 5 a 20. Os resultados obtidos mostraram que a heurística desenvolvida é eficiente, com soluções de qualidade sendo obtidas dentro de um tempo computacional aceitável para aplicações práticas.

Jarboui et al. (2013) desenvolveram uma heurística inspirada na busca em vizinhança variável para resolver o PLR. Na versão do problema estudado, cada

veículo é responsável por realizar apenas uma rota estando associado somente a um depósito. A validação do algoritmo foi efetuada experimentalmente por meio de um conjunto de 79 instâncias, com o número de clientes variando de 20 a 200 e as instalações de 5 a 20.

Mais recentemente, Koç et al. (2016) desenvolveram um algoritmo híbrido de busca evolucionária para resolver o PLR com frota heterogênea e janela de tempo. Os experimentos computacionais foram realizados em um conjunto de 56 instâncias com 100 clientes e 10 depósitos, mostrando que o algoritmo é eficiente na resolução do problema.

Lopes, Ferreira e Santos (2016) propuseram um algoritmo genético híbrido para resolver a versão capacitada do PLR. Para comprovar a eficiência da heurística, testes computacionais foram realizados sobre 85 instâncias da literatura, as quais são compostas por clientes variando de 20 a 200 e de 5 a 20 depósitos. Os resultados mostraram que a heurística desenvolvida é capaz de resolver problemas práticos em um tempo computacional baixo.

Ponboon, Qureshi e Taniguchi (2016) desenvolveram um algoritmo exato do tipo *branch-and-price* para resolver o PLR com janela de tempo. Segundo os autores, ainda não havia trabalhos relacionados com a aplicação de algoritmos exatos para a resolução desta versão do PLR. A validação do algoritmo foi feita por intermédio de testes computacionais em três grupos de instâncias (com depósitos de capacidade pequena, média e grande) mostrando que o algoritmo proposto é eficiente na resolução do problema.

2 Caracterização do problema e da heurística

Esta seção traz a definição do problema integrado de localização de instalações e roteamento de veículos. Em seguida, apresenta-se uma descrição do algoritmo artificial de algas desenvolvido.

2.1 Descrição do PLR

Conforme Prins et al. (2007), a variante capacitada do PLR pode ser definida em um grafo não-orientado $G = (V, E)$, tal que V representa o conjunto de vértices (ou nós), composto pelo subconjunto de depósitos $I = \{1, 2, \dots, m\}$ e pelo subconjunto de clientes $J = \{1 + m, 2 + m, \dots, n + m\}$, e E representa todas as arestas que ligam dois nós de V , com exceção de arestas que conectam depósito com depósito. Cada aresta $(i, j) \in E$ tem uma distância/custo dada por $c_{ij} > 0$. Além disso, cada cliente $j \in J$ tem demanda d_j que deve ser atendida por um único veículo e uma única vez. Cada depósito $i \in I$ tem capacidade máxima de distribuição W_i e custo de instalação O_i .

Existe um conjunto de K veículos idênticos, cada um com capacidade máxima de carga Q . Para cada veículo utilizado por um depósito, incorre um custo fixo F , sendo que um veículo só pode executar uma única rota. Cada rota começa e termina no mesmo depósito, tal que a capacidade Q do veículo não pode ser excedida. Também, um depósito pode ter mais de uma rota, todavia a sua capacidade de distribuição deve ser respeitada. O objetivo é minimizar o custo total incorrido da instalação de depósitos, das rotas partindo dos depósitos e do uso dos veículos, tal que as restrições mencionadas devem ser atendidas.

2.2 Descrição do algoritmo artificial de algas

O Algoritmo Artificial de Algas (AAA - *Artificial Algae Algorithm*) para o PLR capacitado, denominado por AAAPLR, desenvolvido neste trabalho, segue a estrutura do algoritmo proposto por Uymaz, Tezel e Yel (2015). Algumas adaptações foram realizadas, uma vez que o AAA foi apresentado para problemas contínuos de maximização.

O Algoritmo Artificial de Algas (AAA) simula a vida das algas que consiste: em seu modo de mover/nadar, dado por um movimento helicoidal; adaptação a novos ambientes; e, a reprodução por divisão mitótica. Assim, o algoritmo é composto por três fases principais: movimento helicoidal, adaptação e reprodução. O Algoritmo 1 apresenta a estrutura completa do AAAPLR, que possui 7 parâmetros de entrada, quais sejam:

- P_a : probabilidade de aplicar a operação de adaptação;
- I_{iter} : número máximo de iterações;
- N_n : quantidade de colônias de algas;
- e : taxa de perda de energia;
- P : penalidade aplicada quando ocorre violação da capacidade do depósito;
- f_c : força de cisalhamento; e,
- ε : tolerância.

No início do Algoritmo 1, gera-se uma população inicial \mathbf{z} , dada por uma matriz de ordem $N_n \times L$, em que cada linha representa um grupo de algas que vivem juntas, denominado de colônia. A quantidade de algas em uma colônia é dada na eq. (2.1).

$$L = N + M + N_{zero} \quad (2.1)$$

em que N é a quantidade de cliente, M é o numero de depósitos e N_{zero} corresponde a quantidade mínima de veículos (ou rotas) necessária para tender a demanda de todos os clientes. O N_{zero} é utilizado para terminar as rotas, auxiliando na obtenção de soluções melhores, uma vez sem os zeros as rotas só seriam

terminadas quando a capacidade do veículo fosse atingida. Porém, ao considerar os zeros as rotas podem ser rescindidas com qualquer quantidade de demanda inferior a capacidade de carga Q do veículo. O cálculo do N_{ZERO} é dado por:

$$N_{ZERO} = \left\lceil \frac{\sum_{j=1}^N d_j}{Q} \right\rceil \quad (2.2)$$

Algoritmo 1 – Estrutura Geral do AAAPLR.

Entrada: $P_a, I_{iter}, N_n, e, P, f_c, \varepsilon$

- 1 Gerar a população Z com as colônias de algas iniciais;
 - 2 $T_t \leftarrow 1, \quad t = 1, 2, \dots, N_n;$
 - 3 $Ap_t \leftarrow 0, \quad t = 1, 2, \dots, N_n;$
 - 4 $I \leftarrow 0, \quad Fbest \leftarrow \min(F(Z, P));$
 - 5 **Enquanto** $I \neq I_{iter}$ **faça**
 - 6 $E_t \leftarrow \left\lceil \frac{N_n}{T_t} \right\rceil, \quad w_t \leftarrow 2\pi \left(\frac{\sqrt{3T_t}}{\sqrt{4\pi}} \right)^2, \quad t = 1, 2, \dots, N_n;$
 - 7 **para** $t = 1$ **até** N_n **faça**
 - 8 $nf \leftarrow True;$
 - 9 **Enquanto** $E_t \geq 0$ **faça**
 - 10 $Y \leftarrow$ Aplicar o **Movimento Helicoidal** em $Z_t;$
 - 11 $E_t \leftarrow E_t - e/2;$
 - 12 **Se** $F(Y, P) < F(Z_t, P)$ **então**
 - 13 $F(Z_t, P) \leftarrow F(Y, P); \quad Z_t \leftarrow Y; \quad nf \leftarrow False;$
 - 14 **Senão** $E_t \leftarrow E_t - e/2;$
 - 15 **Se** $nf = True$ **então** $Ap_t \leftarrow Ap_t + 1;$
 - 16 $T_t \leftarrow T_t + T_t \frac{F(Z_t, P)}{T_t + F(Z_t, P)}, \quad t = 1, 2, \dots, N_n;$
 - 17 Aplicar a **Operação de Reprodução** em $Z;$
 - 18 Gerar um número aleatório $r;$
 - 19 **Se** $r < P_a$ **então** Aplicar a **Operação de Adaptação** em $Z;$
 - 20 $I \leftarrow I + 1;$
 - 21 **Se** $erro < \varepsilon$ **então** $I \leftarrow I_{iter} + 1;$
- Saida:** Colônia Z_t com menor valor de $F(Z_t, P)$.

Para gerar a solução inicial, usa-se um procedimento aleatório descrito na subseção 2.2.2. Posteriormente, atribuem-se os valores iniciais do tamanho da população (T_t) e a aptidão, sendo que Ap_t corresponde a aptidão de uma colônia

de alga e está relacionado com a melhora ou piora do valor da função objetivo. O tamanho da população representa as condições de vida das algas, tal que quando as algas estão em condições de vida perfeita, elas vão reproduzir e aumentar de tamanho.

Em seguida, calcula-se a energia da população fazendo o número de algas na colônia sobre o seu tamanho, assim quanto menor o tamanho da colônia tt , maior deve ser a sua energia. O próximo passo é a aplicação do movimento helicoidal, o qual busca movimentar as colônias em direção a colônia com melhor valor de função objetivo. O movimento helicoidal ocorre em três dimensões para cada colônia. Dessa forma, três algas da colônia são selecionadas de forma aleatória e as suas posições são modificadas conforme as eqs. (2.3) a (2.5), respectivamente,

$$z_{tv} = z_{tv} + (z_{qv} - z_{tv})(f_c - w_t)\rho, \quad (2.3)$$

$$z_{tw} = z_{tw} + (z_{qw} - z_{tw})(f_c - w_t)\cos(\alpha), \quad (2.4)$$

$$z_{tl} = z_{tl} + (z_{ql} - z_{tl})(f_c - w_t)\sin(\beta), \quad (2.5)$$

sendo que v, w e l são números inteiros escolhidos aleatoriamente entre o intervalo $[1, L]$; q corresponde a uma colônia vizinha escolhida de forma aleatória entre $[1, N]$; ρ é um número real que varia no intervalo $[-1, 1]$; e, por fim, α e β estão no intervalo de $[0, 2\pi]$.

Após a geração da nova solução Y , realiza-se a avaliação da mesma, assim a solução Y é aceita se $F(Y, P) < F(z_t, P)$. Quando a energia de todas as colônias acaba, atualiza-se o tamanho T_t da colônia t e, então, a solução Z é submetida a operação de reprodução. Quando as algas recebem nutrientes e luz em quantidades adequadas, elas crescem e se reproduzem rapidamente, caso contrário, com baixos índices de nutrientes e luz, as algas sobrevivem até um certo período de tempo e, posteriormente, morrem. Assim, no AAA, a colônia z_t fica maior ao se mover em direção a solução mais eficiente, ou seja, com melhor valor de função objetivo, sendo este processo apresentado nas eqs. (2.6) a (2.8),

$$alga_maior = \max_{t=1,2,\dots,N_t} (T_t), \quad (2.6)$$

$$alga_menor = \min_{t=1,2,\dots,N_t} (T_t), \quad (2.7)$$

$$alga_maior_i = alga_menor_i, \quad i = 1, 2, \dots, L. \quad (2.8)$$

Em seguida, no caso de um número aleatório r ser menor do que P_a , aplica-se a operação de adaptação, na qual as colônias que não podem crescer o suficiente tentam se adaptar ao ambiente. A adaptação é o processo em que uma colônia busca se assemelhar a melhor colônia da população. O movimento de adaptação consiste em escolher a colônia d com maior Ap e adaptá-la conforme as eqs. (2.9) e (2.10),

$$z_d = \max_{t=1,2,\dots,N_t} (Ap_t), \quad (2.9)$$

$$z_{di} = z_{di} + (alga_menor_i - z_{di})r_2, \text{ se } r < P_a, \quad i = 1, 2, \dots, L. \quad (2.10)$$

O algoritmo chega ao fim quando o erro relativo (*erro*) for menor do que um parâmetro ϵ ou quando I_{iter} iterações são executadas. O erro relativo é dado por:

$$erro = \sqrt{\sum (F(z_{ant_t}, P) - F(z_t, P))^2}. \quad (2.11)$$

2.2.1 Função de avaliação

Uma solução Y é avaliada pela função $F(Y, P)$ a ser minimizada, sendo que seu cálculo é dado por:

$$\sum_{i \in I} o_i y_i + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ijk} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} F x_{ijk} + P \sum_{i \in I} A(i), \quad (2.12)$$

em que a primeira parcela desta função corresponde ao custo de abertura do depósito, enquanto que a segunda está associada ao custo das rotas, que consiste na distância percorrida para cada rota. A terceira parcela está relacionada com o custo fixo de utilizar os veículos e, por fim, há uma última parcela associada a penalidade aplicada ao excesso de demanda do depósito, isto é, toda vez que a capacidade do depósito for ultrapassada, o valor excedido é multiplicado por um fator P .

A ideia é que a heurística convirja, ao passar das iterações, para soluções que respeitem a capacidade dos depósitos abertos, visto que pagar a penalidade torna a solução não atrativa. Para realizar o cálculo da penalidade, seja $D(i)$ a diferença entre a soma da demanda dos clientes j atendidos pelo depósito i pela capacidade do depósito i . Logo, $A(i) = \max(0, D(i))^2$.

2.2.2 População inicial

A população inicial é gerada de forma aleatória conforme o Algoritmo 2, que inicialmente gera uma matriz com a sequência de números de 1 até $N + M$, além de considerar os N_{zero} . Em seguida, cada linha da matriz passa por um embaralhamento (*shuffle*) de forma aleatória, o que fornece uma solução para o PLR.

Algoritmo 2 – Rotina para gerar a solução inicial.

```

1 para  $i = 0$  até  $N_n$  faça
2   para  $j = 0$  até  $N + M$  faça
3      $z[i][j] = j + 1$ ;
4 para  $i = 0$  até  $N_n$  faça
5   shuffle( $z^T[i]$ );

```

Saída: População Z .

3 Experimentos Computacionais

A heurística AAAPLR foi codificada em linguagem *Python*. Os testes computacionais foram realizados em um computador com processador Intel Core i7-4790K de 4 GHz, 32 GB de memória RAM e sistema operacional Linux Ubuntu 14.04 LTS. A solução de cada instância foi obtida a partir da realização de uma única execução da heurística.

Os parâmetros iniciais da heurística foram calibrados pelo pacote *irace*, em que somente o valor de ϵ e P não foram calibrados. O ϵ foi tomado fixo em 10^{-10} , uma vez que ele está relacionado com um dos critérios de parada, tal que um valor alto pode resultar em convergência prematura. O valor de P foi determinado para ser $200(\sum O_i / \sum W_i)$. Após a calibração dos parâmetros, obteve-se: $I_{iter} = 4941$, $N_n = 88$, $f_c = 9$, $e = 0,16$, $P_a = 0,47$ e semente igual a 491.

A validação da heurística ocorreu de forma numérica com experimentos sobre 27 instâncias da literatura. As instâncias escolhidas fazem parte do conjunto proposto por Barreto (2004) e Prins, Prodhon e Calvo (2006). As instâncias possuem as informações do número de clientes e de depósitos disponíveis, coordenadas para os clientes, coordenadas para os depósitos, capacidade do veículo, capacidade do depósito, demanda dos clientes, custo de abertura para os depósitos e custo de utilização de um veículo.

As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam os resultados obtidos para as instâncias de Barreto (2004) e Prins, Prodhon e Calvo (2006), respectivamente. As tabelas contêm as informações: quantidade de clientes n e depósitos m ; valor da melhor

solução conhecida (*BKS - Best Known Solution*), obtida a partir dos trabalhos dos autores apresentados na própria tabela; soluções encontradas por outros três métodos: SALRP de Yu et al. (2010), MACO de Ting e Chen (2013) e GRAS-P+ILP de Contardo, Cordeau e Gendron (2014b); valor da solução encontrado pela heurística AAAPLR e o respectivo tempo gasto em segundos; o número de avaliações da função objetivo; e, a diferença relativa (GAP em porcentagem) entre o valor da solução encontrada e a melhor solução conhecida.

A Tabela 3.1 sumariza os resultados obtidos para as instâncias de Barreto (2004). Ao analisar o GAP, percebe-se que o AAAPLR não apresentou um desempenho satisfatório, uma vez que a diferença relativa, por exemplo, da instância Gaspelle5 (32x5) foi maior do que 21%. O tempo computacional médio foi de 611,47 segundos e o GAP médio foi de 11,06%, sendo superior aos resultados dos demais métodos da literatura.

Tabela 6.1 Resultados para as instâncias de Barreto (2004).

Instância (nxm)	BKS	SALRP		GRASP+ILP		MACO		AAALPR				
		Solu- ção	GAP (%)	Solu- ção	GAP (%)	Solu- ção	GAP (%)	Solu- ção	Avaliações da Função	CPU	GAP (%)	
Gaspelle (21x5)	424,90	424,90	0,00	424,90	0,00	424,90	0,00	441,27	160549	456,12	3,85	
Gaspelle2 (22x5)	585,10	585,10	0,00	585,10	0,00	585,10	0,00	591,04	172319	487,67	1,02	
Gaspelle3 (29x5)	512,10	512,10	0,00	512,10	0,00	512,10	0,00	604,47	170505	580,45	18,04	
Gaspelle4 (32x5)	562,20	562,20	0,00	562,22	0,00	562,22	0,00	633,10	191420	715,74	12,61	
Gaspelle5 (32x5)	504,30	504,30	0,00	504,30	0,00	504,30	0,00	611,82	178411	653,59	21,32	
Gaspelle6 (36x5)	460,40	460,40	0,00	460,40	0,00	460,40	0,00	495,23	179731	717,38	7,56	
Min27 (27x5)	3062,00	3062,00	0,00	3062,00	0,00	3062,00	0,00	3460,99	200394	669,34	13,03	
Média Global			0,00		0,00		0,00				611,47	11,06

Na Tabela 3.2 é possível observar que a solução BKS não foi encontrada para nenhuma das instâncias. As instâncias com 20 clientes e 5 depósitos apresentaram o menor GAP comparada com as demais instâncias, contudo a heurística desenvolvida não conseguiu obter nenhum resultado melhor do que os algoritmos SALRP, MACO e GRASP+ILP. O tempo de execução médio para estas instâncias foi de 346,86 segundos. Para as instâncias com 5 depósitos e 50 clientes, obteve-se uma diferença relativa média de 20,86%, com tempo computacional médio de 1.615,61 segundos.

Para as instâncias com 100 clientes e 5 depósitos, encontrou-se uma solução com uma diferença relativa de 35,32%, sendo a diferença média dessas instâncias igual a 25,28%, um valor superior ao dos outros métodos da literatura. Por fim, tem-se as instâncias com 100 clientes e 10 depósitos, cujos resultados tiveram um GAP médio superior a 20%. O GAP médio considerando todas as instâncias foi de 18,16%, enquanto o tempo computacional médio foi de 2.666,49 segundos.

Tabela 6.2 Resultados para as instâncias de Prins, Prodhon e Calvo (2006).

Ins-tância (nxm)	BKS	SALRP		GRASP+ILP		MACO		AAALPR			
		Solu-ção	GAP (%)	Solu-ção	GAP (%)	Solu-ção	GAP (%)	Solu-ção	Avaliações da Função	CPU	GAP (%)
20-5-1 (20x5)	54793	54793	0,00	54793	0,00	54793	0,00	55021	169277	146,74	0,42
20-5-1b (20x5)	39104	39104	0,00	39104	0,00	39104	0,00	39492	183541	362,53	0,99
20-5-2 (20x5)	48908	48908	0,00	48908	0,00	48908	0,00	49199	165139	463,49	0,59
20-5-2b (20x5)	37542	37542	0,00	37542	0,00	37542	0,00	37611	155285	414,69	0,18
Média			0,00		0,00		0,00		306789	346,86	0,55
50-5-1 (50x5)	90111	90111	0,00	90111	0,00	90111	0,00	98752		1615,65	9,59
50-5-1b (50x5)	63242	63242	0,00	63242	0,00	63242	0,00	82428	299272	1620,41	30,34
50-5-2 (50x5)	88298	88298	0,00	88298	0,00	88298	0,00	100594	259717	1510,81	13,93
50-5-2b (50x5)	67308	67308	0,00	67373	0,10	67308	0,00	78187	362308	1938,02	16,16

Continua

Tabela 6.2 Resultados para as instâncias de Prins, Prodton e Calvo (2006). (Continuação)

Ins-tância (nxm)	BKS	SALRP		GRASP+ILP		MACO		AAALPR			
		Solu-ção	GAP (%)	Solu-ção	GAP (%)	Solu-ção	GAP (%)	Solu-ção	Avaliações da Função	CPU	GAP (%)
50-5-2bIS (50x5)	84055	84055	0,00	84055	0,00	84055	0,00	93411	314884	1637,55	11,13
50-5-2BIS (50x5)	51822	51822	0,00	51883	0,12	51822	0,00	67950	284508	1622,94	31,12
50-5-3 (50x5)	86203	86203	0,00	86203	0,00	86203	0,00	98561	267430	1539,59	14,34
50-5-3b (50x5)	61830	61830	0,00	61830	0,00	61830	0,00	75087	267545	1437,94	21,44
Média			0,00		0,03		0,00		556626	1615,61	18,51
100-5-1 (100x5)	275419	275419	0,00	275457	0,01	276220	0,29	324134		6042,23	17,69
100-5-1b (100x5)	213615	213615	0,00	214056	0,21	214323	0,33	269311	508285	4462,82	26,07
100-5-2 (100x5)	193671	193671	0,00	193708	0,02	194441	0,40	226837	430290	4301,37	17,12
100-5-2b (100x5)	157095	157150	0,04	157178	0,05	157222	0,08	204900	655479	5428,07	30,43

Continua

Tabela 6.2 Resultados para as instâncias de Priins, Prodhon e Calvo (2006). (Continuação)

Ins-tância (n _x m)	SALRP		GRASP+ILP		MACO		AAALPR			
	Solu-ção	GAP (%)	Solu-ção	GAP (%)	Solu-ção	GAP (%)	Solu-ção	Avaliações da Função	CPU	GAP (%)
100-5-3 (100x5)	200079	0,00	200339	0,13	201038	0,48	250141	502081	5352,65	25,02
100-5-3b (100x5)	152441	0,00	152466	0,02	152722	0,18	206286	471314	3995,80	35,32
Média		0,01		0,07		0,29			4930,49	25,28
100-10-1 (100x10)	287983	0,03	287892	0,00	291134	1,13	357387	422355	4039,64	24,14
100-10-1b (100x10)	231763	0,00	234080	1,00	235348	1,55	318044	568922	5394,80	37,23
Média		0,02		0,50		1,34			4717,22	30,68
Média Global		0,00		0,08		0,22			2666,49	18,16

Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho apresentou o algoritmo artificial de algas para resolver o problema integrado de localização e roteamento. Considerou-se a versão capacitada do problema, em que os depósitos e os veículos têm capacidade limitada. A heurística desenvolvida parte da estrutura proposta por Uymaz, Tezel e Yel (2015), com a proposta de adaptações nos parâmetros e nas operações de reprodução e adaptação de forma a ser aplicada no PLR.

A heurística foi testada em 27 instâncias de dois autores diferentes, tal que para pequenas instâncias ela apresentou um desempenho satisfatório. Por outro lado, a heurística teve resultados ruins para instâncias grandes, tendo um desempenho geral além do esperado. Assim, para as instâncias de Prins, Prodhon e Calvo (2006), o GAP médio foi de 18,16% e o tempo computacional médio foi de 2.666,49 segundos, sendo as maiores instâncias compostas por 100 clientes e 10 depósitos. Para as sete instâncias avaliadas de Barreto (2004), o GAP médio foi de 11,06% com um tempo computacional médio de 611,47 segundos.

Trabalhos futuros desta pesquisa visam estudar os parâmetros iniciais da heurística, em especial o e e a fórmula para calcular a energia das colônias, uma vez que a energia impacta no número de aplicações da função helicoidal. Além disso, objetiva-se desenvolver alguns operadores para ajudar a explorar melhor o espaço de busca, visto que ao longo dos experimentos, notou-se que a heurística fica estagnada em possíveis ótimos locais.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG).

Referências

- AKSEN, D.; ALTINKEMER, K. A location-routing problem for the conversion to the “click-and-mortar” retailing: The static case. *European Journal of Operational Research*, v. 186, n. 2, p. 554-575, 2008.
- ALBAREDA-SAMBOLA, M.; DÍAZ, J. A.; FERNÁNDEZ, E. A compact model and tight bounds for a combined location-routing problem. *Computers & Operations Research*, v. 32, n. 3, p. 407-428, 2005.

- BARRETO, S. S. *Análise e Modelização de Problemas de Localização-Distribuição*. Tese (Doutorado) – Gestão Industrial, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2004.
- BELENGUER, J.-M. et al. A branch-and-cut method for the capacitated location-routing problem. *Computers & Operations Research*, v. 38, n. 6, p. 931-941, 2011.
- CONTARDO, C.; CORDEAU, J.-F.; GENDRON, B. An exact algorithm based on cut-and-column generation for the capacitated location-routing problem. *INFORMS Journal on Computing*, v. 26, n. 1, p. 88-102, 2014a.
- CONTARDO, C.; CORDEAU, J.-F.; GENDRON, B. A GRASP + ILP-based metaheuristic for the capacitated location-routing problem. *Journal of Heuristics*, v. 20, n. 1, p. 1-38, 2014b.
- ESCOBAR, J. W.; LINFATI, R. Un algoritmo metaheurístico basado en recocido simulado con espacio de búsqueda granular para el problema de localización y ruteo con restricciones de capacidad. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, v. 11, n. 21, p. 139-150, 2012.
- GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. *Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness*. San Francisco: Freeman, 1979.
- GOVINDAN, K. et al. Two-echelon multiple-vehicle location-routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food. *International Journal of Production Economics*, v. 152, n. 1, p. 9-8, 2014.
- JARBOUI, B. et al. Variable neighborhood search for location routing. *Computers & Operations Research*, v. 40, n. 1, p. 47-57, 2013.
- KOÇ, Ç. et al. The fleet size and mix location-routing problem with time windows: Formulations and a heuristic algorithm. *European Journal of Operational Research*, v. 248, n. 1, p. 33-51, 2016.
- KULCAR, T. Optimizing solid waste collection in brussels. *European Journal of Operational Research*, v. 90, n. 1, p. 71-77, 1996.
- LAPORTE, G.; NOBERT, Y. An exact algorithm for minimizing routing and operating costs in depot location. *European Journal of Operational Research*, v. 6, n. 2, p. 224-226, 1981.

- LEE, Y. et al. A location-routing problem in designing optical internet access with wdm systems. *Photonic Network Communications*, v. 6, n. 2, p. 151-160, 2003.
- LÓPEZ-IBÁÑEZ, M. et al. *The irace package, Iterated Race for Automatic Algorithm Configuration*. Relatório Técnico, 2011.
- LOPES, R. B.; FERREIRA, C.; SANTOS, B. S. A simple and effective evolutionary algorithm for the capacitated location-routing problem. *Computers & Operations Research*, v. 70, p. 155-162, 2016.
- MARINAKIS, Y. An improved particle swarm optimization algorithm for the capacitated location routing problem and for the location routing problem with stochastic demands. *Applied Soft Computing*, v. 37, p. 680-701, 2015.
- PERL, J.; DASKIN, M. S. A warehouse location-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 19, n. 5, p. 381-396, 1985.
- PONBOON, S.; QURESHI, A. G.; TANIGUCHI, E. Branch-and-price algorithm for the location-routing problem with time windows. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 86, p. 1-19, 2016.
- PRINS, C. et al. Solving the capacitated location-routing problem by a cooperative lagrangean relaxation-granular tabu search heuristic. *Transportation Science*, v. 41, n. 4, p. 470-483, 2007.
- PRINS, C. C.; PRODHON, C.; CALVO, R. W. Solving the capacitated location routing problem by a grasp complemented by a learning process and a path relinking. *4OR: A Quarterly Journal of Operations Research*, v. 4, n. 3, p. 221-238, 2006.
- PRODHON, C.; PRINS, C. A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, v. 238, p. 1-17, 2014.
- TING, C.-J.; CHEN, C.-H. A multiple ant colony optimization algorithm for the capacitated location routing problem. *International Journal of Production Economics*, v. 141, n. 1, p. 34-44, 2013.
- TUZUN, D.; BURKE, L. I. A two-phase tabu search approach to the location routing problem. *European Journal of Operational Research*, v. 116, p. 87-99, 1999.

UYMAZ, S. A.; TEZEL, G.; YEL, E. Artificial Algae Algorithm (AAA) for nonlinear global optimization. *Applied Soft Computing*, v. 31, p. 153-171, 2015.

YU, V. F. et al. A simulated annealing heuristic for the capacitated location routing problem. *Computers & Industrial Engineering*, v. 58, p. 288-299, 2010.

ZHANG, Y. et al. Hybrid metaheuristic solutions to inventory location routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 70, p. 305-323, 2014.

Aplicação de modelo de regressão na antropometria da mão

Bruno Alves Maia¹

Guilherme Ferreira Neto³

Bruno Rodrigues de Oliveira²

Marcelo Henrique Stoppa⁴

Resumo: Visando melhorar a qualidade de vida de crianças e adolescentes, surgiram projetos que disponibilizam gratuitamente arquivos de membros artificiais que podem ser confeccionados utilizando Manufatura Aditiva comumente conhecida por impressão 3D. Devido à falta de dados referentes ao tamanho da mão de crianças e adolescentes, não existem padrão nem um sistema de classificação relativo ao tamanho das próteses disponibilizadas. Este trabalho busca encontrar a relação entre alguma medida antropométrica da pessoa com a mão, para que, na falta dos dois membros, o indivíduo possa ter próteses adequadas às suas características. Primeiro foi considerado a idade para esta estimativa, posteriormente a estatura, sendo que a segunda medida apresentou resultados satisfatórios.

Palavras-chave: Prótese de mão. Membro superior. Regressão.

Introdução

Membros artificiais são usados desde o início da humanidade. As próteses mais antigas que atualmente se têm conhecimento, pertencem à civilização egípcia

-
- 1 Mestrando do programa de Modelagem e Otimização da Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão. Contato: brnomaia@gmail.com
 - 2 Instituto Federal do Triângulo Mineiro – IFTM. Campus Paracatu, Professor EBTT Eletrônica – Controle e Automação. Mestrando POSMOT Universidade Federal de Goiás – UFG, Regional Catalão. Contato: brunorodrigues@iftm.edu.br
 - 3 Mestrando do programa de Modelagem e Otimização da Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão. Contato: guilhermefneto@gmail.com
 - 4 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: mhstoppa@pq.cnpq.br

(THURSTON,2007). Dentre esses membros artificiais, o mais antigo é datado aproximadamente entre 1295 e 664 a.C. e se trata de uma réplica do dedão do pé direito de uma mulher (CHOI, 2007). Somente em 500 a.C. é que houve registro de um membro artificial. O registro se refere a Hegestratus, um prisioneiro que conseguiu fugir de suas correntes, cortando seu pé e substituindo o mesmo posteriormente por uma peça de madeira (BELLIS, 2016).

As principais funções de membros artificiais são, sua funcionalidade, estética e antigamente possuía um sentido psíquico-espiritual de totalidade (THURSTON, 2007). A função psíquico-espiritual pode ser observada em culturas antigas, como a egípcia por exemplo. Eles acreditavam que quando uma pessoa era enterrada faltando alguma parte do corpo, ela começaria uma nova vida sem esse membro. Membros artificiais foram encontrados anexados em múmias com detalhes delicados e sem sinais de desgaste. Tais evidências sugerem que as substituições foram realizadas quando a pessoa não estava mais viva, sendo então, um preparativo da múmia para sua vida futura (NERLICH et al., 2000).

A estética dos membros artificiais impacta nas relações interpessoais. As pessoas acreditam que não são aceitas pela sociedade se não possuir “todos os membros” e estes não forem esteticamente iguais aos reais. Para amenizar essa insegurança, em 1949 foi desenvolvida uma luva estética pela APRL (do inglês: *Army Prosthetics Research Laboratory*). Desde então foram realizadas pesquisas e aprimoramentos na estética dos membros artificiais (WILSON, 1992). As luvas atuais conseguem reproduzir detalhes como unhas, nervuras, pelos e articulações com a aparência e sensação muito próximas do natural.

As próteses de membro superior são divididas em quatro classes principais, a saber: prótese passiva; prótese mecânica; prótese mioelétrica e prótese híbrida. **Próteses Passivas:** possuem apenas a função estética, não realizando nenhum movimento. **Próteses Mecânicas:** utilizam o movimento do corpo para controlar o dispositivo através de um sistema de cabos. **Próteses Mioelétricas:** tem seus movimentos controlados por sensores de sinais eletromiográficos (EMG), essa tecnologia produz os movimentos próximos da mão humana e será explicada posteriormente. **Próteses Híbridas:** são a combinação das próteses mecânicas e mioelétricas. As três últimas classes podem apresentar como dispositivo terminal mãos ou ganchos (WRIGHT et al., 2001).

Sistemas de controle mioelétrico utilizam o sistema neuromuscular existente para o acionamento e controle de mecanismos. O controle é feito por meio de sensores EMG (BILLOCK, 1986). A eletromiografia permite a avaliação contínua dos nervos colocando eletrodos dentro ou próximos de músculos específicos (LIEBERMAN, 2008). Os sinais EMG estão sendo investigados para analisar e melhorar o esporte, a arte e o desempenho ocupacional. Existe uma vasta área

de aplicação destes sinais, incluindo, mas não se limitando ao controle de exoesqueletos, próteses de braço e mãos robotizadas (BOYALI; HASHIMOTO, 2016).

Membros artificiais em geral, são caros e há pouca informação sobre a sua relação custo-benefício, em especial sobre próteses de membro superior (WRIGHT et al., 2003). Membros superiores artificiais custam no exterior entre \$ 4.000 e \$ 75.000 (RESNIK et al., 2012). O valor é influenciado por algumas características como ponto de amputação, estética, funcionalidade e o modo de controle, que pode ser mecânico ou mioelétrico (ZUNIGA et al., 2015).

As próteses infantis precisam ser resistentes, baratas e fáceis de reparar, caso eventualmente seja danificada, além de possuir uma estrutura robusta, mas que não afete sua funcionalidade. O fato de usar um membro artificial não deve impedir a criança de executar as atividades cotidianas, e sim estimular a prática diária e de novas descobertas. A idade juntamente com aspectos sociais e a personalidade influenciam a criança na escolha de um modelo de prótese (BURN; TA; GOGOLA, 2016).

A opção mais viável para crianças era as próteses mecânicas de gancho, devido principalmente ao preço. Embora funcionais, estes dispositivos nem sempre são muito bem recebidos, devido a sua aparência. De forma geral, as próteses não se adaptam ao crescimento da criança. Portanto é necessário constantemente realizar ajustes ou substituições (ZUNIGA et al., 2015).

Os principais problemas enfrentados com relação a membros artificiais para crianças, são atualmente o alto custo e a falta de opções de tamanho. O custo, vem sendo minimizado com a popularização de impressoras 3D. Essa popularização, juntamente com avanço dos softwares de Desenho Assistido por Computador CAD (do inglês: *Computer Aided Design*), proporcionaram uma onda de interesse no desenvolvimento de membros artificiais de baixo custo (BURN; TA; GOGOLA, 2016).

A manufatura aditiva, mais conhecida por impressão 3D, vem conseguindo reduzir o custo das próteses, tornando possível até mesmo confeccioná-las em casa. Existem inúmeros projetos que procuram desenvolver novos membros artificiais, principalmente voltados para crianças. Os arquivos dos projetos estão sendo disponibilizados pela internet de forma gratuita. Porém os projetos, são geralmente voltados para casos específicos.

Devido a individualidade dos projetos, normalmente é necessário realizar adaptações, para que a prótese possa ser utilizada por outra criança. A falta de dados e parâmetros, são os responsáveis por não haver padrões nem classificação das dimensões dos membros artificiais. Sabendo dos novos desafios e do recente cenário das próteses de membro superior para crianças, o objetivo deste trabalho é estudar a antropometria da mão e verificar a existência de relação entre algum dado da criança ou adolescente com as dimensões da mão.

1 Desenvolvimento

Nesta seção, é apresentado o procedimento utilizado na escolha da variável que será posteriormente utilizada para estimar as medidas da mão, e também, exhibe as características antropométricas do membro superior de adultos.

1.1 Escolha da variável antropométrica

O intuito deste trabalho é desenvolver uma forma de estimar o tamanho da mão de uma criança ou adolescente a partir de alguma variável de fácil aquisição. Partindo deste princípio, escolheu-se a idade para ser essa variável. Este é um dado de fácil obtenção, não sendo necessário realizar nenhum procedimento especial. Buscando a eficiência de tal variável, procurou-se na literatura se haviam estudos que relacionam a idade com o comprimento da mão.

Durante a pesquisa observou-se a insuficiência na literatura, de trabalhos que apontassem a relação entre a idade e o comprimento da mão de crianças e adolescentes. Por fim, foi encontrado um único trabalho desenvolvido nos Estados Unidos da América na década de 1970.

Snyder et al. (1975), realizaram uma pesquisa que teve duração de 3 anos, que ocorreu entre 1972 e 1975. Foram coletadas 41 medidas do corpo, sendo que algumas não haviam sido coletadas em nenhum estudo anterior. Estes dados visavam a obtenção das dimensões antropométricas de bebês, crianças e adolescentes. Existia um grande interesse nessas medidas, principalmente para o desenvolvimento de padrões de design para produtos adequados à segurança.

Ocorriam muitos acidentes nesse período devido ao mal dimensionamento dos móveis e brinquedos. Estima-se que 700.000 crianças foram lesionadas por brinquedos em 1968. Eles sabiam que as pessoas estavam ficando mais altas e que existem diferenças regionais. Portanto, precisavam de uma quantidade grande dados para representar a população dos Estados Unidos da América. No total foram coletadas as medidas de 4027 crianças e adolescentes que foram divididos por gênero e meses de vida, de 0 a 156 meses (13 anos) (SNYDER et al., 1975).

Por serem dados que foram coletados apenas na população dos Estados Unidos da América e a mais de 40 anos atrás, eles não seriam uma boa estimativa para os padrões atuais. Segundo Freire (2000), fatores como mistura genética, melhora na alimentação e na saúde, dentre outros, modificam os padrões da população. Outro problema encontrado, foi a inexistência de banco de dados que relaciona a idade com o comprimento da mão de crianças e adolescentes.

Foram realizadas inúmeras pesquisas em bancos de dados bibliográficos (*Scopus*, *ScienceDirect* e *SciELO*), além do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), porém não foram encontrados dados sobre a relação da idade com o

comprimento da mão. Devido a ausência de material, a idade não é uma variável adequada para esse trabalho, donde foi necessário escolher uma nova. Dessa vez, para evitar novamente o problema de falta de dados, realizou-se a busca na literatura por variáveis que sejam relacionadas com o comprimento da mão. Também foi levada em consideração a existência de estudos recentes com a variável escolhida.

A estatura é uma medida que se mostrou relevante, uma vez que vem sendo estudada a bastante tempo. A primeira pesquisa que procurou a relação da estatura com outras partes do corpo foi realizada por Sue (1755). Desde então vem sendo estudada a relação da estatura com outras partes do corpo. Na ciência forense, existem estudos que relacionam a estatura com o comprimento da mão.

Os trabalhos encontrados que estudaram a relação entre a estatura e o comprimento da mão ocorreram em diferentes países. Foram totalizados onze estudos que ocorreram em diferentes países, sendo o primeiro datado de 1990 e o mais recente de 2015, os valores encontrados são apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 Medidas de estatura e comprimento da mão encontrados na literatura

	Mulher		Homem		País
	Estatura (m)	Comp. mão (cm)	Estatura (m)	Comp. mão (cm)	
Abdel-Malek et al. (1990)	1,59	18,27	1,73	19,93	Egito
Krishan e Sharma (2007)	1,56	16,82	1,68	18,23	Índia
Agnihotri et al. (2008)	1,60	17,22	1,74	18,89	Ilhas Maurício
Habib e Kamal (2010)	1,60	17,61	1,75	19,33	Egito
Ishak, Hemy e Franklin (2011)	1,79	19,55	1,64	16,89	Austrália Ocidental
Akhlaghi et al. (2012)	1,62	17,15	1,76	18,93	Irã
Krishan, Kanchan e Sharma (2012)	1,56	16,80	1,68	18,20	Índia
Ahmed (2013)	1,60	17,25	1,75	19,16	Sudão
Uhrová et al. (2014)	1,66	17,21	1,80	18,72	Eslováquia
Jee e Yun (2015)	1,56	17,10	1,70	18,30	Coreia do Sul
Paulis (2015)	1,57	17,82	1,68	19,12	Egito

Fonte: o autor

Os estudos buscaram encontrar parâmetros para estimar a estatura a partir das dimensões de outras partes do corpo. As principais medidas analisadas, foram o comprimento e largura dos membros superior e inferior. No geral, o comprimento da mão mostrou ser a medida mais confiável para estimar a estatura. Por este motivo, a estatura é utilizada para determinar o comprimento da mão neste trabalho.

1.2 Antropometria da mão

A estrutura da mão é composta por 27 ossos que são divididos em três grupos: as falanges, o metacarpo e o carpo. Tradicionalmente o carpo é considerado como pulso, e contribui para a estabilidade e movimentação do membro superior. A região da palma da mão, é chamada de metacarpo e vem logo após o carpo. Por último, está a estrutura dos dedos, que é composta pelas falanges. O polegar é estruturalmente diferente dos outros dedos, devido à posição que ocupa em relação à mão e ter uma falange a menos que os demais dedos (PANCHAL-KILDARE; MALONE, 2013).

Alexander e Viktor (2010), realizaram o estudo das medidas dos ossos do membro superior (metacarpo e falanges) e também do tecido que cobre as pontas da falange distal. Foram coletadas as medidas de ambas as mãos de 66 pessoas, com a faixa etária de 19 a 78 anos. Eles obtiveram os comprimentos a partir de imagens de Raio X e as medidas são mostradas na Figura 7.1. Os dedos foram numerados de I a V, começando pelo polegar (I) e terminando no mínimo (IV).

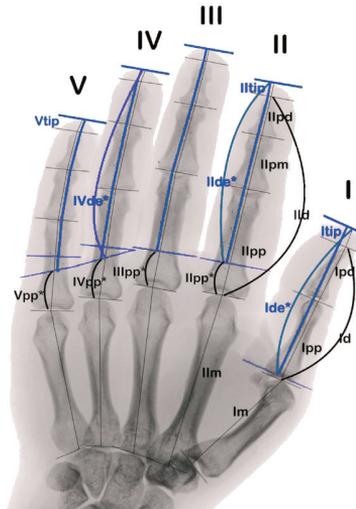


Figura 7.1 Medidas coletadas: m) metacarpo; pp) falange proximal; pm) falange medial; pd) falange distal; tip) tecido mole da falange distal; d) comprimento total das falanges do dedo; de) comprimento total do tecido até a ponta do dedo; pp*) altura do tecido na articulação metacarpofalângica.

Fonte: adaptado de Alexander e Viktor (2010).

Os resultados foram considerados satisfatórios para os autores. Os dados não apresentaram diferença significativa entre as medidas da mão esquerda e direita, sendo de no máximo 0,5%. As medidas obtidas e o desvio padrão, das medidas coletadas, são apresentados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 Comprimento das falanges, metacarpos e tecido mole das falanges distais (medidas em mm).

Dedo	tecido mole da falange distal (tip)	falange distal (pd)	falange medial (pm)	falange proximal (pp)	meta-carpo (m)
I	5,67 ± 0,61	21,67 ± 1,60	–	31,57 ± 3,13	46,22 ± 3,94
II	3,84 ± 0,59	15,82 ± 2,26	22,38 ± 2,51	39,78 ± 4,94	68,12 ± 6,27
III	3,95 ± 0,61	17,40 ± 1,85	26,33 ± 3,00	44,63 ± 3,81	64,60 ± 5,38
IV	3,95 ± 0,60	17,30 ± 2,22	25,65 ± 3,29	41,37 ± 3,87	58,00 ± 5,06
V	3,73 ± 0,62	15,96 ± 2,45	18,11 ± 2,54	32,74 ± 2,77	53,69 ± 4,36

Fonte: (Alexander e Viktor, 2010).

Como pode ser observado na Tabela 7.2, as medidas apresentaram o comprimento médio (soma de cada uma das partes da mão, para o dedo III) de 156,9 mm. Os dados apresentaram em média uma variação de aproximadamente 11%, o que ocorreu devido ao fato de informações como gênero e altura não serem levadas em consideração. Utilizando as medidas encontrada é possível também encontrar a relação entre o tamanho dos ossos, sendo essa, uma informação importante para o desenvolvimento de próteses.

2 Metodologia / procedimentos utilizados

Observando os dados apresentados pelos autores, duas características podem ser notadas. A primeira é que eles aparentemente seguem uma tendência, mostrando que a relação entre a altura e comprimento da mão podem seguir um padrão. A segunda característica, é que existe uma diferença entre a altura dos homens em relação às mulheres, sendo os homens, geralmente mais altos que as mulheres, estes aspectos são mostrados na Figura 7.2.

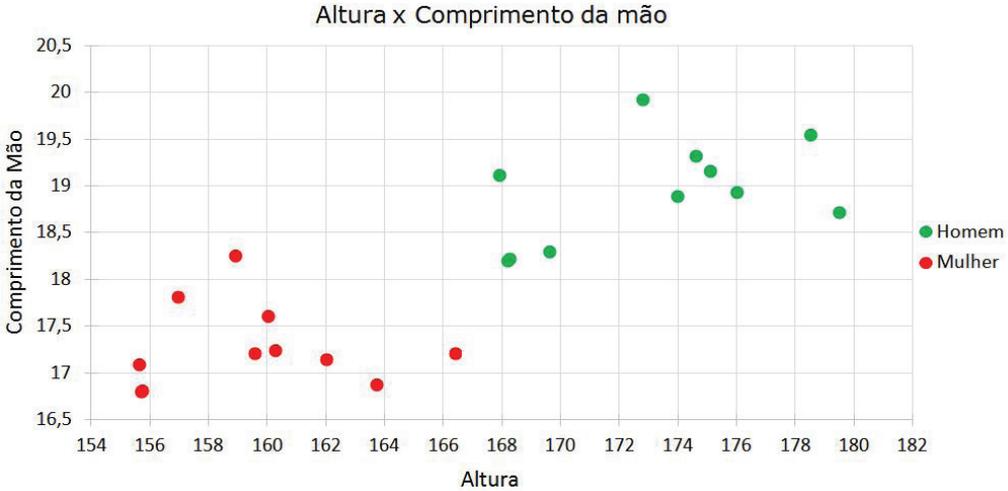


Figura 7.2 Gráfico da Altura pelo Comprimento da Mão dos dados obtidos pelos autores supracitados, mostrando homens e mulheres (medidas em cm)

Fonte: o autor

Devido à grande miscigenação existente na população brasileira e para verificar a eficiência da estatura para estimar o comprimento da mão, os dados foram analisados sem separação por gênero, diferente dos estudos utilizados. O objetivo ao utilizar todos os dados, é realizar uma regressão mais abrangente.

O crescimento é um processo biológico, de multiplicação e aumento da quantidade celular, que pode ser observado pelo desenvolvimento corporal. Ele é influenciado por fatores intrínsecos (genéticos e metabólicos) e fatores extrínsecos (alimentação, higiene, saúde, cuidados gerais com a criança, entre outros) (WHO et al., 1995). Por consequência, a possibilidade de atingir ou não o potencial genético máximo de crescimento, depende das condições às quais a criança é submetida. Outra informação importante, é que a velocidade de crescimento geralmente não é uniforme nos diferentes órgãos e tecidos (BÁSICA, 2002).

A regressão é uma ferramenta estatística usada para prever o valor aproximado de uma variável a partir da medida conhecida de outra. Será utilizada a regressão linear, que segundo Freund (2006), uma função linear tem esse nome pelo fato de seu gráfico no plano cartesiano apresentar o formato de uma linha reta. Ela possui dois coeficientes, o angular e o linear. Para encontrar tais coeficientes, será utilizado o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ).

O MMQ é a técnica mais utilizada em ciências experimentais, por conseguir encontrar os coeficientes que geram o menor erro. Ele consiste em determinar os valores que minimizam a soma das diferenças quadráticas dos resíduos. A forma

de encontrar tais coeficientes é exibida a seguir na Equação 1 (HELENE, 2006; CORREA, 2003).

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \cdot \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1)$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x}$$

Onde:

- = quantidade de dados coletados;
- = variável independente;
- = valor médio da variável x;
- = variável dependente;
- = valor médio da variável y.

Após encontrar a equação de regressão, a correlação linear entre as variáveis será estudada. A correlação linear mostra o quanto a regressão linear consegue representar o comportamento entre duas variáveis. O valor do coeficiente de correlação varia entre o intervalo de -1 e +1 pode ser calculado pela Equação 2 (Larson; Farber, 2010).

$$r = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] \cdot [n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}} \quad (2)$$

Quanto mais próximo de zero, menor é a correlação, não existindo correlação, no caso de o coeficiente resultar em zero. Quanto mais próximo de -1 (correlação negativa) ou +1 (correlação positiva), maior é a correlação. A correlação negativa, implica que a medida que uma variável aumenta a outra reduz seu valor. Já a correlação positiva, implica que uma variável acompanha o sentido da outra. Se o coeficiente encontrado, resultar em -1 ou 1, significa a existência de uma correlação “perfeita”, ou seja, a regressão linear consegue representar todos os dados sem que ocorra nenhum erro (CORREA, 2003).

3 Discussão e Resultados

Após utilizar o MMQ nos dados da Tabela 7.1, foram obtidos os valores dos coeficientes angular (10,26) e linear (1,04), resultando na Equação 3.

$$y = 10,26x + 1,04 \quad (3)$$

Para averiguar se a regressão consegue ou não descrever o comportamento dos dados, será calculado o coeficiente de correlação. Utilizando a Equação 2, é

encontrado o valor de $r = 0,83$. Segundo Correa (2003), valores de r indicam a existência de uma forte correlação ou ainda, que a interdependência entre as duas variáveis é bastante significativa. Considerando esta informação, pode-se afirmar que a estimativa do comprimento da mão, utilizando a estatura, apresenta boa confiabilidade. A curva de regressão encontrada (Equação 3) e os dados utilizados (Tabela 7.1), são apresentados na Figura 7.3.

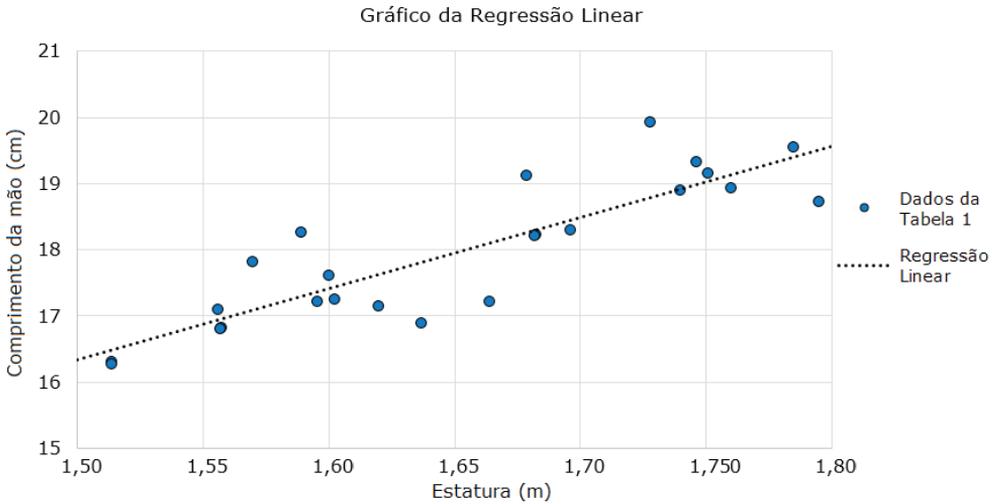


Figura 7.3 Gráfico da curva de regressão utilizando a estatura para estimar o comprimento da Mão.

Fonte: o autor

Como pode ser observado, a regressão consegue representar a tendência dos dados. Por apresentar 83% de coeficiente de correlação, é possível notar que os dados apresentam uma pequena dispersão em torno da reta de regressão. Portanto, quanto maior o coeficiente, menor será a dispersão.

Considerações finais

O resultado obtido com a equação de regressão e o coeficiente de correlação foram satisfatórios e mostraram que a estatura é uma boa medida para estimar o comprimento da mão. Diferente dos estudos apresentados que utilizaram apenas as medidas da população local, aqui foram consideradas as medidas de vários países. Portanto, observa-se que o desenvolvimento do corpo segue o mesmo padrão, mesmo passando por condições adversas.

Para ter uma estimativa mais precisa do comprimento da mão das crianças e adolescentes brasileiras a partir da estatura, é fundamental que se colete tais medidas. Estes dados são extremamente necessários, visto que os dados utilizados

são apenas de adultos e não apresentam informações relativas à população brasileira. Como trabalho futuro, deseja-se realizar todas as etapas necessárias para a coleta de tais dados, validando o modelo para características dimensionais e populacionais do Brasil.

Referências

- ABDEL-MALEK, A. K. *et al.* Prediction of stature from hand measurements. *Forensic Science international*, Elsevier, v. 46, n. 3, p. 181–187, 1990.
- AGNIHOTRI, A. K. *et al.* Prediction of stature using hand dimensions. *Journal of Forensic and legal Medicine*, Elsevier, v. 15, n. 8, p. 479–482, 2008.
- AHMED, A. A. Estimation of stature from the upper limb measurements of sudanese adults. *Forensic science international*, Elsevier, v. 228, n. 1, p. 178-e1, 2013.
- AKHLAGHI, M. *et al.* Estimation of stature from upper limb anthropometry in iranian population. *Journal of forensic and legal medicine*, Elsevier, v. 19, n. 5, p. 280–284, 2012.
- ALEXANDER, B.; VIKTOR, K. Proportions of hand segments. *Int. J. Morphol.*, v. 28, n. 3, p. 755–758, 2010.
- BÁSICA, S. d. P. d. S. Ministério da Saúde Departamento de A. *Saúde da criança: acompanhamento do crescimento e desenvolvimento infantil*. [S.l.]: Ministério da Saúde Brasília, 2002.
- BELLIS, M. A brief history of prosthetics. 2016. Disponível em: <<http://inventors.about.com/library/inventors/blprosthetic.htm>>. Acesso em: 05/02/2016.
- BILLOCK, J. N. Upper limb prosthetic terminal devices: Hands versus hooks. *Clin Prosthet Orthot*, v. 10, n. 2, p. 57–65, 1986.
- BOYALI, A.; HASHIMOTO, N. Spectral collaborative representation based classification for hand gestures recognition on electromyography signals. *Biomedical Signal Processing E Control*, Elsevier, v. 24, p. 11–18, 2016.
- BURN, M. B.; TA, A.; GOGOLA, G. R. Three-dimensional printing of prosthetic hands for children. *The Journal of hand surgery*, Elsevier, 2016.

- CHOI, C. Q. World's first prosthetic: Egyptian mummy's fake toe. *Live Science*, v. 27, 2007.
- CORREA, S. M. B. B. Probabilidade e Estatística. 2. ed. [S.l.]: PUC MINAS, 2003.
- FREUND, J. E. Estatística Aplicada. Economia, Administração e Contabilidade. 11. ed. [S.l.]: BOOKMAN, 2006.
- HABIB, S. R.; KAMAL, N. N. Stature estimation from hand and phalanges lengths of egyptians. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, Elsevier, v. 17, n. 3, p. 156–160, 2010.
- HELENE, O. Métodos dos Mínimos Quadrados. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2006.
- ISHAK, N.-I.; HEMY, N.; FRANKLIN, D. Estimation of stature from hand and handprint dimensions in a western australian population. *Forensic science international*, Elsevier, v. 216, n. 1, p. 199–e1, 2011.
- JEE, S.-c.; YUN, M. H. Estimation of stature from diversified hand anthropometric dimensions from korean population. *Journal of forensic and legal medicine*, Elsevier, v. 35, p. 9–14, 2015.
- KRISHAN, K.; KANCHAN, T.; SHARMA, A. Multiplication factor versus regression analysis in stature estimation from hand and foot dimensions. *Journal of forensic and legal medicine*, Elsevier, v. 19, n. 4, p. 211–214, 2012.
- KRISHAN, K.; SHARMA, A. Estimation of stature from dimensions of hands and feet in a north indian population. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, Elsevier, v. 14, n. 6, p. 327–332, 2007.
- LARSON, R.; FARBER, B. *Estatística Aplicada*. 4. ed. [S.l.]: PEARSON, 2010.
- LIEBERMAN, J. A. Chapter 44 - electromyography and evoked potentials. In: GUPTA, A. K.; GELB, A. W. (Ed.). *Essentials of Neuroanesthesia and Neurointensive Care*. Philadelphia: W.B. Saunders, 2008. p. 283-289. ISBN 978-1-4160-4653-0.
- NERLICH, A. G. *et al.* Ancient egyptian prosthesis of the big toe. *The Lancet*, Elsevier, v. 356, n. 9248, p. 2176–2179, 2000.

- PANCHAL-KILDARE, S.; MALONE, K. Skeletal anatomy of the hand. *Hand clinics*, Elsevier, v. 29, n. 4, p. 459-471, 2013.
- PAULIS, M. G. Estimation of stature from handprint dimensions in egyptian population. *Journal of forensic and legal medicine*, Elsevier, v. 34, p. 55-61, 2015.
- RESNIK, L. *et al.* Advanced upper limb prosthetic devices: implications for upper limb prosthetic rehabilitation. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, Elsevier, v. 93, n. 4, p. 710-717, 2012.
- SNYDER, R.G. *et al.* Physical characteristics of children. *Bethesda, MD:US Consumer Product Safety Commission*, 1975.
- SUE, J. J. Sur les proportions des squelette de homme, examiné depuis l'âge de plus tendre, jusqu'b celui de vingt cinq, soixante ans, & audel. *Acad. Sci. Paris Mem Mathemat. Phys. Present. Divers Savants*, v. 2, p. 572-585, 1755.
- THURSTON, A. J. Paré and prosthetics: the early history of artificial limbs. *ANZ journal of surgery*, Wiley Online Library, v. 77, n. 12, p. 1114-1119, 2007.
- UHROVÁ, P. *et al.* Estimation of stature using hand and foot dimensions in slovak adults. *LegalMedicine*, Elsevier, v. 17, n. 2, p. 92-97, 2014.
- WHO, W. H. O. *et al.* Physical status: The use of and interpretation of anthropometry, report of a who expert committee. Geneva: World Health Organization, 1995.
- WILSON, A. B. History of amputation surgery and prosthetics. *Atlas of Limb Prosthetics: Surgical, Prosthetic, and Rehabilitation Principles*, Mosby Year Book, p. 3-15, 1992.
- WRIGHT, F. V. *et al.* The prosthetic upper extremity functional index: development and reliability testing of a new functional status questionnaire for children who use upper extremity prostheses. *Journal of Hand Therapy*, Elsevier, v. 14, n. 2, p. 91-104, 2001.
- _____. Evaluation of the validity of the prosthetic upper extremity functional index for children. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, Elsevier, v. 84, n. 4, p. 518-527, 2003.

ZUNIGA, J. *et al.* Cyborg beast: a low-cost 3d-printed prosthetic hand for children with upper-limb differences. *BMC research notes*, Springer, v. 8, n. 1, p. 1-9, 2015.

Verificação formal de sistemas digitais embarcados

Nayara de Souza Silva¹

Marcelo Henrique Stoppa³

Vaston Gonçalves da Costa²

Resumo: O uso de verificadores de modelos tem sido explorado na tarefa de validar uma especificação comportamental no seu nível adequado de abstração, sobretudo, na validação de especificações de sistemas críticos, principalmente quando estes envolvem a preservação da vida humana, quando a existência de erros acarreta enorme prejuízo financeiro, ou quando tratam com a segurança da informação. Neste artigo é apresentado um arcabouço metodológico prático para tratar da implementação de procedimentos a serem empregados na especificação formal de sistemas. Como estudo de caso, trabalhou-se com o sistema digital embarcado *Avoiding Doored System* (ADS), tido como crítico, cuja correteza fora verificada formalmente utilizando-se como ferramenta semi automática o *Specification and Verification System* (PVS).¹²³

Palavras-chave: Métodos Formais. Especificação e Verificação Formal de Sistemas. Lógica Matemática. Provadores de Teoremas. Teoria da Prova.

Introdução

O processo de desenvolvimento de sistemas computacionais leva em conta muitas etapas. Algumas destas são tidas mais necessárias que outras, dependendo da finalidade da aplicação. A etapa de implementação sempre é necessária, indis-

1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: nah.nayaracomp@gmail.com.

2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: vaston@ufg.br.

3 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: mhstoppa@gmail.com.

cutivamente. Por vezes as fases de análise de requisitos e de testes são negligenciadas. E, geralmente, a parte de verificação formal de corretude é destinada a poucas aplicações (SOMMERVILLE, 2007).

Estas poucas aplicações são, especialmente, as tidas como críticas, em que a falha pode levar a grande prejuízo financeiro ou colocar vidas em risco, e a confiabilidade deve ser garantida para que sejam efetivamente utilizadas no mercado.

Processo “correto” de desenvolvimento de software, aqui, se opõe a Processo de Desenvolvimento de Software (PDS) de forma *ad hoc*, que não suporta as diversas decisões de projeto que sobre ele foram tomadas. O simples uso de abstrações de propósito geral, tais como diagramas *Unified Modeling Language* (UML) (FRANCE et al., 2004), estando estas acopladas a métodos (também de propósito geral) que identificam etapas no PDS ou não, não apontou para uma maior garantia na correta implementação das funcionalidades requeridas do sistema.

O fato de, por exemplo, PDS baseado em UML ter sido bem aceito pelo mercado é bastante influenciado pela existência de ferramentas para a derivação de código executável, por vezes já em etapa final da produção. Não é preciso nenhuma análise mais detalhada para chegar a esta conclusão: sabe-se do aumento da produção quando a etapa de codificação/implementação é reduzida. No entanto, ainda é prática comum validar-se, por meio de testes ou simulações, o código produzido pela abstração UML, por exemplo, em lugar de apoiar esta validação em técnicas de Análise Formal conduzidas no nível de abstração da própria especificação UML.

Com o que se conhece sobre probabilidade, pode-se afirmar com certeza que um sistema pouco testado/validado que possua um número infinito de entradas ou comportamentos distintos tem a mesma probabilidade de estar definitivamente correto do que um bastante testado/validado.

Neste sentido, ao se tratar de validação de sistemas se devem levar em conta seus aspectos mais intrínsecos, por meio de verificadores de modelos e de teoremas, que atestam fielmente se o sistema implementado atende os requisitos para ele propostos. Isto justifica a crescente expansão do uso dos mais variados sistemas formais para verificação de corretude de sistemas.

Neste artigo apresenta-se uma abordagem formal, baseada em provadores e verificadores de modelos, para verificar a corretude de sistemas. Além de expor os fundamentos teóricos necessários para a compreensão da abordagem apresentada, cria-se um arcabouço metodológico prático que pode ser ajustado para o processo de validação de outros sistemas digitais embarcados.

De forma a consolidar a teoria, apresenta-se a verificação de corretude de um sistema digital embarcado desenvolvido pela equipe do Laboratório de Modelagem e Prototipagem 3D da Universidade Federal de Goiás - Regional Catalão (LaMoP3D/UFG-RC). O sistema, denominado ADS (OLIVEIRA, 2015), foi pro-

jetado como assistente de abertura de portas de veículos e, devido a sua característica, que prima para garantir a segurança de condutores de veículos e passageiros, convém verificar se o mesmo executa realmente o que lhe foi especificado.

Para melhor compreensão do texto produzido, opta-se por dividi-lo da seguinte forma: na seção 1 apresenta-se a fundamentação teórica que serviu como base para o desenvolvimento do artigo, cuja seção fora dividida em: 1.1 - referente ao verificador de modelos PVS adotado aqui no processo de validação de sistemas; 1.2 – em que se apresenta o sistema dedutivo cálculo de sequentes, cujas regras são utilizadas por trás das estratégias do provador de teoremas do PVS; 1.3 – onde se explica o funcionamento do sistema ADS. Na seção 2 fala-se sobre os procedimentos utilizados. Na seção 3 apresentam-se as discussões e resultados, detalhando-se os passos necessários para transformar o código em modelo da linguagem do verificador de modelos e a prova das propriedades sobre o sistema. Por final, apresentam-se as conclusões.

1 Desenvolvimento

Apresenta-se nesta seção a fundamentação teórica empregada para o desenvolvimento do artigo.

1.1 PVS

O PVS se caracteriza como um sistema de verificação por oferecer um ambiente mecanizado para especificação e verificação formal através de uma linguagem de especificação integrado a um provador de teoremas (OWRE et al., 2001c).

Sua linguagem de especificação é altamente expressiva, baseada na lógica clássica e tipada em lógica de ordem superior, isto é, funções podem ter funções como argumentos e devolvê-las como valores, e a quantificação pode ser aplicada em variáveis de funções.

Ao pensar em uma linguagem de especificação é importante diferenciá-la de uma linguagem de programação. Apesar de terem diversas características em comum, existem diferenças essenciais entre elas: enquanto uma especificação representa requisitos ou um projeto, um texto de programa representa a implementação de um projeto; um programa pode ser visto como uma especificação, mas uma especificação não pode ser vista como um programa; uma especificação expressa **o que** está sendo computado, enquanto um programa expressa **como** isso é computado; uma especificação pode ser incompleta e ainda ser significativa, enquanto um programa incompleto simplesmente não será executável (OWRE et al., 2001a).

Especificações são conjunto de teorias construídas pelo uso de definições e/ou axiomas. Pode-se entender, também, as especificações como sendo arquivos de texto ASCII salvos com a extensão *.pvs*. Logicamente são organizadas e modularizadas em teorias (parametrizadas ou não), permitindo-se generalização e reusabilidade.

O PVS possui um provador de teoremas acoplado, que é uma coleção de procedimentos de inferência que são aplicados de forma interativa sob a orientação do usuário dentro de uma estrutura de cálculo de seqüentes (OWRE et al., 2001b).

O PVS é implementado em *Common Lisp*, mas não é necessário saber *Common Lisp* para efetivamente usar o sistema, uma vez que os editores *Emacs* provêm a interface de interação com o usuário e o *Tcl/TK* a interface gráfica para a exibição de árvores de prova, hierarquia de teorias e comandos de provas.

Por prover um ambiente integrado para o desenvolvimento e análise de especificações formais, o PVS pode ser usado em diversas aplicações. Como, por exemplo, na formalização de conceitos matemáticos e provas em áreas como análise, teoria dos grafos e teoria dos números; na verificação de *hardware*, algoritmos sequenciais e distribuídos; e como uma ferramenta de verificação de *back-end* para sistemas de álgebra computacional e verificação de código.

Caso seja desejado ao leitor aprofundar-se em tal sistema, recomenda-se que procure pelo conjunto completo de manuais, instruções de como obter e instalar o sistema, publicações de diversos artigos de referência e muitos outros, disponíveis online em <http://pvs.csl.sri.com/>.

1.2 Cálculo de Seqüentes

O sistema dedutivo cálculo de seqüentes foi introduzido pelo matemático e lógico alemão Gerhard Gentzen, em 1934, estabelecendo-se como um mecanismo lógico-matemático para formalizar provas matemáticas e investigar as estruturas destas provas. Suas aplicações são vastas nos campos da teoria da prova, lógica matemática e dedução automática, sendo um método frutífero e prático ao ser utilizado em, principalmente, provadores de teoremas.

As regras de inferência do cálculo de seqüentes são categorizadas como regras estruturais de enfraquecimento, contração, permutação e corte; regras lógicas ou inferências proposicionais de negação, conjunção, disjunção e implicação; regras lógicas ou inferências quantificadas do quantificador universal e quantificador existencial; e axiomas proposicional e de igualdade, descritas na Figura 8.1.

<i>Estruturais</i>	$\frac{\Gamma \vdash \Delta}{D, \Gamma \vdash \Delta} w \vdash$	$\frac{\Gamma \vdash \Delta}{\Gamma \vdash \Delta, D} \vdash w$
	$\frac{D, D, \Gamma \vdash \Delta}{D, \Gamma \vdash \Delta} c \vdash$	$\frac{\Gamma \vdash \Delta, D, D}{\Gamma \vdash \Delta, D} \vdash c$
	$\frac{\Gamma, C, D, \pi \vdash \Delta}{\Gamma, D, C, \pi \vdash \Delta} p \vdash$	$\frac{\Gamma \vdash \Delta, C, D, A}{\Gamma \vdash \Delta, D, C, A} \vdash p$
	$\frac{\Gamma \vdash \Delta, D \quad D, \pi \vdash A}{\Gamma, \pi \vdash \Delta, A} \text{corte}$	
<i>Proposicionais</i>	$\frac{\Gamma \vdash \Delta, D}{\neg D, \Gamma \vdash \Delta} \neg \vdash$	$\frac{D, \Gamma \vdash \Delta}{\Gamma \vdash \Delta, \neg D} \vdash \neg$
	$\frac{C, D, \Gamma \vdash \Delta}{C \wedge D, \Gamma \vdash \Delta} \wedge \vdash$	$\frac{\Gamma \vdash \Delta, C \quad \Gamma \vdash \Delta, D}{\Gamma \vdash \Delta, C \wedge D} \vdash \wedge$
	$\frac{C, \Gamma \vdash \Delta \quad D, \Gamma \vdash \Delta}{C \vee D, \Gamma \vdash \Delta} \vee \vdash$	$\frac{\Gamma \vdash \Delta, C, D}{\Gamma \vdash \Delta, C \vee D} \vdash \vee$
	$\frac{\Gamma \vdash \Delta, C \quad D, \pi \vdash A}{C \rightarrow D, \Gamma, \pi \vdash \Delta, A} \rightarrow \vdash$	$\frac{C, \Gamma \vdash \Delta, D}{\Gamma \vdash \Delta, C \rightarrow D} \vdash \rightarrow$
<i>Quantitativas</i>	$\frac{F(t), \Gamma \vdash \Delta}{\forall x F(x), \Gamma \vdash \Delta} \forall \vdash$	$\frac{\Gamma \vdash \Delta, F(a)}{\Gamma \vdash \Delta, \forall x F(x)} \vdash \forall$
	$\frac{F(a), \Gamma \vdash \Delta}{\exists x F(x), \Gamma \vdash \Delta} \exists \vdash$	$\frac{\Gamma \vdash \Delta, F(t)}{\Gamma \vdash \Delta, \exists x F(x)} \vdash \exists$
<i>Axiomas</i>	$\overline{\Delta, A \vdash \Gamma, A}$	$\overline{\Gamma \vdash a = b, \Delta}$

Figura 8.1 Regras de infência do cálculo de seqüentes

Fonte: Adaptado de Takeuti (1987).

Entender o cálculo de seqüentes é importante para entender os efeitos dos comandos de prova do PVS, porém não é suficiente para entender como a lógica do PVS trabalha, uma vez que o PVS não implementa somente as fórmulas relacionadas ao cálculo de seqüentes, também são empregadas outras técnicas e estratégias avançadas. É fato de que somente com a experiência, uso e prática do PVS é que se tem uma melhor noção de seu funcionamento interno e entendimento efetivo dos comandos utilizados pelo provador.

1.3 ADS

O estudo de caso irá se concentrar no sistema ADS, que é um sistema de segurança veicular ativo, isto é, tem por objetivo minimizar as possibilidades de que um acidente ocorra. É um verdadeiro sistema de assistência ao motorista, auxiliando-o na tomada de decisões, uma vez que o sistema detecta riscos potenciais de colisão por abertura em um momento indevido da porta pelo condutor, emitindo sinais sonoros e visuais, como forma de alerta, caso eventuais aproximações de pedestres, ciclistas e veículos possam vir resultar em acidentes (OLIVEIRA, 2015).

Sabendo-se que um sistema crítico é aquele cujas falhas podem causar riscos a vida humana, danos ao meio ambiente e/ou grandes prejuízos financeiros, tem-se que a confiabilidade é a propriedade mais importante que deve então ser conservada nos mesmos (SOMMERVILLE, 2007).

Apesar de que formalmente não se tem o registro e estatísticas reais da quantidade de acidentes que ocorrem por abertura de porta, o ADS deve ser tratado como um sistema crítico, uma vez que lida com a integridade física de motoristas e ciclistas, além de danos materiais por conta de um acidente, caso falhe. Portanto, modelos matemáticos devem ser empregados a fim de verificar erros na sua especificação, projeto ou implementação.

O seu funcionamento, de forma geral, é da seguinte forma:

- 1 O sistema foi acomodado a um invólucro (*case*) e fixado na lateral traseira e esquerda do veículo, de modo que o campo de atuação do sensor ultrassônico esteja direcionado para a região traseira do veículo. A área de atuação do sensor é tida para cobrir uma região denominada de perigo (distância máxima de 300 cm de alcance, restrita pela programação, e 100 cm de varredura lateral).
- 2 Considerando-se duas leituras de distâncias realizadas pelo sensor ultrassônico, a programação efetua uma comparação entre elas; se a diferença entre as duas distâncias for maior que 20 cm, significa que o deslocamento de um determinado objeto é significativo e este possa ser avaliado como de risco potencial.
- 3 Na situação em que o deslocamento do objeto se dê no mínimo em 20 cm e que esteja e permaneça na área de perigo, o sistema acionará o *buzzer* e acenderá o LED como alerta ao motorista, para que este tome cuidado ao abrir a porta do veículo. Caso o objeto desloque a distância mínima de 20 cm, porém saia da área de perigo, o objeto é considerado estar fora de alcance; caso o objeto sequer desloque a distância mínima de 20 cm, estando ou não na área de perigo, é considerado estar sem movimento. Em ambas duas últimas situações, se o objeto estiver tanto fora de alcance quanto sem movimento, o sistema desliga o *buzzer* e apaga o LED, pois o objeto não se mostra uma ameaça.

O pseudoalgoritmo que representa o funcionamento do sistema ADS é dado pelo Quadro 8.1.

Quadro 8.1 Pseudoalgoritmo do sistema ADS

```
IF((abs(d-ud)>tol) AND (d<ma)){  
  led = TRUE; buzzer = TRUE;  
}ELSE{  
  led = FALSE; buzzer = FALSE;  
}
```

Observando-se o pseudoalgoritmo do Quadro 8.1, tem-se que ud representa a última distância de um determinado objeto antes de sua próxima medição, d a distância atual de um determinado objeto, tol a tolerância mínima a ser considerada para se ter o deslocamento significativo do objeto e ma o máximo alcance que deve ser considerado pelo sistema na denominação da região de perigo. As duas variáveis booleanas led e $buzzer$, quando consideradas TRUE, significa que o LED e o $buzzer$ do sistema estão acionados; caso contrário, se consideradas FALSE, então os componentes LED e $buzzer$ estão desligados.

Entendido o funcionamento e propósito do sistema ADS como um todo, a seção que se segue apresentará um procedimento de como a especificação e verificação em PVS pode ser feita, baseando-se no modelo proposto por Clarke e Kroening (2003) e tendo-se como estudo de caso o sistema ADS. Estima-se que pelo uso destes passos possa tornar o processo de especificação formal um pouco mais viável e, principalmente, rápido.

2 Procedimentos Utilizados

Esta pesquisa se caracteriza por ser quantitativa, uma vez que consiste basicamente em implementar sistema e testá-lo.

De fato, como todo trabalho de implementação, fora realizado um estudo preliminar dos requisitos e do ferramental existente que pudesse auxiliar no alcance dos resultados almejados. O uso do PVS se deve basicamente por este ser bem documentado e ser voltado para verificação formal de sistemas por concepção.

Uma vez que o trabalho faz parte de um projeto maior, este se encontra armazenado em um repositório que permite a colaboração e controle de versão entre os vários pesquisadores incluídos, em que os resultados foram apresentados em seminários do grupo de pesquisa para receber realimentação, visando atingir os resultados esperados.

3 Discussão e Resultados

Esta seção irá apresentar os procedimentos realizados na especificação formal em PVS do ADS. O objetivo é que estes procedimentos possam ser usados nas especificações de outros sistemas digitais embarcados. Posteriormente, apresentam-se os passos empregados na verificação de propriedades sobre o ADS.

- 1 Ter o pseudoalgoritmo do programa sequencial a ser especificado em mãos, vide Quadro 8.1.
- 2 Definir o tipo registro (*C*) para representar o estado do programa, definido pelo conjunto de suas variáveis, em que se têm seus campos (variáveis do programa) com seus respectivos tipos, conforme Quadro 8.2.

Quadro 8.2 Definição do tipo registro que representa o estado do programa.

```
C: TYPE = [#
  d: posreal,
  ud: posreal,
  ma: posint,
  tol: posint,
  led: bool,
  buzzer: bool
#]
```

Pode-se notar que os campos do registro *C* são:

- *d* e *ud*: representam as duas últimas distâncias de um objeto medidas pelo sensor ultrassônico; devem ser do tipo *posreal* (valores reais e positivos);
 - *ma* e *tol*: representam, respectivamente, o máximo alcance que o sistema deve considerar ao denominar a região de perigo e a tolerância mínima de deslocamento de um objeto pelo programa para considerá-lo em movimento; são do tipo *posint*, isto é, inteiros positivos;
 - *led* e *buzzer*: são as variáveis booleanas que representam o estado de ligado e desligado do LED e *buzzer* do sistema.
- 3 Traduzir o programa sequencial dentro de um programa *goto*, conforme Quadro 8.3.

Quadro 8.3 Representação na forma *goto* do pseudoalgoritmo do Quadro 1.

```
L1: if((abs(d-ud)>20) AND (d<ma)) goto L2 else goto L3
L2: led = TRUE, buzzer = TRUE  goto LEND
L3: led = FALSE, buzzer = FALSE  goto LEND
LEND:
```

- 4 Definir o tipo enumeração PCt que enumera os passos de transição possíveis que o programa pode assumir, segundo Quadro 8.4.

Quadro 8.4 Tipo enumeração dos passos de transição, conforme programa *goto* do Quadro 8.3.

```
Pct: TYPE = {L1, L2, L3, LEND}
```

- 5 Adicionar o campo PC , do tipo PCt , em C , completando-se assim a definição de C , conforme pode ser observado no Quadro 8.5.

Quadro 8.5 Definição completa de C .

```
C: TYPE = [#
  d: posreal,
  ud: posreal,
  ma: posint,
  tol: posint,
  led: bool,
  buzzer: bool,
  PC: Pct
#]
```

- 6 Traduzir a forma *goto* do pseudoalgoritmo, representada pelo Quadro 3, na linguagem do PVS, combinando os passos de transição através de um contador de programa (t), de acordo com o Quadro 8.6.

Quadro 8.6 Definição do contador de programa t que combina os passos de transição possíveis que o programa pode assumir.

```
t(c: C): C = CASES c`PC OF
L1: IF ((abs(c`d - c`ud) > c`tol) AND (c`d < c`ma))
  THEN c WITH ['PC := L2]
  ELSE c WITH ['PC := L3]
  ENDIF,
L2: c WITH [led := TRUE, buzzer := TRUE, 'PC := LEND],
L3: c WITH [led := FALSE, buzzer := FALSE, 'PC := LEND],
LEND: c
ENDCASES
```

7 Definir a sequência de configuração, isto é, a forma com que se deve iterar sobre os passos de transição, por meio de uma função recursiva (*chama_t*), conforme Quadro 8.7.

Quadro 8.7 Definição de uma função recursiva para iterar sobre os passos de transição possíveis que o programa pode assumir.

```

chama_t(T: nat, c: C): RECURSIVE C =
  IF T = 0
    THEN c WITH [PC := L1]
  ELSE
    t(chama_t(T - 1, c))
  ENDIF
MEASURE T

```

8 Criar “perguntas”, por meio de conjecturas, para provar propriedades sobre o estado $PC = LEND$, tal como a do Quadro 8.8.

Quadro 8.8 Propriedade que deve ser garantida pelo ADS.

```

c_correto: CONJECTURE
FORALL (c: C):
  EXISTS (T: nat | chama_t(T, c)'PC = LEND):
    (chama_t(T, c)'led AND chama_t(T, c)'buzzer) IFF (correct_result(c))

```

Onde *correct_result* é a expressão booleana que representa o estado de perigo para o ADS, como pode ser visto no Quadro 8.9.

Quadro 8.9 Definição da expressão booleana que representa o estado de perigo do ADS.

```

correct_result(c: C): bool =
  ((abs(c`d - c`ud)) > c`tol) AND (c`d < c`ma)

```

A conjectura *c_correto* expressa duas propriedades importantes: a propriedade de terminação, uma vez que para toda instância de *c* do tipo *C*, existe um *T* do tipo *nat* tal que garante que após iterar sobre as várias funções de transição definidas, o estado final *PC* assume o valor *LEND*; a outra propriedade garante que para qualquer instância do programa, sempre que o passo de transição chegar a *LEND* (isto é, o programa terminar), as variáveis *led* e *buzzer* serão verdadeiras se e somente se a expressão $((abs(c`d - c`ud)) > c`tol) AND (c`d < c`ma)$ ser verdadeira. Logicamente, a conjectura *c_correto* deve ser provada a fim de assegurar que estas duas propriedades são garantidas pelo sistema ADS.

A especificação por completo do ADS está representada pelo Quadro 8.10.

Deseja-se saber se o que foi proposto e determinado na especificação do sistema ADS é realmente atendido e está correto nesse sentido. Por isso dar-se-á verificação formal do funcionamento de seu *software* de controle.

Deve-se realizar o *parsing* e o *typechecking* da especificação, a fim de checar a consistência sintática, semântica e de tipos da mesma.

Os passos da prova da conjectura *c_correto* são apresentados pela árvore de prova gerada pela interface *Tcl/TK*, conforme pode ser observado na Figura 8.2.

Quadro 8.10 Especificação completa do ADS.

```

ads: THEORY
BEGIN

PcT: TYPE = {L1, L2, L3, LEND}

C: TYPE =
[# d: posreal,
ud: posreal,
ma: posint,
tol: posint,
led: bool,
buzzer: bool,
PC: PcT #]

t(c: C): C = CASES c`PC OF
L1:
IF ((abs(c`d - c`ud) > c`tol) AND (c`d < c`ma))
THEN c WITH [ `PC := L2]
ELSE c WITH [ `PC := L3]
ENDIF,
L2: c WITH [led := TRUE, buzzer := TRUE, `PC := LEND],
L3: c WITH [led := FALSE, buzzer := FALSE, `PC := LEND],
LEND: c
ENDCASES

chama_t(T: nat, c: C): RECURSIVE C =
IF T = 0
THEN c WITH [PC := L1]
ELSE
t(chama_t(T - 1, c))
ENDIF
MEASURE T

correct_result(c: C): bool = ((abs(c`d - c`ud) > c`tol) AND (c`d < c`
ma))

c_correto: CONJECTURE
FORALL (c: C):
EXISTS (T: nat | chama_t(T, c)`PC = LEND):
(chama_t(T, c)`led AND chama_t(T, c)`buzzer) IFF (correct_result(c))
END ads

```

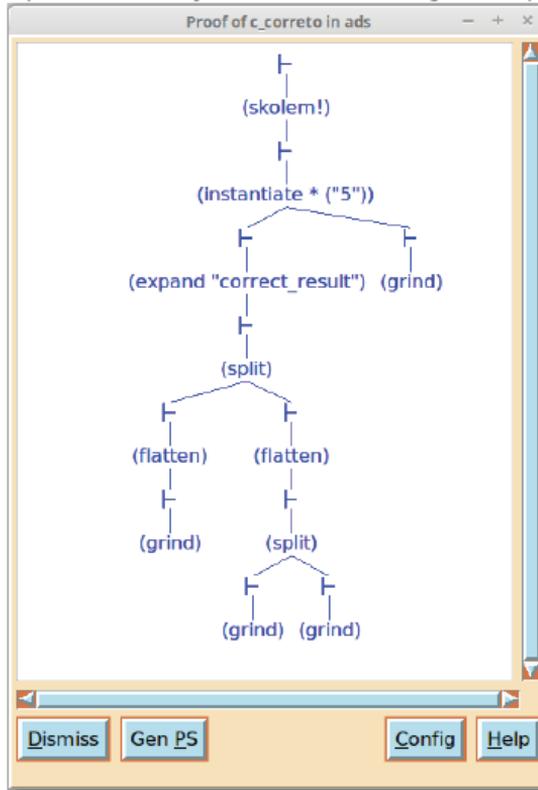


Figura 8.2 Árvore de prova da conjectura *c_correto* gerada pela interface Td/Tk.

Fonte: o autor.

Conclusões

Neste apresentou-se procedimentos metodológicos práticos a serem empregados na especificação de sistemas digitais embarcados, tendo-se como estudo de caso o ADS, que fora especificado e verificado formalmente no ambiente do PVS.

O uso de diagramas UML, testes e simulações não garantem a correta implementação das funções de sistemas, por isso ao lidar com sistemas críticos todas as etapas do processo de desenvolvimento de sistemas computacionais devem receber igual atenção, quer seja a etapa de implementação, quer seja a análise de requisitos e a verificação de corretude.

Espera-se que a abordagem apresentada seja de fácil entendimento, com o objetivo de que seja adaptado no processo de verificação formal de outros sistemas digitais embarcados, uma vez que a análise formal de *software* atesta fielmente se o sistema implementado atende os requisitos para ele propostos.

Referências

- CLARKE, E.; KROENING, D.. Proving Software Correct with PVS. [s.n.], 2003. Carnegie Mellon University. Disponível em: <<http://www.cs.cmu.edu/~emc/15-820A/reading/>>. Acesso em: 26/07/2016.
- FRANCE, R. B. et al. A UML-Based Pattern Specification Technique. IEEE Transactions on Software Engineering, v. 30, p. 193–206, 2004.
- OLIVEIRA, R. M. M.. Desenvolvimento de Sistema de Segurança Veicular a Baixo Custo Contra Acidentes por Abertura de Porta. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás - Regional Catalão, Brasil, 2015.
- OWRE, S. et al. PVS Language Reference. Computer Science Laboratory, SRI International, Menlo Park, CA: [s.n.], 2001. Disponível em: <<http://pvs.csl.sri.com/doc/pvs-language-reference.pdf>>. Acesso em: 20/07/2016.
- OWRE, S. et al. PVS Prover Guide. Computer Science Laboratory, SRI International, Menlo Park, CA: [s.n.], 2001. Disponível em: <<http://pvs.csl.sri.com/doc/pvs-prover-guide.pdf>>. Acesso em: 20/07/2016.
- OWRE, S. et al. PVS System Guide. Computer Science Laboratory, SRI International, Menlo Park, CA: [s.n.], 2001. Disponível em: <<http://pvs.csl.sri.com/doc/pvs-system-guide.pdf>>. Acesso em: 20/07/2016.
- SOMMERVILLE, I.. Engenharia de Software. 8. ed. São Paulo: Pearson Education, 2007.
- TAKEUTI, G.. Proof Theory. 1. ed. Amsterdam: North-Holland, 1987.

Avaliação da degradação ambiental em áreas mineradas: um método quantitativo alternativo

Jainer Diogo Vieira Matos¹
Antonio Nilson Zamuner Filho²

Marília Gabriela Alencar
de Moraes³

Resumo: A Constituição Federal impõe àquele que explorar recursos minerais o dever de recuperar os danos ambientais causados. Assim, o setor de agregados, importante por estar associado à construção civil, deve ser explorado de forma sustentável. Em Catalão-GO, esta operação é realizada por pequenas e médias indústrias e pela indústria informal, o que contribui para a degradação ambiental no município. Este estudo propõe o desenvolvimento do método denominado Avaliação da Degradação Ambiental em Áreas Mineradas para quantificar danos, utilizando cinco indicadores: área desprovida de vegetação, declividade média, processos erosivos, APP degradada e área degradada além da poligonal aprovada pelo DNPM; com posterior aplicação em uma área de 4,78 ha, requerida para extração de cascalho. O IDAM calculado foi de 0,687, alta degradação, o que pressupõe que as atividades de recuperação não foram executadas corretamente após a exploração. O método foi considerado aplicável no âmbito de operações de extração mineral.¹²³

Palavras-chave: Mineração. Meio ambiente. Impacto Ambiental.

-
- 1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Goiás, Unidade Acadêmica Especial de Ciências Sociais Aplicadas. Contato: jainerdiogo@gmail.com
 - 2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: antoniozamuner@ufg.br.
 - 3 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: mariliagabriela_am@hotmail.com

Introdução

As atividades de mineração são caracterizadas por serem fortemente agressivas ao meio ambiente. Desmatam e movimentam uma grande quantidade de solo superficial durante a fase de decapeamento da área e utilizam máquinas e equipamentos pesados que, na maioria das vezes, são movidos a base de combustíveis fósseis. Necessitam, ainda, de complexos industriais para concentrar os minerais de interesse, gerando rejeitos que não podem ser depositados aleatoriamente e, de acordo com a própria natureza da atividade, exploram recursos minerais não renováveis em sua grande maioria. Como são consideradas altamente degradantes, as atividades de mineração são obrigadas a passar por um processo rigoroso de licenciamento ambiental para início de suas atividades. Segundo a legislação brasileira, deve ser apresentado e aprovado durante a fase de licenciamento ambiental o Plano de Recuperação de Área Degradada (PRAD), que tem como objetivo a recuperação do sítio degradado proporcionando uma nova forma de utilização para a área, visando à obtenção de uma estabilidade ambiental. A extração de agregados minerais possibilita a geração de produtos como a brita, a areia e o cascalho, em granulometrias variadas, segundo as especificações de uso e mercado. Esses bens minerais são imprescindíveis ao desenvolvimento da sociedade moderna, pois possibilitam a construção de moradias e de toda infraestrutura necessária ao completo desenvolvimento de uma determinada localidade. Geralmente, a extração de agregados ocupa um espaço restrito e por tempo determinado, delimitado conforme processo administrativo dirigido ao Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Os processos de extração e produção de agregados geralmente não utilizam substâncias químicas e o rejeito gerado nas etapas de processamento não oferece risco de contaminação, sendo constituído por material inerte e partículas finas. Assim, os principais impactos provocados ao meio ambiente são de ordem física e paisagística, sendo necessária a recuperação ambiental da área. Uma tendência que vem se consagrando na avaliação dos impactos ambientais gerados é a utilização de indicadores de degradação, geralmente correlacionados à atividade degradadora. A utilização de métodos numéricos facilita a interpretação de resultados e padroniza a avaliação, permitindo que cada área de estudo possa ser enquadrada em uma classificação contínua, de acordo com o resultado obtido. Neste contexto, este trabalho tem por objetivo desenvolver um método capaz de avaliar a degradação ambiental de áreas licenciadas para extração e produção de agregados minerais que estão em fase de desativação ou já desativadas, reafirmando a importância do processo de recuperação de áreas degradadas para o setor de mineração. Soma-se a isso, a necessidade de uma ferramenta de fiscalização mais intensa, de modo a enfatizar a necessidade de um melhor processo de acompanhamento e fiscalização destas atividades.

1 Desenvolvimento

O termo “agregado” é descrito como um material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para produção de argamassa e concreto (ABNT - NBR 9.935, 2011), sendo destinado à construção de moradias, saneamento básico, pavimentação, dentre outros. Este segmento é caracterizado pelo baixo valor unitário dos bens extraídos, grande número de ocorrências e versatilidade quanto ao aproveitamento de diferentes tipos de minerais e rochas no emprego de uma mesma função (ALMEIDA e LUZ, 2009).

Segundo IBRAM (2012), o indicador nacional para o consumo de agregados em 2011 foi de 3,50 t/hab. O consumo per capita brasileiro evoluiu de 3,3 t/hab em 2010 para 3,5 t/hab em 2011, ou seja, um incremento de 6%. Comparativamente aos países desenvolvidos, o Brasil ainda está muito distante do valor médio histórico de 6 a 7 t/hab ano (por exemplo, Estados Unidos). Segundo o autor, as estimativas de produção nacional para 2022 são de 807 milhões de toneladas desta matéria-prima.

O município de Catalão está localizado no sudeste de Goiás a uma distância de, aproximadamente, 260 km da capital (Goiânia), possui 3.281,463 km² de área superficial, com uma população de, aproximadamente, 100.000 habitantes (IBGE, 2013). Segundo a Secretaria de Estado de Gestão e Planejamento (SEGPLAN, 2016), em 2012 foram produzidas da ordem de 27 mil toneladas de agregados, destinados principalmente à construção civil.

A extração de agregados minerais tem como principais aspectos o emprego de métodos simples, pouco onerosos e plenamente difundidos por todo país. As rochas para brita e os depósitos residuais de areia e cascalho são geralmente extraídos por métodos superficiais baseados no desmonte mecânico e no desmonte por explosivos, enquanto que os depósitos aluvionares e em leito de rio são geralmente explorados por métodos de dragagem. Geralmente a extração ocupa um espaço restrito e por tempo determinado devido à taxa de produção, as exigências de mercado e ao baixo conhecimento geológico da jazida mineral.

As principais alterações provocadas ao meio ambiente pela exploração de agregados são de ordem física e paisagística, sendo passível e necessária a recuperação da área (QUARESMA, 2009). Cabe ressaltar que a Constituição Federal Brasileira (BRASIL, 1988), em seu Art. 23, define a competência comum da União, dos Estados, Distrito Federal e dos Municípios, quanto à proteção do meio ambiente.

Uma tendência que vem sendo observada nos últimos anos é a utilização de indicadores para o diagnóstico e o acompanhamento da realidade de uma área em seus vários aspectos. Inseridos no contexto de gestão dos recursos ambientais, os indicadores são utilizados como instrumentos de análise e acompanhamento dos

processos de degradação ou recuperação ambiental, podendo ser utilizados para formulação de políticas públicas (CUNHA, 2003).

O desenvolvimento de indicadores de degradação e conseqüentemente a utilização de métodos numéricos, que possam quantificar a degradação ambiental de uma área específica, facilitam a interpretação de resultados e padronizam a avaliação, podendo cada área de estudo ser enquadrada em uma classificação contínua, de acordo com o resultado obtido. Além disso, apresentam a vantagem de ser facilmente aplicáveis, não exigindo necessariamente vasta experiência na área permitindo assim, a avaliação por diferentes profissionais em diversos níveis de formação (FERREIRA et al, 2008).

2 Metodologia

Denominada de Avaliação da Degradação Ambiental em Áreas Mineradas (ADAM), este método foi desenvolvido com base nos estudos de Ferreira et al. (2008). A avaliação por este método tem por objetivo a geração de um resultado numérico capaz de quantificar a degradação ambiental de uma área minerada, através da interação entre cinco indicadores: área desprovida de cobertura vegetal (SV), declividade média da área degradada (D), processos erosivos (PE), área de preservação permanente (APP) degradada (DAPP) e área degradada por extração mineral fora da poligonal demarcada pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) (ADF), em que o resultado mensurado em cada indicador varia entre zero e um (0 – 1). A seguir serão demonstradas as particularidades de cada indicador ambiental, bem como as formas e equações utilizadas para sua determinação.

Área desprovida de cobertura vegetal (SV): é fruto do processo de extração mineral na qual a vegetação e as camadas superficiais de solo são retiradas para acesso ao bem mineral a ser extraído. No método, este indicador é calculado através da razão entre a área sem cobertura vegetal e a área total requerida para extração mineral junto ao DNPM (área da poligonal requerida ao DNPM). O indicador pode ser calculado pela eq. (1).

$$SV = \frac{A_{SV}}{A_{POL}} \quad (1)$$

Onde:

SV = Indicador referente à área desprovida de cobertura vegetal;

A_{SV} = Área sem cobertura vegetal localizada dentro dos limites da área requerida ao DNPM (m²); e

A_{POL} = Área total requerida ao DNPM (m²).

Declividade média da área (D): a declividade é entendida como a inclinação do relevo em relação ao horizonte (VALERIANO, 2008). A declividade está diretamente ligada à velocidade de transformação da energia potencial em energia cinética, ou seja, quanto mais acentuada a declividade, maior é a velocidade das massas de água e, conseqüentemente, a sua capacidade de transporte (CREPANI et al., 2001).

Em alguns métodos de extração mineral podem ser criadas superfícies inclinadas, que contribuem para o transporte de sedimentos, acelerando a geração de processos erosivos e o assoreamento de cursos d'água, além da possível formação de áreas instáveis susceptíveis a deslizamentos e movimentos de massa. Esse indicador é determinado a partir do ângulo de inclinação média, medido em toda a área degradada. A Tabela 9.1 apresenta os valores a serem atribuídos ao indicador D, segundo Crepani et al. (2001).

Tabela 9.1 Valores de D segundo a declividade medida da área degradada.

Declividade (%)	Valores de D
<2	0
2 – 6	0,25
6 – 20	0,50
20 – 50	0,75
> 50	1,00

Fonte: Adaptado de CREPANI et al. (2001).

Processos erosivos (PE): em muitas áreas mineradas pode ocorrer o aparecimento de processos erosivos, principalmente associados à exposição do solo, à ação das chuvas e dos cursos hídricos. Os processos mais comuns são erosão laminar, em sulcos, ravinas e voçorocas; que podem provocar danos ambientais severos e de recuperação onerosa. O indicador PE é calculado através da razão entre o somatório dos comprimentos dos processos erosivos identificados por toda a área degradada e a metade do perímetro da poligonal requerida ao DNPM. Devem ser contabilizados apenas os processos mais marcantes e de fácil identificação como erosões em sulcos, ravinas e voçorocas, não levando em consideração a gravidade dos danos, mas apenas a sua continuidade e abrangência ao longo da área. O indicador é determinado conforme eq. (2).

$$PE = \frac{\sum_1^R LE}{\frac{1}{2} P_{POL}} \quad (2)$$

Onde:

PE = Indicador referente aos processos erosivos;

LE = Comprimento total dos processos erosivos identificados na área degradada (m); e

P_{POL} = Perímetro da área da poligonal requerida ao DNPM (m).

Área de APP degradada (DAPP): a remoção das áreas de APP durante o processo de exploração mineral constitui-se como um grave dano ambiental, modificando o fluxo hídrico local, destruindo ecossistemas e expulsando espécies de seu habitat. Entretanto, alguns tipos de extração são comuns em áreas de APP, como a extração de cascalho, de areia e de argila empregada na fabricação de cerâmica vermelha. Para aplicação do método ADAM, as áreas de APP serão delimitadas de acordo com a Lei n° 12.651 (BRASIL, 2012), que dispõe sobre a proteção de vegetação nativa. A determinação deste indicador se dará através da razão entre o somatório das áreas de APP degradadas por processos de extração mineral e as áreas de APP inseridas dentro da área da poligonal aprovada pelo DNPM, de acordo com a eq. (3).

$$DAPP = \frac{\sum_1^R AD_{APP}}{APP_{POL}} \quad (3)$$

Onde:

DAPP = Indicador referente às áreas de APP degradadas;

AD_{APP} = Área de APP degradada pelo processo de extração (m²); e

APP_{POL} = Área de APP inseridas dentro da poligonal aprovada pelo DNPM (m²).

É relevante observar que segundo as eq. (2) e (3) é possível obter resultados acima do valor máximo estabelecido para determinação de qualquer um dos indicadores, isto é, maior que um (1). Neste caso, se o valor calculado superar o máximo pré-determinado, deve-se desconsiderar o valor calculado e atribuir ao indicador o valor máximo pré-estabelecido pelo método.

Área degradada fora da poligonal aprovada pelo DNPM (ADF): a poligonal definida pelo DNPM é a base para regular as atividades de extração mineral, além de ser utilizada para regular a área máxima a ser requerida, de acordo com cada regime de aproveitamento. Os processos de extração mineral realizados fora da poligonal são tidos como clandestinos, sendo passíveis da aplicação de diversas sanções administrativas e penais.

O valor deste indicador será calculado através da razão entre a medida da área degradada fora da poligonal aprovada pelo DNPM e a própria área da poligonal, multiplicando o resultado por 100, (porcentagem), sendo posteriormente comparado aos valores de tolerância máxima, estabelecidos segundo a Tabela 9.2.

Tabela 9.2 Valores de Tolerância à degradação fora da poligonal DNPM.

Área da poligonal DNPM (1.000 m ²)	Tolerância máxima (%)
< 10	7,00
10 – 100	2,50
100 – 200	1,60
200 – 300	1,25
300 – 400	1,00
400 – 500	0,80

Fonte: Autoria própria.

Os valores de tolerância máxima foram definidos de maneira dedutiva, levando em consideração a degradação que pode ser gerada durante a execução de operações auxiliares à extração mineral, tais como: abertura de acessos e estradas para transporte do bem mineral, construção de alojamentos, construção de terraços para evitar o alagamento da área, dentre outras. Neste caso, se a área degradada fora da poligonal exceder o limite máximo tolerável, o indicador receberá o valor máximo, caso contrário o indicador receberá o valor calculado.

O cálculo do indicador ADF é apresentada pela eq. (4).

$$ADF = \left(\frac{AF_{POL}}{A_{POL}} \right) * 100 \quad (4)$$

Onde:

ADF = Indicador referente à área degradada fora da poligonal (%);

AF_{POL} = Área degradada fora da poligonal DNPM (m²); e

A_{POL} = Área total da poligonal requerida ao DNPM (m²).

Para a determinação dos pesos relativos de cada indicador, utilizou-se o Método de Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchy Process – AHP*) (SAATY, 1991). Na Tabela 9.3 são apresentados os critérios de importância relativos à análise de cada par de indicadores.

Tabela 9.3 Análise pareada dos indicadores de degradação ambiental.

Indicadores	Importância relativa	Indicadores
Processos erosivos (PE)	2	Área degradada fora da poligonal (ADF)
Processos erosivos (PE)	2	Área de APP degradada (DAPP)

Continua

Tabela 9.3 Análise pareada dos indicadores de degradação ambiental. (Continuação)

Indicadores	Importância relativa	Indicadores
Processos erosivos (PE)	3	Área sem cobertura vegetal (SV)
Processos erosivos (PE)	5	Declividade média (D)
Área degradada fora da poligonal (ADF)	2	Área de APP degradada (DAPP)
Área degradada fora da poligonal (ADF)	3	Área sem cobertura vegetal (SV)
Área degradada fora da poligonal (ADF)	4	Declividade média (D)
Área de APP degradada (DAPP)	3	Área sem cobertura vegetal (SV)
Área de APP degradada (DAPP)	4	Declividade média (D)
Área sem cobertura vegetal (SV)	3	Declividade média (D)

Fonte: Autoria própria.

De posse dos resultados obtidos pela análise paritária entre indicadores, desenvolveu-se a matriz pareada conforme o Método *AHP*. Na Tabela 9.4 são apresentados os pesos calculados para cada indicador ambiental, os quais representam a contribuição de cada indicador para a avaliação da degradação da área minerada.

Tabela 9.4 Pesos calculados pelo método *AHP*.

Indicador	Peso calculado
Processos erosivos (PE)	0,365
Área degradada fora da poligonal (ADF)	0,265
Área de APP degradada (DAPP)	0,205
Área sem cobertura vegetal (SV)	0,109
Declividade média (D)	0,055

Fonte: Autoria própria.

Utilizando-se os resultados dos pesos obtidos para cada um dos cinco indicadores de degradação ambiental, pode-se determinar o Índice de Degradação da Área Minerada (IDAM), o qual pode ser calculado através da eq. (5).

$$\text{IDAM} = 0,365\text{PE} + 0,265\text{ADF} + 0,205\text{DAPP} + 0,109\text{SV} + 0,055\text{D} \quad (5)$$

Onde:

IDAM = Índice de Degradação da Área Minerada (0 – 1,0).

Após calculado, deve-se comparar o resultado obtido com os valores apresentados na Tabela 9.5, que associa o IDAM com o nível de degradação ambiental da área. Esta tabela foi desenvolvida para classificar a degradação, permitindo que o resultado seja relacionado com o tempo (avaliação a longo prazo) ou a comparação entre áreas distintas. Foram criadas cinco classes de degradação ambiental variando entre degradação muito baixa até degradação muito alta.

Tabela 9.5 Classificação da degradação ambiental de áreas mineradas.

Valor do IDAM	Classificação
0 – 0,2	Degradação muito baixa
0,2 – 0,4	Degradação baixa
0,4 – 0,6	Degradação média
0,6 – 0,8	Degradação alta
0,8 – 1,0	Degradação muito alta

Fonte: Autoria própria.

O método ADAM possui como uma das principais vantagens a possibilidade de se utilizar dados adquiridos de diversas formas para o cálculo dos indicadores, como por exemplo: medições em campo através de equipamentos topográficos manuais, automatizados e/ou GPS; análise de imagens de satélite ou radar; análise de relatórios do desenvolvimento e execução do Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD); dentre outros; o que o torna simples e eficiente.

Dentre as diversas áreas utilizadas para extração de agregados minerais do município de Catalão, identificou-se uma requerida ao DNPM para extração de cascalho, distante, aproximadamente, 6,5 km do centro urbano. A área possui 4,78 ha e está localizada a noroeste de Catalão apresentando as coordenadas geográficas: 7.994.088,094 m S e 184.707,751 m E, que representam o centroide da área. De acordo com registros encontrados no site do DNPM, o licenciamento foi autorizado em 06/10/2011, entretanto, relatos de moradores próximos à área indicam que as atividades de extração só se iniciaram em meados de julho de 2012 e se encerraram por volta de maio de 2013.

Os dados utilizados para calcular a degradação ambiental pelo método ADAM foram coletados em duas etapas: visitas de campo e aquisição de dados geográficos via *download* pelo website do Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás (SIEG) e ao website do DNPM.

Durante a fase de coleta de dados realizaram-se duas visitas. A primeira foi dedicada ao reconhecimento da área e à criação de um registro fotográfico, apontando principalmente os impactos ambientais identificados. Durante a segunda visita foram demarcados 75 pontos de coordenadas geográficas com o auxílio de um aparelho GPS da marca Garmin®, modelo GPSMAP 60CSx. Os pontos foram demarcados ao redor de toda área degradada e também ao longo dos processos erosivos identificados. Os arquivos foram processados no *software* Arcgis® 10.1 e a partir dos pontos demarcados foi gerado o polígono referente à área sem cobertura vegetal e as linhas referentes aos processos erosivos.

Os dados referentes aos cursos d'água de todo território goiano foram importados do *website* do Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás e, após geoprocessamento, foram geradas as áreas de APP próximas à área experimental.

Os dados de altimetria da área foram inferidos através do *software* Google Earth®. Foram adicionados 80 marcadores, em forma de malha, espalhados por toda a área degradada objetivando uma amostra representativa para a determinação da declividade média da área. Os dados coletados foram exportados para o *software* Datamine Studio 3D®, no qual se gerou um modelo de superfície digital (DTM). A partir deste, criou-se curvas de nível a cada 0,5 m.

Na sequência, foi gerado o mapa de sobreposição. As variáveis necessárias para o cálculo dos indicadores ambientais SV, PE e ADF foram determinadas utilizando a ferramenta *Calculate Geometry* (Arcgis® 10.1) aplicada à tabela de atributos de cada arquivo vetorial. Para calcular a declividade média da área degradada, utilizou-se a ferramenta *Querylines* (Datamine Studio 3D®), ao longo do modelo de curvas de nível gerado a partir de pontos demarcados no Google Earth®.

Aplicando-se os valores dos parâmetros nas eq. (1), (2), (3) e (4) e comparando o resultado calculado de D com a Tabela 9.1 e o resultado de ADF com a Tabela 9.2, determinou-se o resultado de cada indicador de degradação ambiental referente à área experimental em estudo.

3 Discussão e resultados

O mapa contendo a área sem cobertura vegetal e as linhas referentes aos processos erosivos pode ser visualizado na Fig. 9.1. A altimetria e o modelo digital do terreno podem ser observados nas Fig. 9.2A e 9.2B.

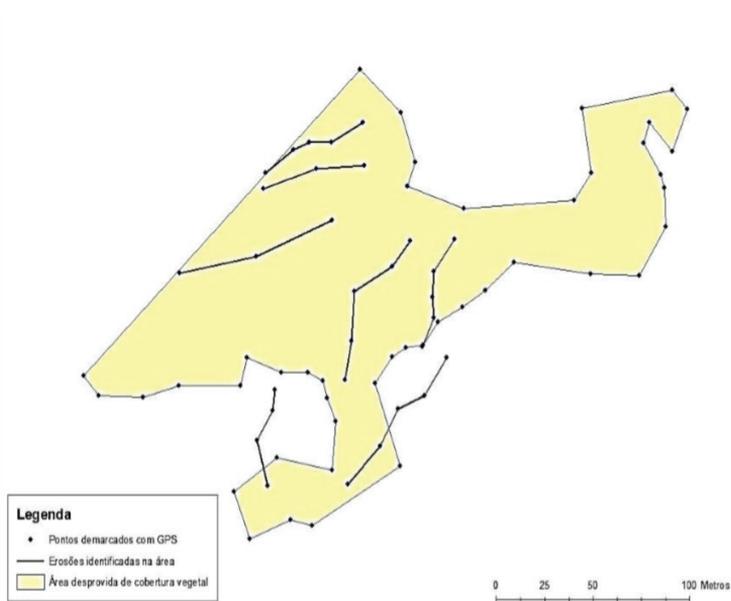


Figura 9.1 Mapa gerado a partir dos dados processados.

Fonte: Autoria própria.

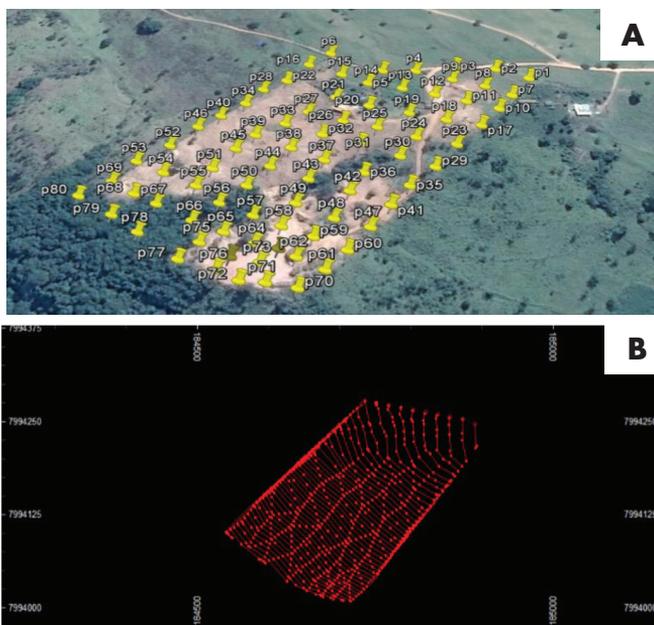


Figura 9.2 Altimetria e modelo digital do local de estudo.

Fonte: Autoria própria.

A declividade média calculada da área de estudo é de 6,92% e quando comparada com a Tabela 9.1, se refere a um valor de D de 0,50.

O mapa de sobreposição, com o indicador ambiental DA_{APP} , resultou em zero, pois constatou-se que as áreas de APP não foram degradadas.

Na Tabela 9.6 são apresentados os resultados dos parâmetros utilizados no cálculo dos indicadores do método ADAM.

Tabela 9.6 Valores dos parâmetros do método ADAM.

Parâmetro	Valor
A_{POL} (m ²)	47.802,69
P_{POL} (m)	906,36
A_{SV} (m ²)	14.739,99
LE (m)	447,37
DA_{APP} (m ²)	0,00
AF_{POL} (m ²)	8.132,53
APP_{POL} (m ²)	2.056,15

Fonte: Autoria própria.

Analisando a Tabela 9.6, nota-se que aproximadamente 31% do total da área encontra-se sem nenhum tipo de cobertura vegetal, justificando os mais de 440 m lineares de processos erosivos. Ainda, a área degradada fora da poligonal DNPM representa, aproximadamente, 17% reforçando a necessidade de uma fiscalização mais atuante.

Na Tabela 9.7 são apresentados os resultados dos indicadores do método ADAM.

Tabela 9.7 Valores dos Indicadores de Degradação Ambiental.

Indicador	Valor
Processos erosivos (PE)	0,99
Área degradada fora da poligonal (ADF)	1,00
Área de APP degradada (DAPP)	0,00
Área sem cobertura vegetal (SV)	0,31
Declividade média (D)	0,50

Fonte: Autoria própria.

Analisando os resultados apresentados pela Tabela 9.7, nota-se que os processos de degradação ambiental mais atuantes na área se devem aos processos de extração mineral fora da área da poligonal aprovada pelo DNPM (ADF) e aos processos erosivos (PE), respectivamente.

Aplicando a eq. (5), obteve-se um valor de IDAM igual a 0,687. Dessa forma, aplicando a Tabela 9.5, a área de estudo foi classificada em “Degradação Alta”, evidenciando que as atividades de recuperação ambiental da área não foram executadas de maneira satisfatória.

Por se tratar de uma área próxima ao centro urbano, acredita-se que o processo de gestão ambiental público foi insatisfatório, principalmente quanto à fiscalização da implantação e da execução do Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), o qual seria responsável por proporcionar o controle dos danos ambientais gerados durante a atividade de extração mineral.

Ainda, através da aplicação do método, identificou-se que as operações de extração mineral de cascalho excederam uma vasta área além daquela regulamentada e delimitada para exercício dessas atividades, evidenciando uma inconformidade grave, a qual deveria ser observada tanto pelo órgão ambiental competente quanto pelo DNPM.

Considerações finais

O método desenvolvido para avaliar a degradação ambiental ocasionada pela extração mineral, denominado ADAM, demonstrou-se ser eficaz. Entre as vantagens observadas durante a aplicação do método, destacam-se: a facilidade de aplicação; a facilidade durante a aquisição de dados; a possibilidade de se utilizar dados coletados através de diferentes mecanismos; o resultado padronizado, possibilitando a avaliação isolada de áreas degradadas em relação ao tempo e em relação a outras áreas; e foco quantitativo na avaliação dos impactos ambientais.

Os resultados obtidos com a aplicação do método podem ser utilizados durante as fases de planejamento, execução e fiscalização do PRAD, apontando a evolução da recuperação da área em estudo. Além de facilitar a identificação dos principais impactos, auxilia no desenvolvimento de ações para neutralizá-los. Este tipo de ferramenta pode assessorar a gestão pública ambiental e territorial, que demandam tempo e recursos financeiros para serem controlados e mitigados.

A área estudada apresentou um Índice de Degradação da Área Minerada igual a 0,687, correspondendo a uma degradação ambiental alta. Sabendo que as análises foram realizadas após o término da exploração, constata-se que as atividades de recuperação ambiental não apresentaram resultados satisfatórios ou que o processo de fiscalização ambiental, quanto à execução do PRAD, não garantiu a sua recuperação.

Referências

- ABNT. NBR 9935: **Agregados – terminologia**. Rio de Janeiro, 2011. 12p.
- ALMEIDA, S. L. M.; LUZ, A. B. (Ed.). **Manual de agregados para construção civil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. 245p.
- BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal, 1988. 292p.
- BRASIL. **Lei nº 12.651/2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília, DF: Senado Federal, 2012. 34p.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2001. 103p.
- CUNHA F. L. S. J. **O uso de indicadores de sustentabilidade ambiental no monitoramento do desenvolvimento agrícola**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2003. 85p.
- FERREIRA. C. J.; BROLLO. M. J.; UMMUS. M. E.; NERY. T. D. Indicadores e quantificação da degradação ambiental em áreas mineradas, Ubatuba (SP). **Revista Brasileira de Geociências**, volume 38, 2008. 12p.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Populacional 2013**. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso: 10 de agosto de 2016.
- IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações e Análises da economia mineral brasileira**. 7ª ed. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2012. 68p.
- QUARESMA. L. F. **Agregados para construção civil. Perfil de areia para construção civil**. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2009. 33p.

SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica**. São Paulo: McGrawHill_Makron, 1991. (Versão ampliada e revisada por Wainer da Silveira e Silva, do original em inglês *The Analytic Hierarquic Process*, Pittsburg, USA: R WS Publications, 1980).

SEGPLAN. **Secretaria de Estado de Gestão e Planejamento**. Disponível em: www.segplan.go.gov.br. Acesso em: 15 ago. de 2016.

Parte 2

Gestão de projetos

A utilização do conceito PMI na gestão de um projeto de sistema de coletores de dados em uma siderúrgica

Igor Carneiro Nicolau¹

Larissa Juliana Patrocínio²

César Augustus Adorno

Ferreira Lima³

Hélio Yochihiro Fuchigami⁴

Resumo: O planejamento estratégico é atualmente visto como de grande importância no cenário empresarial. Para alcançar os objetivos, cada vez mais ambiciosos, utilizam-se diversas ferramentas corporativas, entre elas, os projetos. Estes por sua vez, devido à sua possível complexidade e gama de possibilidades, podem ser gerenciados de diversas maneiras, muitas das quais, de maneira intuitiva. O PMI, instituto reconhecido mundialmente como referência em âmbito de gerenciamento de projetos, define normas e padrões a nível internacional para promover a comunicação eficaz dos profissionais desta área. Existem diversas pesquisas sobre o tema abordado, porém, com uma deficiência em exemplos práticos no ambiente de manufatura. Visando a exploração deste objeto, este projeto exemplifica o ambiente de uma empresa multinacional do ramo de siderurgia, localizada na região metropolitana de Belo Horizonte, gerenciando um projeto de inserção do sistema de coletores de dados, no setor de forja, competente pela superintendência de tubos automotivos.

Palavras-chave: PMI. Projetos. Siderúrgica.

1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Centro de Gestão e Negócios. Contato: igornicolau@hpeautos.com.br

2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Centro de Gestão e Negócios. Contato: larissajps_@hotmail.com

3 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Centro de Gestão e Negócios. Contato: pharmaperito@gmail.com

4 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Aparecida de Goiânia, Unidade Acadêmica Centro de Gestão e Negócios. Contato: heliofuchigami@yahoo.com.br

Introdução

Conforme o Guia PMBOK (20013, p.11), “um projeto é um esforço temporário empreendido para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo”. Em gerenciamento de projetos, torna-se possível obter um resultado satisfatório a menção de critérios qualitativos e quantitativos em sucesso ou goro para determinar a viabilidade da campanha.

Sabe-se que a definição de projeto implica em um resultado exclusivo, delimitado em um determinado espaço de tempo, possuindo assim um início e um final. Embora um projeto possa ser análogo a outro em alguns quesitos, sua singularidade é caracterizada pelos aspectos únicos de cada litígio.

Dos possíveis cenários para a implementação do sistema de gerenciamento de projetos é o ambiente industrial em âmbito de investimento no planejamento e controle de produção, onde é assunto deste projeto. O cenário escolhido é de uma siderúrgica, fabricante de tubos de aço sem costura, situada na região metropolitana de Belo Horizonte, tendo o projeto atuado no setor de tubos automotivos, especificamente no setor de forja.

O projeto tem como objetivo garantir a rastreabilidade do estoque WIP e sustentar confiabilidade para os programadores da linha produtiva. Para tal, será definida uma metodologia de aplicação em parceria com os setores envolvidos, utilizando os critérios do PMI como indutor do roteiro mais adequado para se abranger eficiência e eficácia adequadas ao investimento proposto.

O presente projeto demonstrará de forma teórica e prática, a abordagem do gerenciamento de projetos, segundo as normas do PMI, no ambiente industrial de uma siderúrgica de grande porte, no âmbito de conceber um sistema de coletores de dados para assegurar maior confiabilidade no processo de controle de produção, a fim de contribuir para interessados na área de gerenciamento de projetos, sendo tratado como uma fonte de pesquisa empresarial, bem como se tornar uma referência para pesquisas acadêmicas futuras.

O assunto-problema abordado no projeto trata-se de assegurar uma metodologia adequada no andamento de todas as etapas do projeto, para que desta maneira possa credenciar todas as fases do mesmo, gerando consequentemente uma probabilidade efetiva de sucesso em detrimento de fatores não mensurados por uma metodologia vulga. Sabe-se que o PMI é um instituto de referência no contexto de gerenciamento de projetos, publicando ao longo do tempo as diversas edições do guia PMBOK, no nível de padrão internacional neste campo, para auxiliar aqueles que lidam nesta ciência.

O objetivo geral do artigo é analisar as etapas do projeto de concepção do sistema de coletores de dados em uma siderúrgica da região metropolitana de Belo Horizonte, utilizando as normas do PMI como referência. Justifica-se

a realização deste projeto pela necessidade do mercado empresarial e do meio acadêmico em se obter informações acerca do gerenciamento de projetos em um ambiente de manufatura aplicável, utilizando os conceitos do PMI a fim de obter os resultados desejados e conseqüentemente maximizar as possibilidades que competem a este artigo.

Devido à complexidade das regras descritas no PMBOK, e a falta de mão de obra qualificada para gerenciar um projeto neste nível, as empresas se desprendem dos conceitos do PMI e adotam alternativas paralelas para atender a esta demanda. Contudo, se tratando de normas reconhecidas mundialmente, com prestígio elevado na sociedade empresarial e acadêmica, o PMI é admitido dentre as metodologias existentes como a escolha mais plausível para se gerenciar um projeto.

Para tal, entende-se a necessidade de um mercado fomento por profissionais qualificados para que estes supram a necessidade das empresas e possam desenvolver os processos, utilizando-se das regras do PMI para contribuir com essa otimização, e resultar a elevação do nível do gerenciamento de projetos. Observa-se que a pesquisa neste segmento é ampla, porém carente quando se trata de exemplos práticos no cenário em questão.

Faz-se necessário a produção de artigos com o tema abordado, para contribuir com a erradicação das carências identificadas e conseqüentemente ser adotado por profissionais e acadêmicos que dispõem de interesse sobre o objeto desta pesquisa.

1 Desenvolvimento

Nesse capítulo iniciar-se-á a explanação dos conceitos fundamentais no gerenciamento de projetos, refratando as informações contidas no PMBOK e a de autores em bibliografias levantadas acerca do tema.

1.1 Gerenciamento de projetos

Em crescente conceituação no ambiente corporativo, o gerenciamento de projetos traz consigo inúmeras possibilidades sobre o tema abordado (Guia PMBOK, 2013). Observa-se que as empresas tendem atualmente a criarem ou desenvolverem setores que lidam diretamente no âmbito de projetos.

Descrito como um manual de boas práticas aplicadas amplamente no tema de gerenciamento de projetos, o PMBOK define que as normas contidas em sua publicação garantem o sucesso em grande parte dos projetos, visto que se baseia em estudos que geraram conhecimentos aplicáveis a uma gama consideravelmente ampla (Guia PMBOK, 2013). Além de sua aplicabilidade, observa-se que a padro-

nização de um vocabulário comum dentro da profissão é fundamental para que os profissionais possam de forma geral, comunicarem-se de forma efetiva.

Entende-se projeto, segundo o Guia PMBOK (2013, p.11), como “um esforço temporário empreendido para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo”. Para tal, um projeto tem como característica possuir um início e um final, sendo que este último dá-se quando da conclusão do mesmo ou quando os objetivos não puderam ser alcançados. A gestão desta tarefa é tratada como gerenciamento de projetos, onde se aplicam conhecimento, habilidades, ferramentas e técnicas para atingir o almejado resultado.

Diferentemente de operação, que é uma execução contínua de uma atividade, os projetos não são ininterruptos, pois eles devem ter um fim. Este fim pode resultar na criação de uma operação contínua, porém o projeto terá o término decretado. “Os projetos exigem um gerenciamento de projetos enquanto as operações exigem um gerenciamento de processos de negócios ou gerenciamento de operações” (Guia PMOBOK, 2013, p.18).

Comumente utilizados para atingir um plano estratégico de uma corporação, os projetos normalmente são possibilitados a partir da exigência de uma ou mais das demandas estratégicas, que conforme Cleland et al (2007) podem ser:

- Demanda de mercado;
- Oportunidade/necessidade estratégica de negócios;
- Solicitação de cliente;
- Avanço tecnológico;
- Requisito legal.

Essas considerações estratégicas podem ser atribuídas a um escritório de projetos (Project Management Office, PMO), onde as atividades gerenciais de projetos são centralizadas e este coordenada de forma adequada às estratégias para que a corporação possa atingir suas metas estratégicas. Entre as funções delegadas a um escritório de projetos pode ser presente apenas a função de staff, bem como a responsabilidade de gerenciar um projeto diretamente. Este conceito do PMI é similar ao conceito do IMPA (NCB, 2006, p. 15) “seu papel é tipicamente garantir suporte, definir diretrizes e normas para os gestores de diferentes projetos e programas, coletar dados dos diferentes projetos, consolidá-los e relatá-los a algum órgão ou comitê”.

Um dos papéis de maior importância atribuídos no gerente de projetos é o da figura de um gerente de projetos. Este por sua vez tem a responsabilidade por atingir os objetivos do projeto. Conforme Cleland et al (2007), a função de gerente de projetos requer três características fundamentais, são elas, o conhecimento, que se refere aos conhecimento na área de gerenciamento de projetos, o desempenho, definindo-se como a ação enquanto conhecimento relativo em relação ao gerenciamento de projetos, e por último, o pessoal, que lida com a capacidade de liderança, administrar conflitos e situações de pessoal em um ambiente de um projeto.

Conforme observado na figura 10.1, os projetos possuem um ciclo de vida, sendo que este período pode variar de acordo com diversos fatores que o influenciam. Identifica-se, segundo o Guia PMBOK (2013) os ciclos de início do projeto, organização e preparação, execução do trabalho do projeto e encerramento do projeto.

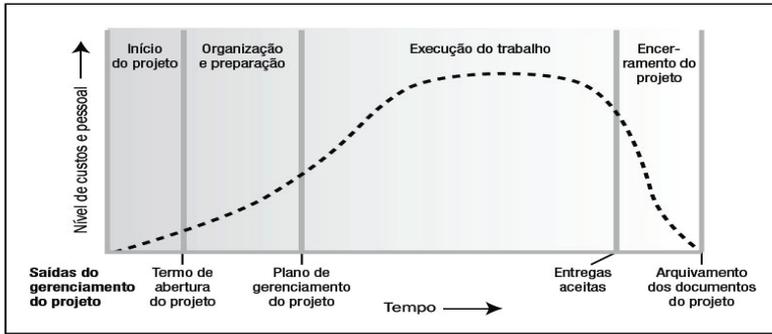


Figura 10.1 Nível típico de custos e pessoal ao longo do seu ciclo de vida.

Fonte: (Guia PMBOK, 2013, p. 22).

Ressalta-se na figura 10.1, conforme o Guia PMBOK (2013), que os projetos possuem algumas características similares. Os níveis de custo tendem a serem baixos no início, alcançam valores maiores durante a execução, e declinam ligeiramente quando se aproxima da conclusão. A figura 10.2 demonstra outra analogia tratando-se da influência das partes interessadas enquanto duração de um projeto, sendo que esta importância é maior no início do projeto e vai decrescendo ao longo do ciclo de vida do projeto. Como tal, os custos de correção de um produto de projetos crescem ao longo do tempo, visto que em sua etapa inicial a retificação dar-se-á de maneira menos agressiva.

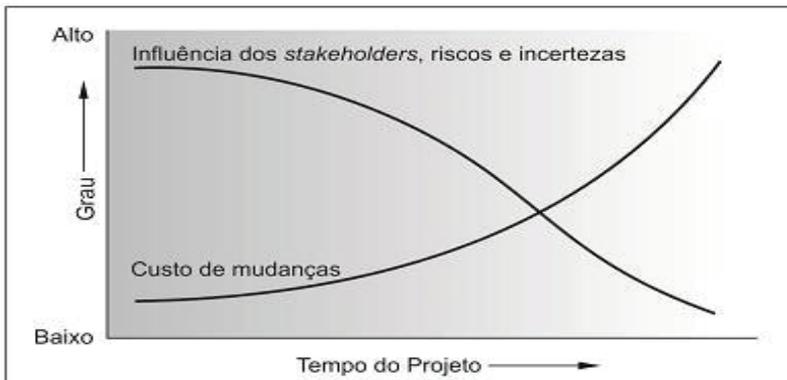


Figura 10.2 Impacto da variável com base no tempo decorrido do projeto.

Fonte: (Guia PMBOK, 2013, p. 22).

Este aglomerado de competências descritas até então, segundo o Guia PMBOK (2013), são atingíveis mediante a aplicação de quarenta e dois processos divididos em cinco grupos conforme quadro 1. São eles a iniciação, o planejamento, a execução, o monitoramento e controle, e finalmente, o encerramento.

Quadro 10.1 Mapeamento de grupos de processos de gerenciamento de projetos e áreas de conhecimento.

Áreas do Conhecimento	Grupos de Processos				
	Iniciação	Planejamento	Execução	Monitoramento e Controle	Encerramento
Integração	Desenvolver Termo de Abertura do Projeto	Desenvolver Plano de Gerenciamento do Projeto	Orientar e gerenciar a execução do projeto	Monitorar e controlar o trabalho do projeto	Encerrar projeto ou fase
				Realizar controle integrado de mudanças	
Escopo		Planejar gerenciamento do escopo		Validar escopo	
		Coletar requisitos		Controlar escopo	
		Definir escopo		Controlar cronograma	
		Criar EAP			
Tempo		Planejar gerenciamento de tempo			
		Definir atividades			
		Sequenciar atividades			
		Estimar recursos das atividades			
		Estimar durações das atividades			
		Desenvolver cronograma			
Custo		Planejar gerenciamento de custo		Controlar custos	
		Estimar custos			
		Criar orçamento			

Continua

Quadro 10.1 Mapeamento de grupos de processos de gerenciamento de projetos e áreas de conhecimento. *(Continuação)*

Áreas do Conhecimento	Grupos de Processos				
	Iniciação	Planejamento	Execução	Monitoramento e Controle	Encerramento
Qualidade		Planejar gerenciamento da qualidade	Realizar garantia da qualidade	Realizar controle da qualidade	
Recursos humanos		Planejar gerenciamento dos recursos humanos	Mobilizar equipe do projeto		
			Desenvolver equipe do projeto		
			Gerenciar equipe do projeto		
Comunicação		Planejar gerenciamento da comunicação	Gerenciar comunicação	Controlar comunicação	
Riscos		Planejar gerenciamento de riscos		Monitorar e controlar riscos	
		Identificar riscos			
		Realizar análise qualitativa dos riscos			
		Realizar análise quantitativa dos itens			
		Planejar respostas aos riscos			
Aquisições		Planejar gerenciamento das aquisições	Conduzir aquisições	Administrar aquisições	Encerrar aquisições
Partes interessadas	Identificar partes interessadas	Planejar gerenciamento das partes interessadas	Gerenciar partes interessadas	Monitorar gerenciamento das partes interessadas	

Fonte: <http://www.segplan.go.gov.br> (acesso em 15/06/2016 às 18:11)

Diferentemente do conceito do PMI, o IPMA, outro instituto internacional em gerenciamento de projetos, tem o NCB como guia prático no ramo citado. Para o IPMA (NCB, 2006), um projeto é composto de algo chamado de olho da competência, onde se encontram competências contextuais, competências comportamentais e competências técnicas. Para o IPMA, um projeto é estruturado em três níveis de competências, onde os processos são descritos conforme quadro 2.

Quadro 10.2 Visão geral dos elementos da competência.

1 Competências técnicas	2 Competências comportamentais	3 Competências contextuais
1.01 Sucesso no gerenciamento do projeto	2.01 Liderança	3.01 Orientação e projetos
1.02 Partes interessadas	2.02 Comprometimento e motivação	3.02 Orientação e programas
1.03 Objetivos e requisitos do projeto	2.03 Autocontrole	3.03 Orientação e portfólio
1.04 Riscos: oportunidades e ameaças	2.04 Assertividade	3.04 Implementação de projetos, programas e portfólios (PPP)
1.05 Qualidade	2.05 Descontração	3.05 Organização permanente
1.06 Organização do projeto	2.06 Abertura	3.06 Negócio
1.07 Trabalho em equipe	2.07 Criatividade	3.07 Sistemas, produtos e tecnologias
1.08 Resolução de problemas	2.08 Orientação para resultados	3.08 Gestão de pessoas
1.09 Estruturas do projeto	2.09 Eficiência	3.09 Saúde, meio-ambiente e segurança
1.10 Escopo e entregas	2.10 Aconselhamento	3.10 Finanças e contabilidade
1.11 Tempo e fases do projeto	2.11 Negociação	3.11 Aspectos legais
1.12 Recursos	2.12 Conflitos e crises	
1.13 Custos e finanças	2.13 Confiabilidade	

Continua

Quadro 10.2 Visão geral dos elementos da competência. *(Continuação)*

1 Competências técnicas	2 Competências comportamentais	3 Competências contextuais
1.14 Aquisições e contratos	2.14 Valores	
1.15 Alterações	2.15 Ética	
1.16 Controle e reporte		
1.17 Informação e documentação		
1.18 Comunicação		
1.19 Iniciação		
1.20 Encerramento		

Fonte: (NCB, 2006, p. 28)

Cada etapa geralmente é sequenciada, porém elas podem sobrepor-se em algumas circunstâncias. As etapas têm como foco segmentar um projeto em conjunções lógicas para facilitar o gerenciamento, o planejamento e o controle (Guia PMBOK, 2013), e podem ser influenciadas consequentemente pelo grau de complexidade de todos os fatores envolvidos no projeto. Existem três tipos fundamentais de relações entre fases:

- Uma relação sequencial: deve-se terminar a fase anterior para iniciar outra etapa, como demonstrado na figura 10.3. Esta relação reduz incertezas acerca do projeto, porém retém a oportunidade de redução do cronograma, aumentando assim o tempo total do projeto;

Uma abordagem de limpeza de um local dos resíduos perigosos



Figura 10.3 Exemplo de um projeto de três fases.

Fonte: (Guia PMBOK, 2013, p. 26).

- Uma relação sobreposta: antes da arrematação de uma fase, inicia-se outra, conforme figura 10.4. Esta opção geralmente provoca aumento de retrabalhos devido à falta de provisões de informações que a fase anterior pode suprir ao termino;

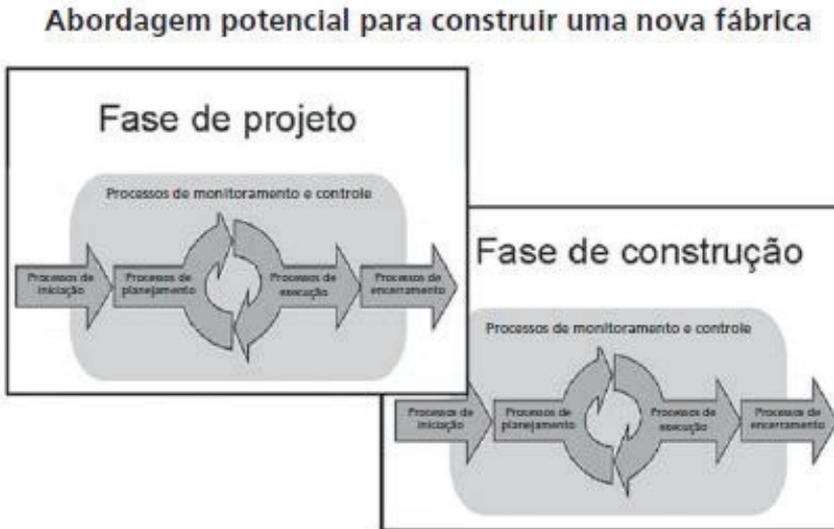


Figura 10.4 Exemplo de um projeto com fases sobrepostas.

Fonte: (Guia PMBOK, 2013, p. 26).

- Uma relação iterativa: nesta relação apenas uma fase está planejada e as demais são planejadas à medida que se dá o avanço da fase atual. Dá-se esta abordagem quando o cenário é muito incerto e sujeito à demasiada oscilação.

Os chamados stakeholders, ou partes interessadas, “são pessoas ou organizações (por exemplo, clientes, patrocinadores, organização executora ou o público) ativamente envolvidas no projeto ou cujos interesses podem ser positiva ou negativamente afetados pela execução ou término do projeto” (Guia PMBOK, 2013, p. 27). Cabe a figura do gerente de projetos identificar e administrar as partes interessadas e a sua influência sobre o projeto, bem como determinar as condições e as expectativas dos mesmos em relação ao produto gerado pelo esquema. A figura 10.5 demonstra a relação das partes interessadas com o projeto.

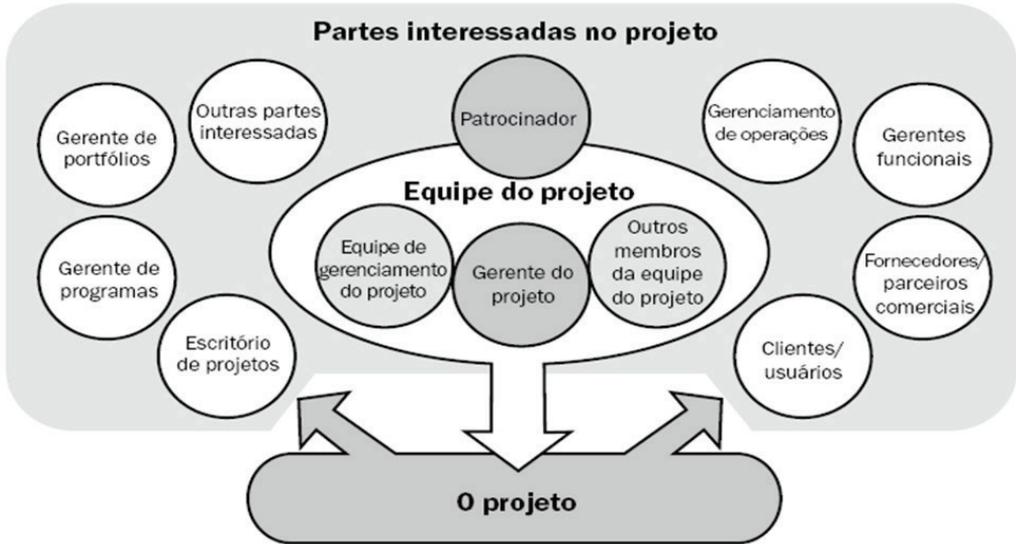


Figura 10.5 A relação entre as partes interessadas e o projeto.

Fonte: (Guia PMBOK, 2013, p. 28).

Identificar as partes de um projeto é uma tarefa de difícil execução (Cleland et al, 2007). Negligenciar este processo acarreta em maximizar os riscos acerca do sucesso da empreitada. Conforme o Guia PMBOK (2013), incluem-se nas partes interessadas de um projeto:

- Clientes/usuários: definidos como os beneficiários do produto gerado pelo projeto. Podem ser internos ou externos em relação à empresa.
- Patrocinador: trata-se do financiador do projeto, em suma, a pessoa ou organização que provém recursos financeiros para tal. Esta figura é aquela que determina o volume de comprometimento em nível gerencial, também participando ativamente do escopo inicial e termo de abertura.
- Gerentes de portfólios/comitê de análise de portfólios: são responsáveis pela direção de um conjunto de projetos ou programas, nos altos níveis gerenciais.
- Gerentes de programas: responsáveis pelo gerenciamento de projetos coordenada tendendo adquirir benfeitorias e controles não disponíveis no gerenciamento singular. Estes dispõem de ajuda para os gerentes de projetos.
- Escritório de projetos: centraliza as ações envolvidas nos projetos de forma a atribuir o propriedade dos mesmos à sua coordenação.
- Gerentes de projetos: são nomeados pela organização executora para alcançar os desígnios do projeto. Trata-se de um papel conspícuo, determinante para uma execução adequada de acordo com o interesse das demais partes interessadas.

- Equipe do projeto: composta essencialmente pelo gerente de projetos e por aqueles que são nomeados para executar o projeto, mas não fundamentalmente envolvidos com o gerenciamento de projetos.
- Gerentes funcionais: são aqueles que desempenham uma atividade gerencial dentro da organização e podem servir de consultoria para determinado assunto correlacionado com o projeto.
- Gerenciamento de operação: lidam, diferentemente dos gerentes funcionais, com uma área relacionada exclusivamente com a produção ou serviço prestado pela empresa.
- Fornecedores/parceiros comerciais: são empresas externas que perdura um contrato para fornecimento de componentes ou serviços imprescindíveis para o projeto.

2 Metodologia / procedimentos utilizados

Para realização deste projeto é utilizada a metodologia descritiva, empregando-se da utilização de pesquisa bibliográfica em livros, artigos, internet, congressos e revistas. A credibilidade do artigo é assegurado pela pesquisa em fontes científicas devidamente credenciadas de acordo com as normas de metodologia científica usualmente adotadas.

Investigando os procedimentos através de visitas à empresa e participando de atividades no projeto, caracteriza-se a pesquisa de campo. Faz-se necessário o acompanhamento das etapas a fim de alcançar maior credibilidade e os participantes são fundamentais para o sucesso da empreitada.

O estudo de caso, tratando-se de um problema identificado pela empresa e trazendo a estrutura do gerenciamento de projetos do PMI como solução para melhor atender às necessidades da campanha, é identificado quando o objeto tem cunho real e não experimental.

Considera-se a utilização da metodologia adequada, mediante as informações acima explanadas. O uso de tais métodos justifica-se pelo objeto de pesquisa e o cenário adotado.

3 Discussão e resultados

Apresenta-se a seguir a utilização dos conceitos explanados anteriormente em um projeto compelido a um cenário de manufatura em uma empresa multinacional, siderúrgica, de grande porte, fabricante de tubos de aço sem costura situada na região metropolitana de Belo Horizonte. O setor ao quais os dados competem é o da forja, situado na superintendência de tubos automotivos.

O produto fabricado pela forja tem o emprego no mercado automotivo na fabricação de eixos para caminhões, ônibus, caminhonetes, pick-ups, máquinas agrícolas e terceiros eixos para trucks e carretas. Os dados foram angariados no período que abrange entre 01 de janeiro de 2015 e 31 de dezembro de 2015.

A demanda por um sistema confiável de rastreabilidade do estoque em processo (WIP) designou a concessão para obter-se um projeto com a finalidade de suprir esta questão. Em um cenário macro, esta ação é promovida por uma empreitada em redução de custos e otimização dos processos sistêmicos para que a qualidade e confiabilidade das informações sejam alocadas em um sistema de melhoria contínua pregado pela empresa.

Para tal utilizar-se-á o modelo de gerenciamento de projetos do PMI, onde as áreas de conhecimento e os processos contidos nas mesmas serão adotados.

3.1 A gestão do projeto conforme o PMI

A abordagem segundo o conceito do *PMI* impõe a reunião de *kickoff meeting*, onde o financiador do projeto (*sponsor*), neste caso, o superintendente de tubos automotivos, informa o produto esperado e nomeia o gerente de projetos. O produto esperado é a adoção de uma solução para ter um controle mais elaborado e preciso do estoque em processo, sendo que, desta forma, e integrado com o sistema *ERP*, o departamento de planejamento e controle de produção (PCP) seja capaz de obter informações concisas afins de, conseqüentemente, contribuir para outros processos de planejamento como a solicitação de matéria-prima, controle de estoque, velocidade da linha de produção, apontamentos de ordens de produção, gerenciamento de recursos e atendimento dos pedidos de clientes.

A equipe de projetos foi definida pelo gerente de projetos, demonstrando os cargos e os departamentos na tabela 1.

Tabela 10.1 A equipe relacionada para o projeto de sistema de coletores de dados

Cargo	Departamento
GERENTE DE PROJETOS	ESCRITÓRIO DE PROJETOS
CONTROLLER	CONTABILIDADE
SUPERVISOR DE PCP	FORJA
ENGENHEIRO	FORJA
PROGRAMADOR	FORJA
ENCARREGADO	FORJA
ANALISTA DE T.I.	TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO

Continua

Tabela 10.1 A equipe relacionada para o projeto de sistema de coletores de dados (*Continuação*)

Cargo	Departamento
ANALISTA DE PL.	PLANEJAMENTO
COMPRADOR	COMPRAS CORPORATIVAS
SUPERVISOR DE INFRAESTRUTURA	INFRAESTRUTURA

Fonte: produção própria.

Seguindo as etapas definidas do *PMI*, os processos foram definidos pela metodologia do *PMBOK*. Assim sendo, envolveu-se no projeto, após definições, uma empresa terceirizada para desenvolver o *software* a ser utilizado para integrar-se com o *ERP*.

Os pré-requisitos necessários foram definidos pela equipe de projetos. O sistema deverá ser acessado via intranet, utilizando-se do recurso da web. Por tratar-se de um sistema que será utilizado por uma gama relativamente grande de usuários, define-se que o mesmo possuirá linguagem simples, objetiva e intuitiva, a fim de atender às limitações que alguns dos usuários venham a apresentar.

Para garantir a eficácia no processo de concepção deste sistema, a empresa desenvolvedora do *software* foi contratada por um período de três meses após o término do projeto para suporte do mesmo.

De acordo com as informações coletadas, o projeto iniciou-se em 01/03/2015 e teve o término em 26/06/2015, possuindo assim duração de 84 dias atingindo a marca de 1.168 horas de trabalho empenhado.

O projeto repassou cada um dos 47 processos de Gerenciamento de Projetos, avaliando sua necessidade ou não, e assim, podendo adotar as práticas adequadas para seu desenvolvimento. Isso assegurou que a gestão do projeto fosse efetivada da maneira mais alinhada com a metodologia do *PMBOK*.

Conclusões ou considerações finais

Neste projeto conceituou-se um projeto segundo as normas contidas no *PMBOK*, definidas pelo *PMI*, um instituto de prestígio mundialmente reconhecido na área de gerenciamento de projetos. A partir destas premissas, observa-se que o projeto obteve maior confiabilidade em relação às exigências dos *stakeholders* e o pedido do *sponsor*.

As cinco divisões aplicadas nos quarenta e dois processos asseguraram que nenhuma lacuna para falha possuísse oportunidade para atingir o projeto. Entre as etapas, observa-se a importância em especial para a do planejamento. Nesta, o

tempo dedicado com a finalidade de se mensurar as possibilidades e de estruturar-se para atingir o objetivo foi fundamental para decreto da satisfação de todas as partes interessadas.

Conclui-se que a aplicabilidade do sistema contido no Guia PMBOK é credenciada ao sucesso, visto que esse deve ser encarado como não apenas o sucesso do projeto em si, mas na possibilidade de se identificar a viabilidade do mesmo e de obter-se a resposta antecipada sobre esta situação. Em relação ao projeto que foi o objeto desta pesquisa, o mesmo foi concretizado com sucesso, atendendo às exigências definidas e possuindo pequena, mas aceitável variação, em relação aos custos e ao tempo. O gerenciamento de projetos *PMI* mostrou-se eficaz e aprovado no ambiente de uma manufatura.

Referências

- CHIAVENATO, I. *Teoria Geral da Administração*. vol. 1. 6ª ed. Rio de Janeiro: Campus, 1999.
- Cleland, D. I.; Ireland, L. R. *Gerenciamento de projetos*. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- HITT, M. A.; IRELAND, L. R. D.; HOSKISSON, R. E.. *Administração Estratégica: competitividade e globalização* 1. ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.
- IPMA (International Project Management Association). *IPMA Competence Baseline*. 3 ed, 2006. Disponível em: <http://www.ipma.ch/Documents/ICB_V_3.0.pdf>. Acesso em 15 jun. 2016.
- JOÃO, B.. *Estratégias Emergentes*. In: CAVALCANTI, Marly (Org.). *Gestão Estratégica de Negócios*. 1. ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2001.
- KERZNER, H.. *Gestão de Projetos: As Melhores Práticas*. Trad. Lene Belon Ribeiro. 2ª Ed. Porto Alegre, 2006.
- LEAL, L. Q. *Uma Abordagem de Gerenciamento Ágil de Projetos de Software baseada no PMBOK® Guide*. Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Informática, 2007. Disponível em: <<http://portal.cin.ufpe.br/gp2/Presentations Download/Luciana-30-08-07.ppt>>. Acesso em 15 jun de 2016.
- OCHNER, J. *GERÊNCIA DE PROJETOS: UMA COMPARAÇÃO ENTRE O PMBOK E XPM*. Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência

da Computação, 2006. Disponível em: <http://www.bcc.ufla.br/monografias/2005/Gerencia_de_projetos_uma_comparacao_entre_o_PMBOK_e_XPM.pdf>. Acesso em 15 jun. 2016.

PMBOK, GUIDE. **Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos**. 2013.

SECRETARIA DO ESTADO DE GESTÃO E PLANEJAMENTO. **Biblioteca Virtual**. Disponível em: <<http://www.segplan.go.gov.br>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

TORREÃO, P. G. B. C. (2005) **Project Management Knowledge Learning Environment: Ambiente Inteligente de Aprendizado para Educação em Gerenciamento de Projetos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

Aplicação do problema de open shop em uma linha de inspeção automotiva

Ludimila Aparecida Louzada¹

Ruvier Rodrigues Pereira³

Pedro Henrique Pedrosa de Melo²

Resumo: O presente artigo aborda o problema de sequenciamento ou *scheduling* em sistemas de produção. A problemática é situada numa linha de inspeção final automotiva, onde a produção é caracterizada como sendo do tipo *open shop* com restrição do tipo *no-wait*, no qual é preestabelecido uma sequência dos modelos de carros nos tipos de inspeções, com o intuito de reduzir o *makespan*. Para tanto, são abordadas as principais definições acerca dos sistemas e sequenciamento de produção, enfatizando os ambientes *open shop*. A busca pela solução ótima do problema é feita utilizando método analítico, por meio de tabelas e aplica-se também uma meta-heurística conhecida como método de Colônia de Formigas, apresentando sua definição e as principais características. Como resultado apresenta-se uma solução ótima para o problema, de forma que a meta-heurística empregada e o método analítico evidenciaram um ótimo desempenho no objetivo específico desse trabalho.

Palavras-chave: Open shop. Sequenciamento. Colônia de Formigas.

Introdução

Atualmente, as indústrias encontram-se em um mercado competitivo e inovador, tendo como principal objetivo a otimização de um ou mais processos. Desta

1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização. Contato: ludimila_ap7@hotmail.com.

2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização. Contato: eng.pedromelo@hotmail.com. Bolsista FAPEG.

3 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização. Contato: ruvierrodrigues@hotmail.com. Bolsista FAPEG.

forma, o Planejamento e Controle de Produção (PCP) desempenha um papel fundamental nas empresas, principalmente na otimização de processos juntamente com o sequenciamento de produção (*scheduling*), proporcionando maiores lucros, melhores aproveitamentos do sistema, redução de tempo, além de reduzir custos na produção. Assim, o sequenciamento abrange todas etapas do processo produtivo, desde a articulação das matérias primas até o desempenho dos empregados.

Anteriormente, o sequenciamento era tratado especificamente para o processo de produção de itens dentro da indústria, porém com a busca pela qualidade e redução dos gastos com reparo e recall, as empresas estão cada vez mais investindo nos processos de inspeção final de seus produtos. A inspeção nas fábricas é um método utilizado para manter o controle da qualidade, envolvendo testes em cada produto ou em itens aleatórios por meio de técnicas estatísticas. A finalidade geral da inspeção é detectar problemas nos produtos antes que os mesmos deixem a fábrica em direção aos clientes (MARINO, 2006).

Os problemas de sequenciamento estão inseridos em diversos ambientes industriais, como é o caso do *job shop* (Jm), *flow shop* (Fm) e *open shop* (Om). De forma que, em ambientes *open shop* com número de máquinas (m) maior que dois, com restrição *no-wait*, o problema é considerado NP-hard (Sahni e Cho, 1979). Como consequência, é improvável que tais problemas podem ser resolvidos de forma eficiente, isto é, por meio de algoritmos polinomiais. A fim de encontrar uma solução “boa” dentro de um período de tempo aceitável pode-se aplicar as meta-heurísticas.

De acordo com Stutzel (1999), meta-heurística é um método que permite novas buscas em um dado intervalo de soluções além do ótimo local, buscando novas soluções. Esses métodos apresentam vantagens devido a capacidade de tratar de forma eficiente a função objetivo e as restrições do problema, que tendem a convergir para uma solução que é o ótimo global no espaço do problema, embora não garantam uma solução ótima. Esta propriedade de convergência parece ser importante, na medida em que permite a melhoria, de uma forma iterativa das soluções sub-ótimas.

O presente artigo busca minimizar o tempo de conclusão (C_{\max}) de uma linha de inspeção em uma indústria automobilística, no qual o ambiente é do tipo *open shop* com restrição *no-wait*, no qual haverá uma predefinição da ordem em que os modelos dos carros devem ser inspecionados, bem como não será permitido o estoque de carros dentro do ambiente fabril que tiverem uma sequência na inspeção.

Desta forma, pretende-se resolver analiticamente o problema, visto que serão considerados poucos tipos de inspeções e poucos modelos de carros para serem inspecionados, possibilitando assim aplicação desse método. Pretende-se também aplicar uma meta-heurística bio-inspirada conhecida como Colônia de Formiga

(ACF) a fim de se verificar a sua eficiência na resolução de problema de sequenciamento, contribuindo para que, em trabalhos futuros, se possa aplicar esse método em problemas reais com proporções extensas e com maior complexidade.

Portanto, esse trabalho apresenta um referencial teórico acerca do problema de sequenciamento de produção – com ênfase no *open shop*, abordando as principais características da meta-heurística ACF, bem como analisa e compara a solução analítica com a aplicação da meta-heurística para o problema proposto pela metodologia.

1 **Scheduling** ou Sequenciamento da produção

O *scheduling* ou sequenciamento da produção pode ser definido como a busca pela determinação de uma sequência para as tarefas com um dado recurso. Logo, pode se dizer que o *scheduling* trata de um processo decisório com a meta de otimizar, sendo neste caso, otimizar o processo produtivo (PINEDO, 2010). Segundo Talma (2007), os principais objetivos do problema de sequenciamento são: cumprimento dos prazos e datas para entrega, minimização do tempo para o fluxo dos estoques intermediários e busca pela maximização da capacidade produtiva. As combinações destes problemas também são bastante comuns.

Os problemas de sequenciamento são de mesma natureza de problemas de otimização, visto que, em suma, sua solução se resume a minimizar ou maximizar algumas características do processo produtivo. Devido aplicação em grandes escalas de produção, os empregos de técnicas computacionais se tornam uma alternativa de alta relevância, sendo já de grande utilização.

Alguns problemas de sequenciamento são mais comuns e abrangem diversos seguimentos fabris, como é o caso do *job shop* (Jm), *flow shop* (Fm) e *open shop* (Om). No primeiro cada tarefa possui sua própria sequência de processamento dentro do conjunto de máquinas. Já no *Flow Shop* todas as tarefas possuem uma sequência igual de produção no conjunto de máquinas. Por outro lado, no *open shop* ocorre um processamento sem especificação ou preestabelecimento das tarefas no conjunto de máquinas, logo as tarefas podem ser executadas em qualquer sequência (NAGANO et al. 2004).

1.1 Open Shop

O problema de sequenciamento de tarefas em ambientes open shop consiste em determinar em que sequência um conjunto de n tarefas devem ser processadas em um conjunto de m máquinas (PINEDO, 2010). No entanto, alguns destes tempos de processamento podem ser iguais a zero, visto que a tarefa pode ser ou

não executada em todas as máquinas. Não há restrições no que diz respeito ao encaminhamiento de cada tarefa através do ambiente da máquina.

Em outras palavras, no problema de *open shop*, há duas decisões a serem tomadas, a determinação das rotas de processamento dos postos de trabalho e a sequência de trabalho em cada máquina (PINEDO, 2010). Todos os trabalhos são independentes e estão disponíveis para serem processados no tempo zero. Todas as máquinas são continuamente disponíveis, sendo que cada máquina pode, no máximo, processar uma tarefa de cada vez. É importante ressaltar que o processo de um trabalho em uma máquina não pode ser interrompido.

Dentro do ambiente *open shop* podem ser consideradas vários tipos de restrições de processamento, como por exemplo o *no-wait*, que restringe para que não haja tempo de espera no processamento de uma máquina para a seguinte, se tratando de uma mesma tarefa. Vale ressaltar que, nesse tipo de restrição é permitido apenas espera no início do processamento da tarefa na primeira máquina da sequência determinada (BRANCO, 2006).

O problema *open shop* em comparação aos outros tipos de problemas de *scheduling* está em um crescente desenvolvimento, visto que é um problema complexo presente em vários tipos de ambientes de produção e possui uma ampla diversidade a ser estudada. Brasel *et al.* (1999) discutiu a teoria por trás das sequências irredutíveis do problema de *open shop*. Sequências irredutíveis são conjunto de sequências estruturalmente ótimas no sentido em que há, pelo menos, uma sequência ótima no conjunto para cada instância do tempo de processamento.

Muitos algoritmos exatos, heurísticos e meta heurísticos foram propostos para solucionar problemas de open shop (ANAND & PANNEERSELVAM, 2015; SILVIA & CORREIA, 2013). Os primeiros algoritmos exatos foram propostos por Brucker *et al.* (1997) que foram melhorados por Guéret *et al.* (2000) e Dorndorf *et al.* (2001), conseguindo resolver problemas com maiores números de máquinas e tarefas.

Os resultados mais promissores para o tema têm sido obtidos através da aplicação de meta heurísticas, com aplicação das seguintes técnicas: Algoritmo Genético (PRINS, 2000; KHURI & MIRYALA, 1999; LIAW, 2000), *Simulated Annealing* (ROSHANAIE *et al.*, 2010), Colônia de abelhas (HUANG & LIN, 2011) e Colônia de Formigas e *Beam Search* (BLUM, 2005).

2 Algoritmo de colônia de formigas

O Algoritmo de Colônia de formigas (ACF) é uma meta-heurística baseada no comportamento de uma população de formigas na busca de seu alimento. Esta busca é realizada através da exploração das trilhas com uma substância química depositada pelas formigas durante seu percurso, conhecida como feromônio. Esta

trilha auxilia a formiga a encontrar o alimento e a voltar ao formigueiro, além de ajudar as outras formigas a encontrarem o alimento. Este comportamento simples de seguir trilhas faz emergir um comportamento mais complexo de encontrar trilhas mais curtas entre os dois pontos.

Os primeiros algoritmos ACO surgiram nos anos 1990. O *Ant System* (AS) é o primeiro algoritmo que surgiu inspirado em colônia de formigas, apresentado por Marco Dorigo e colaboradores (DORIGO *et al.*, 1991). Nesse algoritmo, as formigas percorriam caminhos deixando no mesmo uma certa quantidade de feromônio. As formigas escolhiam os caminhos conforme a função probabilística abrangendo a distância deste caminho e a quantidade de feromônio presente no mesmo.

Fazendo analogia ao sistema biológico-social das formigas, no algoritmo, inicialmente, uma formiga escolhe aleatoriamente um dos caminhos disponíveis, quando a mesma encontra seu objetivo, uma função implementada anteriormente avalia a qualidade da solução encontrada. A partir desta avaliação pode ocorrer o depósito de feromônio, sendo que o mesmo é utilizado pelas formigas para fazer a marcação de caminhos. Os algoritmos, bem como as formigas, associam a maior quantidade de feromônio em uma direção com o fato daquela direção possivelmente ser melhor ou mais curta, concentrando naquela direção um maior empenho computacional (KOIDE, 2010).

O pseudo-código para o ACF foi realizado por Dorigo *et al.* (1991) é exposto a seguir:

Algoritmo de Colônia de Formiga

1. Inicialização dos parâmetros (N_{pop} , N_{iter} , d , ρ , α , β e as trilhas de feromônio $\Delta\tau_{i,j}$)
2. Inicialização da população (\vec{x})
3. Atualização da melhor formiga (\vec{x}^*)
4. Avaliação de cada indivíduo da população – Função objetivo ($F(\vec{x})$)
- While** (o critério de parada não for satisfeito) **do**
5. Atualização de cada formiga através da regra de transição de estado ($P_{i,j}^k$)
6. Avalie o valor da função objetivo
7. Armazene o valor da melhor solução
8. Atualize os valores de $\Delta\tau_{i,j}$ e $\tau_{i,j}$
- end**
9. Retorna a melhor solução encontrada.

Em que N_{pop} é o número de população de formigas, N_{iter} é o número de iterações, ρ é a taxa de evaporação, α é a importância relativa da trilha de feromônio, β é a importância relativa da heurística local e $\Delta\tau_{i,j}$ é a quantidade de feromônio que será depositada na aresta (i, j) que depende da função objetivo f .

A regra de transição de estado utilizada é dada pela Equação 1:

$$p_{i,j}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{i,j}^\alpha(t)\eta_{i,j}^\beta}{\sum_{j \in J^k} \tau_{i,j}^\alpha(t)\eta_{i,j}^\beta} & \text{se } j \in J^k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

na qual, $\eta_{i,j}$ é a informação heurística de (i, j) .

Para aumentar o feromônio entre as tarefas de melhor solução e diminuir as outras, tem-se a Equação 2:

$$\tau_{i,j}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{i,j}(t) + \rho\Delta\tau_{i,j}(t) \quad (2)$$

Em que, $\Delta\tau(i, j)$ é dado pela Equação 3:

$$\Delta\tau(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{f(s)} & \text{se } (i, j) \in S \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3)$$

3 Metodologia

Esse artigo apresentará um problema que consiste em programar um conjunto n de modelos de veículos, definido como $J = \{1, 2, 3, \dots, n\}$, realizando uma série de k testes de inspeção, indicado por $M = \{1, 2, 3, \dots, k\}$ com o objetivo de minimizar o *makespan* (C_{\max}) total dessa inspeção. Os modelos de veículos estão disponíveis na data zero de programação e podem realizar todos os testes de inspeção em uma sequência predefinida. E com o intuito de diminuir o estoque entre as inspeções não será permitido durante o processamento, as chamadas “filas de esperas” de um mesmo modelo de veículo que seguir de uma inspeção para a seguinte. Vale ressaltar que será permitido o modelo de veículo esperar apenas na primeira inspeção da sequência determinada. Portanto, esse problema conta com a notação de três campos introduzida por Graham *et al.* (1979), sendo representada por $Om | nwt, prec | C_{\max}$.

Com o intuito de otimizar esse problema, foi utilizado o método analítico e para a aplicação computacional será utilizado o método de Colônia de Formigas baseado em funções de penalidades. Desta forma o problema é reescrito sem restrições, alterando a função objetivo de maneira que se alguma restrição for violada, esta é penalizada. Dessa maneira, a solução se mantém na região viável. A função objetiva reescrita é dada pela Equação 4.

$$\min \phi(x, p) = f(x) + rpP(x) \quad (4)$$

onde, $\phi(x, rp)$ é a função pseudo-objetiva, $f(x)$ é a função objetivo original, $P(x)$ é denominada função de penalidade e rp é um escalar associado a $P(x)$. Para penalizar a função de pseudo-objetivo será utilizado o Método da Função de Penalidade Exterior, nesse caso $P(x)$ é dado pela Equação 5.

$$P(x) = \sum_{j=1}^m (\max(0, g_j(x)))^2 + \sum_{k=1}^l (h_k(x))^2 \tag{5}$$

em que, m e l representam respectivamente o número de restrições de desigualdade e de igualdade.

4 Análise de resultados

Para a experimentação computacional e analítica foram considerados 4 tipos de inspeção (M1, M2, M3, M4) para serem realizados em 5 tipos de modelos de carros (J1, J2, J3, J4, J5) em uma linha de *open shop*, as operações serão realizadas conforme a Tabela 11.1.

Tabela 11.1 Ordem Precedência.

M1	J2	J4	J5	J3	J1
M2	J1	J2	J4	J5	J3
M3	J3	J1	J2	J4	J5
M4	J5	J3	J1	J2	J4

Está apresentado na Tabela 11.2 o tempo de processamento dos modelos de carros nos tipos de inspeções que serão realizadas.

Tabela 11.2 Tempo de processamento.

	J1	J2	J3	J4	J5
M1	4	5	2	3	2
M2	2	6	3	4	5
M3	3	2	8	5	3
M4	4	7	8	9	4

Os valores que foram considerados são fictícios, escolhido de forma aleatória em um intervalo [0,10], com o intuito somente de apresentar um problema real.

Com esses dados calculou-se a solução através da Método Analítico e a aplicação no algoritmo de Colônia de Formigas.

4.1 Método Analítico

Com o Método Analítico a solução foi realizada através de tabelas. As tabelas foram preenchidas conforme a ordem de precedência, e quando não obedecem a restrição de *no-wait* na próxima sequência, os valores em destaque deverão ser atualizados para obedecer tal restrição.

Tabela 11.3 Primeira iteração.

	M1	M2	M3	M4
J1	–	2	–	–
J2	5	11	–	–
J3	–	–	8	–
J4	8	–	–	–
J5	–	–	–	4

Na Tabela 11.3 para obedecer a restrição *no-wait*, o J1 na M2 deve ser atrasado, visto que a M3 só estará disponível no tempo 8, logo o tempo do J2 na M1 e M2 serão alterados.

Tabela 11.4 Segunda iteração.

	M1	M2	M3	M4
J1	–	8	11	–
J2	8	14	–	–
J3	–	–	8	16
J4	11	–	–	–
J5	13	–	–	4

Na Tabela 11.4 o J4 na M1 deve ser atrasado, visto que a M2 estará disponível no tempo 14, logo o tempo do J5 na M1 sofrerá modificações.

Tabela 11.5 Terceira iteração.

	M1	M2	M3	M4
J1	–	8	11	–
J2	8	14	–	–
J3	–	–	8	16
J4	14	18		–
J5	16	–	–	4

Na Tabela 11.5 o J1 deverá ser atrasado devido a M4 está ocupada no tempo 11, assim ocorrerá várias alterações.

Tabela 11.6 Quarta iteração.

	M1	M2	M3	M4
J1	–	13	16	20
J2	13	19	21	–
J3	23	–	8	16
J4	19	23	–	–
J5	21	–	–	4

Na Tabela 11.6 para obedecer a restrição *no-wait*, o J5 na M1 deve ser atrasado, não sendo necessário nenhuma outra alteração na tabela.

Tabela 11.7 Quinta iteração.

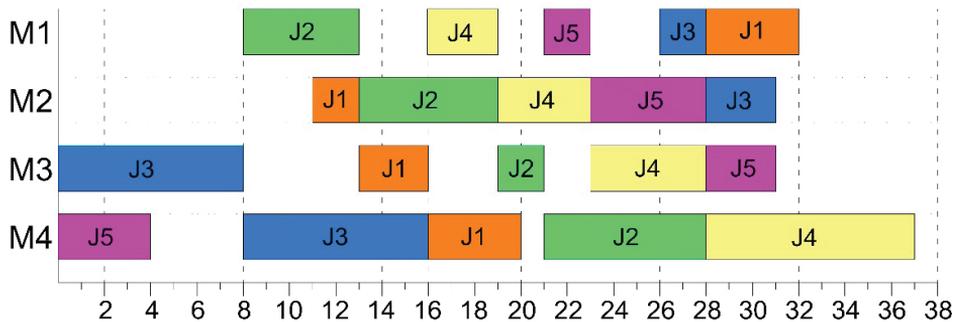
	M1	M2	M3	M4
J1	29	13	16	20
J2	13	19	21	28
J3	25	–	8	16
J4	19	23	28	–
J5	23	28	–	4

Na Tabela 11.7 somente o J3 na M1 deve ser atrasado.

Tabela 11.8 Sexta iteração.

	M1	M2	M3	M4
J1	32	13	16	20
J2	13	19	21	28
J3	28	31	8	16
J4	19	23	28	37
J5	23	28	31	4

Portanto, através da Tabela 11.8 é possível verificar que a tempo de conclusão máximo na linha de inspeção vai do modelo J4 na inspeção M4 com $C_{\max} = 37$ minutos. Para melhor visualizar a solução será apresentado o Gráfico de Gantt (Figura 11.1), que é uma importante ferramenta utilizada para representar a programação da produção de forma clara e objetiva.

**Figura 11.1** Gráfico de Gantt para a solução do problema analítico.

4.2 Algoritmo de Colônia de Formigas

Para um bom desempenho do algoritmo de Colônia de Formiga foram estudados os parâmetros do modelo, de forma que foram encontrados os valores das instâncias através do método de tentativa e erro até encontrar uma solução que respeitasse todas as restrições do modelo.

Como o algoritmo de Colônia de Formigas utiliza o comando *rand* que gera números aleatórios, foi útil que esse número gerado fosse sempre o mesmo para verificar quais restrições não estavam sendo respeitadas e para encontrar os parâmetros que resolvessem o problema. Para conseguir isso foi fixado a semente

(seed) do gerador de números aleatórios. Desta forma os parâmetros que proporcionaram um resultado satisfatório são apresentados na Tabela 11.9.

Tabela 11.9 Parâmetros utilizados.

Parâmetros	Valores
seed	0
N_{pop}	110
N_{int}	6500
ρ	0.5

Através desses parâmetros foi analisado a função objetivo, como pode ser visualizado na Figura 11.2, percebendo que a solução ótima foi encontrada após as 6000 iterações.

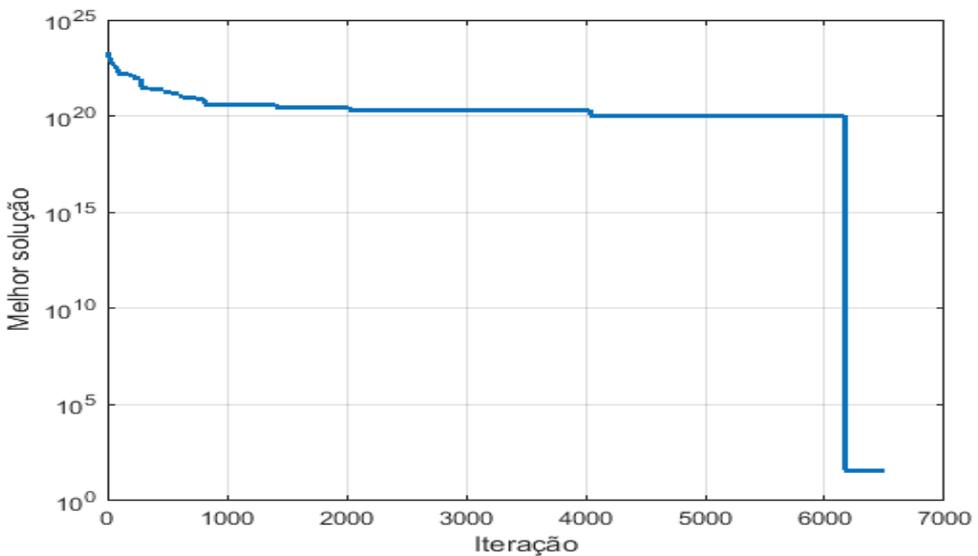


Figura 11.2 Comportamento da função objetivo no algoritmo Colônia de Formiga.

Desta forma, o algoritmo chegou na solução apresentada pelo gráfico de Gantt, conforme mostrado na Figura 11.3.

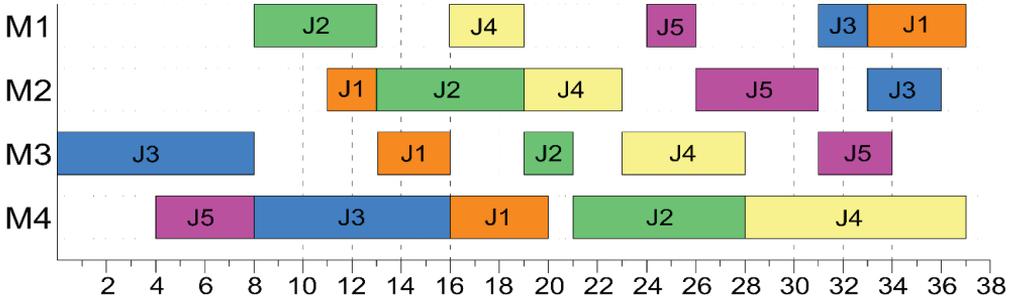


Figura 11.3 Gráfico de Gantt para a solução do problema pelo algoritmo Colônia de Formiga.

Analisando a Figura 11.3 é perceptível que o $C_{\max} = 37$ minutos, no qual todas as restrições foram atendidas e todas as inspeções foram realizadas com sucesso.

Todavia, esse método possui o parâmetro “seed” com alta sensibilidade, no qual uma alteração do valor acarreta em várias violações das restrições do problema, ou seja, não obedeceu a restrição de precedência ou a de *no-wait*, como pode ser visualizado na Tabela 11.10.

Tabela 11.10 Variação do parâmetro “seed”.

Semente	Função Objetivo	Restrições violadas
0	37	0
1	3E+20	3
2	6E+20	6
3	7E+20	7
4	3E+20	3
5	2E+20	2
6	8E+20	8
7	8E+20	8
8	3E+20	3
9	37	0

Através da Tabela 11.10 é visível que a mudança da semente proporcionou resultados diferentes, nos quais a maioria violou as restrições do problema, obtendo, assim, um valor muito alto da função objetivo devido as penalizações que foram aplicadas. Para melhor visualizar a sensibilidade do parâmetro *seed*, observe a figura 11.4.

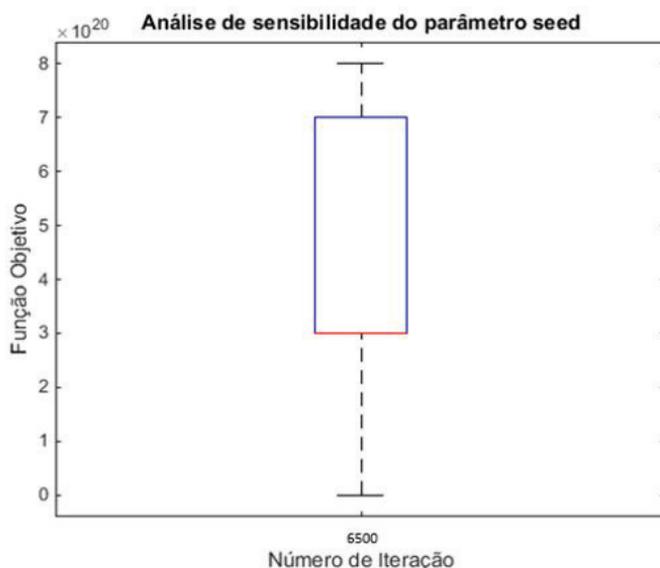


Figura 11.4 *Boxplot* para o algoritmo Colônia de Formigas.

Com base na Figura 11.4 é possível verificar que a média dos resultados obtidos são assimétricos negativos e que possui dois valores discrepantes da função objetivo, de $f = 8E20$ no limite superior e $f = 37$ no limite inferior.

4.3 Comparações

A solução analítica e a computacional apresentaram a solução ótima $C_{\max}^* = 37$ minutos, porém algumas tarefas tiveram o tempo final diferentes. Para analisar as diferenças entre os dois métodos segue a Tabela 11.11.

Tabela 11.11 Diferenças entre o Método Analítico e algoritmo de Colônia de Formigas.

	J1	J2	J3	J4	J5	C_{\max}	Tempo computacional (s)
Método Analítico (min)	32	28	31	37	31	37	–
Algoritmo ACF (min)	37	28	36	37	34	37	973,538
Desvio padrão (%)	2,5	0	2,5	0	1,5	0	–
Porcentagem de diferença relativa (%)	15,625	0	16,129	0	9,677	0	–

Desta forma, percebe-se que os dois métodos atingiram o objetivo e encontraram a solução ótima para o problema. Analisando o tempo final de cada tarefa individual, o método ACF teve eficiência inferior ao método analítico, porém cabe ressaltar que o algoritmo teve como objetivo somente a minimização do tempo de conclusão de todas as tarefas, evidenciando assim, que a meta-heurística necessitaria ser multi-objetiva para minimizar também o tempo individual de cada tarefa.

Conclusões

Nesse artigo, foi tratado o problema de *open shop* com restrição *no-wait* e precedências, com o intuito principal de minimizar o tempo de conclusão do processo de inspeção em alguns tipos de modelos de carros. Com o método analítico e o com o auxílio de software, aplicou-se o algoritmo de Colônia de Formigas proposto alcançando a solução ótima.

A meta-heurística empregada evidenciou um bom desempenho no objetivo de minimizar o C_{max} , mostrando-se bastante flexível, de forma que pode ser verificado uma grande viabilidade para problemas dinâmicos, mostrando necessário que para minimizar também o tempo de conclusão de cada tarefa individual, a função objetivo deve ser multi-objetivo.

Contudo, para problema maiores, com mais restrições e sem uma ordem predefinidas das tarefas é inviável realizar o método analítico. Desta forma, o método ACF mostrou-se apto para resolver problemas de maior complexidade, porém o mesmo terá um custo computacional alto.

Para trabalhos futuros, pretende-se aplicar o algoritmo de Colônia de Formigas, de maneira que seja minimizado o término das tarefas individuais, ou seja, propor uma função multi-objetivo. Pretende-se também aplicar o algoritmo de Colônia de Formigas em outros problemas na área de *scheduling* para melhor avaliar o seu desempenho nessa área específica.

Referências

- ANAND, E.; PANNEERSELVAM, R., Literature Review of Open Shop Scheduling Problems. **Intelligent Information Management**, 7, 33-52, (2015).
- BLUM, C., BEAM-ACO: Hybridizing Ant Colony Optimization with Beam Search: An Application to Open Shop Scheduling. **Computers and Operations Research**, 32, 1565-1591, (2005).
- BRANCO, F. J. C. Avaliação de métodos heréticos para problema no-wait flow shop com critério de minimização da duração total da programação

- da produção.** Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- BRASEL, H., HARBORTH, M., TAUTENHAHN, T. and WILLENIUS, P., On the Set of Solutions of Open Shop Problem. *Annals of Operations Research*, 92, 241-263, (1999).
- BRUCKER, P., HURINK, J., JURISCH, B. and WOSTMANN, B., A Branch and Bound Algorithm for the Open Shop Problem. *Discrete Applied Mathematics*, 76, 43-59, (1997).
- DORIGO, M.; Maniezzo, V.; Colorni, A., Positive Feedback as a Search Strategy, Tech. Report, No. 91-016, *Politécnico di Milano*, Italy, 1991.
- DORNDORF, U.; PESCH, E.; PHAN-Huy, T. Solving the open shop scheduling problem. *Journal of Scheduling*, v. 4, p. 157–174, 2001.
- GRAHAM, R. L.; LAWLER, E. L.; LENSTRA, J.K.; RINNOOY KAN, A.H.G. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: a survey. *Annals of Discrete Mathematics*, v. 5, p. 287-326, 1979.
- GUERET, C., JUSSIEN, N.; PRINS, C., Using Intelligent Backtracking to Improve Branch-and-Bound Methods: An Application to Open-Shop Problems. *European Journal of Operational Research*, 127, 344-354, 2000.
- HUANG, Y.M.; LIN, J.C., A New Bee Colony Optimization Algorithm with Idle-Time-Based Filtering Scheme for Open Shop Scheduling Problems. *Expert Systems with Applications*, 38, 5438-5447, 2011.
- KHURI, S. and MIRYALA, S.R. Genetic Algorithms for Solving Open Shop Scheduling Problems. *EPIA '99 Proceedings of 9th Portuguese Conference on Artificial Intelligence: Progress in Artificial Intelligence*, Évora, Portugal, 21-24 September 1999, 357-368, 1999.
- KOIDE, R. M. *Algoritmo de colônia de formigas aplicado à otimização de materiais compostos laminados*. 2010. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- LIAW, C.F., A Hybrid Genetic Algorithm for the Open Shop Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*, 124, 28-42, 2000.

- MARINO, L. H. F. C. Gestão da qualidade e gestão do conhecimento: fatores-chave para produtividade e competitividade empresarial. **XIII SIMPEP**, Bauru, SP, Brasil. p. 1-9, 2006.
- NAGANO, M. S.; MOCCELLIN, J. V.; LORENA, L. A. N. Programação da produção flow shop permutacional com minimização do tempo médio de fluxo. **XXVII SBPO**. p. 23-16, 2004.
- PINEDO, L. M., **Scheduling Theory, Algorithms, and Systems**. New York: Springer, 2010.
- PRINS, C., Competitive Genetic Algorithms for the Open Shop Scheduling Problem. **Mathematical Methods of Operations Research**, 52, 389-411, 2000.
- ROSHANAIEI, V.; ESFEHANI, M.M.S.; ZANDIEH, M. Integrating Non-Preemptive Open Shop Scheduling with Sequence-Dependent Setup Times Using Advanced Metaheuristics. **Expert Systems with Applications**, 37, 259-266, 2010.
- Sahni, S., Cho, Y., 1979. Complexity of scheduling shops with no-wait in process. **Mathematics of Operations Research** 4, 448-457.
- SILVA, H. R. F.; CORREIA, C. S., **Algoritmo Heurístico Para Problema de Sequenciamento de Tarefas em Ambientes de Open-Shop**, 2013.
- STUTZEL, T., **Local Search Algorithms for Combinatorial Problems – Analysis, Algorithms and New Applications**. Germany, 1999.
- TALMA, N. S. **Planejamento de um sistema integrado para sequenciamento de produção em uma malharia**. Juiz de Fora: UFJF/Departamento de Engenharia de Produção, 2006. 40 p. Trabalho de conclusão de curso. Disponível em:< http://www.ufjf.br/ep/files/2014/07/2006_3_Nathalia.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2016.

Aplicação das fases definir e medir da metodologia DMAIC: uma avaliação de manutenção corretiva

Josana Barcelar Batista Andrade¹

Rogério Santana Peruchi³

Thiago Rodrigues Andrade²

Resumo: Frente às dificuldades quanto a horas improdutivas num setor de produção, este artigo propõe uma elaboração das fases Definir e Medir, a partir da metodologia DMAIC. Assim, o objetivo deste trabalho é a avaliação do desempenho fabril em termos de tempo entre falhas, observando as características críticas de paradas. A estrutura coerente e ordenada de raciocínio do DMAIC, proporciona maior entendimento da problemática, sob uma perspectiva estatística de capacidade e estabilidade do processo. Assim, foram estudados os comportamentos das paradas por manutenção corretiva. Observou-se que, em média, a cada 1,46 dias houveram paradas. Essa média demonstra uma criticidade em relação a disponibilidade e estabilidade do processo. A carta de controle T, que monitora eventos raros, se mostrou apropriada para a avaliação de dados do tipo tempo médio entre falha (*Mean Time Between Failures*) no contexto de manutenção. As etapas remanescentes das fases do DMAIC (Analisar, Melhorar, Controlar) serão discutidas no próximo artigo.

Palavras-chave: Carta de controle, Capacidade dos processos, Metodologia DMAIC.

-
- 1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: barcelar.josana@gmail.com.
 - 2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: andrade.r.thiago@gmail.com.
 - 3 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: rogerioperuchi@ufg.br.

Introdução

O controle e melhoria no processo sempre foi algo desejável para profissionais envolvidos com o processo fabril e os *stakeholders*. Desta maneira, torna-se possível produzir atendendo os requisitos de qualidade e alcançar significantes resultados de produção (NETTO et al., 2003). Desenvolvido para atender as demandas por processo melhores a metodologia Seis Sigma traz uma proposta de estudos e análises a fim de minimizar variações que comprometem o processo e encontrar melhores ações a serem tomadas dentro do sistema de produção (HARRY; SCHROEDER, 1998, MONTGOMERY, 2009).

Projetos elaborados pela metodologia Seis Sigma tem grande aceitação pela esfera industrial como uma metodologia que traz resultados significativos (LINDERMAN et al., 2003, ARUMUGAM; ANTONY; LINDERMAN, 2016). Segundo Mandal (2012) o Seis Sigma é apresentado como um programa que objetiva ações de melhoria através da metodologia por etapas ou fases do projeto. Estas são frequentemente elaboradas pelo passo-a-passo DMAIC (*Define, Measure, Analyse, Improve e Control*).

O direcionamento para a tomada de decisão de maneira mais assertiva, melhoria das rotinas de processos, a ordenação e harmonização de estratégia e abordagens estatísticas são os principais benefícios do método DMAIC (DE KONING; DE MAST, 2006).

No contexto de ambiente produtivo existem vários eventos considerados críticos, que podem ocorrer diária e simultaneamente em qualquer chão de fábrica (HANSEN, 2006). O método DMAIC mostra-se eficiente como uma estrutura sistemática das fases iniciais, Definir e Medir, de um projeto Seis Sigma (PERUCHI, et al., 2012). Frente os problemas de indisponibilidade do processo produtivo, a metodologia DMAIC torna-se viável para avaliar a fragilidade do sistema quanto a indisponibilidade dos equipamentos.

Uma empresa de fabricação do fosfato bicálcico, matéria prima para suplementos animais, sofre dificuldades em manter a disponibilidade do chão de fábrica. Neste setor há grandes quantidades de intervenções não planejadas, resultando em horas paradas, afetando a produtividade do processo produtivo.

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o desempenho do processo fabril da empresa em estudo, no ano de 2015, em termos de horas improdutivas, através da etapa Definir e Medir do método DMAIC. O que consiste em definir quais são os principais motivos de horas paradas e medir o tempo médio entre falhas, através da carta de controle T *chart* e análise da capacidade do processo.

1 Referencial Teórico

1.1 Desempenho na perspectiva fabril e a relação com a manutenção

É de grande importância para as organizações a mensuração de suas eficiências do setor de produção (CASTRO; ARAUJO, 2010). Um bom desempenho do processo fabril está relacionado as paradas no processo. Uma parcela das interrupções do tempo total disponível para o trabalho ocorre devido a manutenção dos equipamentos do setor produtivo (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

A ABNT NBR 5462 (1994) define manutenção como sendo a ‘Combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida’.

Um processo produtivo confiável é proporcional ao melhor aproveitamento em tempo com qualidade, ou seja, a utilização eficiente dos equipamentos de produção. Sob essa perspectiva, para aumentar a produtividade é necessário otimizar a confiabilidade e disponibilidade da produção, garantindo o aumento da campanha das unidades produtivas, a minimização de prazos de paradas no sistema, a diminuição do tempo médio de reparos, a redução de perdas de produção e o aumento do tempo médio entre falhas (KARDEC; NASCIF, 2012).

1.2 O Seis Sigma e o método DMAIC

O Seis Sigma, é um método estruturado para resolução de problemas com variabilidade do processo ou qualidade, elaborada em bases estatísticas e científicas, que surgiu na década de oitenta (HARRY, SCHROEDER, 1998). A metodologia é frequentemente associada como um procedimento de grande sucesso e aceitação de empresas. O Seis Sigma sugere a formação de uma equipe de especialistas capazes de atingir metas, nomeada de *belts*, que procuram solucionar problemas difíceis e de grande retorno ao investimento, a fim de atingir a redução de variabilidade a determinado nível sigma (LINDERMAN et al., 2003).

O termo Seis Sigma refere-se a uma métrica de desempenho do processo acerca da variabilidade do processo. Esta métrica, em processos que apresentam uma boa performance, mostra um número pequeno de defeitos/falhas (partes por milhão, ppm). Assim, um determinado nível sigma está relacionado ao número de defeitos e a porcentagem de valores que podem ser encontrados dentro das especificações, considerando uma distribuição normal. (MONTGOMERY; WOODALL, 2008). Porém, considerando que o sistema pode estar sujeito a perturbações, até 1,5 desvios-padrão fora do alvo, um processo seis sigma deve produzir cerca de

3,4 ppm defeituosos, com 99,999660% dentro das especificações (MONTGOMERY, 2009).

A padronização em método é característica de projetos Seis Sigma, que proporciona maior entendimento das fases que um projeto deve ter, devido a uma linguagem comum. Assim, ao seguir as etapas, é alcançado metas e objetivos claros e coerentes (ARUMUGAM; ANTONY; LINDERMAN, 2016). Uma das metodologias mais utilizadas em processos já existentes é a metodologia DMAIC (ANDRIETTA; MIGUEL, 2007, RIBEIRO DE JESUS, et al., 2016). Este método tem um objetivo geral em suas etapas e se desdobra em passos coerentes (DE KONING; DE MAST, 2006), Quadro 1.

Uma das razões deste método ser de sucesso é que ele incide sobre o uso eficaz de um conjunto de ferramentas os seus passos, ou onde eles têm grandes chances de ser utilizados contextualizando com a problemática do projeto em questão (MONTGOMERY, 2009).

Quadro 12.1 Definição geral das fases do DMAIC.

Fases do DMAIC	
Definir	Deve selecionar o problema e benefícios. Estabelecendo os fundamentos para um projeto Seis Sigma; avaliando o impacto no cliente e os benefícios potenciais.
Medir	Faz a tradução do problema em uma forma mensurável. Identificar as Características Críticas para a Qualidade (CTQs) do produto ou serviço; verificar capacidade de medição; Linha de base da taxa e defeito; definir metas de melhoria.
Analisar	Faz a identificação de fatores de influência e causas que determinam o comportamento do CTQs. Compreender as causas de por que ocorrem defeitos/falhas; identificar as variáveis-chave do processo que causam defeitos/falhas; avaliação comparativa dos principais indicadores de desempenho do produto.
Melhorar	Faz o design e implementação de ajustes para que o processo possa se tornar melhor os desempenhos dos CTQs. Determinar a forma de intervir no processo para reduzir significativamente os níveis de defeitos/falhas; gera, seleciona e implementa soluções.
Controlar	Realiza gestão de processos através de sistema de controle, a fim de que melhorias permaneçam sustentáveis.

Fonte: Adaptado de De Koning; De Mast, (2006).

1.3 Carta de controle T

Métodos estatísticos ajudam a avaliar a variabilidade natural, detectar e isolar as anomalias, indicando as suas causas especiais de um processo. O Controle Estatístico do Processo (CEP) oferece um acervo de ferramentas úteis para avaliar, controlar, auxiliando na redução da variação do processo (LOUZADA et al., 2013).

A folha de controle ou gráfico de controle é uma das sete ferramentas do CEP, que faz a apresentação dos dados a partir de uma amostra *versus* outra amostra ou tempo distribuídas no gráfico, na qual há limites de controle que auxiliam na avaliação do comportamento da amostra. Há também uma linha central que representa a média dos dados (MONTGOMERY, 2009).

Para monitorar a quantidade de ‘tempo entre eventos adversos’ é preciso utilizar uma carta específica, como a carta T de controle. Esta carta é derivada da carta G, em que monitora o mesmo tipo de dado, porém diferentemente da carta G, no T *chart* o tempo é medido em uma escala contínua (ZHANG; XIE; GOH, 2005).

A carta T observa o comportamento de eventos raros, em que é provável não ter grandes quantidades de dados. Desta maneira, a coleta de dados deve ser suficiente para responder a uma evolução da frequência de eventos, o que pode levar meses ou mesmo anos. Uma carta T traça o tempo entre os eventos sucessivos, para que se possa facilmente detectar quando os eventos ocorrem com maior ou menor frequência do que o habitual. Assim, são contados os números de oportunidades, antes ou até o momento de ocorrência de falhas. (XIE; GOH; RANJAN, 2002).

Os dados são caracterizados como datas e horários de eventos ou o número que representa o período entre os eventos, sob a distribuição Weibull (MONTGOMERY, 2009). Benneyan (2001) orienta que a interpretação de cartas que monitoram tempos entre eventos raros deve ser feita considerando que, os pontos situados na região em direção a linha de limite de controle superior, são pontos que indicam a diminuição dos eventos observados. De maneira análoga, se os pontos estiveram na região em direção a linha de limite de controle inferior, o inverso acontece.

Testes são utilizados estatisticamente para a averiguação do comportamento dos dados, monitorando a variação em cartas de controle. Regiões são traçadas a partir da linha central, que representam o desvio padrão, ± 1 , ± 2 , ± 3 , sendo o último coincidente aos limites de controle. Cada um dos testes para causas especiais procura detectar um padrão específico nos dados. A ocorrência de um padrão sugere uma causa especial para a variação, que deve ser investigado conforme a adequação de testes para cartas de controle (NELSON, 1997), Quadro 2.

Quadro 12.2 Os oito testes para Cartas de Controle.

Testes para Cartas de Controle	
Teste 1	A sua rejeição traz a evidência mais forte de falta de controle do processo, ou seja, é identificado um ponto ou mais fora dos limites (mais do que 3σ).
Teste 2	Observa pequenos desvios, encontrando K pontos em uma linha em um lado da linha central.

Continua

Quadro 12.2 Os oito testes para Cartas de Controle. (Continuação)

Testes para Cartas de Controle	
Teste 3	Deteccão de tendência ou movimento com K pontos em uma linha, todos aumentando ou diminuindo.
Teste 4	Deteccão de tendência ou movimento, porém a reprovação neste teste significa a deteccão de variação previsível.
Teste 5	Observa o padrão de variação de pequenos desvios no processo, com K de K + 1 pontos mais do que 2σ da linha central (mesmo lado).
Teste 6	Atua como o teste 5, porém observa K de K + 1 mais do que 1σ da linha central (mesmo lado).
Teste 7	Identifica K pontos que seguem a linha central muito de perto (1σ da linha central, em qualquer lado).
Teste 8	Detectam K pontos que estão perto dos limites de controle, ou seja, tendem a evitar a linha central.

Fonte: Adaptado de Nelson, (1997).

Para deteccão de causas especiais para a carta T de controle são mais indicados os testes 1 e 2. Os demais testes podem ser lentos na deteccão de causas especiais para dados de ‘tempo entre falhas’ (BENNEYAN, 2001).

1.4 Índices de capacidade do processo

Outra ferramenta importante na avaliação do controle estatístico é a análise da capacidade do processo. Através dela é possível verificar a uniformidade do processo, ou seja, quantificar e avaliar a variabilidade dele. Seus métodos de investigação têm em vista dizer o qual capaz é um processo, seguindo uma distribuição normal de probabilidade (MONTGOMERY, 2009).

Para dados que não seguem a distribuição de normalidade é comum realizar transformações para a sua adequação. Em casos de não-normalidade de dados uma opção da estatística é transformação Box-Cox. Esta transformação consiste em encontrar uma constante λ , tal que os dados transformados Y'_1, \dots, Y'_n se aproximem de uma distribuição normal, conforme as condições (BOX; COX, 1964):

$$Y'_i = \begin{cases} \frac{y^\lambda - 1}{\lambda} & \lambda \neq 0, \\ \ln y & \lambda = 0 \end{cases} \quad \text{Eq. 1}$$

Uma vez que uma análise de variância não é alterada por uma transformação, pode-se assumir a simplificação da Eq.1 (BOX; COX, 1964):

$$Y'_i = \begin{cases} y^\lambda & \lambda \neq 0, \\ \ln y & \lambda = 0 \end{cases} \quad \text{Eq. 2}$$

Assim, em processos que seguem distribuição normal, transformados ou originais, é possível expressar quantitativamente a capacidade do processo observando o Limite Superior de Especificação (LSE) e o Limite Inferior Especificação (LIE). Quando os dados estiverem simetricamente distribuídos entre os limites de especificação, a capacidade C_p é calculada por (Montgomery, 2009):

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad \text{Eq. 3}$$

Montgomery, (2009) relata casos em que a média do processo está deslocada para esquerda ou para a direita, observado por uma assimetria em relação aos seus limites visto no histograma dos dados, a métrica C_{pk} traz maior precisão da capacidade do processo. O C_{pk} é expresso:

$$C_{pk} = \min \left(\frac{LSE - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \right) \quad \text{Eq. 4}$$

Neste caso tem-se uma visão unilateral em que considera a menor distância da média de dispersão com os LSE e LIE (MONTGOMERY, 2009).

2 Metodologia

Este trabalho usou uma abordagem quantitativa através do método de pesquisa experimental. As medições foram coletadas com base no banco de dados da empresa e relatos operacionais de paradas no processo. A amostra consistiu em avaliar 100% das paradas na produção classificadas como manutenção corretiva no período de doze meses. Para a análise dos dados na carta de controle T, foi observado o período de um ano, a fim de garantir uma quantidade suficiente de dados.

Os dados foram considerados confiáveis, por serem revisados por três departamentos diretamente relacionados com a manutenção e produção, sendo eles o setor de planejamento e controle da produção, gerência de produção e gerência de manutenção.

A realização de análises de dados qualitativos busca percepções e entendimento sobre o caráter em estudo. Os dados qualitativos foram angariados através de observação e participação de reuniões com os funcionários da empresa, contribuindo para o enriquecimento deste trabalho com seus conhecimentos da área e gestão.

Neste estudo conduziu, numa abordagem Seis Sigma, a proposição das fases do DMAIC feito por De Koning e De Mast, (2006). Interpretando conforme o contexto e observando os requisitos de disponibilidade, foi elaborada uma metodologia para as fases Definir e Medir, conforme Quadro 3, a fim de avaliar o processo quanto aos Dias Entre Falhas na produção de fosfato bicálcico:

Quadro 12.3 Orientação do projeto seguindo a metodologia DMAIC.

Fases	Descritivo dos passos.
Definir	D1. Identificar o problema a ser resolvido e mapear o processo relevante.
	D2. Fazer um business case para o projeto
Medir	M1. Seleção de uma ou mais características críticas de disponibilidade (Dias Entre Falhas).
	M2. Registrar os resultados no processo em carta de controle (T <i>chart</i> – avaliando o período entre falhas).
	M3. Estimar a capacidade do processo
	M4. Definir objetivos para variáveis dependentes.

Fonte: Próprio Autor.

3 Discussão e Resultados

3.1 Identificar o problema a ser resolvido e mapear o processo relevante.

Em 2015, a performance da área de produção enfrentou dificuldades em atender o plano de produção prevista para o ano. A indisponibilidade do processo produtivo é apontada como uma das causas principais dentro das possibilidades que resultaram no descumprimento das metas de produção. No ano em questão, a disponibilidade mensal (horas totais real de produção/horas totais previstas disponíveis) não se manteve constante devido a uma grande quantidade de intervenções no setor operacional.

Para o ano de 2016, houve um aumento das metas de produção para a fábrica de fosfato bicálcico. O aumento da produtividade é alcançado identificando os fatores que levam ao desperdício de tempo em produção. Tempo que não foi aproveitado para produzir fosfato bicálcico e foi necessário algum tipo de investimento para sanar algum evento de parada, prevista ou não. Desta maneira, convém ao departamento de produção ter melhor entendimento da situação de horas paradas, a fim de aumentar o tempo entre falhas no chão de fábrica.

3.2 Fazer um business case para o projeto

A melhoria da performance do setor produtivo ocorre quando as necessidades de intervenção na área são reduzidas, utilizando de maneira eficiente todos os recursos e equipamentos que agregam valor na produção de fosfato bicálcico. Desta maneira torna-se possível o cumprimento da meta de produção mensal do produto.

A totalidade de eventos de paradas durante o ano de 2015 foram de 1058,15 horas improdutivas no geral. Deste total de horas, as expectativas de parada classificadas por Manutenção Corretiva, no acumulado, eram de que houvessem 135 horas paradas por este motivo, porém ocorreram 160,5 horas. As classificadas por Manutenção Corretiva, foram as que mais excederam do valor planejado para horas paradas. Logo, é relevante a elaboração de ações para minimizar horas perdidas diante do aumento em 18,9% de horas paradas além do planejado.

Os registros de horas paradas para este estudo foram manutenção em equipamentos que param não somente o equipamento, mas todo o setor de produção de fosfato bicálcico. Essas paradas podem ocorrer seguindo as classificações feita pela empresa:

- Quebra/Falha: ocorrências que impedem o funcionamento de algum equipamento.
- Entupimento: obstruções de linhas e do fluxo das matérias do processo.
- Desarme: sistema de proteção do equipamento que ocasiona a parada quando as condições de operação estão fora do especificado.
- Substituição: é verificado a necessidade de realizar troca de peça/equipamento sem paradas inesperadas, agenda-se a parada assim que possível.
- Vazamento: é verificado vazamento de fluídos ou produto no qual é inevitável a manutenção corretiva, agendando a parada assim que possível.
- Limpeza: há ocorrência de paradas por obstrução do equipamento ou linha.
- Controle de Qualidade: é verificado ocorrência fora da especificação do produto durante o processo.
- Operacional: paradas devido a ocorrência de erros humanos na produção.

Todas as paradas por manutenção corretiva podem ser enquadradas nessas classificações, nesta empresa. As definições para essas paradas foram tomadas para auxiliar os departamentos na busca de informações em histórico de paradas. Analisando o ano de 2015, intervenções feitas na área de produção por Quebra/Falha apresentam uma frequência de 80,4% dos casos, Gráfico 1.

O estudo deve ser direcionado buscando entender, estatisticamente, o desempenho quanto a paradas de Manutenção Corretiva por Quebra/Falha, visto que no total de horas paradas é este motivo que se mostra com maior representatividade e não correspondeu a programação de manutenção.

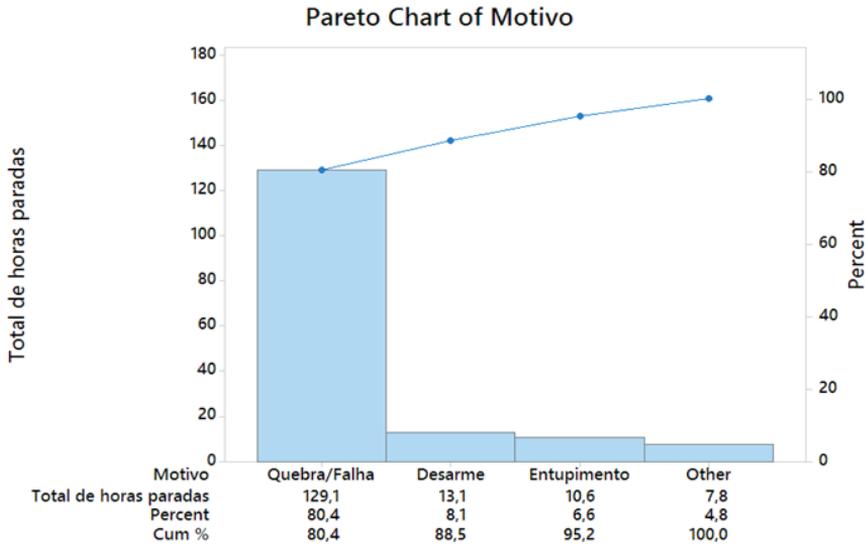


Gráfico 12.1 Gráfico de Pareto, motivo das paradas por Manutenção Corretiva.

Fonte: Próprio autor no Minitab 17.

3.3 Seleção de uma ou mais características críticas de disponibilidade

Para avaliar o setor de produção, que enfrenta uma grande frequência de paradas por Manutenção Corretiva-Quebra/Falha, é necessário traduzir este problema de forma mensurável. Uma melhor compreensão das horas improdutivas do setor pode ser feita atentando o tempo médio entre as falhas. Através desta análise, se o período entre uma falha e outra foi curto ou não, é percebido o desempenho da fábrica quanto a disponibilidade do setor de produção.

Logo, de maneira análoga ao parâmetro ‘tempo entre falhas’, a característica crítica de disponibilidade identificada para análise nas próximas etapas deste trabalho é ‘Dias Entre Paradas’. Os fatores motivadores para a execução do trabalho foi o entendimento das variáveis críticas do contexto exposto.

3.4 Registrar os resultados no processo em carta de controle

Para confrontar o quão estável é o tempo entre paradas em escala contínua, através da carta de controle T *chart*. Foram conferidos se há a existência de causas especiais. Desta maneira é possível evidenciar se o sistema considerado, ‘Dias Entre Paradas’ no setor produtivo, está atuando de forma controlada sob a perspectiva estatística.

A relação de ‘Dias Entre Paradas’ por ocorrência de paradas por Quebra/Falha foi avaliada sob o teste de carta de controle do tipo 2, avaliação para pequenos desvios no processo. Realizou a investigação se há 7 pontos consecutivos, todos aumentando ou diminuindo, na região ou acima ou abaixo da linha central.

Este teste foi escolhido pela compreensão de que o mínimo de intervenções na área deve ser feito por motivo de Manutenção Corretiva. Sendo a quantidade de 7 para eventos o menor valor permitido para este teste.

O Gráfico 2 exibe que a maioria dos pontos estão marcados numa região bem próxima do Limite de Controle Inferior (LCL - *Lower Center Limit*) na carta de controle, isto relata quão significativa é a quantidade de paradas no setor. Esta condição mostra um cenário indesejado no chão de fábrica. Na perspectiva de ‘Dias Entre Paradas’ por Manutenção Corretiva, a média de ‘Dias Entre Paradas’ é de 1,46.

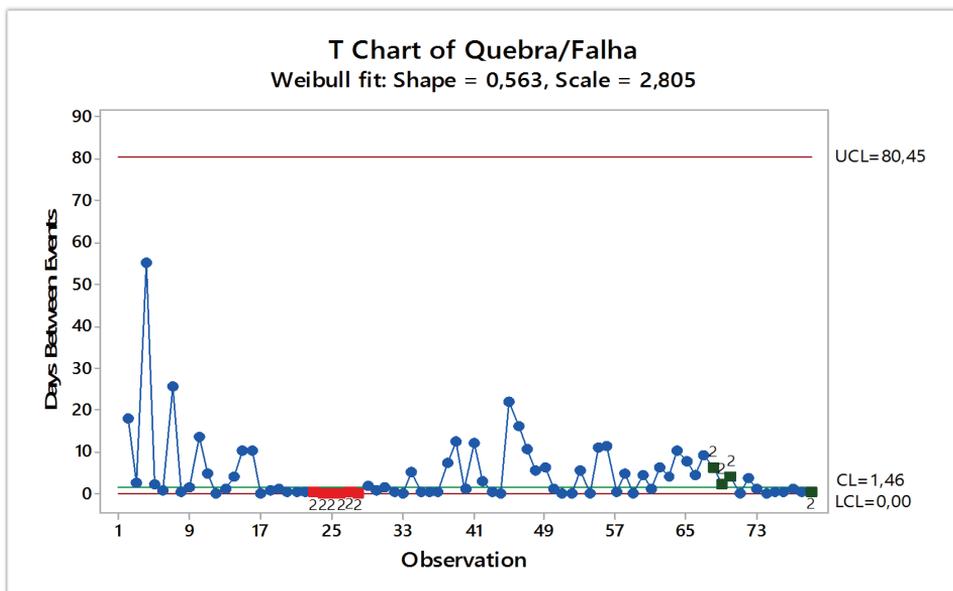


Gráfico 12.2 Carta de Controle, T chart, para Quebra/Falha 2015.

Fonte: Próprio Autor no Minitab 17.

Foram identificadas causas especiais, retratando que o processo não está sob controle. Os pontos em que ocorreram a falha do teste foram destacados de vermelho ou verde e assinalados com o número, conforme Gráfico 2.

Os que foram destacados na cor verde e assinalados na região acima da Linha Central (CL) mostram uma tendência de estabilidade com quantidade superior ao tempo médio entre paradas no processo. Já os pontos vermelhos,

destacados abaixo da linha central, relatam a criticidade da frequência do tempo entre paradas, ou seja, considerados os sete eventos indesejados, pré-requisito do teste, houveram outros eventos na sequência.

É relevante analisar também os sete pontos anteriores ao primeiro destacado, além dos pontos de causas especiais do teste 2. A média dos pontos 16 ao 28 foi de 0,07 'Dias Entre Paradas' e dos pontos 68, 69, 70 e 79, foi de 1,68 'Dias Entre Paradas'. Estes valores representam o quanto o tempo entre uma parada e outra foi significativamente pequeno para o primeiro grupo citado, assim, em média a cada 1,68 horas ocorreram paradas. Já para o segundo grupo, que descrevem uma tendência de tempo entre paradas acima do valor médio, foi percebido que, em média, a cada 40,32 horas médias houveram paradas por motivo de Quebra/Falha, mostrando propensão a um cenário mais desejado.

A outra etapa da fase de medição é a verificação da capacidade do processo. Para esta verificação o processo deve estar sob controle, ou seja, as causas especiais não podem estar presentes no sistema observado. Para atender este requisito, as causas especiais foram retiradas. Remover as causas especiais destacadas na carta é uma forma de ação corretiva que permite avaliar a capacidade de dados que possuem um comportamento previsível.

3.5 Estimar a capacidade do processo

Os dados dos 'Dias Entre Paradas' não se conformam a distribuição normal. Uma alternativa é a aplicação da transformação de Box-Cox para realizar a análise de capacidade, seguindo a condição da Eq. 2 com $\lambda = 0,14$. A Gráfico 3 (b) mostra a aderência dos dados a distribuição normal.

No setor de produção de fosfato bicálcico é desejado que os 'Dias Entre Paradas' por Manutenção Corretiva - Quebra/Falha sejam superiores que cinco dias. Não há um limite máximo visto que quanto maior os números de 'Dias Entre Paradas' por este motivo melhor.

Ao realizar a transformação o LSL - *Lower Spec Limits* (Limite Inferior de Especificação) é transformado para aproximadamente 1,25, Gráfico 3 (a). No histograma as frequências dos valores medidos estão deslocadas a esquerda do valor LSL. Esta condição proporciona um valor negativo para $C_{pk} = -0,20$.

O índice PPM faz a análise de taxa de defeitos por milhão, 725.295,3 a um nível sigma de -0,60. Na Gráfico 3 (c) o valor de PPM não está em porcentagem, porém tal informação pode ser traduzida dividindo por um milhão, na qual tem-se que 72,53% dos 'Dias Entre Paradas' estão abaixo do LSL.

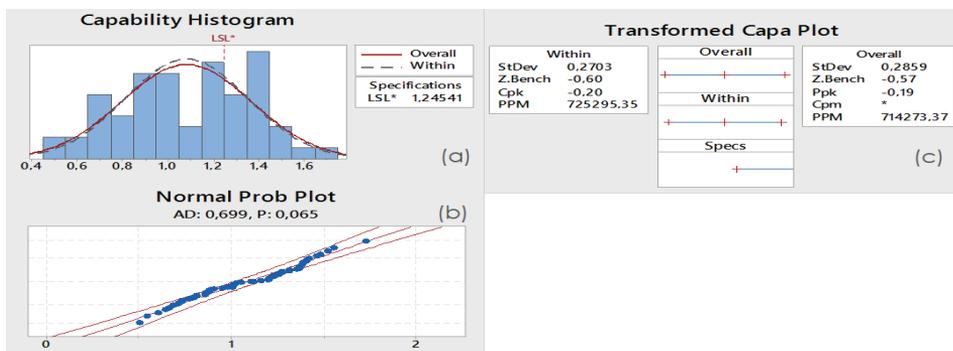


Gráfico 12.3 Capacidade do Processo 2015, transformação Box-Cox com $\lambda = 0,14$.

Fonte: Próprio autor no Minitab 17.

3.6 Definir objetivos para variáveis dependentes

Os índices de capacidade mostram um processo não capaz e que terá grandes dificuldades de atender a expectativa de cinco ‘Dias Entre Paradas’. Logo, compreendendo esta dificuldade, não se projeta tornar este processo capaz, mas tornar melhor os índices e que o processo seja previsível. É conveniente melhorar os resultados com um aumento do nível sigma e C_{pk} , redução em 10% do ppm e que o processo esteja sob controle, Tabela 1.

Tabela 12.1 Objetivo de desempenho sob análise dos resultados de 2015.

	Desempenho 2015		Objetivo
	ppm	Nível sigma	ppm
Dias Entre Paradas	72,52%	-0,60	< 65,27%

Fonte: Próprio autor.

Considerações finais

Sob as orientações das fases Definir e Medir da metodologia DMAIC, utilizada em projetos Seis Sigma, este trabalho avaliou o processo de uma indústria de fosfato bicálcico. Essa análise foi feita a fim de julgar as manutenções corretivas. Assim, este artigo contribui para casos em que há significativa interrupções no processo. Foi avaliada a estabilidade do processo, traduzindo o problema de

forma mensurável, quanto a ‘Dias Entre Paradas’ na fase Medir. Nesta etapa foi necessário a utilização de uma carta de controle adequada para eventos raros. A utilização da carta de controle T, traz uma contribuição acadêmica pois permitiu melhor análise da estabilidade do processo contextualizado para dias entre falhas. Ao avaliar a capacidade do sistema, os índices mostram grandes dificuldades de estar dentro do limite mínimo de especificação. Este fato justifica a dificuldade de o setor cumprir as metas de produção.

A orientação consistente das fases desenvolvidas neste trabalho, possibilitou coerência a cada passo realizado e um tratamento sistemático das informações e dados pertinentes ao tempo médio entre falhas. Em sequência das demais fases do método DMAIC, Analisar, Melhorar e Controlar, será tratado em trabalhos futuros, relatando a metodologia proposta para casos de indisponibilidade dos equipamentos sob a perspectiva de ‘Dias Entre Paradas’.

Referências

- ANDRIETTA, J.; MIGUEL, P. Aplicação do programa Seis Sigma no Brasil: resultados de um levantamento tipo survey exploratório-descritivo e perspectivas para pesquisas futuras. *Gestão & Produção*, v. 14, n. 2, p. 203-219, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Confiabilidade e manutenção* - NBR 5456. Rio de Janeiro, 1994.
- ARUMUGAM, V.; ANTONY, J.; LINDERMAN, K. The influence of challenging goals and structured method on Six Sigma project performance: A mediated moderation analysis. *European Journal of Operational Research*, v. 254, n. 1, p. 202-213, 2016.
- BENNEYAN, J. Performance of number-between g-type statistical control charts for monitoring adverse events. *Health Care Management Science*, v. 4, n. 4, p. 319-336, 2001.
- BOX, G.; COX, D. An analysis of transformations. *Journal of the Royal Statistical Society*, v.26, p.211-252, 1964.
- CASTRO, F.; ARAUJO, F. Medição da eficiência operacional através do indicador OEE (Overall Equipment Effectiveness): uma proposta de implantação no segmento de bebidas. In: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO. VI CNEG, Niterói, ago. 2010.

DE KONING, H. & DE MAST, J. A rational reconstruction of Six-Sigma's breakthrough cookbook. *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol.23, p.766-87, 2006.

FOGLIATTO, F.; RIBEIRO, J. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. São Paulo: Campus; Elsevier, 2009.

HANSEN, R. *Eficiência Global dos equipamentos: Uma poderosa ferramenta de produção/manutenção para aumento dos lucros*. Porto Alegre: Bookman, 2006.

HARRY, M.; SCHROEDER, R. Six sigma: a breakthrough strategy for profitability. *Quality Progress*, New York, may, 1998.

KAKDEC, A; NASCIF, J. *Manutenção – Função Estratégica*. 4ª ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora, 2012.

LINDERMAN, K.; SCHROEDER, R.; ZAHEER, S.; CHOO, A. Six sigma: a goal theoretic perspective. *Journal of Operations Management*, Vol.21, p.193-203, 2003.

LOUZADA, F.; DINIZ, C.; FERREIRA, P; FERREIRA, E. *Controle Estatístico de Processos: uma abordagem prática para cursos de Engenharia e Administração*. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MANDAL, P. Improving process improvement: executing the analyze and improve phases of DMAIC better. *International Journal of Lean Six Sigma*, v. 3, n. 3, p. 231-250, 2012.

MONTGOMERY, D.C. *Introduction to statistical quality control*. 6ª ed. New York: John Wiley & Sons. 2009.

MONTGOMERY, D.; WOODALL, W. An overview of six sigma. *International Statistical Review*, v. 76, n. 3, p. 329-346, 2008.

NELSON, L. Supplementary runs tests for np control charts. *Journal of quality technology*, v. 29, n. 2, p. 225, 1997.

NETTO, R.; MEIRELES, M.; SILVA, O.; PAIXAO, M. Productivity: production management system implementation in a brazilian industry – case study. In:

INTERNATIONAL CONGRESSO OF MECHANICAL ENGINEERING, 17., COBEM. São Paulo, SP, p. 10-14, 2003.

PERUCHI, R.; BALESTRASSI, P.; DE SANTANA, M.; MAIA, P. Aplicação das etapas definir e medir do roadmap DMAIC para um exemplo didático do projeto Seis Sigma. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. XXXII ENEGEP, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, 2012.

RIBEIRO DE JESUS, A. et al. Six Sigma critical success factors in Brazilian industry. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 33, n. 6, p. 702-723, 2016.

XIE, M.; GOH, T.; RANJAN, P. Some effective control chart procedures for reliability monitoring. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 77, n. 2, p. 143-150, 2002.

ZHANG, C.; XIE, M.; GOH, T. Economic design of exponential charts for time between events monitoring. **International Journal of Production Research**, v. 43, n. 23, p. 5019-5032, 2005.

Modelagem conceitual IDEF-SIM do base stock control system aplicado em uma empresa automobilística

Sara Aparecida da Silva Vaz¹

Stella Jacyszyn Bachega²

Resumo: Uma das etapas primordiais do processo de simulação é a elaboração do modelo conceitual. Dentre os métodos utilizados para tal, encontra-se o IDEF-SIM (*Integrated Definition Methods – Simulation*). Com esta técnica, é possível representar todo o sistema produtivo, tornando muitas vezes um mapeamento complexo em um perfil de fácil entendimento para a modelagem computacional. O presente artigo tem como objetivo representar, via IDEF-SIM, o funcionamento do *Base Stock Control System* (BSCS) em uma linha de produção automobilística. Foram utilizados os procedimentos de pesquisa teórico-conceitual e estudo de caso. Após o desenvolvimento da modelagem conceitual, notou-se que a técnica facilitou a compreensão do sistema real antes da aplicação da simulação. Todos os seus símbolos são característicos e de fácil compreensão para representar ambientes e que, como disposto na literatura, isoladamente o IDEF-SIM não consegue fornecer toda informação desejada. Para tanto, é necessário um alto nível de conhecimento sobre o sistema modelado.

Palavras chave: Modelo conceitual. IDEF-SIM. BSCS.

1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: saraavaz@hotmail.com. Programa Institucional Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC).

2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: stella@ufg.br.

Introdução

O ambiente atual empresarial é de ampla disseminação de informações e de constante aparecimento de novidades no mundo. Dessa forma, as empresas se sentem forçadas a remanejar seus recursos e a focarem suas estratégias em métodos que visem uma produção mais enxuta e eficiente, de modo a driblar as dificuldades do mercado e propiciar uma real competitividade perante a concorrência.

Neste contexto, em meio as diversas alternativas empreendidas pelas empresas, a modelagem dos processos produtivos tem sido utilizada. Dentre as técnicas que auxiliam nesse processo se encontra a simulação. Sua popularidade deve-se ao fato de que ao se conhecer todo o funcionamento das etapas de produção, a empresa passa a contar com fundamentos mais embasados para a tomada de decisão, tendo a possibilidade de analisar suas reações quanto as variações no mercado, tais como atrasos em algum setor, oscilação em demanda, automatização dos processos, entre outros.

Um dos primeiros passos utilizados na simulação é a concepção do modelo conceitual, ou seja, a coleta de dados e o mapeamento de todos os processos da empresa, realizando a descrição de todos os elementos e levantando os pontos de decisão para a posterior execução do modelo computacional. Entretanto, apesar das vantagens do modelo conceitual, ainda há pouco enfoque deste voltado a simulação, e é neste sentido que diversos autores como Perera e Liyanage (2000), Chwif e Medina (2007), e Leal (2009) tem focado seus trabalhos na obtenção de uma interligação entre as ferramentas de modelagem e processos de simulação visando assim obter uma relação entre as ferramentas de modelagem e a simulação (ROBINSON 2013). A literatura apresenta também Montevechi et al. (2010), responsáveis pelo desenvolvimento do IDEF-SIM como técnica de modelagem conceitual aplicada a simulação.

O IDEF-SIM realiza uma satisfatória representação de todo o sistema produtivo, tornando muitas vezes um mapeamento complexo em um perfil de fácil leitura (MONTEVECHI, 2010). Este quesito é de suma relevância pois, o agente responsável pela coleta e tratamento dos dados por vezes não é o mesmo que irá realizar a simulação do sistema. Outro aspecto de vantagem apresentado por esta técnica é o ganho considerável de tempo, pois ao se realizar um modelo conceitual com enfoque na simulação, a coleta e aproveitamento dos dados tornam-se mais efetivas.

Posto isso, o objetivo deste artigo é representar o funcionamento do *Base Stock Control System* (BSCS) em uma linha de produção automobilística, mediante o uso da técnica IDEF-SIM (*Integrated Definition Methods – Simulation*). Ressalta-se que esta pesquisa é vinculada ao Grupo de Estudos em Modelagem e Simulação (GEMS) no contexto do projeto de pesquisa intitulado “Método para

escolha de sistemas de coordenação de ordens com uso de simulação: aplicação em ambientes de produção *flow shop*”.

O presente artigo é estruturado da seguinte forma: na seção 1 há o referencial teórico; na seção 2 há a metodologia; na seção 3 está a discussão e resultados da pesquisa; e, por fim, há as considerações finais.

1 Referencial Teórico

Nesta seção há a exposição de conteúdo teórico sobre o BCSC, sobre modelagem conceitual e sobre a técnica de modelagem conceitual IDEF-SIM.

1.1 Base stock control system

Ao estudar um sistema de racionamento de estoque, Cheng, Gao e Shen (2011) expuseram que um dos maiores desafios para o gerenciamento de sistemas de produção é o de enfrentar a falta de confiabilidade da máquina. Segundo os autores, as instalações industriais estão passíveis a falhas inesperadas devido ao tempo de utilização e ao mau uso propriamente dito. Tais falhas tornam os processos produtivos mutáveis, reduzindo a capacidade e aumentando o custo de produção. Os autores defendem ainda que para sistemas como esses a melhor política de produção é a política utilizada pelo princípio BSCS (também denominado política de estoque-base).

Com uso desta política, no caso de ocorrer problemas em alguma das máquinas, a demanda prossegue com a remoção do material presente no estoque de produtos finais. As máquinas a jusante da máquina falha também continuam no processo, até que se tornem carentes de peças para processamento. Entretanto, as máquinas que se localizam a montante da máquina com defeito receberão as informações advindas do processo de demanda, operando como de costume. Existirá, por conseguinte, um acúmulo de estoque de produtos (esperando para serem processados) frente a máquina falha. Caso a lista de pedidos em carteira for aprovada, não existe um limite máximo relativo ao acúmulo desse estoque (BONVIK; COUCH; GERSHWIN, 1997).

Para aplicação do BSCS, Chang e Lu (2011) consideram um ambiente de produção seriada, que possui espaço de armazenamento finito, onde apenas a estação de trabalho final adota a produção *make-to-stock* (MTS), sendo esta controlada pela política de estoque-base e todas as demais seguem produção *make-to-order* (MTO). De início existem alguns produtos acabados estocados. Desta maneira, quando uma demanda entra, a procura será satisfeita imediatamente. Caso não existirem produtos acabados em estoque, tal pedido será perdido. Sob a perspectiva do BSCS, uma ordem de produção será, então, depositada sempre que

um produto acabado for retirado do estoque ou, de forma análoga, uma demanda for atendida para impedir a carência de produtos.

Para se trabalhar com o procedimento proposto pelo BSCS, faz-se imprescindível que as emissões das informações de demanda sejam direcionadas a cada posto de trabalho no instante em que o produto é demandado. Para tal, utiliza-se um controle baseado em cartões, comparável ao sistema *kanban*. Coloca-se um dado número de cartões em cada item de produtos finais, usando tantos cartões quanto se tem postos de trabalho. Se o produto é então levado para suprir a demanda, extrai-se os cartões presentes no produto, enviando em seguida outro cartão para cada etapa de produção. Cada cartão autoriza a produção da mesma forma que os cartões *kanban*. Assim que uma operação é finalizada, o cartão é outra vez alocado ao produto e o acompanhará até que deixe o *buffer* de produtos acabados. Quando se tem apenas um processo produtivo, o controle se torna análogo ao sistema *kanban*, distinguindo-se em linhas mais compridas de acordo com fluxo de informações. O controle BSCS distribui, ao mesmo tempo, as solicitações de demanda para todas as etapas do processo (LEE; ZIPKIN, 1992; KIMBALL, 1988 apud BONVIK; COUCH; GERSHWIN, 1997).

Segundo Anbazhagan, Wang e Gomathi (2013), a política apresentada pelo BSCS por vezes tem sido adotada no controle de estoques de itens lentos e caros, em situações de demanda pouco frequente. Como normalmente são produtos de alto valor de mercado, o custo da encomenda torna-se imperceptível se confrontado com os custos relativos a exploração e escassez. Os autores argumentam que itens reparáveis de maneira geral são mais caros e possuem taxas individuais de demanda consideravelmente baixas. Desta forma, o BSCS revela-se adequado para esses sistemas e vem sendo vastamente empregado em tal circunstância.

1.2 Modelagem conceitual

Atualmente um considerável avanço na utilização da simulação computacional vem sendo notado, motivado pela sua flexibilidade em avaliar ambientes que ofereçam elevada complexidade na compreensão e concepção de dados. Dentre as etapas da simulação encontra-se a modelagem conceitual de processos, que mostra por benefício a melhoria do grau de qualidade do modelo simulado e a diminuição do tempo gasto para realização do mesmo (PERERA; LIYANAGE, 2000). Estas são algumas das razões que levam Law (2009) a considerar a etapa de elaboração do modelo conceitual uma das mais importantes dentro do estudo da simulação.

De acordo com Sargent (2011), o modelo de simulação é obtido por meio da aplicação do sistema a ser estudado no computador, ou seja, realizando a programação das especificações do modelo conceitual. O autor explica, ainda,

que as inferências sobre o sistema são atingidas com a base de dados obtidas por meio da realização de experimentos computacionais (experimental) no modelo de simulação. Para Robinson (2013), escolher o que modelar e o que não modelar é comumente exposto como sendo a tarefa mais complexa, menos compreendida e mais importante num dado estudo de simulação.

Mesmo com a praticidade disposta pelo modelo conceitual durante a estruturação da simulação computacional, uma parte relevante dos métodos utilizados com este intuito não apresentam embasamentos relacionados diretamente à simulação. Isto se dá especialmente ao fato de que a lógica utilizada por tais técnicas é diferente da usada pelo modelo de simulação, dificultando sua implementação (RYAN; HEAVEY, 2006).

Robinson (2013) relata que a intenção inicial se dá pela construção de um modelo que contenha o máximo de detalhes possíveis para que se alcance o nível mais próximo do sistema real e, conseqüentemente, um modelo mais preciso. No entanto, isso só ocorreria se tivéssemos conhecimento total do sistema real, além de uma elevada disponibilidade de tempo para desenvolver e executar o modelo. Na prática, essa situação torna-se quase que impossível. Logo, deve-se desenvolver um modelo menos detalhado, determinando o nível ideal de abstração necessário para a modelagem. Este processo de abstrair um modelo do mundo real é conhecido como modelagem conceitual.

A validação do modelo conceitual, conforme Sargent (2011), é caracterizada como a determinação de que as teorias e pressupostos subjacentes ao estudo do sistema estejam corretas. Isto é, quanto a representação do modelo, sua estrutura, lógicas utilizadas, bem como as relações matemáticas e causais são admissíveis para o que foi determinado. Para tal, cada submodelo e, também, o modelo completo precisam passar por avaliações a fim de definir se são aceitáveis e adequados para a finalidade desejada. Isto deve incluir a determinação do nível de detalhe apropriado. Geralmente, examina-se o fluxograma ou modelo gráfico (SARGENT, 1986), ou até mesmo o conjunto de equações presentes no modelo. Se forem encontrados erros, todo o modelo conceitual precisa ser revisto e validado novamente.

1.3 A técnica IDEF-SIM

Visto a carência de técnicas que ofereçam apoio particular à simulação computacional, Montevechi et al. (2010) sugerem o uso do IDEF – SIM, uma ferramenta de modelagem conceitual que tem como proposta principal apresentar o sistema a ser simulado previamente de um modo mais claro e de fácil leitura. Conforme os autores, por ser focada em simulação e representar a lógica utilizada em eventos discretos, a técnica provê os dados essenciais à sua execução, ainda que

ela não garanta a transcrição de todas as informações solicitadas para o modelo computacional. Logo, o IDEF-SIM cria um modelo conceitual no qual a lógica empregada durante a coleta dos dados esteja conforme a utilizada na simulação, facilitando a compreensão dos componentes presentes no ambiente de estudo.

Por mais que a técnica IDEF-SIM ofereça a lógica e os elementos para projetos característicos de simulação, dentro de ambientes complexos (assim como no IDEF0 e no IDEF3), apenas a rotulagem dos elementos e a utilização de um quadro descritivo não garantem que o modelo conduza toda informação desejada. Ou seja, mesmo entendendo o método IDEF-SIM profundamente, faz-se imprescindível o conhecimento sobre o sistema modelado, para que se possa entender as definições de dados e elementos apresentados no diagrama. Desta forma, o IDEF-SIM maximizará sua eficiência quando combinado com alguma técnica de documentação normalizada, que busca coletar e registrar todas as especificações necessárias do sistema (RANGEL; NUNES, 2011).

O Quadro 13.1 apresenta os elementos e símbolos usados para modelagem conceitual da técnica IDEF-SIM, bem como, de onde cada elemento se originou. A seguir encontram-se as explicações expostas por Montevechi et al. (2010) para cada item presente neste quadro, a saber:

Quadro 13.1 Simbologia IDEF-SIM.

	ELEMENTO	SÍMBOLO	TÉCNICA DE ORIGEM
1	Entidade		IDEF3
2	Funções		IDEFO
3	Fluxo da Entidade		IDEFO e IDEF3
4	Recursos		IDEFO
5	Controles		IDEFO
6	Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos	 Regra E	IDEF3
		 Regra OU	
		 Regra E/OU	
7	Movimentação		FLUXOGRAMA
8	Informação Explicativa		IDEFO e IDEF3
9	Fluxo de entrada no sistema		
10	Ponto final do sistema		
11	Conexão com outra figura		

Fonte: Adaptado de Montevechi et al. (2010)

- 1) Entidade: itens a serem processados pelo sistema, podem ser designados como matérias-primas, produtos, pessoas, documentos etc. Podem ser agrupados ou divididos durante o processo de produção e são movidas por si só ou om uso de um recurso;
- 2) Funções: descrevem os lugares onde a entidade vai sofrer uma ação. Funções podem ser postos de trabalho, postos de atendimento, correias transportadoras, linhas e ações;
- 3) Fluxo de Entidade: representam a direção da entidade no modelo, caracterizando o momento de entrada e de saída das entidades nas funções;
- 4) Recursos: são os elementos utilizados para mover as entidades e executar funções. Os recursos podem representar equipamentos ou pessoas;
- 5) Controles: representam as regras utilizadas nas funções, como sequenciamento, regras de fila, programação, entre outras;
- 6) Regras para fluxo paralelo e/ou alternativo: dois ou mais caminhos, depois de uma função, podem ser executados em conjunto (regra E), ou de um modo alternativo (regra OU), ou permitindo ambas as regras (regra E/OU);
- 7) Movimento: retrata um deslocamento da entidade no qual o modelador acredita possuir um efeito importante sobre o modelo;
- 8) Informações explicativa: usada para inserir uma explicação objetivando facilitar a compreensão do modelo;
- 9) Fluxo de entrada no sistema modelado: determina a entrada ou a criação de entidades no modelo;
- 10) Ponto final do sistema: define o fim de um percurso no interior do fluxo modelado. Tudo o que, na prática, é encontrado para além deste ponto está fora dos limites do modelo;
- 11) Conexão com outra figura: usada para dividir o modelo em partes diferentes de figuras.

2 Metodologia

Conforme Berto e Nakano (1998; 2000), os procedimentos de pesquisa frequentemente aplicados em engenharia de produção são: teórico-conceitual, experimental, *survey* (pesquisa de avaliação), pesquisa-ação e estudo de caso. Os procedimentos de pesquisa empregados nesta pesquisa foram o teórico-conceitual (BERTO; NAKANO, 1998) e o estudo de caso (YIN, 1990).

A pesquisa teórico-conceitual foi empregada com a finalidade de garantir a orientação teórica sobre os temas abordados. Quanto ao estudo de caso, este foi usado para o entendimento da realidade da montadora de automóveis estudada e para obter os dados e informações necessários. A parte da linha estudada trata-se da produção de eixos traseiros.

As etapas propostas por Law e Kelton (2000) foram seguidas durante a modelagem conceitual, sendo que a técnica utilizada para a modelagem conceitual foi o IDEF-SIM, proposta por Leal (2003), Leal, Almeida e Montevechi (2008), Leal et al. (2009) e Montevechi et al. (2010). Conforme Leal et al. (2009), o IDEF-SIM propicia desenvolver modelos conceituais com informações que facilitam a elaboração dos modelos computacionais em estudos de simulação. A validação do modelo conceitual foi realizada por meio da validação face-a-face (SARGENT, 2011).

3 Discussão e Resultados

O estudo realizado voltou-se à uma parte da linha de produção de uma montadora de automóveis. Esta parte da linha monta eixos traseiros. Todos os dados coletados foram apropriados para a modelagem conceitual do funcionamento do local analisado. O ambiente estudado é responsável pela produção de sete diferentes tipos de eixos, designados no modelo como eixo n (onde $n = 1, 2, \dots, 7$). Cada modelo possui um tempo de processamento distinto em todas as estações de trabalho, com exceção da estação 5 em que os tempos de processamento são iguais para todos os tipos de modelo.

O local de estudo é dividido em cinco estações de trabalho, nas quais cada uma é encarregada de realizar um dado conjunto de atividades, visando a montagem completa dos eixos. Seis operadores são utilizados como recursos do sistema. Na estação de trabalho 2, dois operadores trabalham de maneira simultânea, nas demais apenas um operador em cada.

Para que o sistema BSCS fosse aplicado com base na realidade da empresa, fez-se uso de postos de cartões (no modelo denominados como posto de cartão 1, 2, 3, 4 e 5) sendo o primeiro colocado no início do sistema e os outros dispostos entre as estações, tais cartões são os responsáveis pela emissão da ordem de produção no instante em que um eixo é demandado.

Dada a sistemática posta para aplicação do BSCS, foi ainda necessário o uso de estoques intermediários que se localizam, também, entre as estações de trabalho. Além deles, o modelo contou com um estoque inicial responsável pela alocação da matéria-prima que chega e um estoque final no qual os eixos acabados esperam para sair da linha.

Os sete eixos passam obrigatoriamente em todas as estações de trabalho. Como os tempos de movimentação são valores muito pequenos, estes são somados no tempo de operação de cada operador, portanto, não apresentam movi-

mentações significativas no modelo. Todos os estoques presentes são regidos pela regra de sequenciamento FIFO.

A modelagem conceitual do sistema estudado é representada nas Figuras 1 e 2, que foram desenvolvidas de acordo com a método proposto pela técnica de modelagem IDEF-SIM. O modelo mostra as informações necessárias para a compreensão do ambiente estudado, assim como todos elementos que o compõe, facilitando, como já exposto, o desenvolvimento e aplicação da simulação.

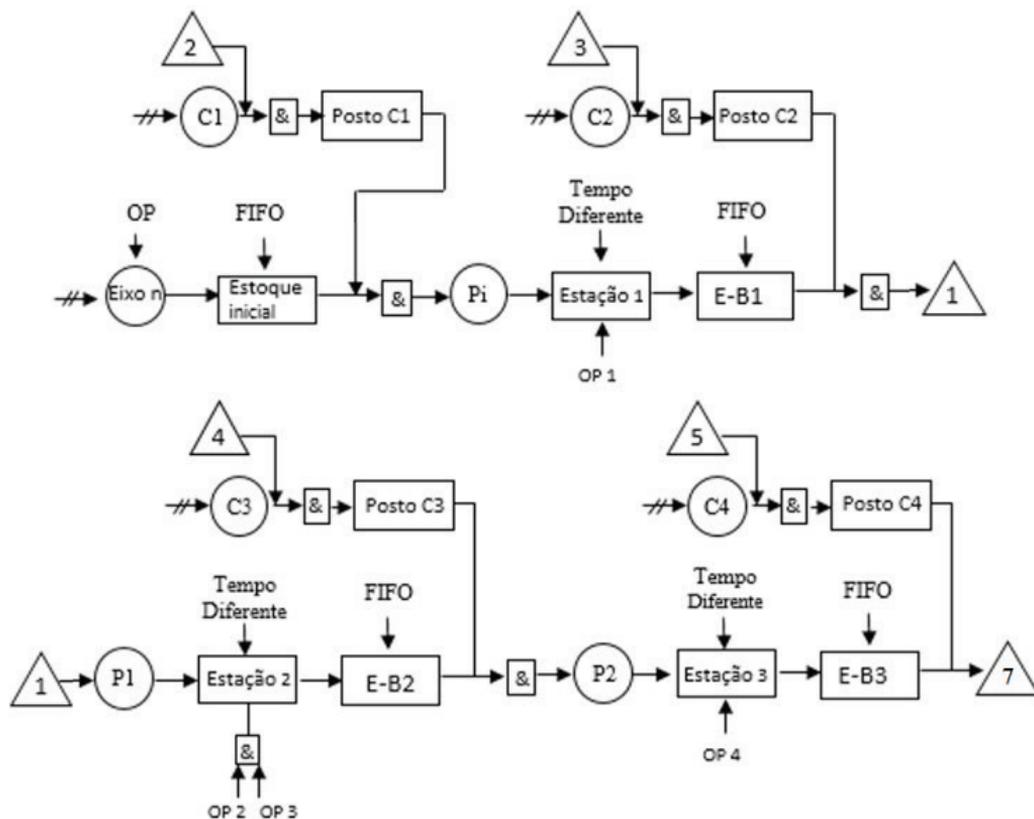


Figura 13.1 Modelo conceitual elaborado (Parte 1).

Fonte: Próprias autoras.

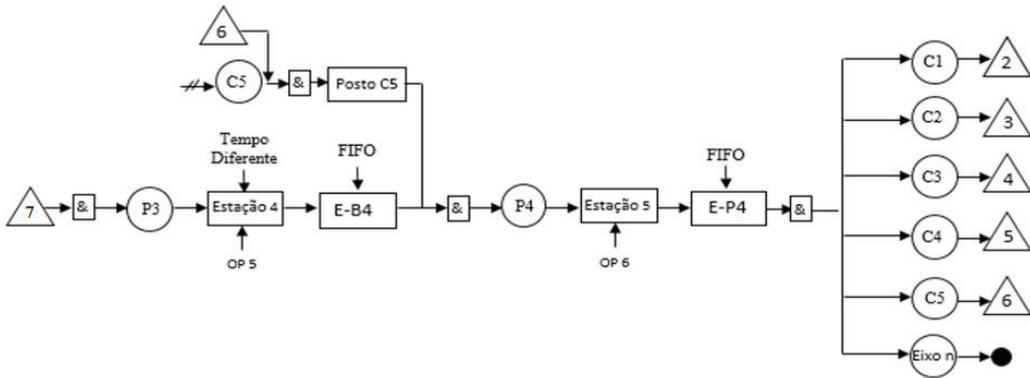


Figura 13.2 Modelo conceitual elaborado (Parte 2).

Fonte: Próprias autoras.

O Quadro 13.2 refere-se à definição das notações apresentadas no modelo conceitual realizado. Para simplificação da notação exposta na tabela, foi escolhida a representação de maneira geral, utilizando a letra “n” para identificação das variáveis presentes no sistema.

Quadro 13.2 Notações utilizadas no IDEF-SIM.

NOTAÇÃO	DEFINIÇÃO
Eixo n:	Modelo de eixo n
Posto Cn:	Posto Cartão n
OP	Ordem de Produção
OPn	Operador n
Cn:	Cartão de produção n
Pn:	Produto n
Pi:	Eixo n + C1
P1:	Pi + C2
P2:	P1 + C3
P3:	P2 + C
P4:	Eixo n + \sum Cn
E-Bn:	Estoque-Base n
E-P4:	Estoque de P4

Fonte: Próprias autoras.

O eixo (Eixo n inicial) que entra no sistema respeitando o estabelecido na Ordem de Produção (OP) é colocado no estoque inicial e aguarda até que seja retirado para processamento. Assim que uma ordem de produção advinda da solicitação de demanda chega ao posto de cartão 1 (Posto C1), um cartão C1 é alocado em uma das peças presentes no estoque inicial e uma nova entidade é criada, designada no modelo como com P_i . Posteriormente, o eixo com o primeiro cartão é levado e processado na estação de trabalho 1, pelo operador P1. Após processamento, a peça segue para o estoque-base 1 (EB-1) que é regido pela regra FIFO.

Quando se tem uma nova ordem de produção, o cartão de produção 2 é anexado à uma das peças P_i , transformando-a em uma nova entidade, agora denominada como P1 (junção do $P_i + C2$), e então a entidade é levada para processamento na estação de trabalho 2, que por sua vez emprega 2 operadores simultaneamente. Quando a peça é processada, a mesma é transportada ao EB-2, também regido pela regra FIFO.

Da mesma maneira, quando uma ordem de produção chega ao Posto de cartão 3, o cartão C3 é **alocado em uma** entidade P1 criando-se uma outra entidade (P2) que posteriormente é processada na estação de trabalho em questão por um operador (OP4) e colocada no próximo estoque-base (EB-3). Esse processo se repete até a estação de trabalho 5 (**única com tempos de processamentos iguais para todos os eixos**), onde a peça processada por ela é levada diretamente a um estoque de produtos acabados (E-P4) sem que se faça a adição de um novo cartão.

Quando uma nova peça é demandada, retira-se uma das peças prontas do E-P4, removendo-se todos os seus cartões (uma nova entidade surge, o Eixo n referente ao produto final) enviando-os novamente para seu respectivo posto de cartão. Dessa maneira, cada estação de trabalho entende a chegada de tais cartões como uma ordem de produção e inicia-se um novo ciclo do processo. A peça pronta é **então levada para fora do sistema** com o intuito de atender a demanda. Cada posto de cartão é abastecido por suas respectivas entidades de cartão, sendo que, como já exposto, ao fim do processo todos os cartões presentes no produto acabado retornam ao sistema emitindo uma ordem de produção quando um item é demandado.

Considerações Finais

Neste artigo foi feita a modelagem conceitual IDEF-SIM de uma linha de produção automobilística sob o funcionamento da política *base stock control system*. Durante o estudo, foram verificados fatores importantes para a programação do sistema no simulador, como os relacionamentos lógicos, as características do

BSCS aplicado em um ambiente real e os componentes do sistema. Portanto, o objetivo almejado foi atingido.

O IDEF-SIM mostrou-se como uma técnica de modelagem que, assim como apresentado na literatura, facilitou a compreensão do sistema real antes da aplicação da simulação computacional. Os símbolos utilizados durante a modelagem conceitual foram considerados característicos e de fácil compreensão para a representação do ambiente estudado. Vale salientar que, sozinha, a técnica não fornece todas as informações desejadas para o modelador. Logo, mesmo entendendo o IDEF-SIM profundamente, faz-se indispensável um bom conhecimento sobre o sistema modelado, para que se possa entender as definições de dados e elementos apresentados no modelo conceitual.

O presente artigo contribui para maior integração do que é disposto na teoria com a prática empresarial, facilitando o entendimento e a divulgação da técnica utilizada. Para pesquisas futuras, sugere-se realizar a modelagem conceitual de outros sistemas de emissão de ordens, como o *kanban* e o CONWIP (*Constant Work in Process*). Ainda, sugere-se a simulação dos modelos conceituais para verificar o desempenho do ambiente produtivo estudado.

Referências

- ANBAZHAGAN N.; WANG, J.; GOMATHI D. Base stock policy with retrieval demands. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, p. 4464-4473, 2013).
- BERTO, R. M. V. S.; NAKANO, D. N. A produção científica nos anais do encontro nacional de engenharia de produção: um levantamento dos métodos e tipos de pesquisa. **Produção**, v. 9, n° 2, p. 65-75, jul. 2000.
- BERTO, R. M. V. S.; NAKANO, D. N. Metodologia da pesquisa e a engenharia de produção. In: XVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENE-GEP) e IV International Congress of Industrial Engineering (ICIE), 1998, Niterói, RJ. **Anais...** Niterói: UFF/ABEPRO, out. 1998. 1 CD-ROM.
- BONVIK, A. M.; COUCH, C.; GERSHWIN, S. B. A. Comparison of Production-Line Control Mechanisms. **International Journal of Production Research**. v. 35, n. 3, p. 789-804, 1997.
- CHANG, Kuo-Hwa; LU, Yang-Shu. Inventory management in a base-stock controlled serial production system with finite storage space. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 54, n. 11-12, p. 2750-2759, 2011.

- CHENG, T. C. E.; GAO, C.; SHEN, H. Production and Inventory Rationing in a Make-to-Stock System With a Failure-Prone Machine and Lost Sales. **IEEE, Transactions On Automatic Control**, v. 56, n. 5, p. 1176-1180, 2011.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. São Paulo: Bravarte. 2ª ed. 2007.
- LAW, A. M. How to build valid and credible simulation models. In: 2009 Winter Simulation Conference, 2009, Austin. **Proceedings...** Austin: IEEE, 2009, p. 24-33.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling & Analysis**. 3rd edition, New York: McGraw- Hill, 2000.
- LEAL, F. **Um diagnóstico do processo de atendimento a clientes em uma agência bancária através de mapeamento do processo e simulação computacional**. Itajubá: UNIFEI, 2003. 223 P. (Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Itajubá).
- LEAL, F.; ALMEIDA, D. A.; MONTEVECHI, J.A.B. Uma Proposta de Técnica de Modelagem Conceitual para a Simulação através de elementos do IDEF. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 40, 2008, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: SBPO, 2008., p. 2503-2514.
- LEAL, F.; OLIVEIRA, M. L. M.; ALMEIDA, D. A.; MONTEVECHI, J. A. B. Desenvolvimento e aplicação de uma técnica de modelagem conceitual de processos em projetos de simulação: O IDEF-SIM. In: Encontro de Engenharia de Produção, 29, 2009, Salvador. **Anais...** Salvador: ABEPRO, 2009. 14 p.
- MONTEVECHI, B. A. J.; LEAL, F.; PINHO, F. A.; COSTA, S. F. R.; OLIVEIRA, M. L.M.; SILVA, F. L. A. Conceptual Modelling In Simulation Projects By Mean Adapted Idef: An Application In A Brazilian Tech Company. In: 2010 Winter Simulation Conference, 2010, Baltimore. **Proceedings...** Baltimore: IEEE, 2010. p. 1624-1635.
- PERERA, T.; LIYANAGE, K. Methodology for rapid identification and collection of input data in the simulation of the manufacturing systems. **Simulation Practice and Theory**, v.7, p. 645-656, 2000.

- RANGEL, J. A. J.; NUNES, F.A. Use Of Idef-Sim To Document Simulation Models. In: 2011 Winter Simulation Conference, 2011, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: IEEE, 2011. p. 1542-1553.
- ROBINSON, S. Conceptual Modeling For Simulation. In: 2013 Winter Simulation Conference, 2013, Whashington. **Proceedings...** Whashington: IEEE, 2013. p. 377-388.
- RYAN, J.; HEAVEY, C. Process modeling for simulation. **Computers in industry**, v. 57, n. 5, p. 437-450, 2006.
- SARGENT, R. G. The use of graphical models in model validation. In: 1986 Winter Simulation Conference, Piscataway. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 1986. p. 237-241.
- SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. In: 2011 Winter Simulation Conference, 2011, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: IEEE, 2011. p. 183-198.
- YIN, R. K. **Case study research: design and methods**. Newbury Park, California: Sage Publications, 1990.

Análise de processos multivariados: aplicada aos índices de desempenho

Débora Alves Coelho¹

Rogério Santana Peruchi³

Maíza Biazon de Oliveira²

Resumo: Mediante a necessidade de fornecer produtos com qualidade de acordo com as necessidades do cliente. Com intuito de garantir esta qualidade, faz-se necessário avaliar o desempenho dos processos. Diante desse cenário, existem métodos que quantificam o desempenho do processo, por meio de índices univariados e multivariados. Esta pesquisa teve como foco propor o método WPC e demonstrar a sua eficácia em comparação com abordagens multivariadas da literatura, utilizando os métodos de componentes principais e ponderados. Utilizando como critério de avaliação o intervalo de confiança univariado, impondo que os índices multivariados apresentem valores dentro dos limites deste IC para afirmar a validade dos métodos. Para as análises realizadas seguiu-se uma sequência de passos abordados no estudo, verificando-se, por meio dos resultados auferidos, a eficácia do método proposto e suas vantagens em relação aos demais.

Palavras-chave: Índices desempenho multivariados. Método de componentes principais ponderados. Intervalo de confiança.

Introdução

O mercado cada vez mais se preocupa em melhor atender aos requisitos, especificações dos clientes. O ideal para as empresas, consiste em atingir essas

1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: debora-alves.8@hotmail.com. Bolsista do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica do CNPq.

2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: maizabiazon@hotmail.com.

3 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias, Laboratório de Metrologia. Contato: rogerioperuchi@ufg.br.

exigências, apresentando um nível mínimo de variabilidade dos produtos ou processos. Porém, sempre existe variações entre uma peça e outra, advindas de causas comuns ou causas especiais. Quando o processo atende a uma variabilidade mínima, considera-se a presença apenas de causas comuns (AIAG, 2005; MONTGOMERY e RUNGER, 2011).

Espera-se em um processo de fabricação, que haja a presença apenas causas comuns de variação. Assim, as saídas deste caracterizam-se em uma distribuição estável no tempo e previsível, pode-se então considerar que o produto ou processo estão sob controle estatístico. Para as causas especiais, devido a não estabilidade e repetitividade, o produto/processo encontram-se fora de controle estatístico, isto pode ser ocorrer devido a desajustes de máquinas, erros de operação, entre outros (AIAG, 2005).

Diante da importância de se manter o processo sob controle, as empresas estão sempre buscando por meios e técnicas para avaliar os resultados de seus processos e realizar previsões. Entre os sistemas utilizados, tem-se o Controle Estatístico do Processo (SPC), no qual, se avalia a qualidade por meio de técnicas estatísticas. A análise de capacidade do processo está entre as ferramentas do SPC. Com sua aplicação pode-se avaliar a capacidade do processo em produzir satisfazendo as especificações do consumidor, para que possam ser identificadas e minimizadas as variações. Auxiliando assim, na tomada de decisões sobre o processo, definindo ações até mesmo preventivas (AIAG, 2005; WANG, 2006; SHAHRIARI e ABDOLIAHZADEH, 2009).

A análise de capacidade do processo é quantificada por meio dos índices de capacidade de processos (ICPs) univariados. Estes estabelecem uma comparação entre o desempenho real e desejado do processo, utilizando uma única característica de qualidade. Vários índices vem sendo propostos para melhor se adaptar aos tipos de processos (CHEN, PEARN e LIN, 2003; DAS, 2009). Devido as especificações, sabe-se que as saídas dos processos, apresentam mais de uma característica de qualidade importante e que estas encontram-se correlacionadas. Portanto o meio industrial necessita de técnicas multivariadas, que abordem todas as especificações relevantes para serem analisadas, através dos índices de capacidade de processos multivariados (AIAG, 2005; WANG, 2006; AHMAD et al., 2009).

Neste cenário, em que se necessita o desenvolvimento da análise multivariada, o presente estudo busca abordar a análise de capacidade ou desempenho, com múltiplas variáveis correlacionadas, e sugerir um método alternativo, diferente das abordagens literárias. Realizando uma comparação entre os métodos de análise dos componentes principais (PCA), com o método dos componentes principais ponderados (WPC). A validação do método baseia-se, na avaliação dos índices calculados em relação aos intervalos de confiança, através da aplicação dos dados literários de Scagliarini (2011).

Desta forma, para alcançar o objetivo proposto, a pesquisa foi estruturada da seguinte forma: a segunda seção refere-se a revisão bibliográfica de acordo com o tema abordado, a terceira seção aborda ao método utilizado nesse estudo, a quarta seção remete aos resultados obtidos e sua análise, e ao final são apresentadas as considerações finais do estudo.

As considerações e resultados abordadas no presente estudo, colaboram com os conhecimentos sobre análise multivariada, a fim de enriquecer a temática e estimular novas pesquisas acadêmicas na área. Para que o tema seja bem esclarecido, os métodos sejam validados, como no caso do método WPC, em que se mostrou a eficiência de sua aplicação, e assim, proporcionar bons resultados para os meios industriais e acadêmicos.

1 Referencial Teórico

1.1 Índices Univariados de Desempenho

Os índices univariados são aplicados na análise dos processos, visando mensurar a capacidade (ICP_s) e desempenho (IDP_s), para obtê-los exige-se a normalidade do processo. Diante de uma amostra de dados que não possui normalidade, existem diferentes técnicas de transformações que alteram um conjunto de dados não normal para normal. As principais técnicas estatísticas de transformação de dados propostas são a de potência de Box-Cox e de Johnson. A de Johnson, apresenta um sistema clássico de distribuições, assim como apresentado na Eq. (1).

$$z = \gamma + \eta\tau(x; \varepsilon, \lambda) = \delta g(x) \quad (1)$$

Onde Z , trata-se da variável que deve ser ajustada pela transformação, em relação as variáveis $\gamma, \eta, \varepsilon, e \lambda$ são obtidos por meios de estimativas, desde que, sigam as restrições: $\eta > 0, \lambda > 0, -\infty < \gamma < \infty, -\infty < \varepsilon < \infty$. A função $g(x)$, dependendo do uso, pode assumir distribuições limitadas, não limitadas e lognormal. No que diz respeito a sua variável x , esta, é obtida pela expressão essa $x = g^{-1}\left(\frac{z-\gamma}{\eta}\right)$. (AIAG, 2005; MONTGOMERY e RUNGER, 2011; PEARN e KOTZ, 2006).

De acordo com Montgomery (2009), a Automotive Industry Action Group (AIAG) faz o uso dos índices P_p e P_{pk} para avaliar o processo, estando este, sob controle ou não. À vista disso, a AIAG (2005), estabelecem os índices P_p e P_{pk} conforme as Eqs. (2) e (3).

$$P_p = \frac{LES - LEI}{6\sigma_{LT}} \quad (2)$$

$$P_{pk} = \min \left\{ \frac{LES - \bar{X}}{3\sigma_{LT}}, \frac{\bar{X} - LEI}{3\sigma_{LT}} \right\} \quad (3)$$

Observa-se que, as especificações de engenharia, LES, LEI e T, referem-se respectivamente ao intervalo, superior, inferior e no alvo das características de qualidade. Enquanto a média e o desvio padrão global são simbolizados pelas variáveis \bar{X} e σ , respectivamente.

Pearn e Kotz (2006), afirmam que obtém-se os índices C_{pm}/P_{pm} por meio da Eqs. (4)

$$C_{pm}/P_{pm} = \frac{LES - LEI}{6\sqrt{\sigma_{LT}^2 + (\mu - T)^2}} \quad (4)$$

Sabe-se que, LES, LEI e T dizem respeito ao intervalo, superior, inferior e no alvo, de tolerância que se permite no processo. Enquanto as variáveis μ e σ fazem alusão a média e desvio padrão global do processo.

Conforme Montgomery e Runger (2011), utiliza-se os ICP_s, (C_p , C_{pk} , C_{pm} e C_{pmk}), mediante um processo sob controle e estável, com presença apenas de causas comuns de variação. Já os IDP_s, (P_p , P_{pk} , P_{pm} e P_{pmk}), mesuram tanto em condições de causas especiais quanto comuns, ou seja. Portanto, nota-se que a principal diferença entre eles refere-se a variação das características analisadas.

Dentre os diferentes usos, o intervalo de confiança univariado julga a eficácia de métodos estatísticos relacionados a mensurações de processo. Este, é definido pela presença de limites superior e inferior. Conforme representado pela Eqs. (5) e (6).

$$LIIC = \bar{M} - t_{N-1, \alpha/2} \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (5)$$

$$LSIC = \bar{M} + t_{N-1, \alpha/2} \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

Estas especificações, referem-se aos intervalos da média, onde s é do desvio padrão da amostra, \bar{M} trata-se da média de desempenho para características de qualidade, N relaciona-se ao tamanho da amostra e o termo $t_{N-1, \alpha}$ diz respeito $(1 - \alpha)100\%$ percentis com a presença de graus de liberdade. (PERUCHI *et al.*, 2012).

1.2 Índices multivariados de desempenho

A análise de componentes principais (PCA), proposta por Wang e Du (2000), é um método utilizado para descrever o desempenho de um processo em termos multivariados, onde os escores de componentes principais (PCis) devem estar restritos a normalidade. Além disso, esse método, possibilita a transformação de dados correlacionados em dados independentes. Este método pode ser descrito

pela Eq. (7) e suas especificações de engenharia, LEI_{PCi} , LES_{PCi} e T_{PCi} pelas Eqs (8), (9) e (10).

$$PC_{\text{escore}} = u'^T x \quad (7)$$

$$LEI_{PCi} = u'_i LEI \quad (8)$$

$$LES_{PCi} = u'_i LES \quad (9)$$

$$T_{PCi} = u'_i T \quad (10)$$

Sabe-se que, u'^T , refere-se a matriz transposta de autovetores, e x as variáveis originais do processo. Em relação as especificações, nota-se que, LEI , LES e T dizem respeito ao limite inferior, superior e no alvo das observações originais (x).

Para se obter os índices de desempenho de um processo, por meio do método PCA, faz-se indispensável estimar os índices univariados, referentes a cada PC analisado, e aglutina-los. Wang e Chen (1998) afirma, que para analisar o desempenho de um processo, os dados devem apresentar normalidade de distribuição. Os índices multivariados, então serão obtidos por intermédio da média geométrica entre os índices univariados dos PCs. Assim, de acordo com Wang e Chen (1998), método PCAM, obtêm-se os índices multivariados por meio da Eq. (11).

$$MP_p = \left(\prod_{i=1}^k P_{p;PCi} \right)^{1/k} \quad (11)$$

Ressaltando-se que, k refere-se ao número de PC considerado na análise e $P_{p;PCi}$ denota os índices univariados de cada PC, calculado com auxílio da Eq. (2).

Segundo Perakis e Xekalaki (2012), pode-se obter os índices, por meio de outro equacionamento, no qual utiliza-se a ponderação dos índices univariados relacionados aos PCs e média aritmética para aglutina-los. Com isso, são atribuídos pesos diferentes a cada $P_{p;PCi}$, sendo estes relativos aos autovalores (λ_i). Desta maneira, a Eq. (12), representa o método PCAX.

$$MXP_p = \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i P_{p;PCi}}{\sum_{i=1}^k \lambda_i} \quad (12)$$

Nos estudos de Wang (2005), o mesmo desenvolveu um método de cálculo dos índices multivariados, buscando abordar os processos que apresentam produção com curto período. Diante disso, para definir os índices multivariados aplicou-se condições de não-normalidade, baseou-se na ponderação dos índices univariados e na utilização da média geométrica.

Para Scagliarini (2011), faz-se necessário a premissa de normalidade da distribuição para se utilizar os índices. Neste cenário, aplicou-se ao método a condição de dados normais e os renomeou. Obtêm-se os índices de desempenho multivariado, através do método PCAW, utilizando a Eq. (13).

$$MWP_p = \left(\prod_{i=1}^k P_{p;PC_i}^{\lambda_i} \right)^{1/\sum_{i=1}^k \lambda_i} \quad (13)$$

De acordo com as abordagens de Perakis e Xekalaki (2012) e Scagliarini (2011), para as medidas de desempenho, P_{pk} , P_{pm} , pode-se calcular seus índices multivariados utilizando o mesmo equacionamento supracitado. Ressaltando que para isso, deve-se substituir o cálculo de $P_{p;PC_i}$ por $P_{pk;PC_i}$ e $P_{pm;PC_i}$. Diferenciando apenas as equações relacionada aos índices univariados de cada PC.

Liao (2005), propôs o método dos componentes principais ponderados (WPC), com intuito de suprir as limitações encontradas no método PCA. Para isso, utiliza-se a ponderação dos componentes principais. Uma das formas de definir o WPC, baseia-se no percentual de explicação relacionado a cada componente principal. Representado pela Eq. (14).

$$WPC = \sum_{i=1}^m \left[\frac{\lambda_i}{\sum_{k=1}^m \lambda_k} (PC_i) \right] \quad (14)$$

Onde k representa o número de escores significativos no cálculo, PC_i refere-se ao escore de componente principal, obtido por meio da Eq. (7), sendo esta compartilhada com o método PCA e λ_i evidencia os autovalores.

A utilização do método WPC exige que novos limites de especificação, inferior (LEI_{WPC}), superior (LES_{WPC}) e alvo (T_{WPC}), sejam determinados, para isso faz-se necessário utilizar as Eqs. (15), (16) e (17). No qual, as variáveis LEI , LES e T representam os limites padronizados por meio das Eqs. (8), (9) e (10), também compartilhados pelo método PCA. Em relação a variável U esta denota a matriz de autovetor e λ os autovalores. Soma-se ao fato, o cálculo do desvio padrão global ($\hat{\sigma}_{LT}$).

$$LEI_{WPC_S} = LEI'U\lambda \quad (15)$$

$$LES_{WPC_S} = LES'U\lambda \quad (16)$$

$$T_{WPC_S} = T'U\lambda \quad (17)$$

$$\hat{\sigma}_{LT} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (18)$$

Após determinado os parâmetros do método WPC, pode-se estimar os índices de desempenho multivariados, P_p , P_{pk} e P_{pm} , com o auxílio das Eqs. (19), (20) e (21), respectivamente.

$$WPCP_p = \frac{LES_{WPC} - LEI_{WPC}}{6\sigma_{LT;WPC}} \quad (19)$$

$$WPCP_{pk} = \min \left\{ \frac{LES_{WPC} - \bar{Y}_{WPC}}{3\sigma_{LT;WPC}}, \frac{\bar{Y}_{WPC} - LEI_{WPC}}{3\sigma_{LT;WPC}} \right\} \quad (20)$$

$$WPCP_{pm} = \frac{LES_{WPC} - LEI_{WPC}}{6\sqrt{\sigma_{LT;WPC}^2 + (\bar{Y}_{WPC} - T_{WPC})^2}} \quad (21)$$

2 Metodologia

As análises realizadas na pesquisa encontram-se embasadas em uma metodologia, estruturada em uma sequência de passos, que podem ser executados, por ambos os métodos abordados, com a finalidade de determinar os índices multivariados do processo. Esta sequência está dividida em sete passos, em que apenas no sexto passo ocorre a diferenciação dos métodos. Esses passos são apresentados abaixo.

- Passo 1: Selecionar as características de qualidade a serem analisadas;
- Passo 2: Adquirir os dados, referentes às características;
- Passo 3: Obter os escores dos componentes: principais e ponderados;
- Passo 4: Realizar a análise dos componentes para obter autovalores, matriz autovetor e percentual de explicação;
- Passo 5: Determinar o desvio padrão e os limites de especificação;
- Passo 6: Determinar os índices de desempenho;
- Passo 7: Determinar o intervalo de confiança.

O desenvolvimento deste estudo começa com o passo1, no qual realiza-se a seleção das características de qualidade que se deseja avaliar, sendo estas de maior relevância para o processo e para o produto final. Em seguida, realiza-se o passo 2, este consiste nas medições necessárias, referentes as características definidas no passo anterior. Juntamente com essa coleta de dados são obtidos os valores limites das especificações de engenharia, estes se relacionam aos valores que se esperam obter de cada variável, para que a qualidade seja adequada.

No passo3, por meio da aplicação das equações, obtêm-se os escores dos componentes referentes a cada método. Portanto são determinados os escores de componentes principais, estes destinados ao método PCA, e os escores dos componentes principais ponderados, necessários para realizar a avaliação através do método

WPC. Aplicando-se a análise dos componentes com o auxílio da matriz de variância-covariância, têm-se assim, o passo 4. No qual gera-se os autovalores, a matriz autovetor e o percentual de explicação, parâmetros relacionados as variações.

Para utilização dos métodos, faz-se necessário obter novos limites de especificação, portanto o passo 5, consiste em determinar estes limites e o desvio padrão global. Que serão utilizados em análises posteriores. Para o método PCA, realiza-se apenas a padronização dos dados aplicando as equações descritas. Em relação ao WPC, os limites são calculados por meio da utilização destes dados de limites padronizados para PCA.

No passo 6, faz-se possível obter os índices multivariados, já que determinou-se os parâmetros necessários. Neste passo, os métodos se diferem, devido à necessidade de se calcular os índices univariados para estimar os multivariados baseados no método PCA. No método WPC não são exigidos obter os índices univariados, pois os parâmetros são ponderadas de forma a definir as estimativas multivariadas.

Após definidos os índices multivariados, realiza-se o passo 7, calculando-se o intervalo de confiança univariado segundo o equacionamento de Peruchi *et al* (2012), a fim de garantir que estes índices multivariados obtidos representem adequadamente as variações do processo.

3 Discussão e Resultados

Para desenvolver o estudo da análise multivariadas utilizou-se como base os dados da literatura de Scagliarini (2011) referente à 30 medições das características de qualidade profundidade (Y_1), comprimento (Y_2) e largura (Y_3), referentes aos dados de). Os dados coletados encontram-se na Tab. 1.

Tabela 14.1 Dados de 30 medições de profundidade, comprimento e largura

N	Y_1	Y_2	Y_3	N	Y_1	Y_2	Y_3
1	2,196	304,728	304,799	16	2,169	304,681	304,764
2	2,184	304,704	304,747	17	2,122	304,655	304,711
3	2,136	304,713	304,680	18	2,202	304,790	304,810
4	2,141	304,721	304,720	19	2,210	304,719	304,721
5	2,120	304,725	304,768	20	2,237	304,842	304,820
6	2,163	304,670	304,792	21	2,195	304,707	304,775
7	2,145	304,699	304,753	22	2,171	304,704	304,737

Continua

Tabela 14.1 Dados de 30 medições de profundidade, comprimento e largura (*Continuação*)

N	Y_1	Y_2	Y_3	N	Y_1	Y_2	Y_3
8	2,210	304,792	304,816	23	2,116	304,663	304,649
9	2,227	304,738	304,755	24	2,169	304,739	304,765
10	2,278	304,860	304,822	25	2,151	304,761	304,783
11	2,193	304,710	304,755	26	2,183	304,699	304,778
12	2,195	304,719	304,753	27	2,120	304,652	304,739
13	2,115	304,706	304,709	28	2,193	304,779	304,809
14	2,151	304,734	304,760	29	2,237	304,764	304,736
15	2,127	304,720	304,753	30	2,244	304,861	304,805

Fonte: Scagliarini, 2011

Tomando como base os dados das Tab. 1, calculou-se os escores dos componentes principais e ponderados. Através da Eqs. (7) e (14). Além disso, para realizar as posteriores análises, fez-se necessário utilizar as especificações de engenharia referentes aos limites, inferior (LEI), alvo (T) e superior (LES), das características exploradas do estudo de Scagliarini (2011). A Tab.2 apresenta essas especificações.

Tabela 14.2 Especificações de profundidade, comprimento e largura

Variáveis	LEI	T	LES
Y₁	2,1	2,2	2,3
Y₂	304,5	304,8	305,1
Y₃	304,5	304,8	305,1

Fonte: Elaborado pelos autores

3.1 Análise por meio do método WPC

Através da aplicação da análise de componentes principais utilizando a matriz de variância-covariância (S), obteve-se os dados da Tab. 3, referentes

aos autovalores, autovetores e percentual de explicação para cada componente principal.

Tabela 14.3 Análise dos componentes principais para Y1, Y2, Y3

		PC₂	PC₃
Autovalores	0,0053	0,0007	0,0006
%PC	0,801	0,111	0,088
%Explic. A.	0,801	0,912	1,000
Variáveis	Autovetores		
Y₁	0,523	-0,256	-0,813
Y₂	0,712	-0,393	0,582
Y₃	0,469	0,883	0,023

Fonte: Elaborado pelos autores

A utilização do método WPC requer que novos limites de especificação sejam estimados, tornando-se indispensável a padronização das especificações originais de engenharia, presente no estudo de Scagliarini (2011), por meio das equações (8), (9), (10). Com isso, faz-se possível o cálculo dos parâmetros de processo, em termos multivariados, conforme as Eqs. (15), (16) e (17). Ainda seguindo o método proposto, obteve-se o desvio padrão global com auxílio da Eq. (18). Os referentes dados encontram-se na Tab.4.

Tabela 14.4 Parâmetros do processo, utilizando WPC

LEI_{WPC}	T_{WPC}	LES_{WPC}	$\sigma_{LT,WPC}$
321,449	321,797	322,145	0,05818

Fonte: Elaborado pelos autores

Estimou-se os índices multivariados do método WPC, baseados nos dados da Tab. 4 e nas Eqs. (19), (20) e (21), referentes aos índices de desempenho P_p , P_{pk} e P_{pm} . Conforme apresentado na Tab. 5.

Tabela 14.5 Estimativas de desempenho multivariadas

P_p	P_{pk}	P_{pm}
1,99	1,61	1,30

Fonte: Elaborado pelos autores

A Fig. 14.1, representa a avaliação das características de qualidade, juntamente com os índices multivariados, por meio do método WPC.

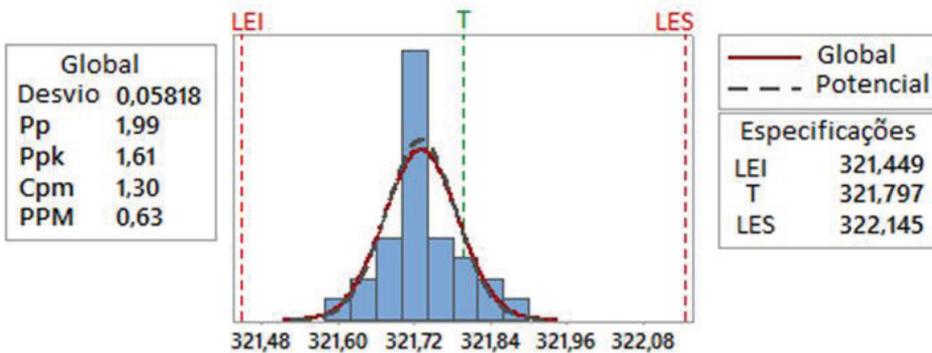


Figura 14.1 Análise de desempenho do WPC

Fonte: Elaborado pelos autores

3.2 Análise de desempenho utilizando o método PCA

Similar a análise de componentes principais ponderados, o desenvolvimento do método PCA compartilhou da mesma metodologia, obtendo-se também os parâmetros de especificação de engenharia padronizados, inferior (LEI_{PCA}), alvo (T_{PCA}) e superior (LES_{PCA}) o desvio padrão global ($\sigma_{LT;PCA}$) para cada componente principal. Assim como também, calculou-se os índices de desempenho univariado e multivariado, por meio do PCA. Esses métodos diferem-se devido ao fato do PCA levar em consideração os componentes principais que apresentam um percentual de explicação significativo. No entanto para esta pesquisa optou-se pelo uso de todos os componentes principais.

À vista disso, alcançou-se, os parâmetros do método PCA encontram-se presentes na Tab. 6 por meio da aplicação das Eqs (8), (9), (10) e (18).

Tabela 14.6 Parâmetros do processo utilizando PCA

LEI_{PCA}	T_{PCA}	LES_{PCA}	$\sigma_{LT;PCA}$
360,672	361,078	361,485	0,072

361,078	148,801	148,922	0,027
182,361	182,461	182,561	0,024

Fonte: Elaborado pelos autores

Assim como exposto na Tab. 7, calculou-se os índices supracitados, sendo eles P_p , P_{pk} e P_{pm} , através das Eqs. (2), (3) e (4) para cada componente principal.

Tabela 14.7 Estimativas dos índices univaridos referentes aos escores PCs

	P_p	P_{pk}	P_{pm}
PC1	1,869	1,502	1,245
PC2	1,500	1,463	1,491
PC3	1,389	1,090	1,025

Fonte: Elaborado pelos autores

As análises referentes a cada PCs, através do método PCA, encontram-se na Fig. 14.2.

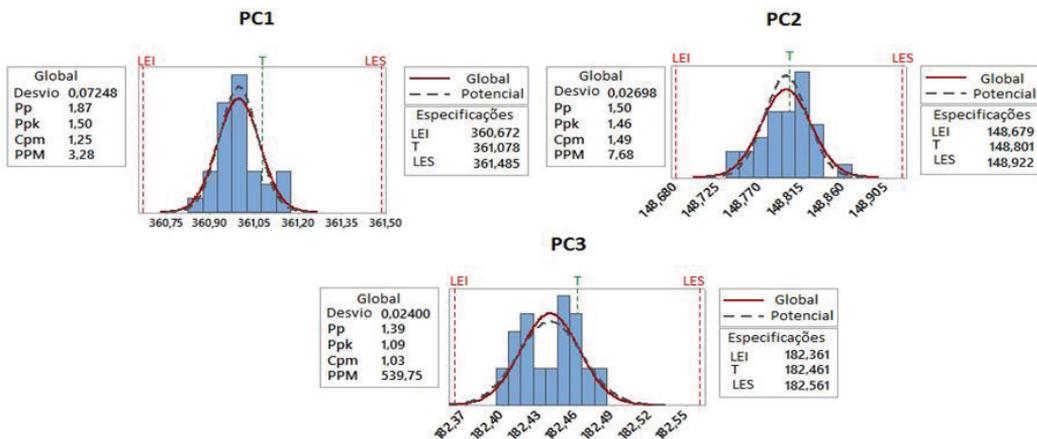


Figura 14.2 Análise de desempenho do PCA

Fonte: Elaborado pelos autores

Com o propósito de auferir os índices multivariados, embasados em formulações da literatura, utilizou-se as Eqs. (11), (12), (13), referentes aos métodos PCAM, PCAX, PCAW respectivamente. Os valores encontrados apresentam-se na Tab. 8.

Tabela 14.8 Índices multivariados de acordo com a literatura

	PCAM	PCAX	PCAW
P_p	1,573	1,786	1,777
P_{pk}	1,338	1,462	1,456
P_{pm}	1,239	1,253	1,249

Fonte: Elaborado pelos autores

3.3 Intervalos de Confiança

Com o intuito de avaliar a eficácia dos métodos multivariados, garantindo-se que o índice represente apropriadamente o desempenho do processo, efetuou-se os cálculos do intervalo de confiança univariado, com auxílio das Eqs. (5) e (6). Para validação do método, torna-se imprescindível que as estimativas dos índices em termos multivariados, permaneçam dentro dos limites especificados.

Em relação a característica comprimento Y2, fez-se necessário a transformação de Jonhson obtendo a normalidade dos dados deste parâmetro, mediante a Eq. (1). Os resultados auferidos estão presentes na Tab. 9, juntamente com os índices de desempenho calculados anteriormente.

Tabela 14.9 Índices Univariados e Multivariados e Intervalo de Confiança

	IC Univariado			Índices Multivariados			
	Mediana	LEI	LES	WPC	PCAM	PCAX	PACAW
P_p	0,842	0,772	2,410	1,990	1,573	1,786	1,777
P_{pk}	0,792	0,592	2,085	1,610	1,338	1,462	1,456
P_{pm}	0,676	0,220	1,710	1,300	1,239	1,253	1,249

Fonte: Elaborado pelos autores

Com os dados resultantes dos cálculos, presentes na Tab. 9, notou-se que os limites do IC foram respeitados por todos os índices multivariados. Como pode-se observar nos índices $P_{p_{wpc}} = 1,990$ estando dentro do $IC_{Pp} = [0,772; 2,410]$ e

$P_{pk_{wpc}} = 1,610$ sendo $IC_{P_{pk}} = [0,592; 2,085]$, constatando-se que para os demais métodos também se obteve resultados satisfatórios. Confirmando assim, a validade do desempenho do método dos componentes principais ponderados e os da literatura.

Portanto recomenda-se a aplicação do método WPC, para avaliação de processos que contenham múltiplas características de qualidade, devido a exigência de apenas uma avaliação de normalidade destas características. Enquanto os demais métodos abordados requerem mais avaliações, necessitando que todos os PCs sejam normalizados.

Conclusões ou considerações finais

Este estudo propôs apresentar uma comparação de índices multivariados por meio de diversas abordagens, sendo elas referente ao método WPC e aos métodos de literatura fundamentados no método PCA. Afim de se avaliar a eficácia dos métodos multivariados, efetuou-se o cálculo do intervalo de confiança univariados. Notou-se nesta pesquisa, que os valores obtidos nas estimativas multivariadas dos índices atenderam as limitações impostas pelo intervalo de confiança. Assim como, foi percebido para os índices de cada método multivariado, $P_{pm;WPC} = (1,990)$, $P_{pm;PCAM} = (1,573)$, $P_{pm;PCAX} = (1,786)$ e $P_{pm;PCAW} = (1,777)$, a permanência dos mesmos dentro do $IC_{P_{pm}} = [0,220; 1,710]$.

Diante do atendimento dos métodos multivariados ao intervalo de confiança, alcançou-se o objetivo do estudo. Posto que, o mesmo consistia em demonstrar a eficácia do método WPC diante da avaliação do intervalo de confiança univariado, utilizado, neste caso, como critério de julgamento. À vista disso, validou-se o método de componentes principais ponderados. Com isso, indica-se o uso do método WPC para análise multivariadas, devido apresentar como vantagem uma única avaliação de normalidade.

Por meio da temática abordada e dos resultados auferidos, este estudo apresentou contribuições na área acadêmica, assim como, no setor industrial. Uma vez que, em relação a primeira contribuição, o estudo atua como fonte de subsídios da abordagem multivariada, além de, incentivo para pesquisas futuras. No que tange o âmbito industrial, proporciona-se o esclarecimento de uma técnica de análise multivariada, de forma a impactar no processo, possibilitando inferências de reduções de custo e conseqüentemente melhoria do mesmo.

Referências

AHMAD, S.; ABDOLLAHIAN, M.; ZEEPHONGSEKUL, P.; ABBASI, B. Multivariate nonnormal process capability analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 44, n. 7-8, p. 757-765, 11 fev. 2009.

- AIAG. **Statistical process control spc**. Second edition. Troy, michigan: [s.n.]. P. 143. 2005
- CHEN, K. S.; PEARN, W. L.; LIN, P. C. Capability measures for processes with multiple characteristics. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 19, n. 2, p. 101-110, mar. 2003.
- DAS, S.. **Process capability indices for non normal distributions**. 2009. Tese de Doutorado. NORTHERN ILLINOIS UNIVERSITY. p. 37.
- LIAO, Hung-Chang. Multi-response optimization using weighted principal component. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 27, n. 7-8, p. 720-725, 23 fev. 2005.
- MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. 6th ed. John Wiley & Sons, Inc., 2009. p. 363.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. 5th ed. Danvers: John Wiley & Sons, Inc., p. 792, 2011.
- PEARN, W. L.; KOTZ, S. **Encyclopedia and handbook of process capability indices: a comprehensive exposition of quality control measures (Series on Quality, Reliability and Engineering Statistics)**. World Scientific Publishing Co., Inc., 2006. v. 12p. 391.
- PERAKIS, M.; XEKALAKI, E. On the implementation of the principal component analysis - based approach in measuring process capability. **Quality and Reliability Engineering International**, p. 467-480, 2012.
- PERUCHI, R. S.; PAIVA, P. A.; BALESTRASSI, P. P.; DIAZ, G. A. Simulated analysis for multivariate gr&r study. In: **International Conference on Industrial Engineering and Operations Management**. 2012, 12 p.
- SCAGLIARINI, M. Multivariate process capability using principal component analysis in the presence of measurement errors. **AStA Advances in Statistical Analysis**, v. 95, n. 2, p. 113-128, 4 mar. 2011.
- SHAHRIARI, H.; ABDOLLAHZADEH, M. A new multivariate process capability vector. **Quality Engineering**, v. 21, n. 3, p. 290-299, 12 jun. 2009.

- WANG, Chung-Ho. Constructing multivariate process capability indices for short-run production. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 26, n. 11-12, p. 1306-1311, 2005.
- WANG, F. K. Quality evaluation of a manufactured product with multiple characteristics. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 22, n. 2, p. 225-236, mar. 2006.
- WANG, F. K.; CHEN, J. C. Capability index using principal components analysis. **Quality Engineering**, v. 11, n. 1, p. 21-27, set. 1998.
- WANG, F. K.; DU, T. C. T. Using principle component analysis in process performance for multivariate data. **Omega**, v. 28, n. 2, p. 185-194, 2000.

Modelagem conceitual do sistema de emissão de ordens polca com uso da técnica IDEF-SIM

Daniel Ribeiro Gomes¹

Stella Jacyszyn Bachega³

Natália Cibebe de Sousa Santos²

Resumo: A elaboração de um modelo conceitual é uma etapa de extrema importância para se realizar um estudo de simulação, visto que tal modelo facilita a visualização e a interpretação do sistema que está sendo estudado, além de auxiliar a construção do modelo computacional. Dentre as técnicas de modelagem conceitual está o IDEF-SIM. O presente artigo tem o objetivo de elaborar o modelo conceitual de parte de uma linha de produção de uma empresa automobilística, representando seu funcionamento com o sistema de emissão de ordens POLCA. Para tal, utilizou-se nesta pesquisa a abordagem mista quantitativa e qualitativa, bem como os procedimentos de pesquisa revisão bibliográfica e estudo de caso. Constatou-se que a técnica IDEF-SIM apresentou ser uma técnica de fácil compreensão em relação aos conceitos e simbologias utilizados, o que facilitou a representação e o entendimento do modelo conceitual desenvolvido.

Palavras-chave: Modelagem Conceitual. POLCA. IDEF-SIM.

-
- 1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: daniel.ribg@gmail.com. Programa Institucional Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC).
 - 2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: naticibebe_sousa@hotmail.com. Programa Institucional Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC).
 - 3 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: stella@ufg.br.

Introdução

As empresas, atualmente, se deparam com diferentes métodos e técnicas que podem auxiliar a tomada de decisão. Dentre estes está a simulação. Assim, organizações dos mais variados portes vem fazendo uso da técnica de simulação, que é definido por Harrel et al. (2002) como um processo de experimentação com um modelo detalhado de um sistema real. O intuito é determinar como o sistema se comportará a alterações em seu ambiente, estrutura, ou condições de contorno. Esta técnica é advogada por diversos autores como Berends e Romme (1999), Buffa e Sarin (1987), Chwif e Medina (2007), Freitas Filho (2008) e Law e Kelton (2000). Ainda, Sargent (2011) afirma que os modelos de simulação são cada vez mais usados para resolver problemas e para ajudar na tomada de decisões.

Entre as etapas sugeridas por Law e Kelton (2000), para um estudo de simulação, está a coleta de dados e definição do modelo. É nesta etapa que se elabora o modelo conceitual. Perera e Liyanage (2000) afirmam que a modelagem conceitual pode aumentar a qualidade de modelos de simulação, e ainda reduzir o tempo gasto para a construção destes modelos computacionais. Por este motivo, autores como Chwif, Paul e Barreto (2006), Greasley (2006), Perera e Liyanage (2000) e Ryan e Heavey (2006) apresentam uma interligação entre as ferramentas de mapeamento de processos e projetos de simulação em seus trabalhos.

Para Sargent (2011), um modelo conceitual deve ser constituído com o objetivo de facilitar a visualização e interpretação do sistema que está sendo estudado. Para tal, pode-se fazer usos de esquemas, pseudocódigos, fluxogramas, diagramas entre outros. Segundo Leal et al. (2009), para elaboração de um modelo conceitual, pode-se utilizar a técnica IDEF-SIM (*Integrated Definition Methods – Simulation*). Esta técnica facilita o trabalho encontrado na fase de modelagem computacional, pois o modelo conceitual é construído de uma forma que a lógica almejada pelo especialista em simulação é mantida. Além disso, esta é uma lógica de modelagem conceitual focada em projetos de simulação, fazendo uso de técnicas de modelagem já reconhecidas dentro do contexto do BPM (*Business Process Modeling*).

Baseado neste contexto, o objetivo do presente artigo é elaborar o modelo conceitual de parte de uma linha de produção de uma empresa automobilística, representando seu funcionamento com o sistema de emissão de ordens POLCA (*Paired-cell Overlapping Loops of Cards with Authorization*). Este sistema é parte de uma estratégia chamada QRM (*Quick Response Manufacturing*), discutida por Suri (1998, 2010).

É válido salientar que esta é uma das pesquisas do Grupo de Estudos em Modelagem e Simulação (GEMS). O presente artigo enquadra-se no projeto de pesquisa intitulado “Método para escolha de sistemas de coordenação de ordens com uso de simulação: aplicação em ambientes de produção *flow shop*”.

O artigo está estruturado como segue: na seção um apresenta-se a revisão bibliográfica; na seção dois há a metodologia utilizada na pesquisa; na seção 3 é apresentado o modelo conceitual do POLCA aplicado à realidade da empresa foco do estudo; na última sessão estão as considerações finais.

1 Referencial Teórico

Nesta seção, há uma breve revisão bibliográfica sobre sistemas de emissão de ordens, seguida do sistema POLCA e sobre a técnica IDEF-SIM.

1.1 Sistemas de emissão de ordens

Correa et al. (2001) definem o planejamento e controle da produção (PCP) como um processo usado no gerenciamento das atividades de produção, que administra os recursos operacionais de produção de uma empresa. Envolve funções de planejamento, programação e controle. Bem como, decidir o que, quanto e quando comprar e produzir, quais recursos serão utilizados e essencialmente controlar toda a produção.

Erdmann (1994), ao afirmar que as atividades do PCP se dividem em planejamento, programação e controle, define que a função de planejamento representa as atividades a longo prazo e que servem de suporte para a programação. Já a programação e o controle da produção, são funções direcionadas para o médio e curto prazo. Possuem a tarefa de definir as necessidades de materiais, as quantidades a serem fabricadas, as capacidades do sistema de produção e a liberação de ordens.

No mesmo seguimento, Chiavenato (2008) informa que a última etapa do PCP é controlar a produção. Esta etapa envolve acompanhar, analisar e regular as ações produtivas, pretendendo certificar se o que foi executado saiu como o planejado e se os objetivos foram atingidos.

Os Sistemas de Emissão de Ordens (SEO's), assim nomeados por Burbidge (1990), fazem parte das atividades de controle da produção. Tais sistemas auxiliam no monitoramento de liberação de ordens de produção no chão de fábrica. Burbidge (1983) afirma que tal liberação de ordens objetiva enviar as ordens de produção para o Plano Mestre de Produção (PMP). Onde é realizado a melhor estruturação de produção possível, procurando cumprir o período de entrega determinado de uma forma eficiente e eficaz.

A liberação das ordens de produção, nos sistemas de Planejamento e Controle da Produção mais difíceis, se encarrega de tomar providências de produção como: retirada de matéria-prima, substituições, contagem e entregas de peças produzidas (RUSSOMANO, 1979).

Para este fim, os SEO's objetivam auxiliar no controle de liberação de ordens de produção no chão de fábrica. Os quais são sistemas de comunicação que orga-

nizam as necessidades de materiais e controlam a liberação das ordens de fabricação e compra.

Burbidge (1983) classifica os SEO's em três grupos distintos, a saber: (i) sistemas para fazer de acordo com o pedido; (ii) sistemas de estoque controlado. Sistemas em que o nível de estoque de cada produto é controlado separadamente dos demais e independente do Plano Mestre de Produção; (iii) sistemas de fluxo controlado. Sistemas que definem as necessidades de itens, a partir do Plano Mestre de Produção.

A escolha do sistema de emissão de ordens é de extrema valia para uma empresa e vale ressaltar que é importante levar em consideração o tipo de sistema de produção em que o Sistema de Emissão de Ordens irá operar. Dentre os SEO's está o sistema POLCA.

1.2 Paired-cell overlapping loops of cards with authorization (POLCA)

O sistema POLCA, anexo da estratégia QRM (*Quick Response Manufacturing*), busca reduzir o *lead time* da empresa através da combinação dos sistemas de produção puxada e produção empurrada (SURI, 1998).

No sistema de produção empurrada a produção se inicia antes da ocorrência da demanda pelo produto, a produção depende de uma ordem enviada anteriormente. O sistema de Planejamento das Necessidades de Materiais (MRP) é um exemplo de produção empurrada. Já o sistema que “puxa” a produção, autoriza a liberação de trabalhos com base no *status* do seu nível de estoque. A demanda gerada pelo cliente é que dispara a produção. O *Kanban*, que é um sistema que controla o fluxo de materiais e informações através de cartões de produção e movimentação, é um sistema de produção puxada (SURI, 1998).

Os sistemas *Kanban* e MRP não são apropriados para os ambientes com fabricação de produtos personalizados e com demanda variável. Diante disso, Krishnamurthy e Suri (2003) relatam que o sistema POLCA busca utilizar as melhores características dos dois sistemas de produção (*Kanban* e MRP). Sendo assim, o fluxo de controle de ordens ao longo de duas células de produção é monitorado através de autorizações de liberação e por cartões de controle de produção (denominado cartão POLCA).

Suri (1998) e Fernandes e Godinho Filho (2007) relatam que o POLCA apresenta quatro características principais: i) a autorização de liberação de materiais é gerada via HL/MRP (*High Level Material Requirement Planning*); ii) o método de controle de material é fundamentado em um cartão, utilizado para comunicar e controlar o deslocamento de materiais entre as células (denominado cartão POLCA); iii) os cartões POLCA referem-se a um par de células ao contrário de se referirem a um só produto; iv) o cartão POLCA, para cada par de células, mantém com a tarefa em todo o tempo de seu processamento através das duas células e posteriormente retorna

para a primeira célula no momento em que é finalizado o processamento na segunda célula. Nesse instante, a primeira célula pode começar outra tarefa.

O número de cartões POLCA para cada *loop* pode ser definido usando uma simples aplicação da Lei de Little. A definição do número de cartões é feita através da seguinte equação (SURI, 1998):

$$\text{Número de cartões } A/B = [LT(A) + LT(B)] \times \text{NUM}(A,B)/D \quad (1)$$

Onde:

- $LT(A)$: *lead time* da célula A;
- $LT(B)$: *lead time* da célula B;
- $\text{NUM}(A,B)$: número de trabalhos que vão da célula A para a célula B durante o período de planejamento;
- D : dias de trabalho durante o horizonte de planejamento.

Caso a equação resulte em um número fracionário, o resultado deve ser arredondado para o próximo valor inteiro.

A Figura 15.1 faz uma representação esquemática do funcionamento do POLCA em um sistema produtivo formado por quatro conjuntos de células de produção – Células X, Y, Z e W. No exemplo em questão, o produto será realizado seguindo o caminho X1, Y2, Z3 e W1. Apesar de o cartão POLCA permanecer com a tarefa dentro da célula em que está sendo processada, o fluxo de materiais entre as estações de trabalho na célula pode ser controlado através de outro sistema, como o *Kanban*. Dependendo da quantidade de ordens que serão produzidas, cada um dos ciclos pode ser guiado por um ou mais cartões POLCA. Neste caso, são definidos os ciclos X1/Y2, Y2/Z3 e Z3/W1. Este sistema trabalha com um método de autorizações iniciado por um MRP que imprime o roteiro de produção que acompanha o trabalho a ser feito e contém as informações necessárias para a produção daquele determinado item/produto (SURI, 1998).

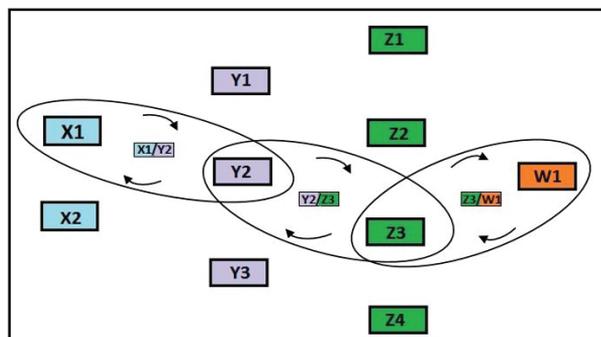


Figura 15.1 Funcionamento do Sistema POLCA

Fonte: Adaptado de Suri (1998).

Ainda conforme a Figura 15.1, o processo é iniciado na Célula X1 desde que haja matéria-prima disponível em X1 e um cartão POLCA X1/Y2, indo em sequência à célula Y2. Assim, acontece sequencialmente para os outros cartões estabelecidos neste processo. Depois que uma célula completa suas operações, o produto da tarefa e o cartão POLCA X1/Y2 vão para o *buffer* de entrada da Célula Y2, indicando que um movimento é necessário, ou que material está disponível para uma próxima operação. Após chegar à Célula Y2, como esta tarefa é destinada à Célula Z3, é necessário que se tenha um cartão POLCA Y2/Z3 disponível para que esta operação seja iniciada (SURI, 1998).

É válido ressaltar que no POLCA o cartão X1/Y2 permanece com a tarefa ao longo da Célula Y2, juntamente com o cartão Y2/Z3. Isto mostra que na Célula Y2 haverá 2 cartões para aquela determinada tarefa, como parte de ciclos de 2 cartões. Sendo assim, cada tarefa na Célula Y2 levará 2 cartões POLCA consigo. Quando o trabalho é terminado na Célula Y2, ocorrem duas situações: i) o cartão X1/Y2 é destacado da tarefa e é devolvido ao começo da Célula X1; ii) a tarefa é entregue ao *buffer* de entrada da Célula Z3 com o cartão Y2/Z3 ainda fixado de modo visível no material que está sendo processado (SURI, 1998).

O mesmo processo se repete para a célula de montagem Z3, que necessita de um cartão Z3/W1 disponível para iniciar a tarefa na célula. Quando a tarefa é completada, esta segue para o *buffer* de entrada de W1, enquanto o cartão Y2/Z3 volta para o início da célula Y2. Como W1 é a última célula do roteiro, não haverá um cartão POLCA esperando para iniciar a produção e a tarefa pode ser lançada em W1 toda vez que a célula estiver preparada para iniciar outra tarefa. Quando a tarefa em W1 é completada, ela é expedida (considerando que a célula W é uma célula de expedição) e o cartão Z3/W1 retorna para o início de Z3, concluindo assim a jornada de cartões POLCA para esta ordem de produção (SURI, 1998).

Diante do funcionamento exposto, cada célula só iniciará seu trabalho, exceto a primeira e última célula, se houver um cartão que relacione a célula em questão com a célula anterior, e um cartão que relacione a presente célula com a célula posterior, além de ter o trabalho autorizado pelo sistema HL/MRP, de acordo com Suri (1998). O uso de cartões POLCA conforme descrito, garante que as células trabalhem em tarefas para a qual elas têm capacidade e ainda asseguram que a célula posterior também tenha capacidade para realizá-las.

1.3 Integrated Definition Methods – Simulation (IDEF-SIM)

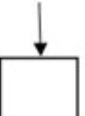
De acordo com Sargent (2011), a modelagem conceitual deve ser feita para facilitar a visualização e a interpretação do sistema em estudo. Dessa forma, podem-se utilizar esquemas e expressões verbais que descreve sua dinâmica, destaque suas funções e as regras pré-estabelecidas. Todavia, a construção do modelo

conceitual baseado em uma linguagem peculiar poderá impossibilitar a compreensão do modelo por uma pessoa que não tenha conhecimento do software utilizado. Como também, o uso do fluxograma, por exemplo, dificulta o entendimento da modelagem devido à falta de recursos para retratar determinados elementos próprios dos sistemas simulados.

Nesse seguimento, Leal et al. (2009) e Montevechi et al. (2010) propõem uma técnica de modelagem conceitual, denominada IDEF-SIM (*Integrated Definition Methods – Simulation*). Esta técnica foi criada devido à falta de técnicas de modelagem conceitual com foco na simulação. O IDEF-SIM tem como proposta que o modelo conceitual seja construído de modo que mantenha a lógica esperada pelo especialista em simulação.

O Quadro 15.1 traz a simbologia utilizada na técnica IDEF-SIM. Conforme Leal et al. (2009) e Montevechi et al. (2010), tal simbologia foi adaptada de elementos lógicos que são empregados em outras técnicas de modelagem (IDEF0 E IDEF3). Além da elaboração de novos elementos, a técnica proposta proporciona a elaboração de modelos conceituais com informações que simplificam a elaboração dos modelos computacionais e facilitam a compreensão do projeto.

Quadro 15.1 Símbolos utilizados no IDEF-SIM

Entidade		Refere-se aos itens que serão processados pelo sistema: produtos, pessoas, documentos, matéria-prima, entre outros. Uma vez já apresentada, o símbolo só aparecerá novamente quando uma nova entidade for criada.
Funções		Caracteriza os locais onde a entidade sofrerá alguma ação. Compreende como funções: postos de trabalho, esteiras de movimentação, filas, estoques e postos de atendimento. Tais funções podem alterar uma entidade.
Fluxo da Entidade		Indica os momentos de entrada e saída da entidade nas funções.
Recursos		Simboliza os elementos utilizados para movimentar as entidades e efetuar funções.
Controles		Regras aplicadas nas funções, como regras de filas, programação, sequenciamento, entre outros.

Continua

Quadro 15.1 Símbolos utilizados no IDEF-SIM (*Continuação*)

Regras para fluxos paralelos e/ou alternativos		Na técnica IDEF3, essas regras são denominadas de junções. Dois ou mais caminhos, posterior a uma função, podem ser executados unidos (junção E), de forma alternativa (junção OU), ou conceder ambas as regras (junção E/OU).
Movimentação		Simboliza um deslocamento de entidade. Ao representar este elemento, espera-se deparar no modelo conceitual uma programação própria para este movimento, como tempo gasto e recurso empregado.
Informação Explicativa		Usado para introduzir no modelo uma explicação, com o propósito de facilitar o entendimento do modelo.
Fluxo de entrada no sistema		Especifica a entrada ou criação das entidades adentro do modelo.
Ponto final do sistema		Estabelece o final de um caminho dentro do fluxo modelado.
Conexão com outra figura		Usado para dividir o modelo em figuras distintas.

Fonte: Adaptado de Leal et al. (2009) e Montevechi et al. (2010)

2 Metodologia

De acordo com Bryman (1989), a pesquisa pode ser categorizada baseada em duas abordagens a saber: quantitativa e qualitativa. Segundo Freitas et al. (2000), diversas vezes pode-se combinar o uso de diferentes métodos, beneficiando-se de duas fontes de coleta de dados, aliando a abordagem qualitativa com a quantitativa. Nesta pesquisa, a abordagem mista foi empregada, devido a forma como os dados coletados e informações geradas foram tratados.

Quanto aos procedimentos de pesquisa, foi aplicada a revisão bibliográfica e o estudo de caso. Segundo Webster e Watson (2002), a revisão bibliográfica é primordial para dar início a qualquer pesquisa científica. Este procedimento foi utilizado com intuito de pré-orientação teórica. Ainda, foi utilizado o estudo de caso (YIN, 1990) para propiciar a compreensão da realidade da empresa montadora de automóveis. Nota-se que a parte estudada na empresa foi a linha de montagem de eixos traseiros.

Os dados utilizados nesta pesquisa foram coletados *in loco* (no próprio local), por meio de entrevistas e observações e podem ser classificados como de natureza secundária. Dados secundários são classificados por Hair Jr. *et al.* (2005) como um conjunto de dados históricos ou coletados anteriormente para um problema de pesquisa distinto da pesquisa atual.

Para a elaboração do modelo conceitual, utilizou-se neste trabalho a técnica IDEF-SIM, proposta por Leal, Almeida e Montevechi (2008). A qual apresenta um conjunto de funções e técnicas de modelagem conceitual com foco na simulação. Para a validação do modelo conceitual desenvolvido, foi usada a validação face-a-face, conforme Sargent (2011).

Utilizou-se o software *DIA*[®] para construir o modelo conceitual por meio da técnica IDEF-SIM. Este software permite a construção de *layouts*, fluxogramas e diagramas em geral, com diversos objetos e recursos.

3 Discussão e Resultados

O modelo conceitual foi elaborado com base em dados coletados em uma parte da linha de produção de uma empresa do setor automobilístico. A parte dessa linha em questão refere-se à produção de eixos. A linha de produção possui cinco estações de trabalho sequenciais, onde, a estação 2 possui dois operadores trabalhando simultaneamente, e as demais operam com somente um operador em cada. Os tempos de movimentação entre as estações de trabalho são valores muito pequenos, sendo que tal valor é agregado no tempo de operação de cada operador e não representado como uma movimentação significativa no modelo.

Os operadores seguem instruções de processo para realização de suas atividades. Ainda, na linha de produção há a possibilidade de entrada de sete modelos diferentes, respeitando o estabelecido na ordem de produção. Todos os modelos passam obrigatoriamente em todas as estações de trabalho, sendo que cada modelo possui um tempo diferente de processamento, com exceção da estação 5 em que os tempos de processamento são iguais para todos os modelos.

De posse de todas essas informações e com auxílio da técnica IDEF-SIM, pôde-se desenvolver o modelo conceitual, foco deste estudo, mostrado na Figura 15.2. A legenda dos elementos utilizados encontra-se nos Quadros 15.2 e 15.3.

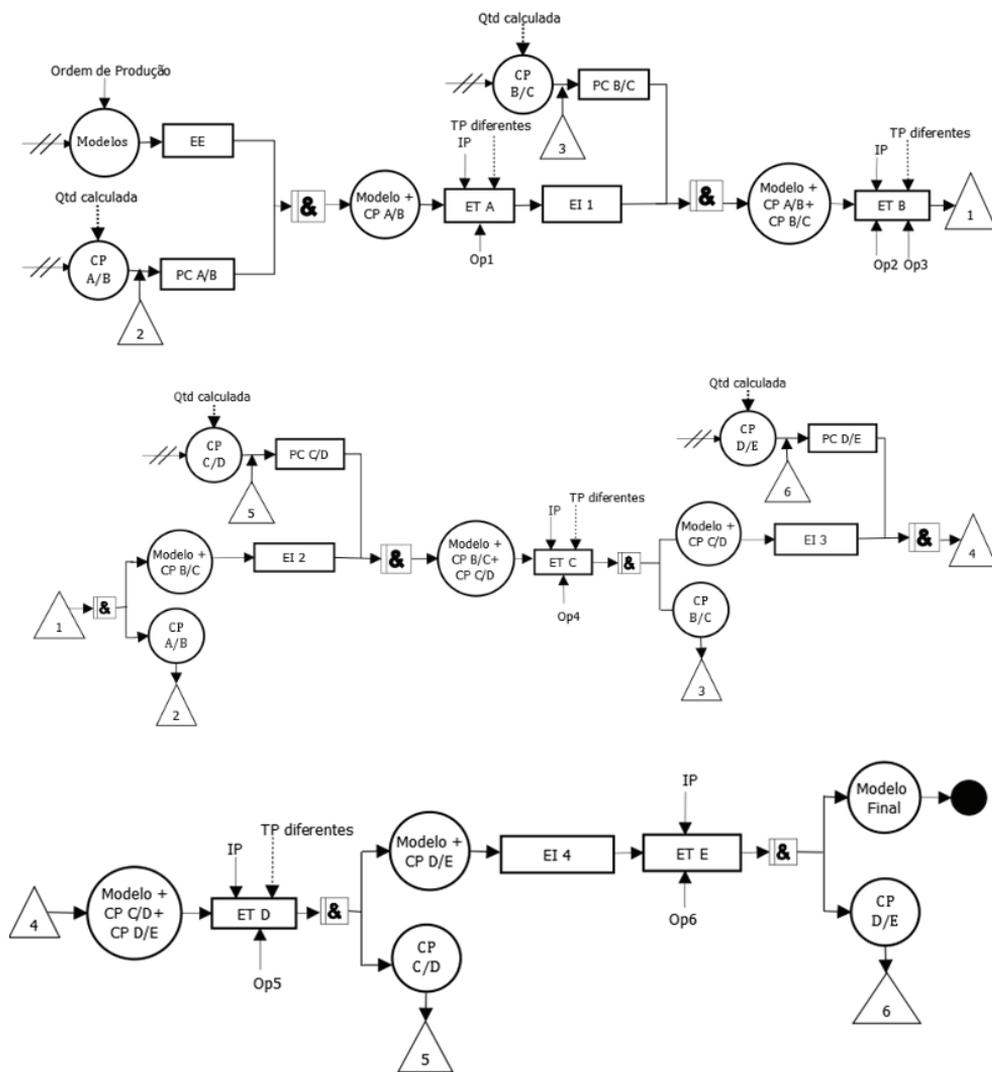


Figura 15.2 Modelo Conceitual POLCA com uso do IDEF-SIM

Fonte: Elaborada pelos autores.

Quadro 15.2 Legenda dos elementos utilizados no IDEF-SIM (Parte 1)

Entidades	Nome	Funções	Nome
Modelos	Modelos de eixo	EE	Estoque de Entrada
CP A/B	Cartão Polca A/B	EI n	Estoque Intermediário n

Continua

Quadro 15.2 Legenda dos elementos utilizados no IDEF-SIM (Parte 1) (Continuação)

Entidades	Nome		Funções	Nome
CP B/C	Cartão Polca B/C		PC A/B	Posto de Cartões A/B
CP C/D	Cartão Polca C/D		PC B/C	Posto de Cartões B/C
CP D/E	Cartão Polca D/E		PC C/D	Posto de Cartões C/D
Modelo+ CPn	Junção de um modelo n com um cartão POLCA n		PC D/E	Posto de Cartões D/E
Modelo final	Modelo de eixo finalizado		ET n	Estação de trabalho n

Fonte: Elaborado pelos autores.

Quadro 15.3 Legenda dos elementos utilizados no IDEF-SIM (Parte 2)

Recursos	Nome		Informações	Nome
Op n	Operador n		IP	Instruções de processo
			TP	Tempo de processamento

Fonte: Elaborado pelos autores.

Quando um modelo de eixo chega à linha de produção, representado no modelo conceitual pelo Estoque de Entrada, se houver um cartão POLCA A/B disponível no posto de cartões, este cartão será anexado no eixo, o que resulta na entidade ‘Modelo+CP A/B’, e a entidade seguirá para estação de trabalho A para ser processada. Na estação de trabalho A há apenas um operador, que segue instruções de processo e os tempos de processamento de cada modelo são diferentes. Percebe-se que as quantidades de cartão são calculadas para cada posto, por meio da Equação 1, e os modelos de eixo chegam à linha baseado em ordens de produção.

Após a entidade ter completado as operações necessárias na estação de trabalho A, esta segue para o estoque intermediário 1, onde aguarda até que um cartão POLCA B/C esteja disponível no posto de cartões B/C. Quando um cartão POLCA B/C fica disponível, este cartão é anexado no item, o que gera a entidade ‘Modelo+CP A/B+CP B/C’, que segue para ser processada pela estação de trabalho B. Nesta estação existem dois operadores que também seguem instruções de processo para realizar suas atividades de forma simultânea. Cada modelo de eixo gasta um tempo diferente para ser processado nesta estação.

Ao se terminar as atividades necessárias na estação de trabalho B, o cartão POLCA A/B é retirado do modelo de eixo e retorna para o posto de cartões A/B. A entidade 'Modelo+CP B/C' segue então para o estoque intermediário 2, e fica aguardando a disponibilidade de um cartão POLCA C/D no posto de cartões C/D. No momento que este cartão fica disponível, ele é anexado no modelo de eixo, e assim a entidade 'Modelo+CP B/C+C/D' segue para ser processada na estação de trabalho C, com tempos diferentes de processamento para cada modelo de eixo e com apenas um operador, que segue as instruções de processo.

Esta mesma lógica de processamento acontece nas demais estações de trabalho. Ressalta-se que o tempo de processamento é constante para todos os tipos de modelo de eixo na estação de trabalho E e que as movimentações foram representadas como sendo somente fluxo de entidade, porque é uma atividade realizada pelo próprio operador de cada uma das estações e se dá em uma pequena fração de tempo.

Pode-se notar também que, após processamento na estação de trabalho D, a entidade 'Modelo+CP D/E segue para o estoque intermediário 4. Neste ponto do sistema não há um cartão POLCA esperando para iniciar a produção e a entidade pode seguir para ser processada na estação de trabalho E sempre que esta estação estiver preparada para iniciar uma nova atividade. Quando a atividade da estação de trabalho E é completada, o modelo de eixo acabado deixa a linha de produção e o cartão POLCA D/E retorna para seu posto de cartões de origem, concluindo assim a jornada de cartões POLCA para esta ordem de produção.

Considerações finais

Os objetivos inicialmente propostos foram alcançados. A modelagem conceitual do sistema de emissão de ordens POLCA foi realizada por meio do uso da técnica IDEF-SIM. Para a construção do modelo conceitual, foram utilizados dados de uma linha de produção de eixos traseiros de uma empresa automobilística, além de uma revisão bibliográfica sobre o sistema de emissão de ordens POLCA e sobre a técnica IDEF-SIM.

Por meio desta pesquisa, a técnica IDEF-SIM se apresentou como uma técnica de fácil compreensão em relação aos conceitos e simbologias utilizados, o que promoveu a representação e o entendimento do modelo conceitual elaborado.

Como a escolha da técnica de modelagem conceitual é de extrema importância para um estudo de simulação, este trabalho contribuiu para a comunidade acadêmica como também para a comunidade empresarial, ao passo que apresentou aplicação prática de uma técnica que auxilia na construção de modelos conceituais voltados para a posterior programação computacional dos modelos de simulação. Ainda, promove a divulgação e uma melhor

compreensão da técnica IDEF-SIM, a qual é um suporte para o estudo de simulação, tendo em vista que a simulação é um método que pode auxiliar as empresas em processos decisórios.

Por fim, para pesquisas futuras, sugere-se que seja realizada a simulação do modelo conceitual apresentado neste trabalho. Ainda, é possível elaborar novos modelos conceituais e de simulação considerando cenários com uso de outros sistemas de emissão de ordens, e compará-los para avaliação do desempenho destes no ambiente produtivo estudado.

Referências

- BERENDS, P.; ROMME, G. Simulation as a research tool in management studies. *European Management Journal*, v.17, n.6, pp.576–583, 1999.
- BRYMAN, A. *Research methods and organization studies*. 1ª ed. London: Uniwin Hyman, 1989. 224 p.
- BUFFA, E. S.; SARIN, R. K. *Modern Production/Operations Management*. 8ª ed. John Wiley & Sons, 1987.
- BURBIDGE, J. L. *Planejamento e controle da produção*. São Paulo: Atlas, 1983.
- BURBIDGE, J. L. Production Control: a universal conceptual framework. *Production Planning and Control*, vol. 1, n.1, pp. 3-16, 1990.
- CHIAVENATO, Idalberto. *Planejamento e Controle de Produção*. São Paulo: Manole, 2008.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. *Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações*. São Paulo: Bravarte. 2ª ed. 2007.
- CHWIF, L.; PAUL, R. J.; BARRETTO, M. R. P. Discrete event simulation model reduction: A causal approach. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 14, n. 7, p. 930-944, 2006.
- CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N.; CAON, M. *Planejamento, Programação e Controle da produção*. 4. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2001
- ERDMANN, R. H. *Modelo organizativo para sistemas de planejamento e controle da produção*. 1994. 309 f. Tese (Doutorado em Engenharia da Produção) – Pro-

grama de Pós-graduação em Engenharia da Produção – UFSC, Santa Catarina, 1994.

FERNANDES, F. C. F. GODINHO FILHO, M. Sistemas de coordenação de ordens: revisão, classificação, funcionamento e aplicabilidade. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 14, n. 2, 2007.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas**. Florianópolis: Visual Books. 2ª ed. 2008.

FREITAS, H. et al. O método de pesquisa survey. **Revista de administração**, v. 35, n. 3, p. 105-112, 2000.

GREASLEY, A. Using process mapping and business process simulation to support a process-based approach to change in a public sector organisation. **Technovation**, v. 26, n. 1, p. 95-103, 2006.

HAIR JR., J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 595 p.

HARREL, C. R.; MOTT, J. R. A.; BATEMAN, R. E.; BOWDEN, R. G.; GOGG, T. J. **Simulação: otimizando os sistemas**. São Paulo: Belge Simulação e IMAM. 2ª ed. 2002.

KRISHNAMURTHY, A.; SURI, R. **How to Plan and Implement POLCA: A Material Control System for High-Variety or Custom-Engineered Products**. Wisconsin, Madison: Center for Quick Response Manufacturing, 2003. Technical Report.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling & Analysis**. 3rd edition, New York: McGraw- Hill, 2000.

LEAL, F.; OLIVEIRA, M. L. M.; ALMEIDA, D. A.; MONTEVECHI, J. A. B. Desenvolvimento e aplicação de uma técnica de modelagem conceitual de processos em projetos de simulação: O IDEF-SIM. In: Encontro de Engenharia de Produção, 29, 2009, Salvador. **Anais...** Salvador: ABEPRO, 2009. p. 14.

MONTEVECHI, B. A. J.; LEAL, F.; PINHO, F. A.; COSTA, S. F. R.; OLIVEIRA, M. L.M.; SILVA, F. L. A. Conceptual Modelling In Simulation Projects By

- Mean Adapted Idef: An Application In A Brazilian Tech Company. In: 2010 Winter Simulation Conference, 2010, Baltimore. **Proceedings...** Baltimore: IEEE, 2010. p. 1624-1635.
- PERERA, T.; LIYANAGE, K. Methodology for rapid identification and collection of input data in the simulation of manufacturing systems. **Simulation Practice and Theory**, v. 7, n. 7, p. 645-656, 2000.
- RIEZEBOS, J. Design of POLCA material control systems. **International Journal of Production Research**, vol. 48, n. 5, p. 1455–1477, 2010.
- RUSSOMANO, V. H. **Planejamento e Acompanhamento da Produção**. São Paulo: Ed. Pioneira, 1979.
- RYAN, J; HEAVEY, C. Process modeling for simulation. **Computers in industry**, v. 57, n. 5, p. 437-450, 2006.
- SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. In: 2011 Winter Simulation Conference, 2011, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: IEEE, 2011. p. 183-198.
- SURI, R. **It's about time: the competitive advantage of quick response manufacturing**. New York: Productivity Press, 2010.
- SURI, R. **Quick response manufacturing: a companywide approach to reducing lead times**. Portland: Productivity Press, 1998.
- WEBSTER, J.; WATSON, J.T. Analyzing the past to prepare for the future: writing a literature review. **MIS Quarterly & The Society for Information Management**, v.26, n.2, pp.13-23, 2002.
- YIN, R. K. **Case study research: design and methods**. Sage Publications Inc., USA, 1990.

Simulação computacional do sistema de emissão de ordens CONWIP aplicada em uma empresa automobilística

Amanda Cristie Nobre¹

Stella Jacyszyn Bacheга²

Resumo: Os sistemas de emissão de Ordens (SEO's), ou *ordering systems*, são responsáveis pelo controle das ordens de produção e compras no chão de fábrica. Dentre os SEO's está o CONWIP. Uma técnica que auxilia as empresas a analisar o desempenho em diversas áreas, como a manufatura, é a simulação computacional. O objetivo deste artigo é simular e analisar o desempenho do CONWIP aplicado em uma empresa do setor automobilístico. Para tanto, utilizou-se a abordagem de pesquisa quantitativa e o procedimento de pesquisa experimental. As medidas de desempenho analisadas foram o total de eixos produzidos, o tempo de processamento de um eixo, as utilizações de cada funcionário e de cada estação de trabalho. Dentre os resultados, observou-se que os estoques intermediários obtiveram baixa utilização, o que indica que os eixos praticamente não esperam nos estoques para serem processados. Esta pode ser considerada uma vantagem do sistema CONWIP.

Palavras-chave: Sistemas de Emissão de Ordens. CONWIP. Simulação Computacional.

1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: amandacristienobre@hotmail.com. Bolsista do Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica (PIBIC/UFG/CNPq).

2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: stella@ufg.br.

Introdução

O Planejamento e Controle da Produção (PCP), quando aliado à técnica de simulação computacional, pode gerar vantagens competitivas para as empresas, devido a melhoria do desempenho destas. A simulação propicia maior conhecimento das atividades desenvolvidas e representadas no modelo. No entanto, segundo Harrel, Ghosh e Bowden (2012), há muita resistência por parte das empresas em utilizar a simulação, devido ao pensamento errado de que esta custaria muito e haveria um consumo de tempo muito grande, sendo que na realidade o que ocorre é o contrário. Mediante o uso da simulação, geralmente ocorre ganho de tempo e menos custos são consumidos.

As áreas de aplicação da simulação são diversas e podem ser divididas em aplicações na manufatura e em serviços. A área de manufatura é o maior campo de aplicação da simulação depois da área militar. Alguns usos práticos na manufatura são: sistemas de movimentação e armazenagem de materiais, linhas de montagem, células automatizadas, problemas de programação da produção e análises de estoque (CHWIF; MEDINA, 2015) e, também, para análise de sistemas de emissão de ordens (LEE; SEO, 2016).

Os sistemas de emissão de ordens (SEO) são denominados por Burbidge (1990) como *ordering systems* e são classificadas por este como: sistemas para fazer de acordo com o pedido; sistemas de estoques controlados e sistemas de fluxo controlado. O sistema foco deste trabalho, o CONWIP (*Constant Work in Process*), é classificado como sistemas de estoques controlados. Neste tipo de sistema, há a combinação de produção empurrada entre as estações de trabalho e puxada de modo geral.

Com base neste contexto, o objetivo do presente artigo é simular e analisar o desempenho do CONWIP aplicado em uma empresa do setor automobilístico. Tal pesquisa justifica-se pela importância do tema e pela necessidade de análise do comportamento do sistema real antes de sua efetiva alteração. Ainda, na literatura da área há várias discussões teóricas ou comparações hipotéticas entre SEO's. Este artigo traz uma aplicação do sistema CONWIP em um ambiente real.

Destaca-se que esta pesquisa possui vínculo com o Grupo de Estudos em Modelagem e Simulação (GEMS) e que faz parte do projeto de pesquisa intitulado “Método para escolha de sistemas de coordenação de ordens com uso de simulação: aplicação em ambientes de produção *flow shop*”.

Para alcançar o objetivo proposto, o artigo está estruturado da seguinte forma: a seção um é destinada para ressaltar as características teóricas do CONWIP; a seção dois trata da metodologia; a seção três apresenta a discussão e os resultados alcançados na pesquisa e, por fim, há as considerações finais.

1 Referencial teórico

Segundo Spearman, Woodruff e Hopp (1990), o CONWIP (*Constant Work in Process*) é apropriado para ambientes com sistemas puxados e apresenta melhor desempenho em ambientes *flow shop* e *job shop*. O sistema de emissão de ordens CONWIP trabalha com ordens controladas por cartões que, segundo Spearman et al. (1990), não estão associados com a quantidade de produtos, mas à linha de produção como um todo.

O CONWIP é considerado por Hopp e Spearman (2008) como um sistema híbrido, pois combina aspectos das estratégias puxadas e empurradas, de forma que a alta taxa de transferência é devido às características empurradas e o controle de WIP (*Work in Process*) se dá pelo comportamento de sistema puxado. O controle de WIP se dá apenas dentro da linha de produção, enquanto que entre os postos de trabalho o mesmo não ocorre. Seus cartões de produção estão associados à linha de produção e não a determinado número de peças, pois a quantidade de peças é determinada ao início da linha, de acordo com uma lista de pedidos (*backlog list*). Quanto ao funcionamento do CONWIP, este está representado na Figura 16.1.

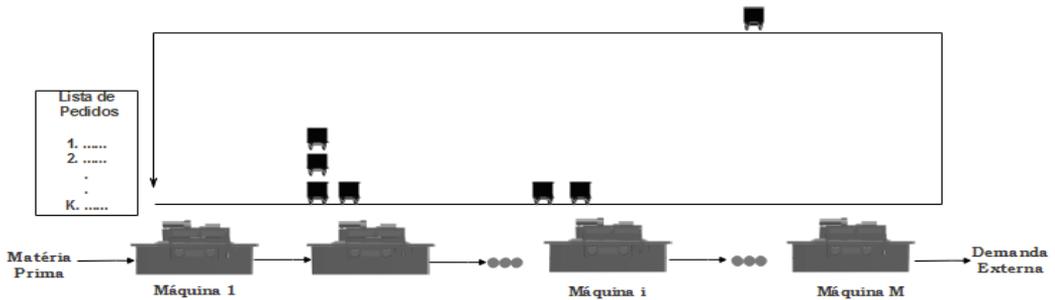


Figura 16.1 Funcionamento do CONWIP

Fonte: Adaptado de Herer e Masin (1997).

Observa-se na Figura 16.1 que: i) um cartão é unido a um contêiner padrão de peças no começo da linha, seguindo a ordem que consta na lista de pedidos em carteira (*backlog list*); ii) o contêiner movimenta-se ao longo da linha de produção e as peças são processadas de acordo com as necessidades em cada estação de trabalho da linha de produção (Na Figura 16.1 são representadas por Máquina 1, Máquina i e Máquina M); iii) ao final da linha, quando o contêiner é utilizado, o cartão é retirado e volta para o início da linha, onde aguarda em uma fila de cartões para seja anexado a outro contêiner de peças.

O CONWIP pode ser entendido como um caso especial do sistema *kanban*, segundo Gong, Yang e Wang (2014). No entanto, ao comparar os dois sistemas, Spearman e Zazanis (1992) constataram que a utilização do sistema CONWIP é mais simples, devido ao fato deste determinar o WIP de forma global, para a linha inteira. Já o *kanban* especifica uma quantidade de cartões para cada estação.

Conforme Gong, Yang e Wang (2014), a informação de demanda é transferida da última estação de trabalho para a primeira. Ovalle e Marquez (2003) explicam que ao iniciar a produção, todos os cartões estão no começo da linha e à medida que chegam ordens de produção esses vão sendo anexados a elas e prosseguem por todo o tempo de processamento juntos. Ao final do processo, os cartões são encaminhados para o início da linha. Além disso, nenhuma ordem de produção é autorizada para entrar na linha sem o acompanhamento de um respectivo cartão. Assim, quando não se tem cartões disponíveis, as ordens se acumulam até que algum cartão seja disponibilizado. Os estoques intermediários, assim como as ordens de produção, seguem a disciplina das filas FIFO (PEPS).

O CONWIP, de acordo com Sipper e Bulfin Jr. (1997), é uma abordagem que se aplica melhor em linhas de produção em que o fluxo possui estabilidade e uniformidade, além disso, pode ser utilizado em ambientes produtivos com maior variedade de produtos em relação ao *kanban*.

Algumas vantagens do CONWIP podem ser explicitadas, quando comparado aos sistemas puxados, a saber (OVALLE; MARQUEZ, 2003, p.197): i) por possuir apenas uma configuração para a contagem de cartão, se apresenta de forma mais simples que sistemas com a contagem de cartões a cada posto de trabalho; ii) em relação a prazos e tempos de ciclo, o CONWIP se mostra superior aos demais sistemas de emissão de ordens; iii) o nível de estoque médio do CONWIP supera o nível do *kanban*, quando comparados no mesmo nível de produção e serviço; iv) o CONWIP tem produzido um *throughput* médio maior (conforme Hopp e Spearman (2008), *throughput* refere-se as saídas médias de um processo produtivo por unidade de tempo), menor variação e um volume menor de estoque máximo quando comparado ao *kanban* em uma linha com produção de apenas um item, entre outras.

Já em relação aos sistemas empurrados, Ovalle e Marquez (2003, p.198) apresentam vantagens do CONWIP, dentre elas: i) quando o sistema de produção opera com níveis de *throughput* maiores possíveis, o CONWIP se mostra superior aos sistemas empurrados; ii) em comparação com o MRP, o CONWIP obtém menores *lead times*, os níveis de serviços são melhores e o WIP de produto acabado, além dos estoques, são menores.

Ovalle e Marquez (2003, p. 198) também exibem as seguintes desvantagens do CONWIP: i) não avalia o impacto que um gargalo pode ter no desempenho de uma linha de produção; ii) nem sempre produz o menor número total de movi-

mentações entre os estágios de produção; iii) pode exigir um local maior para armazenagem entre os estágios do que o *kanban*, uma vez que os contenedores cheios podem aglomerar-se entre qualquer par de fases alternadas.

Diversos autores realizam estudos sobre o CONWIP, como Jaegler, Burlat e Lamouri (2016), que trazem uma revisão de literatura sobre esse sistema. Huang et al. (2016a) propõem o CONWIP *design framework* (CDF), que é uma abordagem sistemática de projeto para obter políticas CONWIP alternativas, considerando a perspectiva de estrutura em ciclo. Huang et al. (2016b) apresentam uma abordagem para projetar o ciclo CONWIP para sistema de montagem em ambiente de produção *one-of-a-kind* (executado sob encomenda específica). Han e Wang (2016) projetaram um sistema de cartões CONWIP eletrônicos, utilizando RFID (*Radio Frequency Identification*).

2 Metodologia

A abordagem de pesquisa utilizada foi a quantitativa, de acordo com Bryman (1989). Nesta pesquisa a abordagem quantitativa foi usada devido a característica da forma de manipulação dos dados e da análise dos resultados gerados.

Quanto ao procedimento de pesquisa, foi empregado a pesquisa experimental, conforme as instruções de Bryman (1989). Geralmente, a pesquisa experimental está associada a experimentos controlados no laboratório ou em modelagens matemáticas e simulações computacionais, a qual esta foi aqui utilizada.

A simulação realizada neste trabalho foi do tipo matemática e executada segundo Law e Kelton (2000), de forma numérica e estocástica. A simulação computacional foi realizada com o auxílio do software ProModel® Professional SP4 versão 8.6³. Para condução de um estudo em simulação tomou-se como base os passos propostos por Law e Kelton (2000), a saber:

- Etapa 1: Formulação do problema e planejamento do estudo;
- Etapa 2: Coleta de dados e definição dos modelos;
- Etapa 3: Validação dos modelos conceituais;
- Etapa 4: Construção do programa computacional e verificação;
- Etapa 5: Realização de execuções piloto;
- Etapa 6: Validação dos modelos programados;
- Etapa 7: Projeto dos experimentos;
- Etapa 8: Realização das execuções de simulação;
- Etapa 9: Análise de resultados;
- Etapa 10: Documentação e implementação.

3 Fonte: <<http://www.belge.com.br/promodel.php>>. Acesso em: 27 de out. de 2016.

Os dados para elaboração do modelo foram coletados em uma empresa do setor automobilístico. Os dados coletados foram a quantidade de estações de trabalho, o tamanho da ordem de produção, a quantidade de funcionários na parte da linha estudada, os tempos de operação em cada estação de trabalho, a jornada de trabalho.

Os tempos de operação foram representados por meio da distribuição Triangular. A escolha desta distribuição deve-se ao fato de não se conhecer a forma exata da distribuição. No entanto, as estimativas para o menor valor, o valor mais provável de ocorrer e o maior valor eram conhecidos (CHWIF; MEDINA, 2015). Destaca-se que somente para a estação de trabalho 6 o tempo de operação é constante, independentemente do tipo de eixo produzido, devido a características da linha de produção. Para a representação do processo de chegada, foram considerados a ordem de ocorrência, os tempos estabelecidos pela empresa e as quantidades de cada eixo presentes na ordem de produção disponibilizada.

Freitas Filho (2008) classifica os sistemas reais como sistemas terminais ou não terminais. Os sistemas terminais, segundo o autor, são aqueles que possuem condições iniciais fixas determinadas e um evento que estabelece o fim natural para a simulação. Este foi o tipo de sistema considerado para se fazer a modelagem, simulação e as análises. Assim, o intervalo de confiança utilizado foi no nível de 95%. Para fazer a interpretação do semi-intervalo de confiança (*half-width*) tomou-se como base Kelton, Sadowski e Sadowski (2002) que afirmam que em 95% das replicações os valores obtidos estarão em um intervalo da média \pm o semi-intervalo.

3 Discussão e resultados

Nesta seção, apresentam-se as características do modelo elaborado. Ainda, os desempenhos obtidos por meio da aplicação do CONWIP na parte da linha de produção pesquisada são expostos e discutidos.

3.1 Características do modelo elaborado

O CONWIP foi simulado nesta pesquisa a partir de dados coletados em uma empresa do setor automobilístico e apenas parte de uma linha de produção foi estudada, que é referente à montagem de eixos traseiros. Vale ressaltar que o CONWIP não está implantado na parte da linha em questão. As características do sistema simulado podem ser observadas na Figura 16.2, a qual representa o cenário CONWIP elaborado no simulador ProModel®.

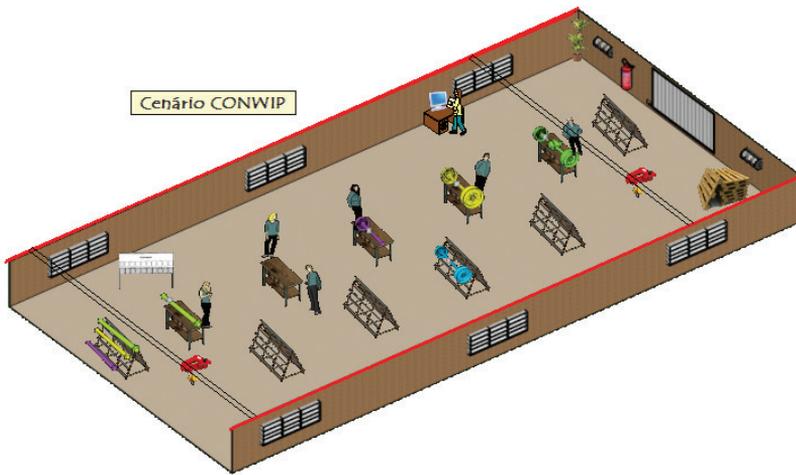


Figura 16.2 Representação do cenário CONWIP

Fonte: Dados da pesquisa.

Nessa linha estão dispostas cinco estações de trabalho e quatro estoques intermediários, utilizados apenas quando a estação seguinte não tem capacidade para processar o eixo. Ainda, há um estoque inicial e um estoque final. Cada estação de trabalho é capaz de montar um eixo por vez. Para isso, estão presentes seis operadores, sendo um para cada estação de trabalho e apenas dois são alocados na estação de trabalho 2.

Também, foi representado um posto de cartões CONWIP no início da linha. Há duas talhas elétricas que auxiliam na movimentação das entidades em partes do ambiente produtivo. Cada estação de trabalho é responsável por uma atividade de montagem, até que o eixo esteja pronto no estoque final. As mudanças também podem ser vistas na Figura 16.2. Ainda, podem ser observadas as cores diferentes de eixos na linha de produção, que representam os tipos diferentes de eixos.

A ordem de produção utilizada no modelo é constituída de 130 eixos traseiros, com sete modelos diferentes e quantidades diferentes de cada tipo de eixo. Com base nas informações coletadas, o dimensionamento do posto de cartões foi feito por meio da seguinte equação, conforme Spearman, Woodruff e Hoop (1990) apud Huang, Wang e Ip (1998):

$$\theta = \mu t \quad (1)$$

Onde:

- θ : Representa a quantidade média de cartões;

- μ : Representa o *throughput* médio da linha de produção, ou seja, a taxa de média de saída;
- t : É referente ao tempo médio que um cartão leva para passar por toda linha de produção.

O número de cartões obtido foi de 5,961 cartões. Sipper e Bulfin Jr. (1997) informam que o número de cartões deve o inteiro superior. Assim, o número de cartões CONWIP utilizado no modelo foi de 6 cartões.

3.2 Desempenho obtido no cenário CONWIP

Por meio da simulação realizada, é possível analisar o desempenho do sistema CONWIP aplicado em um ambiente real. Para esta análise, foram utilizados os valores médio, mínimo, máximo, desvio padrão e semi-intervalo (*half-width*). Este último foi utilizado para poder afirmar se a quantidade de replicações executadas foi satisfatória para a análise dos valores médios obtidos.

Conforme Freitas Filho (2008), se o valor do *half-width* estiver igual ou abaixo de 10% da média amostral, o total de replicações é considerado satisfatório. Neste estudo, foram utilizadas 75 replicações e todas as variáveis obtiveram *half-width* inferior a 10% da média, portanto, a quantidade utilizada de replicações foi satisfatória.

A Tabela 16.1 aborda a quantidade produzida de cada tipo de eixo traseiro. Em 8,63 horas de simulação, que representam as horas úteis na linha analisada para a jornada de um dia de trabalho, o sistema CONWIP foi capaz de produzir em média 94,52 eixos.

Ainda conforme a Tabela 16.1, o eixo mais produzido durante a simulação foi o eixo do tipo 5, sendo produzido em média 36,09 eixos, enquanto que o de menor produção média foi o eixo do tipo 1, com o total de 3 eixos. Através do desvio padrão é possível notar que não houve variação entre os valores médios, mínimos e máximos para os eixos 1, 2, 3 e 7.

Tabela 16.1 Quantidade de eixos produzidos (unidades) no cenário CONWIP

Tipos de eixos	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Half-width
Eixo 1	3,00	3,00	3,00	0,00	0,00
Eixo 2	6,00	6,00	6,00	0,00	0,00
Eixo 3	4,00	4,00	4,00	0,00	0,00
Eixo 4	26,43	26,00	27,00	0,50	0,11

Continua

Tabela 16.1 Quantidade de eixos produzidos (unidades) no cenário CONWIP (Continuação)

Tipos de eixos	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Half-width
Eixo 5	36,09	35,00	38,00	0,72	0,17
Eixo 6	11,00	10,00	12,00	0,28	0,07
Eixo 7	8,00	8,00	8,00	0,00	0,00
Total produzido	94,52	92,00	98,00	1,50	0,35

Fonte: Dados da pesquisa.

Nota-se que o valor médio de produção obtido está abaixo do desejado, uma vez que a ordem de produção possuía 130 eixos. Assim, se o foco da empresa for aumentar o total diário de saídas do sistema, recomenda-se testar cenários com outros sistemas de emissão de ordens, antes da tomada de decisão final sobre a implantação do CONWIP.

A Tabela 16.2 apresenta o tempo médio, em minutos, que um eixo fica no sistema, a contar desde a sua entrada na parte da linha de produção até a sua saída. Dessa forma, um eixo fica em média 36,55 minutos no sistema até que saia permanentemente. O tempo mínimo que um eixo permanece no sistema são 35,33 minutos, e máximo que este fica no sistema são 37,59 minutos. O desvio padrão obtido foi de 0,46 minutos. Case notar que o tempo médio obtido foi considerado satisfatório, considerando as características do sistema CONWIP.

Tabela 16.2 Tempo médio do eixo no sistema no cenário CONWIP

Variável	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão	Half-width
Tempo médio no sistema (minutos)	36,55	35,33	37,59	0,46	0,10

Fonte: Dados da pesquisa.

Como pode ser observado na Tabela 16.3, o recurso mais utilizado no cenário elaborado foi o operador 5, sendo utilizado em média, 75,03% do tempo útil de operação. Já os operadores com as menores utilizações foram o

operador 1 e o operador 6. Dentre os fatores que contribuem para essa menor utilização, estão: o uso da talha elétrica, pois as movimentações de eixos nas respectivas estações são realizadas por este equipamento; o tempo de processamento na estação de trabalho 6 é constante, independentemente do tipo de eixo produzido.

Tabela 16.3 Utilização dos recursos no cenário CONWIP

Recurso	Média (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Desvio Padrão	Half-width
Operador 1	49,46	47,76	51,37	0,75	0,17
Operador 2	64,73	62,58	67,49	1,03	0,24
Operador 3	64,30	62,05	66,88	1,04	0,24
Operador 4	65,59	64,02	67,71	0,88	0,20
Operador 5	75,03	72,64	78,01	0,99	0,23
Operador 6	56,56	55,06	58,56	0,72	0,17

Fonte: Dados da pesquisa.

Cabe ressaltar que a medida de desempenho ‘utilização dos recursos’ é de importância para a análise do modelo, uma vez que a carga operacional média não deve ultrapassar 85% do tempo da jornada de trabalho. Portanto, verificou-se que as porcentagens de utilização foram diferentes, mas não ultrapassaram o limite estipulado pela empresa.

A Tabela 16.4 aborda os percentuais de utilização das estações de trabalho. Foi constatado que a estação 1 possui maior utilização média, equivalente a 97,18% do tempo útil, ou seja, essa estação é utilizada praticamente durante todo o tempo da simulação. Enquanto que a estação com utilização mais baixa é a estação de trabalho 5. Em média, esta é utilizada em 57,15% do tempo útil. Assim, esta tem uma taxa de ociosidade maior que as demais estações de trabalho. Para todas as estações de trabalho, houve variação entre os valores médios e seus mínimos e máximos, que é representado pelo desvio padrão. Cabe ressaltar que as estações de trabalho possuem capacidade unitária e que quanto maior a sua utilização, melhor para a empresa (menor ociosidade).

Tabela 16.4 Utilização das estações de trabalho no cenário CONWIP

Local	Média (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Desvio Padrão	Half-width
Estação de trabalho 1	97,18	97,03	97,29	0,05	0,01
Estação de trabalho 2	67,28	65,04	69,90	1,05	0,24
Estação de trabalho 3	65,44	63,86	67,54	0,87	0,20
Estação de trabalho 4	76,18	73,77	79,17	1,00	0,23
Estação de trabalho 5	57,15	55,62	59,16	0,73	0,17

Fonte: Dados da pesquisa.

Os valores apresentados na Tabela 16.5 mostram que, no geral, o percentual de utilização dos estoques intermediários foi baixo. No entanto, o estoque intermediário 3 foi utilizado, em média, 31,55% do tempo útil. Mesmo assim, esta utilização foi considerada baixa. A baixa utilização dos estoques intermediários pode ser interpretada da seguinte forma: os eixos praticamente não esperam nos estoques 1, 2 e 4 para continuar o processamento na próxima estação de trabalho devido a estas estarem ocupadas.

Tabela 16.5 Utilização dos estoques intermediários no cenário CONWIP

Local	Média (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Desvio Padrão	Half-width
Estoque 1	0,76	0,53	0,98	0,10	0,02
Estoque 2	2,47	0,71	5,51	1,05	0,24
Estoque 3	31,55	27,89	34,12	1,33	0,31
Estoque 4	0,25	0,16	0,36	0,04	0,01

Fonte: Dados da pesquisa.

Com a baixa utilização dos estoques intermediários, foi possível constatar a vantagem do sistema CONWIP exposta por Ovalle e Marquez (2003) na seção um deste artigo. Salienta-se que, se o objetivo da empresa for a redução de estoques intermediários, o CONWIP se mostrou um forte candidato para implantação na linha de produção.

Considerações finais

Neste artigo foi simulado e analisado o desempenho do sistema de emissão de ordens CONWIP, considerando sua aplicação em uma empresa automobilística. Por meio do uso da simulação computacional, foi possível analisar o comportamento do sistema CONWIP na empresa considerada para a elaboração do cenário. Portanto, o objetivo proposto foi atingido.

Dentre os resultados alcançados na simulação, observou-se que o sistema CONWIP obteve melhor desempenho no que se refere a baixa porcentagem média de utilização de estoques intermediários. Ainda, observou-se que foram satisfatórias as porcentagens médias de utilização dos operadores e das estações de trabalho, e também quanto ao tempo médio do eixo no sistema.

Ressalta-se que foi observada a presença do seguinte *trade-off*: se a empresa objetiva possuir menor quantidade média de estoques intermediários e menor tempo médio no sistema, o indicado para o ambiente produtivo provavelmente será o CONWIP. No entanto, se a empresa deseja maior total médio de saídas do sistema, cabe também a análise de outras opções de sistemas de emissão de ordens, por exemplo, o *kanban*.

As contribuições desta pesquisa são para as áreas acadêmica e empresarial. O presente artigo divulga o tema: análise de sistemas de emissão de ordens em ambientes de manufatura. Por ser uma fonte de aplicação prática, os resultados aqui apresentados e discutidos podem auxiliar os gestores no controle da produção e, ainda, promover o interesse em se realizar um processo decisório com uso de simulação. Esta técnica foi considerada como uma ferramenta de auxílio a gestão da produção, pois foi possível analisar se o sistema é adequado à empresa antes da sua efetiva implementação.

Sugere-se, para pesquisas futuras, simular, analisar e comparar o desempenho do CONWIP com outros sistemas de emissão de ordens. Ainda, é possível realizar um estudo de escopo (*scoping study*) para verificar quais sistemas ainda não foram comparados na literatura.

Agradecimentos

Os autores do artigo gostariam de agradecer ao CNPq pela bolsa concedida pelo Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica (PIBIC/UFMG/CNPq).

Referências

BRYMAN, A. *Research methods and organization studies*. London: Uniwin Hyman, 1989. 224 p.

- BURBIDGE, J. L. Production Control: a universal conceptual framework. **Production Planning and Control**, v. 1, n.1, p. 3-16, 1990.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. 4^a ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas**. 2^a ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.
- GONG, Q.; YANG, Y.; WANG, S. Information and decision-making delays in MRP, KANBAN and CONWIP. **Int. J. Production Economics**, v.156, p. 208-213, 2014.
- HAN, X.; WANG, D. Optimization on RFID-enabled CONWIP control strategy for multi-echelon inventory of supply chain. In: World Congress on Intelligent Control and Automation, 12, 2016, Guilin. **Proceedings...** Guilin: WCI-CA 2016, 2016, p. 246-250.
- HARRELL, C.; GHOSH, B.K.; BOWDEN, R. O. **Simulation using ProModel**. 3^a ed. New York: McGraw Hill, 2010.
- HERER, Y. T.; MASIN, M. Mathematical programming formulation of CONWIP based production lines and relationships to MPR. **Int. J. Prod. Res.** v. 35, n. 4, p. 1067-1076, 1997.
- HOPP, W. J.; SPEARMAN, M. L.; **Factory Physics: foundations of manufacturing management**. 3 ed. Chicago: Irwin/McGraw Hill, 2008.
- HUANG, G.; CHEN, J.; WANG, X.; SHI, Y.; TIAN, H. From loop structure to policy-making: a CONWIP design framework for hybrid flow shop control in one-of-a-kind production environment. **International Journal of Production Research**. p. 1-18, September 25, 2016a.
- HUANG, G.; CHEN, J.; WANG, X.; SHI, Y. An approach of designing CONWIP loop for assembly system in one-of-a-kind production environment. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**. v. 29, n. 7, p. 805-820, July 2, 2016b.
- HUANG, M.; WANG, D.; IP, W. H. Simulation study of CONWIP for a cold rolling plant. **International Journal of Production Economics**, v. 54, p. 257-266, 1998a.

- JAEGLER, Y.; BURLAT, P.; LAMOURE, S. The ConWip production control system: a literature review. In: International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, 6, 2016, Bordeaux. **Proceedings...** Bordeaux: ILS 2016, 2016.
- KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; SADOWSKI, D. A. **Simulation with Arena**. 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 2002.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling & Analysis**. 3rd edition, New York: McGraw-Hill, 2000.
- LEE, H.; SEO, D. Performance evaluation of WIP-controlled line production systems with constant processing times. **Computers and Industrial Engineering**, v. 94, p. 138-146, 2016.
- OVALLE, O. R.; MARQUEZ, A. C. Exploring the utilization of a CONWIP system for supply chain management. A comparison with fully integrated supply chains. **Int. J. Production Economics**, v. 83, p. 195-215, 2003.
- SIPPER, D.; BULFIN JR., R. L. **Production: planning, control, and integration**. New York: McGraw-Hill, 1997. 630 p.
- SPEARMAN, M. L.; WOODRUFF, D.; HOPP, W. J. C.: a pull alternative to kanban. **International Journal of Production Research**, v. 28, n.5, p. 879-894, 1990.
- SPEARMAN, M. L.; ZAZANIS, M.A. Push and pull production systems: issue and comparison. **Operations Research**, v.40, n.3, p.521-532, 1992.

Modelo conceitual do sistema de emissão de ordens GKCS com uso da técnica IDEF-SIM

Jarbas Ancelmo da Silva Júnior¹

Stella Jacyszyn Bachega²

Resumo: Com o crescente uso da simulação computacional, torna-se cada vez mais importante a aplicação de técnicas que facilitem o entendimento do sistema real para elaboração do modelo computacional. Neste contexto, é apresentado o IDEF-SIM (*Integrated Definition Methods – Simulation*), que é uma técnica de modelagem conceitual que possui a vantagem de permitir a elaboração de modelos conceituais com foco na simulação. Essa técnica agrupa informações úteis para a representação computacional e para o entendimento do projeto. O presente artigo tem como objetivo elaborar o modelo conceitual IDEF-SIM de uma linha de montagem automotiva, retratando o seu funcionamento por meio do sistema *Generalized Kanban Control System* (GKCS). Para tanto, foram empregados os procedimentos de pesquisa bibliográfica e estudo de caso. Notou-se que, por meio do emprego dessa técnica de modelagem conceitual, houve a simplificação no entendimento e na visualização da realidade representada.

Palavras-chave: IDEF-SIM. Modelagem conceitual. GKCS.

Introdução

Cada vez mais as empresas estão em um ambiente altamente competitivo. Com base neste contexto, as ferramentas/técnicas de apoio a decisões ganham

- 1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: j_jr.95@hotmail.com. Programa Institucional Voluntário de Iniciação Científica (PIVIC).
- 2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: stella@ufg.br.

importância. Dentre as técnicas com este foco está a simulação. Segundo Montevechi et al. (2010), a simulação consiste no ato de importar a realidade para um ambiente que se pode controlar, em que seu comportamento possa ser analisando sob variadas condições, sem riscos materiais e sem custos elevados envolvidos.

Para uma melhor compreensão do ambiente real a ser simulado, é importante a elaboração do modelo conceitual. O modelo conceitual é a definição do modelo ao qual se deseja fazer a representação computacional, independentemente do software a ser utilizado (BROOKS; ROBINSON, 2001). Perera e Liyanage (2000) destacam, ainda, que o modelo conceitual pode proporcionar um aumento na qualidade dos modelos simulados e, também, reduzir o tempo exigido para a construção da modelagem computacional.

Leal, Almeida e Montevechi (2008) propuseram uma técnica que auxilia na elaboração do modelo conceitual e que já possui foco na simulação: o IDEF-SIM (*Integrated Definition Methods – Simulation*). Sua principal característica deve-se a sua aplicabilidade, por ter uma identidade lógica. De acordo com Mendonca, Montevechi e Miranda (2013), dentre os principais benefícios do IDEF-SIM pode-se citar: reduz o tempo utilizado no modelo computacional; auxilia na validação do modelo conceitual juntamente com os especialistas; contribui para documentar os projetos de simulação, registrando as lógicas usadas; permite uma compreensão mais consistente por parte dos leitores futuros do projeto.

Esse trabalho tem como objetivo elaborar o modelo conceitual IDEF-SIM de uma linha de montagem automotiva, retratando o seu funcionamento por meio do sistema *Generalized Kanban Control System* (GKCS). O sistema de emissão de ordens GKCS, foi idealizado por Buzacott (1989) e Zipkin (1989).

Cabe observar que este artigo faz parte dos resultados do projeto de pesquisa intitulado “Método para escolha de sistemas de coordenação de ordens com uso de simulação: aplicação em ambientes de produção *flow shop*”. Este projeto está vinculado ao Grupo de Estudos em Modelagem e Simulação (GEMS).

O presente artigo possui a seguinte estrutura: na primeira seção é abordado o referencial teórico; na segunda seção, a metodologia usada na condução da pesquisa é exposta; na terceira seção estão as discussões e resultados; e, por fim, há as considerações finais.

1. Referencial Teórico

Nessa seção, são abordados aspectos teóricos sobre o sistema de emissão de ordens GKCS e sobre o IDEF-SIM.

1.1 O sistema de emissão de ordens GKCS

O planejamento e controle da produção (PCP) tem com tarefa primordial o gerenciamento de forma eficiente do fluxo de material, o uso de pessoas e equipamentos, respondendo as demandas dos clientes (VOLLMANN et al., 2006). De acordo com Chiavenato (2008), a parte que se refere ao planejamento tem como função determinar, de forma antecipada, os objetivos a serem alcançados, quando fazer e quanto fazer de forma que estes sejam plenamente atingidos. Já o controle consiste na medição e correção do desempenho, fazendo com que os planos sejam melhores executados. Dentre as atividades de controle da produção está a definição de qual sistema de emissão de ordens (SEO's) implantar.

Segundo Burbidge (1983), o sistema de emissão de ordens considera o ordenamento mais adequado das ordens de produção e objetiva o cumprimento dos prazos de entrega, sendo determinados de forma mais eficiente e eficaz possível. Russomano (1979) salienta que a movimentação e a liberação das ordens de produção, em sistemas mais complexos, tem como atribuição tomar providências de produção, retirada de matéria-prima dos estoques, transporte e entrega de peças finalizadas, assim, como contagem de peças.

Os SEO's podem ser classificados, conforme com Burbidge (1983), como: sistemas em que a produção está em conformidade com o solicitado, sistemas em que os estoques são controlados, e sistemas no qual os fluxos são controlados. Dentre os SEO's estão o *kanban*, o CONWIP (*Constant Work in Process*) e o GKCS.

A operação do GKCS é similar à do sistema *kanban*. O que os diferencia é o número de cartões necessários para a produção. No GKCS há cartões *kanban* adicionais livres, tornando possível que a demanda requerida possa ser transferida para o estágio produtivo seguinte, mesmo quando não há itens acabados em um determinado estágio da produção (KARAESMEM; DALLERY, 2000).

A principal vantagem deste SEO é quanto a sua flexibilidade e aderência apresentada em relação às variações da demanda, o que é indicado em distintos estudos onde o funcionamento do GKCS é simulado (LAGE JUNIOR; GODINHO FILHO, 2008).

Bayanat, Buzacott e Dallery (2002) apontam como vantagens do GKCS, em comparação ao *kanban*, a maior versatilidade e o melhor desempenho. Outras vantagens a se considerar neste SEO estão no fato deste mecanismo diminuir a dependência entre a demanda e o cartão *kanban*, e também, à forma de liberação de peças.

Porém, estudos apontam que uma das desvantagens do GKCS é relativo à sua alta complexidade, se comparado ao sistema *kanban*. Pode-se atribuir parte desta complexidade à necessidade de definir dois parâmetros de controle entre os estágios produtivos (FREIN; DI MASCOLO; DALLERY, 1995). Lage Junior e

Godinho Filho (2008) expõem também a necessidade de delimitar o estoque de segurança e o número de sinalizadores de ordem de produção.

1.2 IDEF-SIM

O IDEF-SIM tem como idealizadores Leal, Almeida e Montevechi (2008). Conforme Sargent (2011), o modelo conceitual foi constituído com o intuito de simplificar a interpretação e a visualização do sistema estudado. Neste sentido, o IDEF-SIM foi proposto com foco no desenvolvimento da modelagem conceitual voltada para a simulação computacional. Esta técnica surgiu a partir do IDEF0 e do IDEF3.

O IDEF0 possui como características o uso de elementos textuais e gráficos utilizados de forma combinada. Tem como composição uma série hierárquica de diagramas, exibindo de forma gradativa os níveis de detalhes na descrição das funções. Já no IDEF3, os eventos são dispostos nas ordens reais de acontecimentos, considerando as precedências temporais (LEAL; ALMEIDA; MONTEVECHI, 2008).

Os elementos e símbolos do IDEF-SIM são apresentados no Quadro 17.1, e explicados a seguir, conforme Montevechi et al. (2010, p. 1628):

- a) Entidade: refere-se a itens que serão processados pelo sistema, simbolizando matérias-primas, pessoas, documentos, produtos, dentre outros. Podem ser agrupadas ou divididas ao longo do processo de produção;
- b) Funções: têm como papel representar locais onde as entidades sofrerão alguma ação. Dentre estes locais, estão: esteiras de movimentação, postos de trabalho, estoques e filas;
- c) Fluxo da entidade: direciona a entidade no decorrer do modelo, mostrando momentos de entrada e de saída da entidade nas funções;
- d) Recursos: representam elementos usados na movimentação de entidades e execução de funções. E pode representar equipamentos ou pessoas;
- e) Controles: são as regras usadas nas funções, as quais podem ser: regras de filas, sequenciamento, programação etc.;
- f) Regras para fluxos alternativos e/ou paralelos: são chamadas de junções, podendo ser executadas de forma conjunta (junção E), de forma alternativa (junção OU), ou ambas as regras (junção E/OU);
- g) Movimentação: é o deslocamento da entidade, em que o modelador acredita ser necessária a representação no modelo;
- h) Informação explicativa: utiliza-se para inserir uma explicação, objetivando facilitar o entendimento acerca do modelo;
- i) Fluxo de entrada no sistema modelado: é a criação ou a entrada das entidades no modelo;

- j) Encerramento do sistema: indica o encerramento de um caminho no fluxo modelado;
- k) Conexão com outra imagem: é usada para fazer a divisão do modelo em figuras distintas.

Quadro 17.1 Elementos e símbolos usados na técnica IDEF-SIM

Elementos	Símbolos
Funções	
Entidades	
Recursos	
Controles	
Regras para fluxos alternativos e/ou paralelos	Regra E/OU Regra E Regra OU
Fluxo de entidade	
Movimentação	
Informação explicativa	
Encerramento do sistema	
Conexão com outra imagem	
Fluxo de entrada no sistema modelado	

Fonte: Adaptado de Montevechi et al. (2010).

2 Metodologia

A pesquisa pode ser abordada de forma quantitativa ou qualitativa (BRYMAN, 1989). Porém, segundo Freitas et al. (2000), muitas vezes há a possibilidade de se utilizar as duas abordagens de forma combinada. Nesta pesquisa houve o uso da abordagem mista, devido ao modo como foram tratados os dados coletados e as informações geradas.

Os procedimentos de pesquisa empregados foram a pesquisa bibliográfica e o estudo de caso. A revisão bibliográfica consiste na utilização de documentos já elaborados como fonte de dados (GIL, 2002). Nesta pesquisa, o referido procedimento foi utilizado para pré-orientação teórica sobre o tema abordado. Quanto

ao estudo de caso, Yin (1990) advoga que este procedimento propicia uma visão holística acerca dos acontecimentos da vida real. Este procedimento foi utilizado com intuito de favorecer o entendimento da realidade da empresa estudada.

A coleta de dados foi feita *in loco* (no próprio local) realizada em uma empresa do ramo automotivo. Os dados coletados possuem caráter secundário. De acordo com Malhotra (2001), os dados secundários consistem em dados colhidos para um propósito distinto ao problema em pauta. Hair Jr. et al. (2005) conceitua, ainda, que os dados secundários são uma estrutura de informações e dados já coletados anteriormente para uma problemática distinta da pesquisa atual. Salienta-se que a parte que foi estudada na empresa refere-se a linha de montagem de eixos traseiros.

O modelo conceitual foi elaborado por meio da técnica IDEF-SIM, conforme proposta por Leal, Almeida e Montevechi (2008), e construído com uso do software DIA®.

3 Discussão e Resultados

O cenário representado possui cinco estações de trabalho (estação 1 até estação 5) e seis operadores, sendo que dois destes estão alocados na estação de trabalho 2 e realizam atividades em paralelo. Ainda, há quatro estoques intermediários (B1 até B4), um estoque inicial (B0) e um estoque final (B5). Foram representados, também, cinco postos de cartões *kanban* (postos K1 até K5), cinco postos de cartões *kanban* desencadeados pela demanda (postos DK1 até DK5) e um posto para a demanda efetuada (Posto D). Há sete modelos de eixos traseiros diferentes (modelo n , sendo $n = 1, 2, \dots, 7$). Destaca-se que os tempos de processamento são diferentes de acordo com o modelo de eixo que está sendo montado.

Os dados coletados na empresa automobilística foram adequados para a devida representação do funcionamento do GKCS. No GKCS, a necessidade de produção tem seu início determinado pela demanda D, localizada ao final do processo, onde será verificado no estoque final se há eixos acabados. Sendo obtida a resposta afirmativa, o eixo é encaminhado ao cliente, mas se não houver eixos finalizados, é emitido um cartão de demanda (D4), referente a estação de trabalho 4.

O modelo conceitual desenvolvido, por meio da análise do referido sistema, encontra-se nas Figuras 17.1, 17.2 e 17.3. Como pode ser observado na Figura 17.1, o modelo de eixo (modelo n) entra no estoque inicial e há a junção de um cartão *kanban* (K1) para ser conduzido até a primeira estação. Este cartão K1 que está no posto K1, posteriormente, se une com D1 (demanda 1), o qual é liberado por D2 (demanda 2). Há o posto DK1, onde os cartões *kanban* e a demanda aguardam no posto DK1. Havendo disponibilidade de capacidade na Estação 1, o cartão *kanban* se une ao modelo n para ser processado nesta estação. Passado

pela primeira estação de trabalho, o cartão K1 retornará ao seu posto e o modelo n seguirá para o primeiro estoque intermediário (B1).

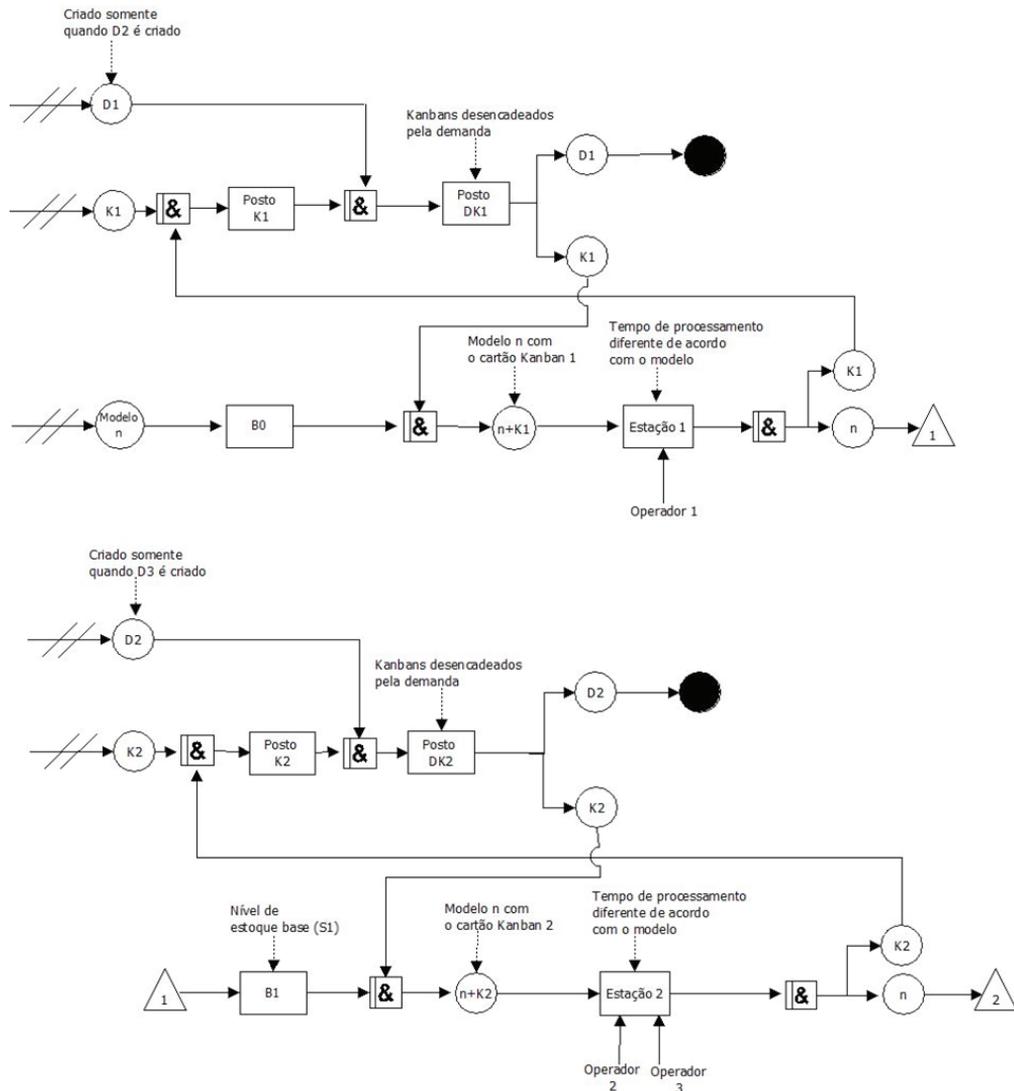


Figura 17.1 Modelo conceitual desenvolvido (Parte 1)

Fonte: Dados da pesquisa.

Da mesma forma, a demanda D2 é criada quando D3 é criado, sendo dirigido ao posto DK2 onde será feita a sua união com K2. Assim que houver disponibilidade de capacidade na estação de trabalho 2, K2 e D2 são desunidos. O cartão *kanban* K2 será encaminhado à união com a peça (resultando em “n+k2”) e D2

será finalizado. Após isso, a entidade é dirigida a estação de trabalho 2, onde será feita a operação por dois operadores. Posteriormente, a peça é separada do cartão, seguindo o estágio produtivo subsequente e o cartão K2 retornará ao seu respectivo posto.

Como pode ser observado na Figura 17.2, o mesmo procedimento se repete para as estações de trabalho 3 e 4. Destaca-se que há a adequação das referidas demandas (D3 e D4) e dos cartões *kanban* (K3 e K4).

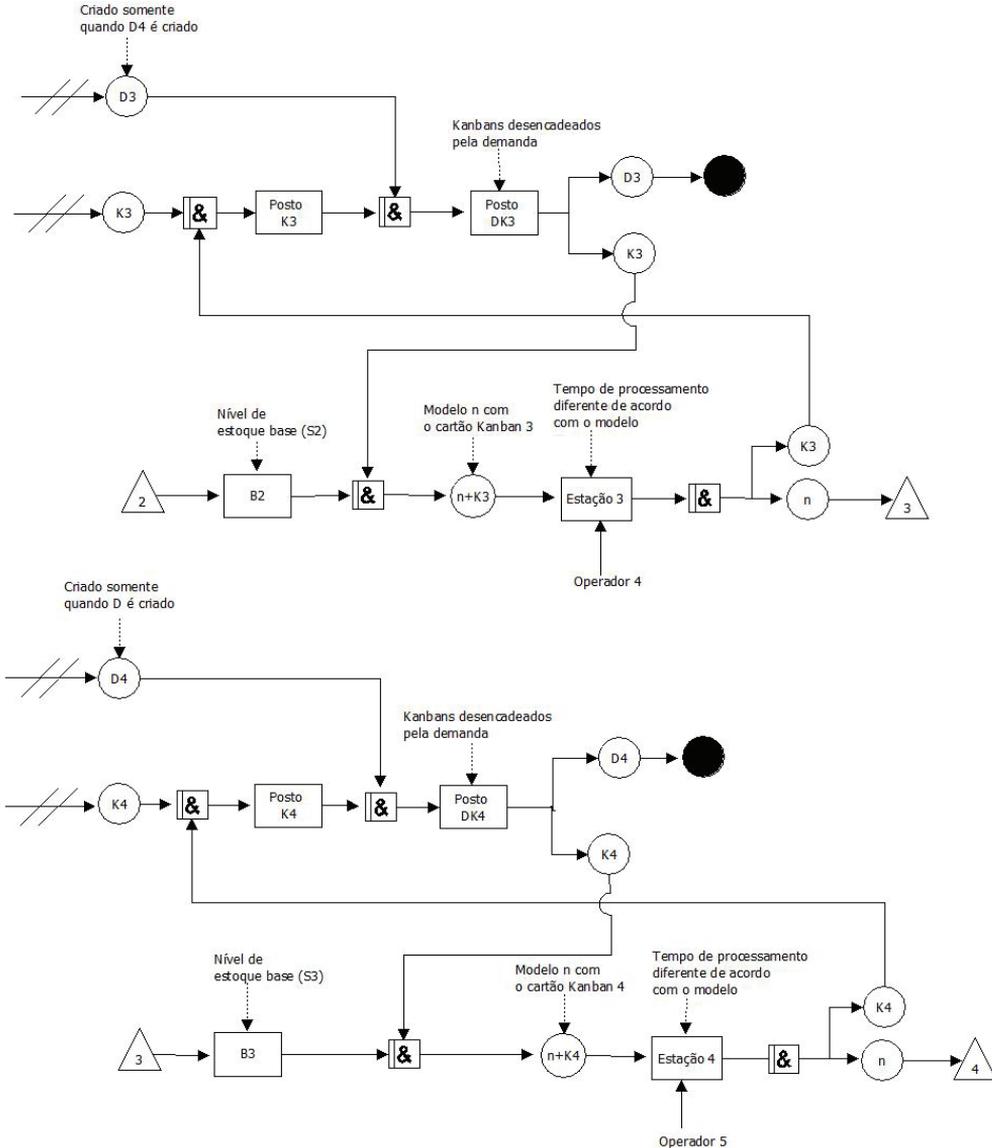


Figura 17.2 Modelo conceitual desenvolvido (Parte 2)

Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 17.3 é explicitado o final do processo para a estação de trabalho 5. Cabe enfatizar que o funcionamento do GKCS se dá de modo que sempre que uma solicitação é realizada ao sistema, instantaneamente esta se subdividirá em duas demandas: a primeira, simbolizada por “D”, solicitará ao estoque final (B5) a liberação pelo produto finalizado para o consumidor. Já a segunda demanda (D5), solicitará a produção ao estágio produtivo 5. Assim que a primeira demanda for criada, esta checará o estoque final. Se contiver a quantidade desejada disponível, a mesma é liberada ao consumidor, caso contrário, ela é colocada na fila de espera para a produção na estação de trabalho 5.

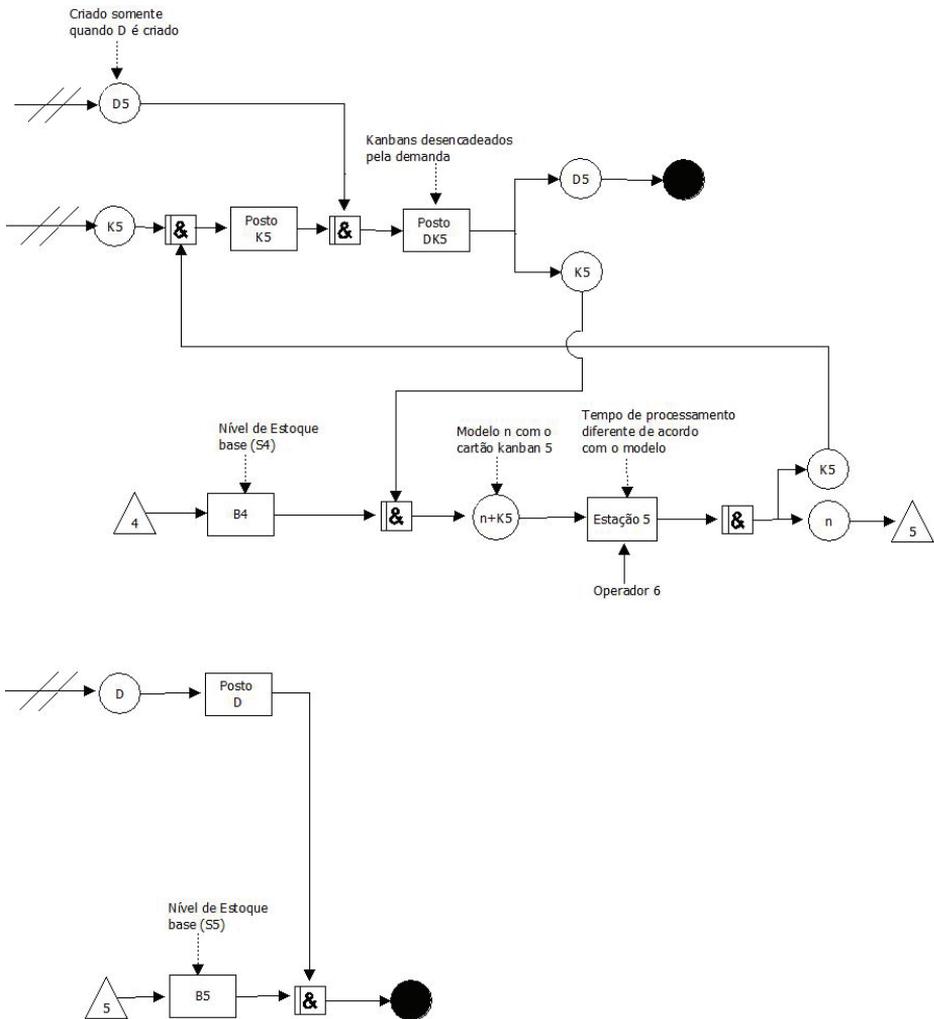


Figura 17.3 Modelo conceitual desenvolvido (Parte 3)

Fonte: Dados da pesquisa.

Assim que a demanda D5 chega ao seu posto (posto D5), se o cartão *kanban* 5 estiver disponível, ele é encaminhado ao seu posto (posto K5) para ser feita a união com o D5 (sendo formado o cartão DK5, no posto DK5). Em seguida, é realizado o desmembramento, onde o cartão K5 segue rumo ao eixo (será feita a união na peça, resultando em “n+k5”) dirigindo-o a estação de trabalho 5 para ser feita a produção. Assim que a produção termina, o cartão será descolado da peça, retornando ao seu posto, o eixo é encaminhado ao estoque final (B5) e o cartão D5 é finalizado.

Considerações finais

O objetivo proposto nesse artigo foi alcançado. Realizou-se a modelagem conceitual do sistema de emissão de ordens GKCS por meio da técnica IDEF-SIM, considerando a realidade de uma empresa montadora de automóveis. Foi possível notar que o IDEF-SIM proporcionou um resultado satisfatório, simplificando a visualização e o entendimento do sistema real para posterior representação computacional. No entanto, cabe ressaltar que é necessário ter conhecimento sobre a técnica e sobre modelagem conceitual.

Dentre as contribuições desta pesquisa está a cooperação para uma maior discussão sobre a importância de se realizar a modelagem conceitual, mais especificamente com o uso da técnica IDEF-SIM, que já possui foco na simulação. Ainda, expõe o modelo conceitual do sistema de emissão de ordens GKCS, que é considerado um sistema complexo para sua representação e implantação, se comparado a outros SEO's como o CONWIP.

Como sugestão de pesquisas futuras, indica-se a aplicação da técnica IDEF-SIM para a representação de outros sistemas de emissão de ordens. Ainda, após a representação, sugere-se elaborar os modelos computacionais para comparação de medidas de desempenho dos sistemas, verificando qual se enquadra melhor a realidade estudada.

Referências

- BAYNAT, B.; BUZACOTT, J. A.; DALLERY, Y. Multi-product kanban like control systems. **International Journal of Production Research**, v. 40, n. 16, pp. 4225-4255, 2002.
- BROOKS, R. J.; ROBINSON, S. **Simulation and inventory control: Operational research series**. Basingstoke: Palgrave, 2001.

- BRYMAN, A. **Research methods and organization studies**. 1. ed. London: Uniwin Hyman, 1989.
- BURBIDGE, J. L. **Planejamento e controle da produção**. 1. ed. São Paulo: Atlas, 1983.
- BUZACOTT, J. A. Queueing models of kanban and MRP controlled production systems. **Engineering Cost and Production Economics**, v. 17, pp. 03-20, 1989.
- CHIAVENATO, I. **Planejamento e controle da produção**. 2. ed. Barueri, SP: Manole, 2008. FREIN, Y.; DI MASCOLO, M.; DALLERY, Y. On the design of generalized kanban control systems. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 15, n. 9, pp. 158 – 184, 1995.
- FREITAS, H. et al. O método de pesquisa survey. *Revista de administração*, v. 35, n. 3, p. 105-112, 2000.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- HAIR JR., J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- KARAESMEN, F.; DALLERY, Y. A performance comparison of pull type control mechanisms for multi-stage manufacturing. **International Journal of production economics**, v. 68, n. 1, pp. 59-71, 2000.
- LAGE JUNIOR, M.; GODINHO FILHO, M. Adaptações do sistema kanban: revisão, classificação, análise e avaliação. **Revista Gestão & Produção**, São Carlos, v.15, n.1, 2008.
- LEAL, F.; ALMEIDA, D. A.; MONTEVECHI, J. A. B. Uma Proposta de Técnica de Modelagem Conceitual para a Simulação através de elementos do IDEF. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 40, 2008, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: SBPO, 2008, p. 2503-2514.
- MALHOTRA, N. K. **Pesquisa de marketing: uma orientação aplicada**. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- MENDONCA, M. M.; MONTEVECHI, J. A. B.; MIRANDA, R. C. Aplicação da modelagem conceitual IDEF-SIM ao software de modelagem computacional

SIMUL8: Um caso prático. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 33, 2013, Salvador. **Anais...Salvador: ABEPRO, 2013, p. 1-20.**

MONTEVECHI, B. A. J.; LEAL, F.; PINHO, F. A.; COSTA, S. F. R.; OLIVEIRA, M. L.M.; SILVA, F. L. A. Conceptual Modelling In Simulation Projects By Mean Adapted Idef: An Application In A Brazilian Tech Company. In: 2010 Winter Simulation Conference, 2010, Baltimore. **Proceedings...** Baltimore: IEEE, 2010. p. 1624-1635.

PERERA, T.; LIYANAGE, K. Methodology for rapid identification and collection of input data in the simulation of the manufacturing systems. **Simulation Practice and Theory**, v.7, p. 645–656, 2000.

RUSSOMANO, V. H. **Planejamento e Acompanhamento da Produção**. São Paulo: Ed. Pioneira, 1979.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. In: 2011 Winter Simulation Conference, 2011, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: IEEE, 2011. p. 183-198.

VOLLMANN, T. E.; BERRY, W. L. F.; WHYBARK, D. C.; JACOBS, R. **Sistemas de planejamento e controle da produção para gerenciamento da cadeia de suprimentos**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

YIN, R. K. **Case study research: design and methods**. Newbury Park, California: Sage Publications, 1990.

ZIPKIN, P. **A kanban-like production control system: analysis of simple models**. Research Working Paper No. 89-91, Graduate School of Business, Columbia University, New York, NY 10027, 1989.

Utilizando o solver para resolver problemas de programação da produção com o método de programação inteira

Gislene da Silva Fonseca¹
Nayara Macedo Vinhal²

José dos Reis Vieira de
Moura Junior³

Resumo: Este trabalho apresenta um problema de Programação da Produção (Scheduling) com tempo de câmbio e ajustes (setup) de um laminador de aços longos. Desta forma, com uma tabela contendo os valores do tempo de setup para determinada sequência de produção serão estudados como obter uma função objetivo e funções de restrições para que possa ser possível resolver este problema através da Programação Inteira com o uso de um programa computacional, o Solver, um programa do pacote Office, o Excel, amplamente disponível no meio industrial. Concluindo, este trabalho apresenta aspectos básicos de formulação de problemas de programação da produção envolvendo tempos de setup associados a mecanismos cotidianos de solução do problema.

Palavras-chave: Programação da produção, Tempos de setup, Programação Inteira, Excel Solver.

-
- 1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Aluna do curso de Engenharia de Produção. Contato: gis-sf@hotmail.com.
 - 2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Aluna do curso de Matemática Industrial. Contato: nayara.macedov@gmail.com
 - 3 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Orientador. Contato: zereis@ufg.br.

Introdução

A programação da produção (*scheduling*) é o campo da Pesquisa Operacional que trata do sequenciamento detalhado de chão de fábrica. Os problemas de *scheduling* determinam quais são as ordens de produção e as respectivas operações que deverão ser realizadas, além de determinar quais recursos e quando o processamento de cada máquina deve ser iniciado ou finalizado (PIMENTA, 2011).

A programação da produção é baseada em tomadas de decisões que buscam otimizar processos industriais a fim de reduzir custos, tempo de processamento, entre outros, de modo a melhorar a relação custo-benefício dos produtos fabricados e gerar ganhos para a empresa (CORRÊA; GIANESI; CAON, 2011).

A programação de um sistema de produção pode exigir um grande grau de dificuldade dependendo das características presentes no ambiente produtivo, tais como: considerar tempos de *setup* em uma linha de produção, lidar de modo eficiente com os recursos disponíveis, reduzir desperdícios, otimizar tempo de processamento, entre outros fatores que influenciam no processamento do produto (TUBINO, 2007).

Ao considerar os problemas e característica do sistema de produção, estes podem ser formulados e representados por modelos matemáticos para serem solucionados de forma rápida e confiável, com auxílio de recursos computacionais.

A formulação e solução do problema de programação da produção pode ser feita através do uso da Programação Inteira, que busca maximizar ou minimizar um objetivo através de uma função linear. Esse método está sujeito a algumas restrições na forma de equações lineares. Na programação inteira, outro fator a ser considera é que as soluções das variáveis somente podem assumir valores inteiros (YANASSE et al., 2006).

Para a resolução de problemas de programação linear são utilizados alguns programas computacionais, como o Solver, o qual será utilizado nesse trabalho. O Solver é um suplemento do Excel que apresenta boa performance na resolução dos problemas de Pesquisa Operacional (ROJAS, 2002).

1 Scheduling

De acordo com Fernandes *et al.* (2010) e Pinedo (2012), os problemas de *scheduling* são codificados de acordo com a forma $\alpha/\beta/\gamma$, onde α é o ambiente de máquina, β são as restrições e γ é a função objetivo.

O primeiro argumento que caracteriza o ambiente de máquina pode assumir uma das seguintes condições:

- Máquinas únicas: As tarefas a serem processadas precisam de uma única máquina disponível.

- Máquinas paralelas: As tarefas podem ser executadas em qualquer máquina.
- *Flow Shop*: As tarefas a serem processadas possuem um mesmo roteiro de processamento passando em várias máquinas que estão em série.
- *Job Shop*: Cada tarefa possui uma rota de produção percorrida pelas máquinas que não necessariamente é a mesma de outra tarefa.
- *Open Shop*: Cada tarefa também possui uma rota tecnológica percorrida pelas máquinas, mas ao contrário do caso anterior, não há necessidade de precedência de uma máquina e depois outra. Assim, o produto pode percorrer uma máquina e depois a outra, ou vice-versa sem alteração do produto.

Podem existir diversos tipos de restrição em um problema de programação da produção. Entretanto, alguns mais comuns são: Data de liberação ou disponibilidade de cada tarefa (r_j), data que a tarefa finaliza o processamento (d_j), tempo de processamento de cada tarefa em cada máquina (p_{jk}), tempo de espera para iniciar a tarefa (W_{ik}). Algumas características de cada tarefa é que todas possuem data de término da tarefa (C_j), pontualidade na tarefa (L_j) e tempo de atraso que a tarefa foi entregue (T_j).

A função objetivo que se deseja encontrar pode ser: Tempo total quando a última tarefa acabar de ser processada ($C_{máx}$), atraso máximo de uma tarefa ($T_{máx}$), atraso total de uma tarefa em processamento (T_j), tempo gasto para finalizar uma tarefa ($\sum C_j$) e total de tarefas atrasadas ($\sum U_j$).

2 Desenvolvimento

Um laminador é formado por um conjunto de cadeiras de laminação que deformam progressivamente o produto semiacabado até a forma final. A classificação dos laminadores ocorre principalmente de acordo com a disposição das cadeiras de laminação. Os tipos de cadeiras também apresentam vários aspectos tecnológicos do laminador. As cadeiras do tipo duo possuem dois cilindros, a cadeiras trio, possuem três cilindros, a cadeiras quádruplo, que são quatro cilindros montados um em cima do outro na vertical e a cadeiras cantiléver, que é utilizado na laminação de produtos longos (RIZZO, 2007).

Para se obter um produto semiacabado num processo de laminação, consiste em um material que tem que passar por vários cilindros até chegar num produto final desejado. Mas para a obtenção de produtos laminados, tem algumas etapas fundamentais. Primeiro acontece a preparação do material, os tarugos, com formado longo e com espessura grande são aquecidos e em seguida irão para os trens de laminação, que contém várias cadeiras de laminação, onde cada cadeira terá um ajuste diferente para receber o tarugo. Terminando o processo a quente, o material terá o acabamento e/ou tratamento térmico quando se trata de um produto final. Em seguida, a decapagem, e se necessário uma laminação a quente,

depois um tratamento térmico e por fim o acabamento e revestimento, ou seja, produtos finais como, chapas grossas, bobinas a quente, chapas finas, barras, fio-máquina e bobinas a frio (RIZZO, 2007).

Assim, para a mudança de produção em um laminador, o tempo de setup ou câmbio ocorre para que todas as cadeiras de laminação sejam ajustadas, temperaturas de fornos, velocidades de ventiladores e vazão de águas de resfriamento.

Neste trabalho é proposta a avaliação da solução do menor tempo de preparação de um laminador de aços longos, que serão produzidos três câmbios para atender a demanda de três clientes com urgência. No caso em estudo são apresentados três tipos de produtos que são laminados em um laminador. Para cada mudança de produto é necessário um tempo de setup conforme mostrado na Tabela 18.1.

Tabela 18.1 Dados de tempo de setup no câmbio do laminador.

De\Para	A	B	C
A	10000	2	4
B	7	10000	3
C	5	1	10000

Fonte: Autores, 2016.

A função objetivo deste problema é minimizar o setup, utilizando a seguinte função objetivo da Equação (1).

$$X_0 = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n s_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

onde s_{ij} é o tempo para preparar a máquina para produzir a tarefa e x_{ij} é o resultado para cada variável da função objetivo.

As equações de restrição são dadas pelas Equações (2-3).

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad (2)$$

para $j = 1, 2$ e 3 que representa que toda tarefa sucede alguma tarefa.

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (3)$$

para $i = 1, 2$ e 3 que é para toda tarefa que antecede alguma tarefa.

Resolvendo a Equação (1) com os parâmetros da Tabela 18.1, obtemos a equação a seguir:

$$\min X_0 = s_{11}x_{11} + s_{12}x_{12} + s_{13}x_{13} + s_{21}x_{21} + s_{22}x_{22} + s_{23}x_{23} + s_{31}x_{31} + s_{32}x_{32} + s_{33}x_{33} \quad (4)$$

Substituindo os valores da Tabela 18.1 na Eq. (4), obtém-se a Eq. (5).

$$\min X_0 = 10000 + 2x_{12} + 4x_{13} + 7x_{21} + 10000x_{22} + 3x_{23} + 5x_{31} + 1x_{32} + 10000x_{33} \quad (5)$$

Sujeito às restrições das Equações (6-11), considerando i variando de 1 até 3 e j fixo.

$$\sum_{i=1}^3 x_{ij} = 1 = x_{11} + x_{21} + x_{31} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^3 x_{ij} = 1 = x_{12} + x_{22} + x_{32} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^3 x_{ij} = 1 = x_{13} + x_{23} + x_{33} \quad (8)$$

E a variável j variando de 1 até 3 e com o i fixo.

$$\sum_{j=1}^3 x_{ij} = 1 = x_{11} + x_{12} + x_{13} \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^3 x_{ij} = 1 = x_{21} + x_{22} + x_{23} \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^3 x_{ij} = 1 = x_{31} + x_{32} + x_{33} \quad (11)$$

Com a obtenção da função objetivo e das restrições, o problema a resolver passa a ser um problema de programação inteira.

3 Metodologia

Primeiramente, uma planilha será criada com os valores da função objetivo e das restrições, como mostra a Figura 18.1.

Nessa planilha, os dados serão dispostos da seguinte forma: as células das linhas 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 contém parâmetros das Equações (6-11) e da função objetivo, a Equação (5). A coluna K apresentará a solução das restrições e a linha 11 conterà a solução final do problema.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1													
2	Variáveis de decisão	X11	X12	X13	X21	X22	X23	X31	X32	X33	Solução	Sinal	
3	Restrição 1	1			1			1				=	1
4	Restrição 2		1			1			1			=	1
5	Restrição 3			1			1			1		=	1
6	Restrição 4	1	1	1								=	1
7	Restrição 5				1	1	1					=	1
8	Restrição 6							1	1	1		=	1
9	Objetivo	10000	2	4	7	10000	3	5	1	10000			
10													
11	Solução												

Figura 18.1 Dados colocados na planilha do Excel

Fonte: Autores, 2016.

As células de K3 até a K9 contém, respectivamente, as seguintes formulas, com o produto dos coeficientes da equação de restrição com a da função objetivo:

=SOMARPRODUTO(B3:J3;\$B\$11:\$J\$11)

=SOMARPRODUTO(B4:J4;\$B\$11:\$J\$11)

=SOMARPRODUTO(B5:J5;\$B\$11:\$J\$11)

=SOMARPRODUTO(B6:J6;\$B\$11:\$J\$11)

=SOMARPRODUTO(B7:J7;\$B\$11:\$J\$11)

=SOMARPRODUTO(B8:J8;\$B\$11:\$J\$11)

=SOMARPRODUTO(B9:J9;\$B\$11:\$J\$11)

Depois de colocar as fórmulas nas células correspondentes, no Menu Dados contém o programa Solver. Ao clicar, aparecerá uma janela. Na caixa, “Definir Objetivo”, será colocado a célula K9, e como a função objetivo é minimizar o tempo de setup, selecione a opção Min. Na caixa “Sujeito as restrições” será colocado todas as restrições que o problema contém, como mostra a Figura 18.2.

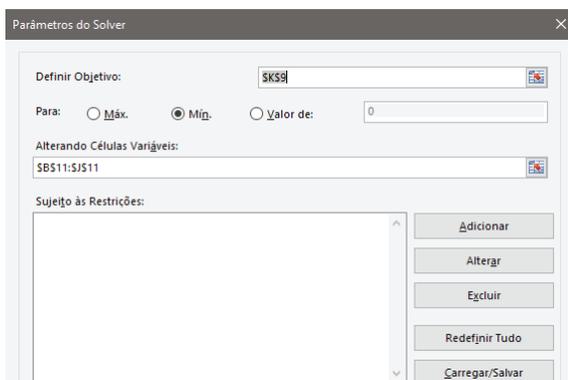


Figura 18.2 Parâmetros do Solver.

Fonte: Autores, 2016.

Ao clicar em “Adicionar” aparecerá uma janela, e em “Referência de célula” serão adicionadas as células da coluna K9, e o sinal de “=” e na “Restrição” os valores da linha M.

Como a solução desse problema é por programação inteira. As células da linha 11 contendo as variáveis das funções, serão adicionadas todas na caixa de “Referência de célula” um de cada vez. Na caixa de sinal, a opção “int” é selecionada e em seguida aparecerá na caixa de “Restrição” (número inteiro), como mostra a Figura 18.3.

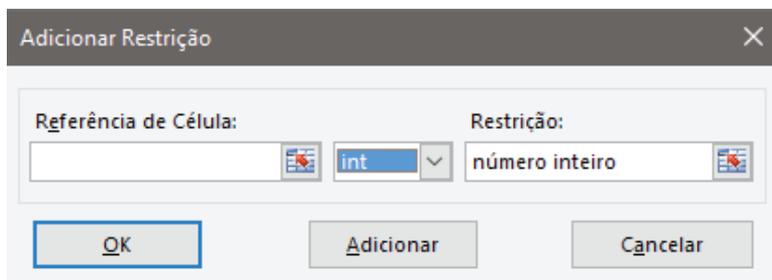


Figura 18.3 Janela para colocar as restrições.

Fontes: Autores, 2016.

Com todas as restrições colocadas nos Parâmetros do Solver, opção “Selecionar um Método de:” será selecionado como LP Simplex, como mostra a Figura 18.4.

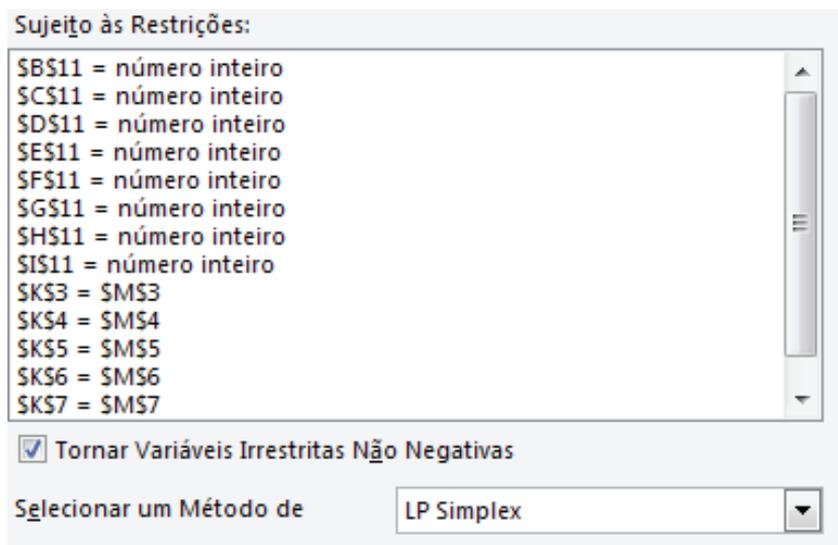


Figura 18.4 Janela do Solver com as restrições e a opção LP simplex selecionada.

Fontes: Autores, 2016.

Em “Opções” desmarque a opção “Usar escala automática” e clique em “Resolver”. O Solver vai mostrar uma janela “Resultados do Solver”. Selecione a opção Manter Solução do *Solver* para aceitar os valores. Em seguida a planilha exibe nas células variáveis os valores que proporcionaram o menor tempo de *setup* para a fabricação. A Figura 18.5 mostra os resultados obtidos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1													
2	Variáveis de decisão	X11	X12	X13	X21	X22	X23	X31	X32	X33	Solução	Sinal	
3	Restrição 1	1			1			1			1	=	1
4	Restrição 2		1			1			1		1	=	1
5	Restrição 3			1			1			1	1	=	1
6	Restrição 4	1	1	1							1	=	1
7	Restrição 5				1	1	1				1	=	1
8	Restrição 6							1	1	1	1	=	1
9	Objetivo	10000	2	4	7	10000	3	5	1	10000	12		
10													
11	Solução	0	0	1	1	0	0	0	1	0			

Figura 18.5 Resultados do problema proposto.

Fonte: Autores, 2016.

Pode-se ver que a Solução na linha K, obteve os valores das restrições. E a solução dos valores da função objetivo são apresentados na linha 11. Com a função objetivo assumindo os valores $x_{11} = 0$, $x_{12} = 0$, $x_{13} = 1$, $x_{21} = 1$, $x_{22} = 0$, $x_{23} = 0$, $x_{31} = 0$, $x_{32} = 1$ e $x_{33} = 0$ para minimizar o tempo de *setup*, que são os pontos ótimos, teve como resultado o número 12, que é o menor valor que o problema de Programação Inteira conseguiu assumir.

Conclusões

Este trabalho pôde apresentar um problema comum do cotidiano de laminadores de produtos siderúrgicos longos que é o processo de câmbio da produção. Este processo quando realizado de forma arbitrária pode trazer consequências financeiras desastrosas, com perdas significativas de produção.

Através dos resultados apresentados foi possível ilustrar a importância da Programação da Produção utilizando formulações de Programação Inteira, um processo que apesar de complexo, pode ser sistematizado em conjuntos de equações e facilmente resolvido através de um software comumente disponível nas empresas.

Como trabalhos futuros espera-se a elaboração de um estudo de caso completo (*timeframe* mensal) de um laminador real de uma indústria siderúrgica brasileira do segmento de longos.

Referências

- CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N.; CAON, M. **Planejamento, promoção e controle da produção: MRP II/ERP: conceitos, uso e implementação: base para SAP, Oracle Applications e outros softwares integrados de gestão.** 5. ed. São Paulo: Atlas, 2011.
- FERNANDES, F. C. F.; FILHO, M. G.. **Planejamento e controle da produção dos Fundamentos ao essencial.** São Paulo: Atlas, 2010.
- FUCHIGAMI, H. Y. **Técnicas de programação de operações em máquinas.** Versão 2, 2010.
- GALVÃO, F. M.. **Aplicação de um modelo de sequenciamento da produção para um setor de moldagem de artefatos plásticos.** Juiz de Fora, MG, 2007.
- PIMENTA, J.. **Primeiros passos para implantação da programação da produção industrial (PPCP).** <http://www.nomus.com.br/blog-industrial/2015/09/primeiros-passos-para-implantacao-da-programacao-da-producao-industrial-ppcp/#sthash.vpXc2jvE.dpuf>.
- PINEDO, M. L. **Scheduling - Theory, Algorithms, and Systems.** Fourth Edition. Springer, 2012.
- RIZZO, E. M. Da S.. **Processos de laminação dos aços: uma introdução.** São Paulo, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.
- ROJAS, A.. **Resolvendo problemas de programação linear com o ms Solver.** Mestrando PET/COPPE/UFRJ. Cadernos do IME: Série Informática: Vol. 13, 2002.
- SILVIA, C. C.. **Excel 2013 avançado.** Santa cruz do Rio Pardo, SP: Editora Viena, 2015.
- TUBINO, D. F. **Planejamento e controle da produção.** São Paulo: Atlas, 2007.
- YANASSE, H. H. et al. **Pesquisa Operacional.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

Impactos de ferrovias em áreas urbanas: estudo de caso em Catalão – GO

Natália Cristina de Araújo¹
Thaynara Silva Rabelo²

Marília Gabriela Alencar
de Morais³

Resumo: O objetivo desse trabalho é realizar um estudo de caso avaliando os impactos provocados pela passagem da ferrovia na área urbana de Catalão–GO. Para tanto, efetuou-se a caracterização de cada cruzamento apontando aqueles mais críticos quanto à segurança por estarem próximos a curvas da via férrea. Foram coletados dados referentes ao ruído e impacto da vibração e, junto às imobiliárias, avaliada a desvalorização de imóveis no trecho. Concluiu-se que são 18 os cruzamentos rodoferroviários, dos quais metade é potencialmente crítico. Os valores de ruídos sonoros estão acima do normatizado e, somados às vibrações geradas, causam a desvalorização de imóveis adjacentes aos trilhos na ordem de 20 a 30% do valor de venda se fossem situados distantes da ferrovia. As melhorias para aumentar a segurança no trecho são relativamente simples: renovação da pintura e manutenção dos dispositivos de sinalização; manutenção dos trilhos e vias; e limpeza periódica na região.

Palavras-chave: Ferrovia. Impactos ambientais. Passagem de nível.

-
- 1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: natalia_cristinaraujo@hotmail.com. Discente do Curso de Engenharia Civil.
 - 2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: thaynarasilvarabelo@hotmail.com. Discente do Curso de Engenharia Civil.
 - 3 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharia. Contato: mariliagabriela_am@hotmail.com. Docente do Curso de Engenharia Civil.

Introdução

No século XIX, o cenário mundial passava por um problema primordial: a falta de meios de deslocamento rápidos e eficazes. A expansão das estradas de ferro surgiu como uma solução, se tornando uma revolução para o transporte de passageiros e cargas (BORGES, 2011).

Nos meados desse mesmo século, quando os trilhos começavam a prosperar em países desenvolvidos, as ferrovias começaram a despertar interesse no governo brasileiro, pois, com a expansão da economia exportadora de café no sudeste do país, era necessária uma infraestrutura de transporte eficaz, criando meios eficientes para o escoamento da produção (THOMÉ, 1983).

A chegada das estradas de ferro potencializou o crescimento econômico das regiões por onde passavam. Inclusive, por este motivo, muitas cidades surgiram ao longo das vias construídas (BORGES, 1990). No entanto, ao atravessar as cidades, as ferrovias trazem algumas desvantagens como, por exemplo, prejuízos quanto à fluidez do trânsito, maior risco de acidentes e possível desvalorização imobiliária (NASCIMENTO, 2003).

Dentre outros impactos causados, também podem ser citados os danos ambientais, como a poluição sonora, através do barulho emitido pela buzina do trem e pela movimentação da carga sobre os trilhos; do ar, devido à poeira da carga transportada e das cargas que caem nos trilhos; e vibrações decorrentes da presença da linha férrea, que trazem consequências como danos à estrutura das construções adjacentes aos trilhos (SIMONELLI; AZEVEDO, 2009).

Em Goiás, a implantação de ferrovias foi realizada de forma lenta, mas, apesar das poucas linhas no estado, houve o desenvolvimento de uma economia agrária e cidades como Catalão, Ipameri e Pires do Rio puderam se desenvolver e se tornarem economicamente competitivas (RODRIGUEZ, 2011). Porém, junto ao progresso trazido pelas ferrovias surgiram efeitos na dinâmica local.

É neste contexto que se insere a presente pesquisa, na qual se pretende abordar as consequências provocadas pela passagem da estrada de ferro na área urbana no município de Catalão, Goiás. Para isso, analisou-se o trecho que contempla a Ferrovia Centro-Atlântica (FCA) efetuando o levantamento e caracterização de cada cruzamento existente e apontando aqueles mais críticos quanto à segurança baseado na distância em relação a curva da via férrea. Foram coletados, a partir de aplicativos de celular e contato com a Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Catalão (SEMMAC), dados referentes ao ruído sonoro e impacto da vibração provenientes da passagem do trem de ferro e, junto às imobiliárias, avaliada a possível desvalorização de imóveis. Por fim, foram propostas alternativas para mitigar e solucionar os impactos levantados.

1 Contextualização do tema

O transporte de cargas possui cinco modos: rodoviário, ferroviário, aéreo, aquaviário e dutoviário; sendo que cada um apresenta suas particularidades, isto é, vantagens e desvantagens, que o tornam mais ou menos apropriado para cada produto e processo logístico.

No modo ferroviário, o transporte é realizado sobre trilhos de ferro e tem como principal característica o volume de carga, geralmente a longas distâncias. A maior dificuldade é a sua baixa flexibilidade, necessitando de outro modo para a mercadoria chegar à porta do consumidor. Entre suas vantagens podem ser citadas, ainda, a alta eficiência energética, baixo custo de transporte e manutenção e maior segurança, porém o tráfego é limitado aos trilhos de ferro e o custo de implantação é elevado (OLIVEIRA, 2012).

O governo brasileiro mostrou interesse pela construção de ferrovias na primeira metade do século XIX, no período entre 1840 e 1889. Nessa fase, as ferrovias surgiram como uma alternativa para o escoamento da produção de café (BORGES, 1990) e foram responsáveis por um grande crescimento econômico, possibilitando a ampliação e surgimento de cidades (FICI, 2007).

O sistema ferroviário ainda padece com a falta de tecnologia, o que impede que ele seja competitivo em relação a outros modos (AZEREDO, 2004). Entretanto, o Brasil tem passado por um momento de retomada no transporte de cargas, apesar da pouca extensão de trilhos quando comparado a outros países, sendo o sistema ferroviário brasileiro responsável por 25% de toda a carga transportada no país. Contudo, o governo planeja investir para que a participação deste modo seja de 32% até o ano 2020 (DNIT, 2015).

A chegada das estradas de ferro gerou desenvolvimento econômico e, com isso, muitas cidades cresceram em seu entorno, o que justifica as ferrovias que ainda hoje atravessam os centros urbanos de cidades no país. Neste contexto surge a chamada passagem de nível, isto é, o cruzamento entre uma via rodoviária/urbana e uma linha férrea que se situam na mesma altura (nível).

O Brasil possui cerca de 12.400 passagens de nível, sendo 2.503 consideradas críticas pelas empresas que as operam. Deste valor, 134 foram destacadas como prioridades, uma vez que além das colisões e atropelamentos, nesses locais os trens são forçados a reduzir sua velocidade, contribuindo para a redução da competitividade do transporte ferroviário (CARMO, 2006). Por esse motivo, Tomazela (2013) relata que no mínimo 20 cidades no interior do estado de São Paulo enviaram ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) pedidos de remoção dos trilhos das áreas urbanas com o intuito de eliminar os riscos de acidentes nas áreas densamente povoadas.

Muitas cidades se dispõem a remover as ferrovias do seu interior com a justificativa de que estas causam transtornos e oferecem perigo aos habitantes. Porém, para uma obra desse porte acontecer é necessário, além de mobilização, grande investimento (Braga, 2002). Por isso, apesar de serem propostas discussões e questionamentos do papel que a ferrovia exerce em áreas urbanas, poucas são as proposições que se tornam realidade. Empreendimentos ferroviários que englobam trens, metrô e bondes consomem altas quantias de dinheiro, tempo para elaboração dos projetos e incertezas, motivos pelo qual frequentemente são abandonados. No âmbito municipal, não há prefeitura que se atraia pela complexidade e os riscos que uma obra desse porte acarreta, agravado pelo atual endividamento e falta de técnicos, que são grandes obstáculos de todo o processo (LUZ, 2006).

2 Metodologia

Inicialmente, realizou-se um levantamento de todas as passagens de nível no perímetro urbano de Catalão. Esses cruzamentos foram enumerados a partir do auxílio da ferramenta Google Earth ®. Definiu-se um ponto zero a partir do qual foram pontuados os cruzamentos na cidade, totalizando 18 unidades. A listagem foi encerrada no Distrito Mineral Industrial de Catalão (DIMIC), considerado uma área industrial, sendo contabilizados, portanto, apenas aqueles localizados em centro urbano.

Também a partir do Google Earth ® e de visitas *in loco* foi registrada a existência de curvas nos trechos de ferrovia próximos aos cruzamentos. Além disso, foram caracterizadas todas as passagens de nível, assim como verificada a existência de dispositivos de proteção e sinalização, presença de lixo, situação das calçadas e vegetação existente no local.

A partir do levantamento de dados, foi feita uma análise superficial do projeto geométrico por meio da distância entre as curvas horizontais circulares da via férrea e os cruzamentos próximos, apontando aqueles potencialmente perigosos, devido à falta de visibilidade, para os dois sentidos de circulação da composição. Para isso, novamente com o auxílio do Google Earth ®, foram identificadas as curvas próximas a cada cruzamento sendo suas imagens exportadas para o *software* AutoCad ®, no qual foi desenhado um círculo sobre a curva, obtendo, assim, a distância do final da curva ao início do cruzamento, bem como o próprio raio da curva, como apresentado na Figura 19.1.

Dessa forma foi possível calcular o tempo necessário para que a locomotiva alcance o início do cruzamento (t), sendo, então, definida a distância a partir da qual a composição se torna visível ao condutor parado no cruzamento (d). Essa medida foi obtida traçando uma linha reta do ponto de parada obrigatório em direção a curva desviando de obstáculos visíveis na imagem. O ponto de encontro

dessa reta com a via férrea foi definido como a posição na qual o condutor avista o trem, sendo a distância percorrida até o cruzamento (d) o valor usado para determinar o tempo disponível para travessia desse motorista (t). Este, por sua vez, foi obtido pela razão entre a distância percorrida (d) e a velocidade média que o trem de ferro percorre o perímetro urbano de Catalão, informação obtida pela empresa que administra o trecho (15 a 30 km/h), sendo empregado o valor mais crítico.



Figura 19.1 Exemplo de cálculo da distância da curva ao cruzamento e valor do raio.

Fonte: Adaptado de GOOGLE EARTH (2016).

A fim de obter dados que quantifiquem a intensidade dos ruídos sonoros e o impacto da vibração no meio urbano foi realizado um levantamento das distâncias entre a linha férrea e as edificações mais próximas, sendo feitas medições manuais utilizando trena de 30,00 metros (m). Com a coleta desses dados foram obtidas as distâncias das faixas *non aedificandi*, que compõem a chamada faixa de domínio, ao longo das margens da linha férrea e definidos os três pontos nos quais foram realizadas as mensurações: mais distante, com 21,38 m (Cruzamento 9); mais próximo da linha do trem, com 10,36 m (Cruzamento 17) e um valor intermediário, com 15,00 m (Cruzamento 07).

A mensuração do ruído ambiental foi feita a partir de um aplicativo gratuito de celular nomeado Decibel 10th®, que gera valores do ruído sonoro, em dB, em relação ao tempo e os envia por e-mail. Posteriormente, os maiores valores foram comparados às regulamentações da NBR 10.151: “Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento”. Para a medição da vibração foi utilizado o aplicativo gratuito de celular Vibrometer®, que utiliza os sensores do próprio aparelho para medir a vibração. Foram solicitados dados a SEMMAC de forma a complementar a mensuração sobre o ruído e vibração provenientes do trem de ferro.

Ao final, buscando levantar dados que quantifiquem a possível desvalorização dos imóveis lindeiros à via férrea, foram realizadas visitas a quatro imobiliárias em Catalão, nas quais foram entrevistados corretores de imóveis responsáveis pelo ramo de vendas e/ou aluguéis de propriedades na região de interesse.

3 Discussão e Resultados

3.1 Caracterização dos cruzamentos

Foram contabilizadas 18 passagens de nível existentes na área urbana do município de Catalão, conforme apresentado na Figura 19.2. O trecho total da linha férrea que cruza a cidade possui, entre o Ponto 0 e o Cruzamento 18, uma extensão de aproximadamente 7,3 km, sendo a maior distância aquela entre os Cruzamentos 02 e 03 (1.049,90 m) e a menor entre os Cruzamentos 13 e 14 (46,70 m).

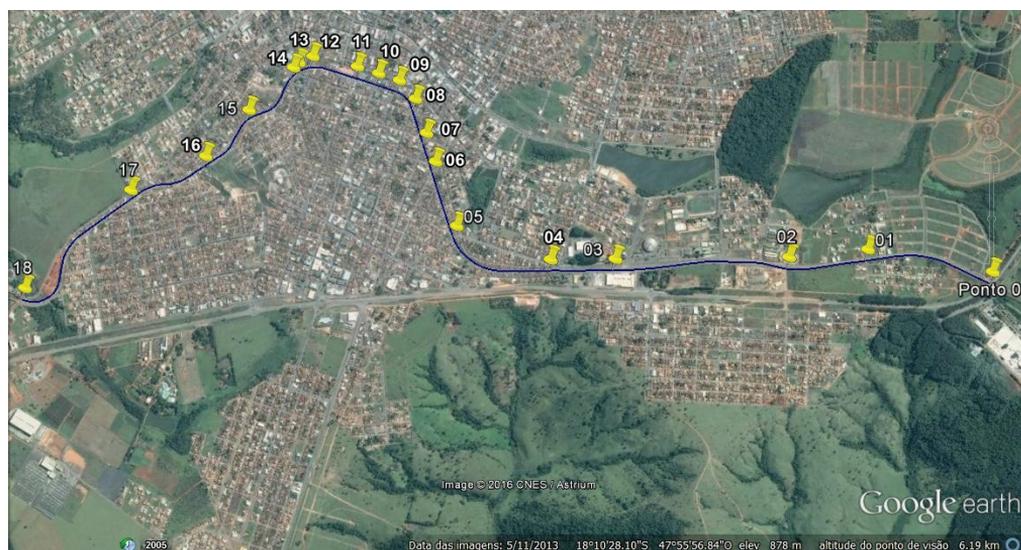


Figura 19.2 Passagens de nível contabilizadas na área urbana de Catalão.

Fonte: Adaptado de GOOGLE EARTH (2016).

Na Tabela 1 é apresentado o resumo das características dos cruzamentos analisados. Em relação ao asfalto e calçadas dos cruzamentos, percebe-se que principalmente na região central as condições são boas, não apresentando buracos nem desgastes significativos. Já os cruzamentos situados em pontos mais periféricos apresentaram pior estado de conservação, constatando que nas regiões mais centrais (áreas comerciais) a manutenção é realizada com maior frequência.

Como exceção, o Cruzamento 18, apesar de estar afastado do bairro Centro, também possui bom estado de conservação, o que pode ser justificado por se tratar de uma importante rota para o DIMIC, região de importância econômica para Catalão. Entre esses cruzamentos, naqueles nos quais há um fluxo frequente de veículos pesados, percebeu-se um maior desgaste das vias.

Nota-se também que a presença de lixo foi constatada em todos os cruzamentos, porém de tipos e quantidades diferentes. Nos cruzamentos do bairro Centro e nos próximos a ele, foi detectada menor quantidade em relação aos demais, sendo em sua maioria embalagens plásticas e papel. Já nos outros cruzamentos, o lixo se encontrava em maior quantidade e de tipos variados, como destroços de móveis.

A sinalização ferroviária dos cruzamentos varia, principalmente, quanto ao estado de conservação sendo que mesmo aquelas situadas em regiões com maior fluxo de veículos apresentaram desgaste, como no Cruzamento 07, situado no bairro Centro. Os dispositivos de proteção ferroviária implantados nos cruzamentos são, em sua maioria, do tipo 1b (proteção simples com sinalização de advertência), exceto nos Cruzamentos 09 e 10, que são do tipo 3b (sinais luminosos com controle manual). Nos Cruzamentos 05 a 13 (situados no setor central) e Cruzamento 17 (importante acesso a bairros populosos), foi adicionado ao dispositivo de sinalização do tipo 1b o sinal luminoso. Os modelos de sinalização citados estão apresentados na Figura 19.3.

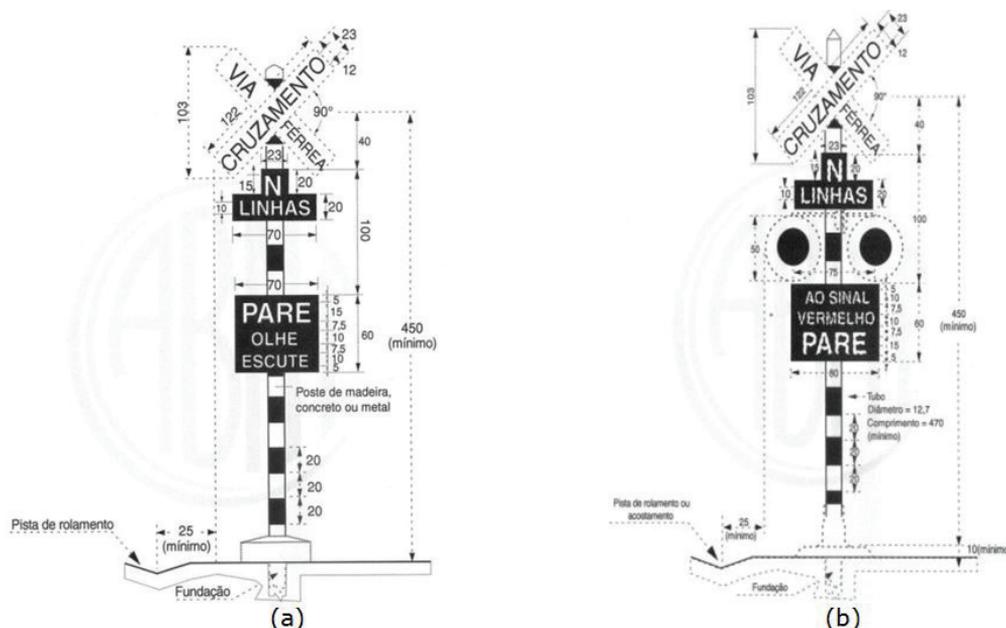


Figura 19.3 Equipamentos de proteção ferroviária tipo 1b (a) e 3b (b) com dimensões em centímetros.

Fonte: ABNT (2011).

Quando comparado aos cruzamentos que possuem sinal luminoso, o Cruzamento 04 apresenta características semelhantes de tráfego (maior volume de veículos leves e caminhões), mas seus dispositivos de sinalização são mais simples. Assim, buscando aumentar a atenção do condutor e, conseqüentemente, a segurança no cruzamento, conclui-se que a implantação do sinal luminoso seria uma eficiente alternativa.

A Placa A-41, Cruz de Santo André, apresentada na Figura 19.4(a), e a placa A-17, Pista Irregular, na Figura 19.4(b), foram encontradas na maioria dos cruzamentos, sendo que no primeiro caso foi observado o símbolo inscrito no pavimento em diversos pontos.

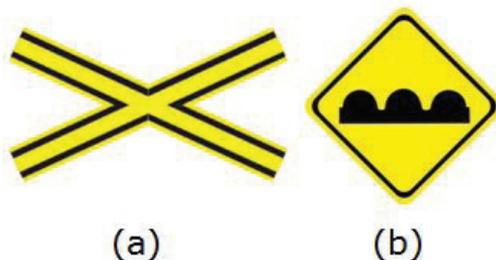


Figura 19.4 Placa A-41, Cruz de Santo André (a), e Placa A-17, Pista Irregular (b).

Fonte: ABNT (2011).

De modo geral, pode-se dizer que os cruzamentos críticos foram o Cruzamento 02, no aspecto de grande volume de tráfego de veículos pesados e degradação da via; o Cruzamento 09, em relação ao tráfego intenso de pedestres e veículos leves; e os Cruzamentos 15 e 16 quanto à falta de limpeza urbana.

Tabela 19.1 Resumo das características das passagens de nível na área urbana de Catalão.

Cruzamento	TRÁFEGO INTENSO				MÁS CONDIÇÕES				DISPOSITIVOS DE SINALIZAÇÃO				
	Veículos leves	Caminhões	Ônibus	Pedestres	Asfalto	Calçadas	Vegetação	Lixo	Sinalização	Tipo	Sinal luminoso	Cruz Santo André	Placa A-17
01		X			X		X	X		1b			
02		X			X		X	X		1b			X
03	X			X				X		1b		X	X
04		X			X			X	X	1b			X
05								X	X	1b	X	X	X
06								X	X	1b	X	X	X
07								X	X	1b	X	X	X
08	X							X	X	1b	X	X	X
09	X			X				X		1b e 3b	X	X	X
10								X		1b e 3b	X	X	X
11								X		1b	X	X	
12								X	X	1b	X	X	
13								X	X	1b	X	X	X
14								X		1b		X	
15					X	X		X	X	1b			
16					X	X		X	X	1b		X	
17	X				X	X		X		1b	X	X	X
18			X					X		1b		X	X

Fonte: Autoria própria.

É possível concluir que existe a preocupação por parte da concessionária com as passagens de nível no trecho urbano analisado. Contudo, são necessárias manutenções nas estruturas físicas dos equipamentos de sinalização atuais, bem como a instalação, em alguns casos, de dispositivos adicionais de forma a aumentar a segurança no local, além da realização de limpeza periódica nas vias, principalmente nas áreas dos trilhos.

3.2 Análise da existência de curvas

Além de expor os condutores a riscos, as curvas na via férrea oferecem perigos também aos pedestres. Segundo Prado (2003), um idoso caminha com velocidade média de 0,4 metros por segundo (m/s). Dessa forma, considerando uma largura média de 7,00 m, seriam necessários no mínimo 18 s para realizar a travessia dos cruzamentos avaliados com segurança. Esse tempo, por ser obtido a partir da caminhada de um idoso, seria a situação mais crítica entre pedestres.

Em relação à travessia de veículos no cruzamento, é necessário um período de tempo mínimo para que este, partindo do tempo zero (parado) possa cruzar a via férrea com segurança, o que permite uma comparação com valores estipulados para estudos de semáforos, sendo os valores usualmente utilizados aqueles entre 10 e 20 s (DENATRAN, 2014). Assim, serão esses os referenciais empregados partindo do princípio que, da mesma forma que nos semáforos, o veículo que deseja atravessar o cruzamento férreo deve, na pior das hipóteses, parar e reiniciar o movimento a fim de fazer a travessia.

A análise da geometria foi realizada somente nos Cruzamentos 05, 08, 09, 12, 13, 14, 15 e 18, os quais estão localizados próximos a curvas horizontais circulares na via férrea, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 19.2 Resumo dos cruzamentos críticos no trecho ferroviário de Catalão.

Cruzamento	Condutor visualiza a composição		Travessia do condutor	Travessia do pedestre
	Distância (m)	Tempo (s)		
05	113,70	13	OK	X
08	44,00	5	X	X
09	58,00	7	X	X
12	72,00	8	X	X
13	38,00	4	X	X

Continua

Tabela 19.2 Resumo dos cruzamentos críticos no trecho ferroviário de Catalão. (Continuação)

Cruza- mento	Condutor visualiza a composição		Travessia do condutor	Travessia do pedestre
	Distância (m)	Tempo (s)		
14	39,00	4	X	X
15	86,00	10	OK	X
18	205,00	24	OK	OK

Fonte: Autoria própria.

Após a análise, percebe-se que a existência de curvas próximas aos cruzamentos os torna potencialmente críticos, oferecendo riscos à segurança dos condutores dos veículos, locomotivas e pedestres. Os cruzamentos analisados anteriormente, exceto o Cruzamento 18, apresentaram tempos restritos para que a locomotiva, após ser avistada pelo condutor, alcance a passagem de nível. O menor tempo foi de 4 s, nos Cruzamentos 13 e 14, sendo que os demais não ultrapassaram o tempo de 13 s. Assim, podem ser considerados críticos uma vez que são menores ou muito próximos ao limite inferior (10 s) estipulado por Denatran (2014) para que um veículo faça a travessia com segurança.

No caso do Cruzamento 18, o tempo encontrado foi de 24 s, período significativamente maior que os demais; no entanto, poderá se tornar potencialmente perigoso quando o bairro local estiver totalmente ocupado, pois as novas edificações se tornarão barreiras visuais ao condutor.

Em todas as passagens de nível, exceto do Cruzamento 18, o tempo disponível para travessia, no caso de pedestres, é insuficiente. Nos Cruzamentos 13 e 14, os mais críticos, um idoso teria menos de um quarto do período necessário para fazê-lo.

Com isso, nota-se a importância do acionamento da buzina ser realizado a distâncias adequadas dos cruzamentos, além da periodicidade de realização de podas nas árvores próximas à via férrea, o que melhora visibilidade; e de manutenção adequada da sinalização das passagens de nível.

3.3 Análise da poluição sonora e vibração

Os valores de ruídos sonoros obtidos estão apresentados na Tabela 4, sendo que, entre eles, o maior resultado dimensionado ocorreu no Cruzamento 17, o mais próximo entre os três avaliados, o que era esperado, uma vez que a distância do eixo da ferrovia ao receptor influencia no nível sonoro obtido, sendo que, quanto mais distante da locomotiva, menor o nível de ruído registrado.

A área a que cada cruzamento pertence foi classificada segundo a NBR 10.151, que vigora quando o município não possui lei própria. Na Tabela 4 está a classificação, com os seus respectivos índices aceitáveis, juntamente com o maior e menor valores de nível sonoro registrados no levantamento realizado.

Tabela 19.3 Tipo de área na qual a passagem de nível avaliada neste quesito se enquadra e valores de ruídos sonoros, conforme a NBR 10.151, e valores obtidos em campo.

Cruza- mento	Tipos de áreas	Nível sonoro (dB)		
		Aceitável*	Maior**	Menor**
17	Área mista, predominantemente residencial	55/50	99,1	80,0
07	Área mista, predominantemente residencial	55/50	98,4	83,6
09	Área mista, com vocação comercial administrativa	60/55	95,7	79,8

* Valores diurno/noturno conforme NBR10.151.

** Valores obtidos na presente pesquisa.

Fonte: Autoria própria.

Verificou-se que tanto os maiores quanto os menores valores obtidos estão acima dos limites especificados pelas normativas existentes, mesmo nos Cruzamentos 07 e 09, os quais possuem faixa *non aedificandi* dentro da exigência legal, igual a 15,00 m. No Cruzamento 17, o maior valor de nível sonoro está 80% acima do permitido, já o menor está 45,5% acima. No caso do Cruzamento 07, que pertence ao mesmo tipo de área que o anterior, os valores são próximos aos do Cruzamento 17, obtendo uma porcentagem de 78,9% para o maior nível sonoro e 52% para o menor. O Cruzamento 09, por pertencer a uma área mista, com vocação comercial administrativa, permite um nível sonoro maior, no entanto os níveis mensurados também permaneceram acima do estabelecido por norma, sendo 59,5% e 33% excedidos do maior e do menor níveis de ruído, respectivamente.

Para aferição dos dados de vibração, o aplicativo não detectou valores devido à falta de precisão do mesmo. Contudo, apesar de não ter sido detectada pelo dispositivo, a vibração pôde ser percebida pela observação do comportamento da estrutura das construções durante a passagem do trem, como o barulho das esquadrias.

Segundo o Relatório de Fiscalização 014/2014 da SEMMAC, alguns moradores de construções lindeiras à via férrea afirmaram que a passagem do trem provoca rachaduras nas paredes e danos no telhado. Outros relataram que percebem as telhas vibrando e que, inclusive, são quebradas, necessitando de reposição.

Por outro lado, outros moradores não relataram a presença de trincas ou rachaduras em suas residências. Contudo, apesar dos relatos, a SEMMAC constatou que a estrutura das casas que possuem rachaduras e trincas é antiga, logo, esses danos podem ser devido ao tempo e falta de manutenção.

3.4 Análise do valor imobiliário

Com as visitas feitas às imobiliárias, foi possível perceber que ocorre desvalorização dos imóveis por serem situados próximos aos trilhos de ferro. Dentre os principais motivos estão o barulho, proveniente da buzina do trem, e possíveis problemas relacionados à vibração, como fissuras e trincas nas residências. O valor da desvalorização foi consensual entre os corretores entrevistados, ocorrendo na ordem de 20% a 30% do valor de venda do imóvel caso este fosse situado distante da ferrovia.

Considerações finais

São 18 cruzamentos rodoferroviários no trecho urbano, dos quais metade (Cruzamentos 02, 05, 08, 09, 12, 13, 14, 15 e 17) foram considerados potencialmente perigosos devido a existência de curvas na via férrea.

Dos impactos analisados, os ruídos sonoros se demonstraram preocupantes, estando em valores acima do normatizado. Além disso, apesar de não ter sido quantificada a vibração, houve relatos de danos às edificações por parte dos moradores da região. Devido a esses fatores, os imóveis próximos a ferrovia no trecho urbano sofrem desvalorização na ordem de 20 a 30% em relação a sua venda se estes fossem localizados em outra região.

Depois de analisados todos os impactos provenientes da passagem do trem na área urbana, foi concluído que é possível realizar mudanças em diversos aspectos, melhorando a qualidade de vida da população da região próxima aos trilhos. Uma primeira ação seria a limpeza das áreas e a manutenção das vias adjacentes a ferrovia.

A melhoria na sinalização dos cruzamentos é necessária em vários locais, pois alguns apresentam sinais luminosos quebrados, desgastes na pintura das placas e do pavimento. Além disso, deve-se considerar a instalação de sinal luminoso em todas as passagens de nível, a fim de reforçar a segurança, e cancelas nos cruzamentos mais críticos (Cruzamentos 08, 09 e 17).

É necessária, também, a intensificação de campanhas que exponham recomendações que garantam uma convivência harmônica entre comunidade e ferrovia, entre elas: respeitar a sinalização do trem, ficar atento ao ouvir a buzina, prestar atenção nos cruzamentos e não permanecer sobre a linha férrea.

Refletindo o cenário semelhante em outras cidades do país, uma possível solução (de forma definitiva) para os impactos provenientes do trem de ferro na área urbana, principalmente em relação à segurança no trânsito, seria a mudança do traçado do trecho ferroviário de Catalão, alocando-o paralelamente a BR-050, rodovia que margeia a cidade. Na área desativada poderiam ser estudadas mudanças positivas na paisagem, como parques e calçadões. O novo traçado teria cerca de 6,0 km (o atual possui 7,3 km) e seria, além de mais curto, mais retilíneo (Figura 19.5), o que possibilitaria uma velocidade operacional maior das composições e reduziria os custos adicionais existentes devido à manutenção das passagens de nível.

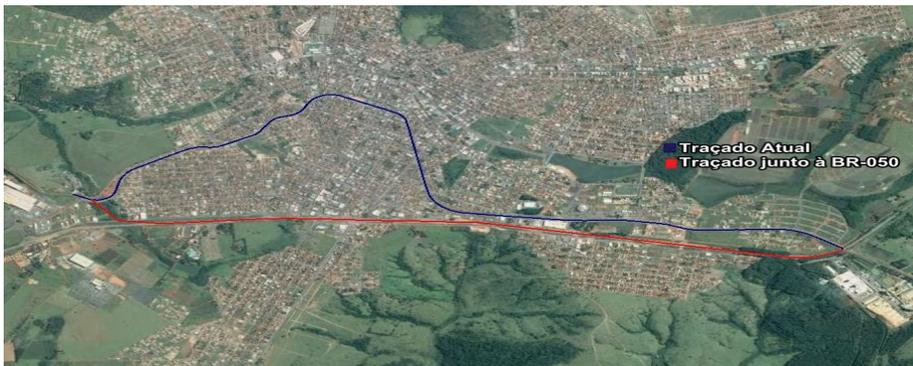


Figura 19.5 Traçado atual e traçado junto à BR-050 do trecho ferroviário de Catalão.

Fonte: Adaptado de GOOGLE EARTH (2016).

No entanto, uma construção desse porte necessita de grande mobilização e alto investimento: França (2016) cita que custa R\$ 4.800.000,00 a construção de um quilômetro de ferrovia. Contudo, a verificação da real viabilidade nos âmbitos ambiental, técnico, operacional e financeiro dessa sugestão exige estudos aprofundados, principalmente considerando que existe um projeto de duplicação da rodovia em questão, o que poderia diluir os custos de construção da via férrea.

Referências

AZEREDO, L. C. L. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Investimento em Infraestrutura no Plano Plurianual (PPA) 2004-2007 – Uma Visão Geral**. Brasília, 2004. 13 p. Texto para Discussão 1024.

BORGES, B. G. O despertar dos dormentes. In: **A Era Ferroviária**, Goiânia, Ceograf – UFG, 1990, cap. 1, p. 1-50.

BORGES, B. G. Dossiê Ferrovias: Ferrovias e Modernidade. *Revista UFG*, v. 13, n. 11, 2011, p. 27-36.

BRAGA, M. A. A polêmica dos trens em áreas urbanas. *A Notícia*, Joinville, Geral, p. A10, 7 de jul. 2002.

CARMO, R. C. **Procedimento para avaliação de passagem de nível**. 2006. 84 f. Monografia (Especialização em Transporte Ferroviário de Carga) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. 2006. Disponível em: <<http://transportes.ime.eb.br/etfc/monografias/MON009.pdf>>. Acesso em: 10 de fev. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO - DENATRAN. **Manual brasileiro de sinalização de trânsito**. v. 5. Brasília DF: DENATRAN, 2014. 299 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES - DNIT. 2015. **Histórico do transporte ferroviário**. Disponível em: <<http://www1.dnit.gov.br/ferrovias/historico.asp>>. Acesso em: 03 dez. 2015.

FICI, R. P. **As ferrovias brasileiras e a expansão recente para o centro-oeste**. 2007. 339 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) Pós Graduação em Geografia Humana – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.

FRANÇA, V. Malha ferroviária produtiva do Brasil é a mesma do Império. *O ESTADÃO*, 06 fevereiro 2016. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/geral,malha-ferroviaria-produtiva-do-brasil-e-a-mesma-do-imperio,153959689>>. Acesso em: 17 ago. 2016.

LUZ, L. F. **Os trilhos nas áreas urbanas: conflitos, desafios e oportunidades em dez cidades paulistas**. 2006. 285f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006. Disponível em: <[HTTP://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8136/tde-07082006-211613/pt-br.php](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8136/tde-07082006-211613/pt-br.php)>. Acesso em: 05 de fev. 2016.

NASCIMENTO, D. **Ecossistema da Modernidade - Ferrovia e Cidade no Sul de Santa Catarina**. Locus (Juiz de Fora), Juiz de Fora – MG, v. 9, p. 117-129, 2003.

OLIVEIRA, C. A. **Infraestrutura de transportes: Análise dos principais modais no Estado de São Paulo**. *Revista Formação Online*, v. 1, n.19, p. 124-150, jan./jun., 2012.

- PRADO, A. R. A. **Acessibilidade e Desenho Universal**. Versão atualizada do texto publicado nos **anais do 3º Congresso Paulista de Geriatria e Gerontologia – GERP’ 2003**, Sociedade Brasileira de Geriatria e Gerontologia – SBGG/SP, Santos, 2003.
- RODRIGUEZ, H. S. **Dossiê Ferrovias: A importância da estrada de ferro para o estado de Goiás**. **Revista UFG**, v. 13, n. 11, 2011, p. 69-74.
- SECRETARIA MUNICIPAL DE MEIO AMBIENTE DE CATALÃO – SEMMAC. Departamento de Fiscalização. **Relatório**. Catalão, 2014. p. 9.
- SIMONELLI, C. H; AZEVEDO, J. A. **Percepção de moradores de área urbana aos impactos da operação ferroviária**, Maringá – PR, 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Juliana_Antunes_De_Azevedo/publication/265913351_Percepcao_de_moradores_de_area_urbana_aos_impactos_da_operacao_ferroviria/links/54611a880cf2c1a63bff7d7b.pdf>. Acesso em: 14 de dez.2015.
- THOMÉ, N. **Trem de ferro: história da ferrovia no contestado**. 2ª ed. Florianópolis: Lunardelli, 1983. p. 204.
- TOMAZELA, J. M. **Ao menos 20 cidades de SP pedem retiradas de trilhos. Estadão**. 2013. Disponível em:<<http://www.estadao.com.br/noticias/geral,ao-menos-20-cidades-de-sp-pedem-retirada-de-trilhos,1100522>>. Acesso em: 01 de jan. 2016.

Parte 3
Comportamento mecânico de
materiais e estruturas

Proposta de superfícies de plastificação para materiais dúcteis porosos dentro de uma abordagem multi-escala

Wanderson Ferreira dos Santos¹

José Julio de Cerqueira Pituba²

Resumo: O presente trabalho trata da simulação numérica do comportamento de microestruturas de materiais porosos utilizando uma abordagem multi-escala. O objetivo principal consiste em propor superfícies de plastificação de metais dúcteis porosos considerando frações diferentes de vazios, bem como estudar a influência da distribuição destes vazios em sua microestrutura. As análises são realizadas a partir do conceito de Elemento de Volume Representativo (EVR), no qual podem ser considerados aspectos relacionados à heterogeneidade do material com o emprego de modelos constitutivos simples, como o modelo de von Mises, o qual é empregado na simulação do comportamento da matriz. Este estudo é relevante, uma vez que as superfícies de plastificação foram pouco exploradas para meios heterogêneos, sendo, portanto, necessários os estudos para obtenção de resultados mais consistentes. Os resultados apresentados atestam a qualidade da modelagem proposta com o emprego de modelos constitutivos simples.

Palavras-chave: Modelagem Multi-escala. Metais Porosos. Plasticidade.

Introdução

O conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais é um aspecto de suma importância para o meio acadêmico, especialmente na área de Ciência dos Materiais.

- 1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias, Laboratório de Mecânica Computacional. Contato: wanderson.ufgeng-civil@gmail.com.
- 2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias, Laboratório de Mecânica Computacional. Contato: julio.pituba@pq.cnpq.br.

Nesse contexto, a modelagem computacional consiste em uma alternativa atraente, pois permite, através de simulações numéricas, uma maior praticidade na obtenção de resultados, inclusive substituindo diversos ensaios onerosos de laboratório. Outra vantagem está atrelada ao aumento no poder de cálculo dos computadores, o que possibilita encontrar respostas cada vez mais realísticas e com rapidez.

No âmbito da mecânica computacional, inicialmente o comportamento dos materiais era obtido basicamente por meio de modelos constitutivos macroscópicos baseados em hipóteses fenomenológicas. No entanto, conforme apresentam Lopes (2011) e Giusti (2009), os avanços tecnológicos levam a necessidade de respostas constitutivas mais realísticas, tornando limitada a utilização das teorias constitutivas fenomenológicas em determinadas situações. Isso fica evidente, por exemplo, na modelagem de materiais com uma estrutura complexa, cuja aplicação de abordagens puramente macroscópicas resulta em formulações complicadas e com um número muito elevado de variáveis a serem encontradas. Além disso, Reis (2014) também acrescenta como limitação a dificuldade em contemplar fenômenos observados no nível microestrutural, tais como: transformação de fase, condutividade térmica entre as diferentes fases, deterioração interna, início da fratura, entre outros mecanismos.

A necessidade de respostas mais precisas impulsionou os estudos voltados para as escalas inferiores e, então, surgiram as teorias multi-escala. Nesta abordagem, informações provenientes de diferentes escalas são empregadas na obtenção da resposta do material. Segundo Azizi (2011), o foco inicial é voltado para o entendimento sobre os mecanismos físicos que se desenvolvem na microestrutura do material e, posteriormente, as informações adquiridas são utilizadas para a obtenção de respostas sobre o seu comportamento macroscópico. A utilização da modelagem multi-escala em materiais com uma maior complexidade é justificada, pois permite uma definição mais detalhada de sua microestrutura e, conseqüentemente, uma análise mais minuciosa de seu comportamento. Neste caso estão incluídos os meios heterogêneos como o caso de metais dúcteis porosos, em que a presença de vazios influencia significativamente no comportamento do material formado.

Em relação aos materiais heterogêneos, pesquisas constantemente são desenvolvidas visando promover análises mais consistentes de seu comportamento. Uma área que ainda requer estudos compreende a proposta e estudo de critérios de início e evolução do processo de plastificação em meios heterogêneos com comportamento dúctil. Cabe destacar que o estabelecimento do limite superior do estado de tensão responsável por acarretar a falha do material é um aspecto de suma importância na análise do comportamento de estruturas. Nessa conjuntura, estão inseridas as superfícies de plastificação, as quais estão relacionadas à falha por escoamento, típica de materiais com um comportamento dúctil.

Um trabalho bastante conhecido na literatura sobre superfícies de plastificação de metais porosos foi o desenvolvido por Gurson (1977), que realizou seu estudo dentro de uma modelagem analítica. Outro trabalho sobre metais porosos foi o estudo realizado por Giusti et al. (2009), o qual utilizou uma abordagem multi-escala para a obtenção de resultados considerando diferentes proporções de vazios e, inclusive, realizou comparações com os resultados de Gurson (1977). Dentro desse contexto, este trabalho visa utilizar modelos constitutivos simples, dentro de uma abordagem multi-escala, para análise de materiais heterogêneos através da simulação de diferentes EVRs. Mais especificamente são realizadas simulações com a finalidade de obter superfícies de plastificação de microestruturas com diferentes proporções de vazios, além de simulações quanto à influência da forma de sua distribuição na microestrutura de materiais metálicos.

1 Modelagem do material

No que segue está uma descrição dos conceitos envolvendo a modelagem multi-escala e a modelagem constitutiva do material.

1.1 Modelagem multi-escala

Na abordagem multi-escala, cada ponto x da macroescala, representada por Ω , é tomado como sendo um EVR, o qual representa a microescala do material, denotada por Ω_μ . O EVR é caracterizado pela coordenada y no seu volume e sua fronteira definida por $\partial\Omega_\mu$, cujo símbolo de derivada parcial ∂ indica o contorno do domínio analisado. Em relação às escalas, o a microescala deve apresentar um comprimento muito inferior em comparação com a macroescala: $l \gg l_\mu$. Entretanto, é importante que EVR tenha uma dimensão suficiente para representar em termos médios a microestrutura do material. Uma representação do processo envolvendo a modelagem multi-escala é mostrada na Figura 20.1.

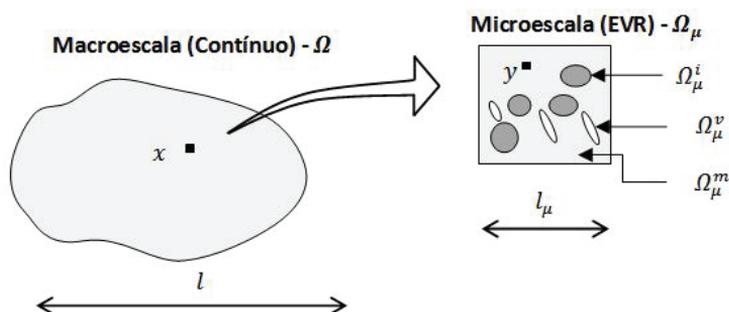


Figura 20.1 Análise multi-escala considerando duas escalas: macroescala e microescala.

Conforme a Figura 20.1, o EVR pode considerar aspectos relacionados à heterogeneidade do material como inclusões (Ω_μ^i) e/ou vazios (Ω_μ^v). Deste modo, o domínio do EVR pode ser composto pela união entre a parcela sólida Ω_μ^s e a parcela de vazios Ω_μ^v :

$$\Omega_\mu = \Omega_\mu^s \cup \Omega_\mu^v \quad (1)$$

Já o domínio da parte sólida Ω_μ^s engloba tanto a matriz Ω_μ^m quanto as inclusões Ω_μ^i :

$$\Omega_\mu^s = \Omega_\mu^m \cup \Omega_\mu^i \quad (2)$$

No que segue é explanado sobre alguns dos principais aspectos da modelagem multi-escala. Um estudo mais detalhado é apresentado em Fernandes et al. (2015) e em Santos (2016), que apresenta como princípios: (1) Equilíbrio do EVR; (2) Princípio da Macro-Homogeneidade de Hill Mandel; (3) Média volumétrica dos tensores de deformação e tensão; e (4) Pressuposto de que o espaço das flutuações de deslocamento cinematicamente admissíveis do EVR é um subespaço do espaço da mínima restrição cinemática sobre as flutuações de deslocamento compatíveis com a proposição da média volumétrica da deformação.

1.1.1 Processo de homogeneização

O processo de homogeneização consiste em uma regra da mistura ao longo do domínio do EVR. Dessa forma, os campos macroscópicos associados a macroescala são obtidos a partir da média volumétrica dos campos relacionados ao EVR. A modelagem multi-escala aqui empregada parte do pressuposto que a tensão σ em um ponto da macro-escala num determinado instante t está relacionada com a deformação acumulada ε até este instante:

$$\sigma(t) = D \varepsilon(t) \quad (3)$$

onde: $\sigma(t)$ e $\varepsilon(t)$ representam a tensão e a deformação no instante t , respectivamente; e D é o tensor constitutivo.

Dentro do conceito de média volumétrica, a deformação na macroescala $\varepsilon(x, t)$ é dada pela média das deformações na microescala $\varepsilon_\mu(y, t)$ em seu volume V_μ :

$$\varepsilon(x, t) = \frac{1}{V_\mu} \int_{\Omega_\mu} \varepsilon_\mu(y, t) dV \quad (4)$$

De forma análoga, as tensões macroscópicas são obtidas por:

$$\sigma(x, t) = \frac{1}{V_\mu} \int_{\Omega_\mu} \sigma_\mu(y, t) dV \quad (5)$$

Logo, $\sigma(x, t)$ representa a tensão macroscópica homogeneizada e $\varepsilon(x, t)$ compreende a deformação macroscópica homogeneizada. Por fim, o tensor constitutivo tangente homogeneizado $D(x, t)$ também passa pelo processo de homogeneização:

$$D(x, t) = \frac{\partial \sigma(x, t)}{\partial \varepsilon(x, t)} = \frac{1}{V_\mu} \int_{\Omega_\mu} D_\mu(y, t) dV \quad (6)$$

1.1.2 Princípio de Hill Mandel

A utilização do princípio de Hill Mandel procura estabelecer a associação entre dois domínios. Por exemplo, pode-se se dizer que a potência dos tensores no macrocontínuo é igual à potência dos tensores homogeneizados microscópicos no EVR:

$$\sigma(x, t):\varepsilon(x, t) = \frac{1}{V_\mu} \int_{\Omega_\mu} \sigma_\mu(y, t):\varepsilon_\mu(y, t) dV \quad (7)$$

A Equação (7) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\sigma(x, t):\varepsilon(x, t) = \bar{\sigma}_\mu(y, t):\bar{\varepsilon}_\mu(y, t) \quad (8)$$

em que, $\bar{\sigma}_\mu(y, t)$ e $\bar{\varepsilon}_\mu(y, t)$ representam os tensores de tensão e deformação homogeneizados na micro-escala, respectivamente. Deste modo, o processo envolvido engloba considerações energéticas e parte do pressuposto que existe de um fluxo com a mesma quantidade de energia em ambas as escalas.

1.1.3 Campo de deslocamento e flutuação dos deslocamentos

O campo de deslocamento microscópico u_μ , em função de y , pode ser decomposto de forma aditiva pelas seguintes parcelas: deslocamento de corpo rígido $u(x, t)$; deformação homogênea $\varepsilon(x, t)y$ que varia conforme a coordenada y ; e um campo de flutuação de deslocamento $\tilde{u}_\mu(y, t)$. Logo, a equação será:

$$u_\mu(y, t) = u(x, t) + \varepsilon(x, t)y + \tilde{u}_\mu(y, t) \quad (9)$$

Um melhor entendimento sobre tal decomposição pode ser verificado a partir da análise de sua representação geométrica, apresentada na Figura 20.2.

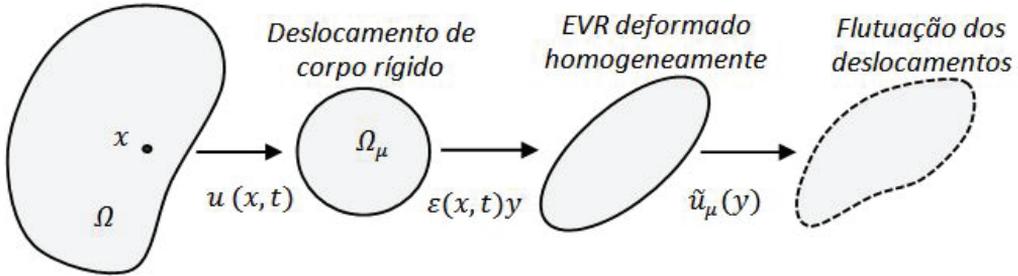


Figura 20.2 Decomposição dos campos de deslocamento microscópico (SANTOS, 2016).

Referente à Equação (9), a parcela \tilde{u}_μ é nula quando a deformação do EVR for homogênea. Caso contrário, isto é, a deformação não for constante, o termo $\tilde{u}_\mu \neq 0$. Portanto, a decomposição aditiva dos campos microscópicos estabelece como ocorre o deslocamento no contorno do EVR.

1.1.4 Modelos multi-escala

As restrições sobre os possíveis campos de deslocamentos admissíveis do EVR definem o tipo de modelo multi-escala. No que segue o modelo de Taylor ou de Deformações Homogêneas no EVR e o modelo de Flutuação Periódica no contorno do EVR são descritos.

1.1.4.1 Modelo de Taylor

No modelo de Taylor ou regra da mistura, o campo de flutuação dos deslocamentos $\tilde{u}_\mu(\mathbf{y})$ para todo \mathbf{y} do EVR é desprezado, ou seja,

$$\tilde{u}_\mu(\mathbf{y}) = 0 \quad \forall \mathbf{y} \in \Omega_\mu \quad (10)$$

Nesta análise, a deformação microscópica é considerada homogênea, sendo que os fenômenos dissipativos, em termos de energia, são desconsiderados e o modelo é fornece apenas uma resposta elástica. Este modelo é tomado como o modelo de resposta mais rígido. Contudo, a formulação de Taylor está presente em outros modelos, como no modelo de Flutuação Periódica, o que justifica sua importância para as análises.

1.1.4.2 Modelo de flutuação periódica

Neste caso, o contorno do EVR pode ser analisado como apresentando uma parte positiva Γ^+ e uma parte negativa Γ^- . Dessa forma, cada ponto y^+ no contorno do EVR apresenta um ponto correspondente y^- , com a associação de um vetor normal $N^+ = -N^-$. Um esquema ilustrativo está apresentado na Figura 20.3.

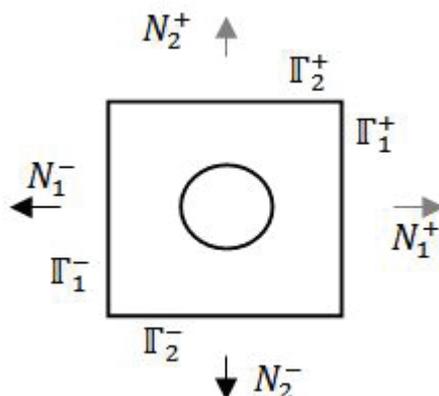


Figura 20.3 Modelo de Flutuação Periódica no contorno do EVR (REIS, 2014).

Assim, existem deslocamentos e deformações para cada ponto do EVR, sendo que a flutuação de um ponto y no contorno do EVR ocorre de maneira periódica, isto é:

$$\tilde{u}_\mu(y^+) = \tilde{u}_\mu(y^-) \quad \forall y \in \partial\Omega_\mu \quad (11)$$

Os cantos do EVR apresentam como característica flutuações nulas. Além disso, este modelo apresenta resposta mais flexível perante o modelo de Taylor.

1.2 Modelagem constitutiva do material

Na análise da microestrutura de metais dúcteis porosos são utilizados conceitos da Teoria da Plasticidade, a qual visa descrever como ocorre o processo de deformações irreversíveis na microestrutura do material. O procedimento utilizado na modelagem dos EVRs consiste numa discretização baseada no Método dos Elementos Finitos, sendo a matriz formada por elementos finitos triangulares, cujo comportamento é condicionado pelo modelo de von Mises. O processo é similar ao apresentado na Figura 20.4.

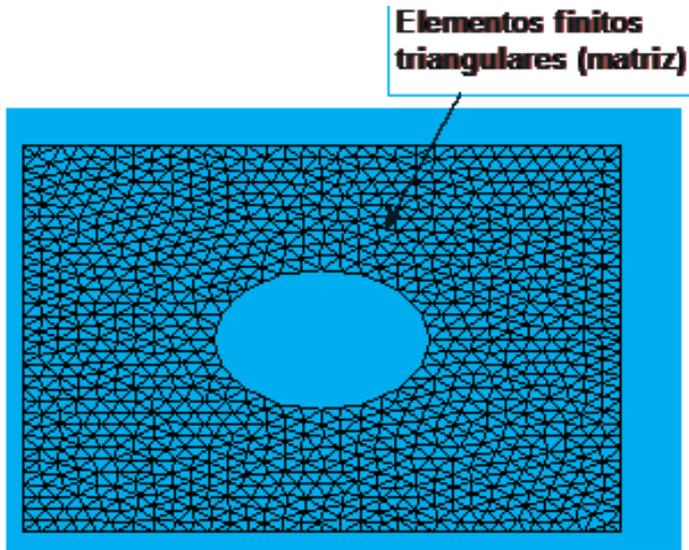


Figura 20.4 Modelagem constitutiva de microestrutura com vazio.

Em se tratando de materiais metálicos, o modelo de von Mises consiste em um critério de plasticidade amplamente empregado para descrever o processo de deformações plásticas. Como este modelo é bastante conhecido na literatura, apresenta-se aqui o equacionamento de forma bastante resumida. Maiores detalhes podem ser encontrados em Souza Neto *et al.* (2008).

O armazenamento da energia de deformação elástica em seu estado genérico pode ser decomposto de forma aditiva em uma contribuição volumétrica U_v e outra contribuição distorcional U_d . Nesse cenário, o modelo de von Mises está associado à parcela de energia distorcional ou desviadora, a qual pode ser obtida pela seguinte relação:

$$U_d = \frac{1}{G} J_2 \quad (12)$$

em que, G e J_2 compreendem, respectivamente, o módulo de elasticidade longitudinal do material e o segundo invariante de tensão desviadora.

No critério de von Mises, a produção plástica ocorre quando a invariante de tensão J_2 alcança um valor crítico, o qual pode ser representado matematicamente na forma:

$$J_2 = R(\alpha) \quad (13)$$

onde, R consiste no valor crítico e é definido como função de uma variável interna de endurecimento α .

Com base nestes conceitos, o critério de plastificação de von Mises pode ser escrito na forma:

$$\phi(\sigma) = q(\sigma) - \sigma_y \quad (14)$$

em que, σ_y é a tensão de escoamento uniaxial e $q(\sigma)$ é denotada tensão efetiva ou equivalente de von Mises.

2 Procedimentos Utilizados

Na obtenção dos resultados, foi empregado o modelo constitutivo de von Mises, dentro de uma abordagem multi-escala, para a análise do comportamento de diferentes EVRs. Cabe destacar que as simulações foram realizadas através do modelo multi-escala de Flutuação Periódica no contorno EVR. Por sua vez, as análises contemplaram o estudo de EVRs com proporções diferentes de vazios e, inclusive, com distribuição variada na matriz metálica. Em todo o processo, foram utilizados códigos computacionais para a obtenção das superfícies de plastificação.

Inicialmente, procurou-se estudar o comportamento em separado da pressão p relacionada à parte hidrostática do tensor de tensões e da tensão equivalente de von Mises q . Considerando o espaço $p' - q'$, normalizado em relação à tensão de escoamento σ_y , foram utilizadas as seguintes relações para a obtenção dos resultados:

$$p' = \frac{1}{\sigma_y} \left(\frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \right) \quad (15)$$

$$q' = \frac{1}{\sigma_y} \sqrt{\frac{3}{2} \left[\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{yy} - \sigma_{xx}}{2} \right)^2 + 2\sigma_{xy}^2 \right]} \quad (16)$$

em que: σ_{xx} representa a tensão na direção x ; σ_{yy} representa a tensão normal na direção y ; e σ_{xy} consiste na tensão de cisalhamento. Para tanto, plotou-se gráficos com q' e p' versus a relação entre o número do incremento e o somatório dos incrementos para cada EVR. Posteriormente, foi obtida uma superfície de plastificação considerando os máximos valores de p' e q' .

Nesse contexto, o estudo envolveu EVRs nas seguintes configurações: *i*) EVR com um vazio centrado correspondente a 10% de seu volume (1800 elementos triangulares e 980 nós); *ii*) EVR com 10% de vazios distribuídos em seu volume de forma aleatória (1922 elementos triangulares 1057 nós); *iii*) EVR com um vazio centrado correspondente a 20% de seu volume (1622 elementos triangulares e 907 nós); *iv*) EVR com 20% de vazios distribuídos em seu volume de forma aleatória

(1606 elementos e 914 nós). Em todos os casos, para a modelagem da matriz utilizou-se o modelo de von Mises com comportamento elasto-plástico perfeito com a tensão de escoamento de $\sigma_y = 240 \text{ MPa}$. Os valores adotados para o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson corresponderam a $E = 200 \text{ GPa}$ e $\nu = 0.3$, respectivamente. Neste caso, as análises também foram realizadas utilizando o estado plano de deformação.

Na deformação aplicada ao EVR, considerou-se a seguinte relação:

$$\varepsilon = \frac{\alpha}{750} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \sqrt{2} & 0 \\ 0 & 1 \\ \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} + \frac{\sqrt{1-\alpha^2}}{750} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & \sqrt{2} \\ \sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

em que, α corresponde a um fator de carga.

Deste modo, existem as componentes de deformação normais (ε_x e ε_y) e a componente distorcional γ_{xy} , as quais variam conforme o fator de carga. Para o fator de carga α , foram utilizados valores positivos ($\alpha = 1.0$, $\alpha = 0.7$, $\alpha = 0.3$), valores negativos ($\alpha = -1.0$, $\alpha = -0.7$ e $\alpha = -0.3$) e a situação com $\alpha = 0.0$.

3 Discussão e Resultados

No que segue estão os resultados das análises de p' e q' em separado considerando fatores de carga expansivos (Figuras 20.5, 20.6 e 20.7) e a situação com o fator de carga nulo (Figura 20.8).

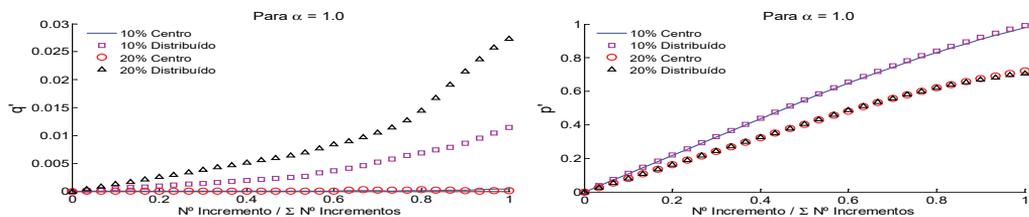


Figura 20.5 Gráficos referentes às componentes q' e p' considerando $\alpha = 1.0$.

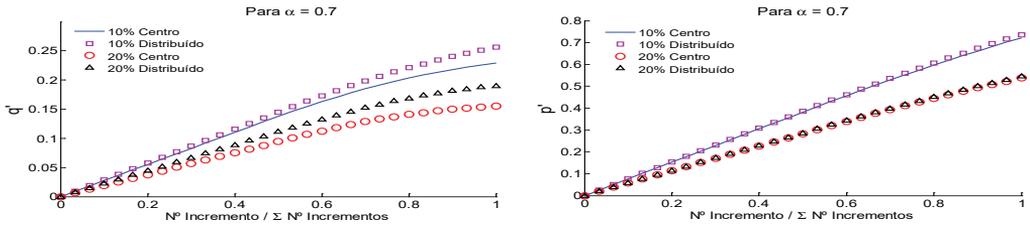


Figura 20.6 Gráficos referentes às componentes q' e p' considerando $\alpha = 0.7$.

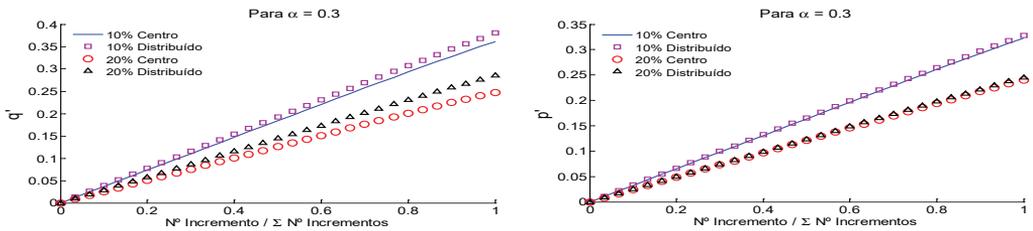


Figura 20.7 Gráficos referentes às componentes q' e p' considerando $\alpha = 0.3$.

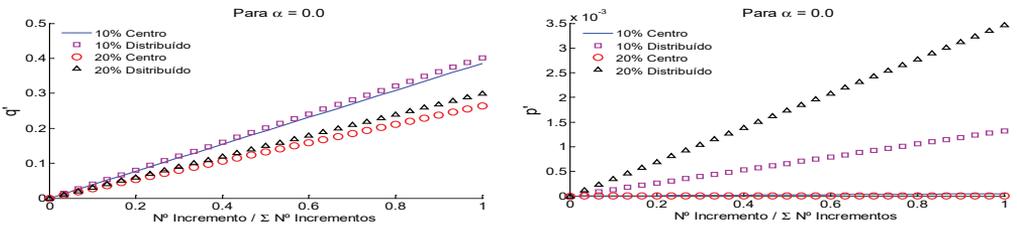


Figura 20.8 Gráficos referentes às componentes q' e p' considerando $\alpha = 0.0$.

A Figura 20.9 apresenta a distribuição de tensões (em MPa) nos EVRs na direção x para cada valor de α positivo e também para α nulo.

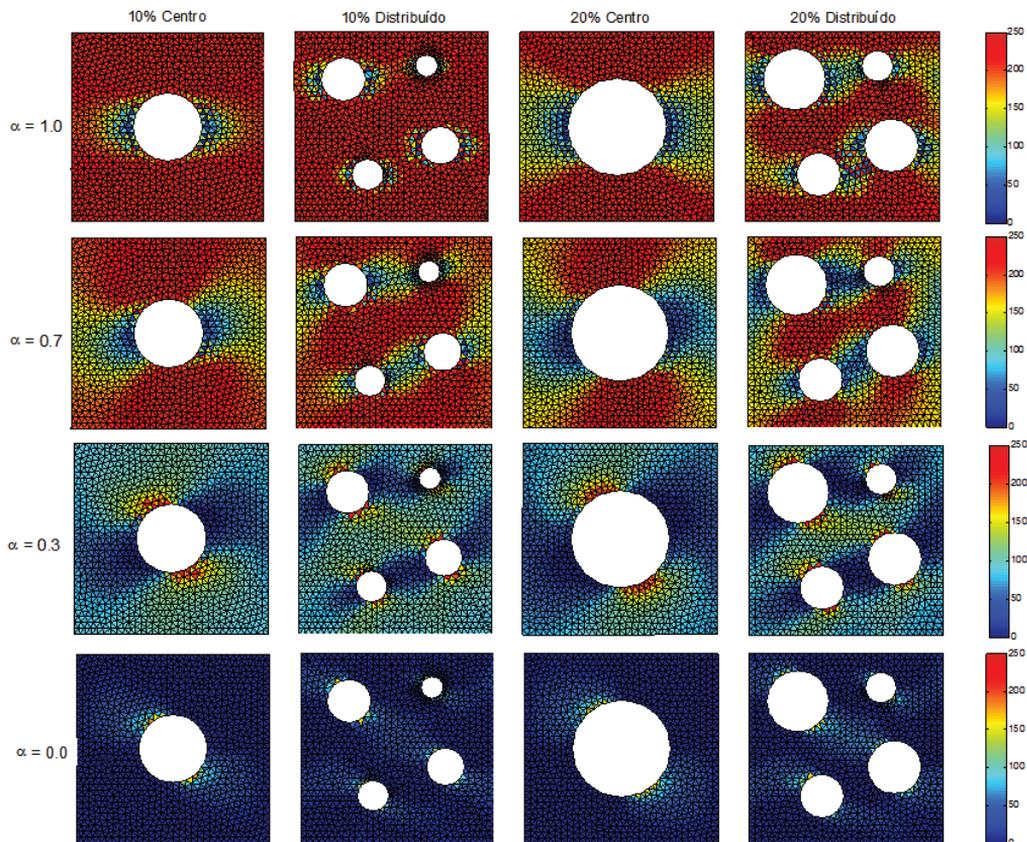


Figura 20.9 Distribuição de tensões (em MPa) nos EVRs na direção x .

Já as análises considerando fatores de carga negativos são mostradas a seguir (Figuras 20.10, 20.11 e 20.12).

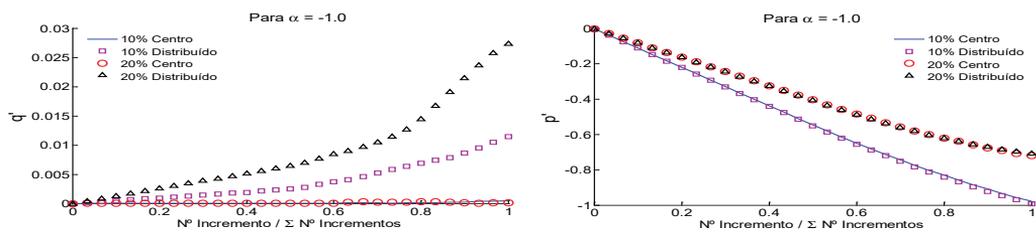


Figura 20.10 Gráficos referentes às componentes q' e p' considerando $\alpha = -1.0$.

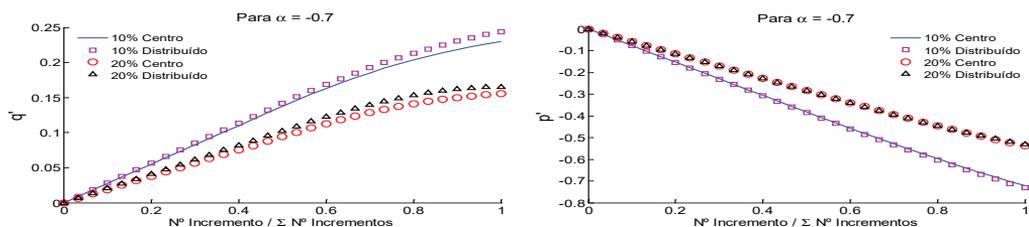


FIGURA 20.11 Gráficos referentes às componentes q' e p' considerando $\alpha = -0.7$.

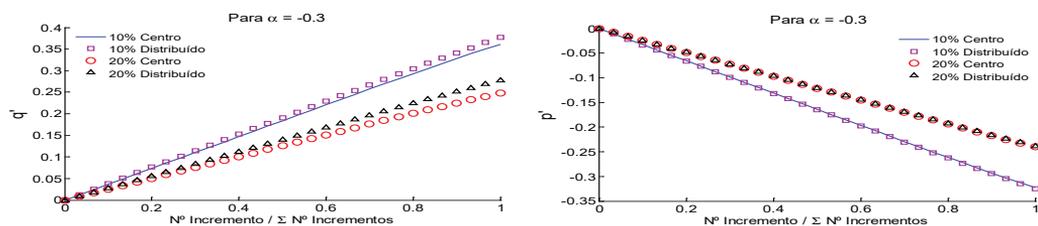


Figura 20.12 Gráficos referentes às componentes q' e p' considerando $\alpha = -0.3$.

A Figura 20.13 apresenta a distribuição de tensões (em MPa) nos EVRs na direção x para cada valor de α negativo.

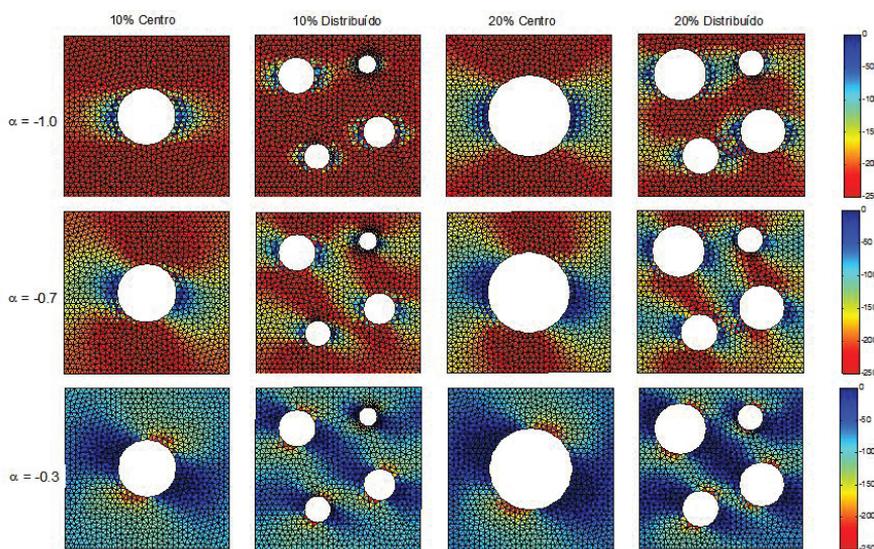


Figura 20.13 Distribuição de tensões (em MPa) nos EVRs na direção x .

Também foram analisados outros valores de α . O gráfico com as componentes máximas q' e p' para todos os fatores de carga α aplicados é apresentado na Figura 14.

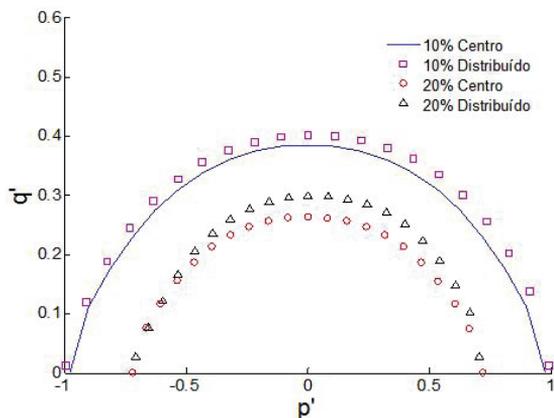


Figura 20.14 Superfície de plastificação considerando as componentes q' e p' .

De modo geral, em relação à componente p' , o comportamento do EVR com um vazio centrado de 10% foi próximo ao comportamento do EVR com 10% de vazios distribuídos aleatoriamente. Da mesma forma, o comportamento do EVR com um vazio centrado de 20% foi próximo ao comportamento do EVR com 20% de vazios distribuídos aleatoriamente. Além disso, os EVRs com menor proporção de vazios apresentaram resultados superiores em termos de resistência aos EVRs com maior proporção de vazios. As respostas são coerentes, pois o aumento da quantidade de vazios promove a perda de resistência da microestrutura e, conseqüentemente, resulta em valores de p' reduzidos, ou seja, o colapso da microestrutura ocorre de forma precoce. Na situação com $\alpha = 0.0$ os resultados foram diferentes e com valores muito inferiores aos demais casos. Essa diferença pode ser explicada pelo fato de $\alpha = 0.0$ resultar apenas na componente de deformação distorcional (γ_{xy}), sendo as deformações normais nulas ($\epsilon_x = 0$ e $\epsilon_y = 0$). Como p' está diretamente relacionado com a parte hidrostática, tal aspecto influenciou nos resultados e implicou em valores bastante reduzidos, principalmente para os EVRs com simetria em sua estrutura.

Nos gráficos referentes à componente q' , a distribuição dos vazios influenciou nos resultados. De modo geral, para a mesma proporção de vazios a microestrutura com distribuição aleatória apresentou curvas com valores mais elevados de q' em comparação com as microestruturas com vazio no centro. Assim, a concentração de vazios no centro influenciou na parte distorcional do tensor de tensões e promoveu uma redução dos valores da componente q' . Já em relação à proporção de vazios, as microestruturas com 10% de vazios apresentaram curvas com

q' superiores perante as microestruturas com 30% de vazios em todos os casos, exceto nas situações com $\alpha = 1.0$ e $\alpha = -1.0$. Nestes últimos casos, possivelmente ocorreu uma perturbação nos resultados, o que está associado com o fato destes fatores de carga ($\alpha = 1.0$ e $\alpha = -1.0$) resultarem apenas em deformações normais (ε_x e ε_y) aplicadas ao EVR.

Conclusões

De modo geral, no estudo específico sobre a presença de vazios na microestrutura de materiais metálicos, os resultados mostram que o aumento da proporção de vazios promove superfícies com valores menores. Por sua vez, o modo como ocorre a distribuição dos vazios influencia de forma sensível na tensão efetiva de von Mises. Neste caso, mantendo a proporção de vazios, os EVRs com distribuição aleatória de vazios apresentam valores maiores da tensão efetiva de von Mises em comparação com os casos com vazios centrados. Assim, a concentração de vazios implica em uma maior plastificação do material.

Com base nestes resultados, em linhas gerais conclui-se que a modelagem multi-escala configura-se como uma ferramenta atraente para o estudo do comportamento de materiais caracterizados por uma estrutura heterogênea. Por fim, como principal vantagem, pode-se destacar a utilização de modelos constitutivos simples para a obtenção de respostas complexas sobre o comportamento mecânico de materiais.

Referências

- AZIZI, R. **Multi-scale modeling of composites**. Lyngby, DK, 2011. 65 f. Thesis (Mechanical Engineering). Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark.
- FERNANDES, G. R.; PITUBA J. J. C. e SOUZA NETO, E. A. Multi-scale modelling for bending analysis of heterogenous plates by coupling BEM and FEM. **Engineering Analysis with Boundary Elements**, v. 51, p. 1-13, 2015.
- GIUSTI, S. M. **Análise de sensibilidade topológica em modelos constitutivos multi-escalas**. Petrópolis, RJ, 2009. 175 p. Tese (Doutorado em Modelagem Computacional). Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Laboratório Nacional de Computação Científica.
- GIUSTI S. M.; BLANCO P. J.; SOUZA NETO E. A. e FEIJÓO R. A. An assessment of the Gurson yield criterion by a computational multi-scale approach. **Engineering Computations**, v. 26, n. 3, p. 281-301, 2009.

- GURSON, A. L. **Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I – yield criteria and flow rules for porous ductile media**. Providence, RI, 1977. 55 p. Technical Report. Division of Engineering, Brown University.
- LOPES, I. A. R. **Análise do dano dúctil baseada em modelos multi-escala**. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- REIS, F. J. P. **Multi-Scale modelling and analysis of heterogeneous solids at finite strains**. 2014. 205 p. Thesis (Doctor Philosophy in Mechanical Engineering). Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering University of Porto.
- SANTOS, W. F.; FERNANDES, G. R. e PITUBA, J. J. C. **Análise da influência dos processos de plasticidade e fratura no comportamento mecânico de microestruturas de Compósitos de Matriz Metálica**. *Matéria*, v. 21, n. 3, p. 577-598, 2016.
- SOUZA NETO, E. A.; PERIC, D.; OWEN, D. R. J. **Computational Methods for Plasticity – Theory and Applications**. Chichester: Wiley, 2008.

Otimização estrutural de vigas de concreto armado submetidas à flexão simples

Christiano Michel Fernandes
Freitas¹

Pedro Henrique Pedrosa de Melo²
Ruvier Rodrigues Pereira³

Resumo: O presente trabalho aborda a importância do processo de otimização dentro da Engenharia Civil com reflexos diretos nos custos da construção civil. Para a otimização foi utilizado uma viga submetida a flexão simples na busca de se minimizar os valores da área de aço e concreto de acordo com seus custos. Para tal, é abordado conceitos básicos referentes aos valores dos domínios de concreto, bem como o aproveitamento das propriedades do material em cada um. Em relação à otimização são abordados o Método de Powell com aplicação dos Multiplicadores de Lagrange Aumentado e Algoritmo de Colônia de Vagalumes, fazendo uma comparação com o procedimento analítico padrão adotados por engenheiros civis. Os valores obtidos seguiram as recomendações de autores da área, além de se obter valores próximos que garantem a funcionalidade dos métodos.

Palavras-chave: Otimização. Vigas de concreto armado. Custo.

Introdução

Dentre as diversas atividades ligadas à engenharia, pode-se destacar a complexidade do desenvolvimento de projetos estruturais. Tal complexidade está relacionada ao fato de envolver projeto de arquitetura, concepção da estrutura,

-
- 1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização. Contato: christiano.michel@hotmail.com.
 - 2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização. Contato: eng.pedromelo@hotmail.com. Bolsista FAPEG.
 - 3 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização. Contato: ruvierrodrigues@hotmail.com. Bolsista FAPEG.

arranjo estrutural a ser adotado e dimensionamento de cada elemento que irá compor o projeto. Vianna (2003) destaca que o objetivo principal e também maior dificuldade do projeto de estruturas é a busca pelo ponto de equilíbrio entre maximizar a segurança e reduzir custos.

A busca referida anteriormente é tratada dentro do estudo de otimização estrutural, que segundo Lopez e Miguel (2013) pode ser definida como um processo numérico/matemático que busca obter uma configuração estrutural que proporcione uma performance ótima de acordo com uma medida de desempenho preestabelecido (podendo ser dimensões ou massa mínimas, máxima rigidez, entre outros). Silva (2015) também esclarece que adoção de métodos convencionais para elaboração do projeto não garante que a solução obtida seja a melhor tanto do ponto vista estrutural quanto econômico, recomendado, para um projeto ótimo, processos iterativos e a adoção da otimização estrutural.

O uso das técnicas de otimização na elaboração de projetos estruturais tem ganhado cada vez mais destaque no ramo da Engenharia Civil, beneficiando, além do mercado em si, os novos profissionais da área, já que o emprego de tal conhecimento diminui a dependência em relação a experiência do projetista, proporcionando maior poder de competitividade aos ingressantes no mercado (LOPEZ; MIGUEL, 2013). Assim, as técnicas se tornam um diferencial em momentos de crise econômica como a vivida atualmente na construção civil brasileira.

O mercado da construção civil tem sofrido fortemente com o cenário de crise estabelecido nos anos de 2015 e 2016, sendo campeão disparado no fechamento de postos de trabalho (JCONLINE, 2016). Aliado a isso a construção civil também tem sofrido com a inflação, registrando um aumento notório no custo da construção, o valor registrado pelo INCC – Índice Nacional de Custo da Construção do Mercado foi de 1,52% para o mês de junho (PORTAL BRASIL, 2016). Assim, o mercado da construção civil se vê numa situação de obrigatoriedade de busca por alternativas do jeito de construir, o que arremete ainda mais para a importância do aproveitamento de todo material empregado.

Visto toda situação e a crescente importância da otimização estrutural na Engenharia Civil, o presente trabalho busca apresentar o emprego de técnicas de otimização para o caso de elementos estruturais. O foco será a redução do custo de vigas submetidas à flexão simples por meio de algoritmos de otimização clássica e evolutivo, fazendo uma comparação entre estes valores com os obtidos por meio do método clássico de dimensionamento de vigas.

1 Dimensionamento viga – estado limite último

Um elemento estrutural deve ser capaz de suportar os esforços ao qual é submetido sem atingir um estado limite. De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014) uma

estrutura deve atender os estados limites últimos, que está relacionado ao colapso ou ruína da estrutura, de forma que paralise seu uso e os estados-limites de serviço, que são aqueles relacionados à durabilidade, conforto dos usuários e estética.

Tem-se então, para uma viga de concreto armado, no estado limite último as situações em que pelo menos um dos materiais, concreto ou aço, atingiram o seu limite de deformação. Assim, há domínios que regem as características dessa deformação em uma dada seção transversal, podendo se enquadrar nos domínios: reta a, 1, 2, 3, 4, 4a, 5 e reta b. Pinheiro (2007), destacou que para o caso de flexão, os domínios possíveis são os domínios 2, 3 e 4, pois são nesses domínios que há necessidade de utilização dos dois materiais: concreto para resistir compressão e aço para tração.

Tem-se, então, para os domínios 2, 3 e 4 algumas características: Domínio 2: a ruína da estrutura se dá pela deformação excessiva do aço, e o concreto não trabalha com sua capacidade máxima; Domínio 3: a ruína se dá pela deformação máxima do concreto à compressão e com escoamento do aço e; Domínio 4: semelhante ao domínio 3, porém o aço não está em escoamento (ABNT, 2014).

O domínio 3 pode ser considerado, então, conforme Pinheiro (2007), a situação ideal de projeto, pois há o aproveitamento das características do aço e concreto. Além do que, a ruína é dúctil, ou seja, há uma fissuração aparente e flechas significativas antes da ruptura.

Em se tratando do dimensionamento da viga para o estado limite último, tem-se as equações de equilíbrio da seção transversal, conforme Equações 1 e 2:

$$0,68 \, b d \beta_x f_{cd} + A'_s \sigma'_s - A_s \sigma_s = 0 \quad (1)$$

$$M_d = 0,68 \, b d^2 \beta_x f_{cd} (1 - 0,4 \beta_x) + A'_s \sigma'_s (d - d') \quad (2)$$

Onde: b é a largura da viga; d a altura útil da viga; d' a distância do centro da armadura até a face da viga; f_{cd} a resistência à compressão de cálculo do concreto; β_x a profundidade da linha neutra; A'_s e A_s a área da armadura comprimida e tracionada na seção respectivamente e; σ'_s e σ_s a tensão normal do aço na compressão e tração respectivamente.

A profundidade da linha neutra (β_x) é calculada através da Equação 3:

$$\beta_x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s} \quad (3)$$

Sendo: ε_c a deformação específica do concreto e ε_s , a deformação específica do aço.

A viga, no entanto, pode ser concebida utilizando armadura simples ou dupla. A armadura simples se diz aquela em que apenas a armadura tracionada é levada

em consideração nos cálculos, sendo o A'_s considerado igual a 0. Já a armadura dupla considera que a armadura situada na zona comprimida auxilia o concreto a resistir aos esforços solicitantes. Logo, a armadura dupla deve ser utilizada apenas quando há impossibilidade de alteração da seção transversal e não sendo possível o dimensionamento nos domínios 2 ou 3 (PINHEIRO, 2007).

A respeito da armadura da viga, é definido pela NBR 6118 (ABNT, 2014) alguns limites. Tem-se que a soma das armaduras de tração e compressão não podem ser maiores do que 4% da área do concreto. De maneira a limitar também o uso de armadura de pele, a norma permite dispensar o uso das mesmas em vigas com altura inferior ou igual a 60 cm. A respeito da armadura à compressão, Vianna (2003) a limita em 50% da armadura de tração.

Vale ressaltar que para o dimensionamento efetivo de um elemento estrutural devem ser realizadas outras verificações além das do estado limite último. Logo, por se tratar de um levantamento apenas de custo, será considerado apenas as verificações supracitadas.

2 Método de Otimização Clássica

Se tratando de métodos clássicos para resolução de problemas de otimização estão as Técnicas de Minimização Sequencial Irrestrita (TMSI) que, segundo Vanderplaats (1999), minimizam uma função objetiva incorporando uma penalidade em relação às restrições, a fim de evitar uma violação da mesma. De uma maneira mais específica, Silva e Brandão (2015), apontam que a ideia geral é penalizar pontos não pertencentes à região viável por meio do aumento do valor da função, de forma que estes pontos sejam descartados na execução do algoritmo.

Segundo Vanderplaats (1999), para se diminuir a dependência da função a ser otimizada em relação aos parâmetros de penalidade, podem ser utilizados os multiplicadores de Lagrange, constituindo, assim, o Método dos Multiplicadores de Lagrange Aumentado (MMLA).

A função pseudo-objetiva fazendo uso dos multiplicadores de Lagrange é apresentada na Equação 4.

$$A(x, \lambda, r_p) = F(x) + \sum_{j=1}^m [\lambda_j \psi_j + r_p (\psi_j)^2] + \sum_{k=1}^m [\lambda_k h_k(X) + r_p (h_k(X))^2] \quad (4)$$

Sendo: $F(x)$ a função obtivo original e r_p o escalar que determina o grau ou tamanho da penalidade. Para ψ_j tem-se a Equação 5:

$$\psi_j = \max \left[g_j(x), \frac{-\lambda_j}{2r_p} \right] \quad (5)$$

Já os multiplicadores de Lagrange λ_j e λ_k são atualizados a cada iteração pelas seguintes Equações 6 e 7.

$$\lambda_j^{p+1} = \lambda_j^p + 2r_p \left\{ \max \left[g_j(x), \frac{-\lambda_j}{2r_p} \right] \right\} \quad (6)$$

$$\lambda_k^{p+1} = \lambda_k^p + 2r_p h_j(x) \quad (7)$$

Os métodos citados até aqui são utilizados para possibilitar a inserção de restrições dentro dos métodos que trabalham com minimização de função irrestrita. Um dos métodos muito utilizado é o de Powell, sendo o mesmo um método de ordem zero capaz de realizar, inicialmente, buscas unidirecionais na direção de cada variável e depois, de forma iterativa, uma combinação linear das buscas anteriores (VANDERPLAATS, 1999).

3 Métodos bio-inspirados

As técnicas clássicas de otimização estão difundidas a bem mais de um século, as mesmas propiciam grande aplicabilidade e confiabilidade na otimização de sistemas distintos. Entretanto, tais técnicas mostram-se ineficientes para determinadas situações, tais como: funções e/ou restrições descontínuas, multimodalidade, vários mínimos e máximos locais, variáveis discretas, funções não convexas, etc. Por este motivo as técnicas relacionadas aos métodos bio-inspirados ganharam espaço nos últimos anos (PRADO; SARAMAGO, 2005).

Os métodos bio-inspirados integram uma gama de algoritmos de otimização estocástica, sendo eles baseados no comportamento das espécies na natureza. Esse comportamento é fundamentado pela teoria evolutiva de Darwin. Tal teoria diz que a evolução da espécie é o efeito da variação genética de uma determinada população e da seleção natural, que opta por indivíduos melhores adaptados ao ambiente. Sendo assim, as melhores características são preservadas ao longo das gerações (FRANCISCO, 2013; PURCINA, 2010).

Os algoritmos com componentes estocásticas baseados na natureza por muito tempo foram tratados como heurísticas, porém, atualmente os mesmos são categorizados como meta-heurísticas. Comumente, heurística significa encontrar soluções por tentativa e erro, já a meta-heurística sugere a um nível maior de sofisticação no processo de otimização, possibilitando soluções de qualidade a um tempo moderado. Todavia, vale ressaltar que nem sempre o ótimo global será obtido (SISNANDO, 2014).

Geralmente, os métodos bio-inspirados possuem algumas características em comum, uma delas é o fato de possuírem populações iniciais geradas aleatoriamente, sendo que, a partir delas o método inicia o processo de cruzamento e

consequentemente, a obtenção das próximas gerações. No entanto, para que haja convergência, os métodos cumprem alguns quesitos, a saber: 1) novas combinações dos indivíduos da população, 2) mutação (em alguns casos), 3) avaliação de todas as possíveis soluções e, 4) seleção das melhores soluções para comporem a próxima geração (SISNANDO, 2014).

Diversos são os algoritmos baseados no comportamento coletivo das espécies, tem-se por exemplo: colônias de vagalumes, formigas, enxame de abelhas, cupins, morcegos, etc. Ainda que simples o comportamento de tais espécies, as mesmas apresentam um comportamento coordenado no que diz respeito à busca pelos seus objetivos. Citando casos análogos, cupins podem construir ninhos rebuscados e formigas e abelhas, através da coletividade, exploram diferentes locais em busca de alimento (FISTER *et al.*, 2013).

Os algoritmos meta-heurísticos esforçam-se para gerar novas soluções em um determinado espaço de busca, sendo assim, apuram a melhor solução para a sobrevivência, já o quesito de aleatoriedade permite que os métodos não se limitem a ótimos locais. Os processos de busca fundamentam-se na harmonia entre prospecção e exploração. A prospecção está relacionada à descoberta de melhores soluções, ao passo que a exploração foca na busca de novos locais descobertos no momento da prospecção (FISTER *et al.*, 2013).

3.1 Algoritmo Colônia de Vagalumes

O Algoritmo Colônia de Vagalumes (ACV), proposto por Yang (2008, *apud* LOBATO, 2016), é inspirado no comportamento social dos vagalumes. Essa espécie é caracterizada pela sua bioluminescência, sendo a mesma responsável por desempenhar algumas funções, a saber: comunicação e atração para potenciais parceiros, isca para atrair suas presas e mecanismo de alerta contra predadores (FISTER *et al.*, 2013).

A comunicação através da bioluminescência está vinculada ao fato de que os vagalumes conseguem emitir flashes luminosos em diferentes intensidades, sendo assim, tal fato possibilita os rituais de acasalamento (GANDOMI *et al.*, 2013). Antes de discutir o método do algoritmo é necessário fazer algumas ponderações, sendo elas: 1) todos os vagalumes são considerados assexuados, 2) a atratividade é proporcional à intensidade da luminosidade e 3) a luminosidade está relacionada com a função custo (GANDOMI *et al.*, 2013; FISTER *et al.*, 2013).

No ACV é importante ressaltar duas importantes situações: a variação da intensidade da luz e a formulação da atratividade (GANDOMI *et al.*, 2013). No que diz respeito a intensidade emitida, Rastgou e Moshtagh (2016) descreve-a conforme a Equação 8:

$$I(r) = I_0 e^{-\gamma r^2} \quad (8)$$

Já o fator de atratividade é formulado como a Equação 9:

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2} \quad (9)$$

Sendo: I_0 a intensidade emitida; γ o parâmetro de absorção de luz pelo meio; r a distância entre os vagalumes i e j ; β_0 a atratividade para distância igual a zero.

A movimentação de um vagalume menos atraente para outro mais atraente é representada pela Equação 10.

$$x_i = x_i + \beta_0 e^{-\gamma r^2} (x_j + x_i) + \alpha \left(\text{rand} - \frac{1}{2} \right) \quad (10)$$

Sendo: x_i é o vagalume mais brilhante, x_j é o vagalume menos brilhante e α é a inserção de aleatoriedade.

No ACV, de acordo com Lobato (2016), o usuário deve informar alguns parâmetros iniciais, sendo eles: número de vagalumes (NP); número de variáveis de projeto (D); fator de atratividade (β_0); parâmetro de aleatoriedade (α); e número máximo de gerações (MG).

4 Metodologia

A análise de custos será feita para a seção transversal de uma viga de concreto armado, tendo como variáveis a serem otimizadas a altura útil (d), a área da armadura tracionada (A_s) e a área da armadura comprimida (A'_s) da seção transversal da viga. Será adotado então, como variáveis: $d = x_1$, $A_s = x_2$ e $A'_s = x_3$.

Como função objetivo tem-se a Equação 11, que visa obter menor custo por comprimento unitário de viga. A equação leva em conta o volume do concreto, o peso do aço e a área de forma, multiplicados por seus respectivos custos.

$$F(x) = b(x_1 + d')c_1 + (x_2 + x_3)\rho_s c_2 + (b + 2(x_1 + d'))c_3 \quad (11)$$

Na Equação 11, ρ_s é a massa específica do aço e c_1 , c_2 e c_3 são os valores referentes aos custos para produção da viga, englobando mão-de-obra e materiais. Tais valores foram obtidos através da tabela de preços da Saneago (SANEAGO, 2015), conforme indicados a seguir: c_1 - Concreto: R\$ 377,66 / m³; c_2 - Aço: R\$ 6,10 / kg e; c_3 - Forma: R\$ 84,96 / m².

Assim, a questão se resume em um problema de minimização com restrições de igualdade e desigualdade, conforme Tabela 21.1. As restrições são aquelas

apresentadas no item de Dimensionamento Viga - Estado Limite Último, adaptadas para as novas variáveis de projeto: x_1 , x_2 e x_3 .

Tabela 21.1 Função objetivo e restrições para a otimização da seção transversal.

Função Objetivo	$F(x) = b(x_1 + d')c_1 + (x_2 + x_3)\rho_s c_2 + (b + 2(x_1 + d'))c_3$
Restrição H₁	$0,68 b x_1 \beta_x f_{cd} + x_3 \sigma'_s - x_2 \sigma_s = 0$
Restrição H₂	$0,68 b x_1^2 \beta_x f_{cd} (1 - 0,4 \beta_x) + x_3 \sigma'_s (x_1 - d') - M_d = 0$
Restrição G₁	$x_2 + x_3 - 0,04 b (x_1 + d') \leq 0$
Restrição G₂	$x_3 - 0,5 x_2 \leq 0$
Restrição G₃	$x_1 - 0,6 \leq 0$

Considerando para análise, uma viga de 30 cm de largura e submetida a um momento fletor $M_d = 441$ kN.m, e utilizando concreto C25 e aço CA-50, tem-se como dados de entrada, além dos custos: $\rho_s = 7800$ kg/m³; $d' = 0,03$ m; $f_{cd} = 17,86$ MPa e; σ'_s e $\sigma_s = 434,78$ MPa.

Com o intuito de se obter o menor custo, foram calculados os valores ótimos das variáveis de projeto e da função para os limites dos domínios 2 e 3, 3 e 4, 4 e 4a. Para tanto, os valores das deformações para cada domínio estão apresentados na Tabela 21.2.

Tabela 21.2 Relação do domínio e deformação do concreto e do aço.

Domínio	ϵ_c (‰)	ϵ_s (‰)
Límite 2-3	3,5	10
Límite 3-4	3,5	2,07
Límite 4-4a	3,5	0

Para melhor visualização dos pontos ótimos para o problema foram feitas as Figuras 21.1 a 21.3, para todos os domínios, contendo as curvas da função objetivo e todas as restrições.

Além disso, as variáveis de projeto foram obtidas analiticamente, através das Equações 1 e 2, e computacionalmente através do Método de Powell e do

Algoritmo Colônia de Vagalumes (ACV). A fim de diminuir as variáveis de projeto foi adotado o uso de armadura simples, ou seja x_3 igual a zero, para o cálculo analítico e para o Método de Powell, sendo para este limitado uma quantidade de 3000 iterações. Já para o ACV utilizou-se então todas as variáveis, pois ele faz uma varredura em todo ambiente de projeto, independente da quantidade das mesmas.

5 Discussão e Resultados

Visando obter o menor custo para produção de um comprimento unitário de uma viga biapoaiada de concreto armado e submetida a um momento fletor de 441 kN.m, realizou-se o dimensionamento para o estado limite último. Para tanto, são apresentados nas Figuras 21.1 a 21.3 o espaço de soluções viáveis para o problema, lembrando que, por questão de economia x_3 será igual a zero. Nas figuras esse espaço é representado pela área não hachurada.

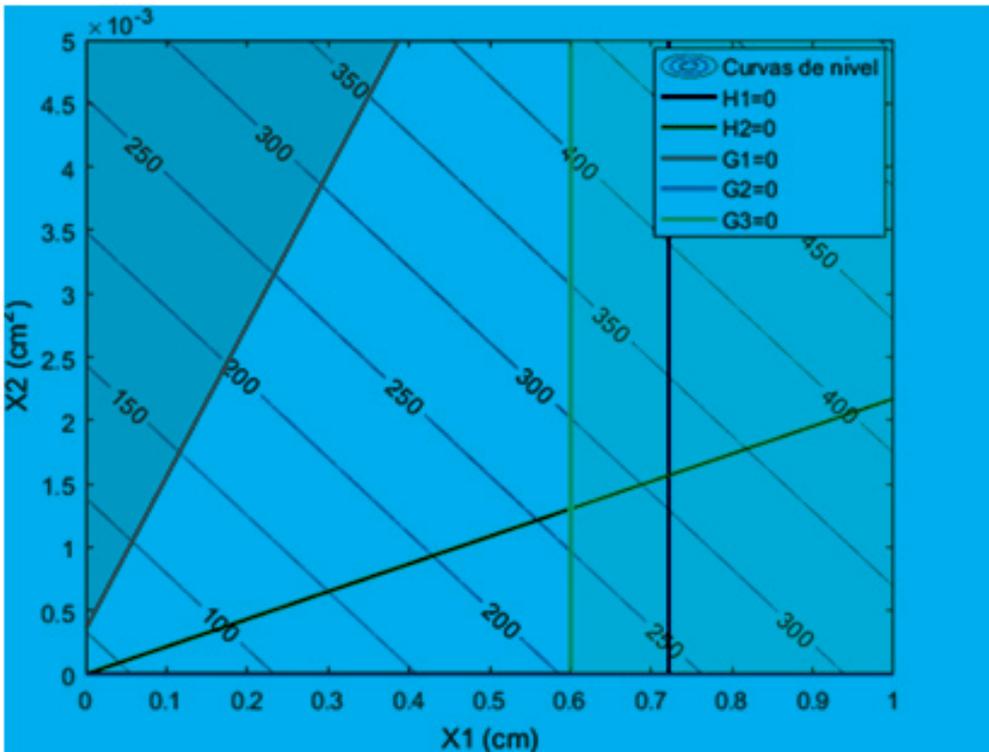


Figura 21.1 Restrições e área de soluções viáveis para o limite dos domínios 2-3.

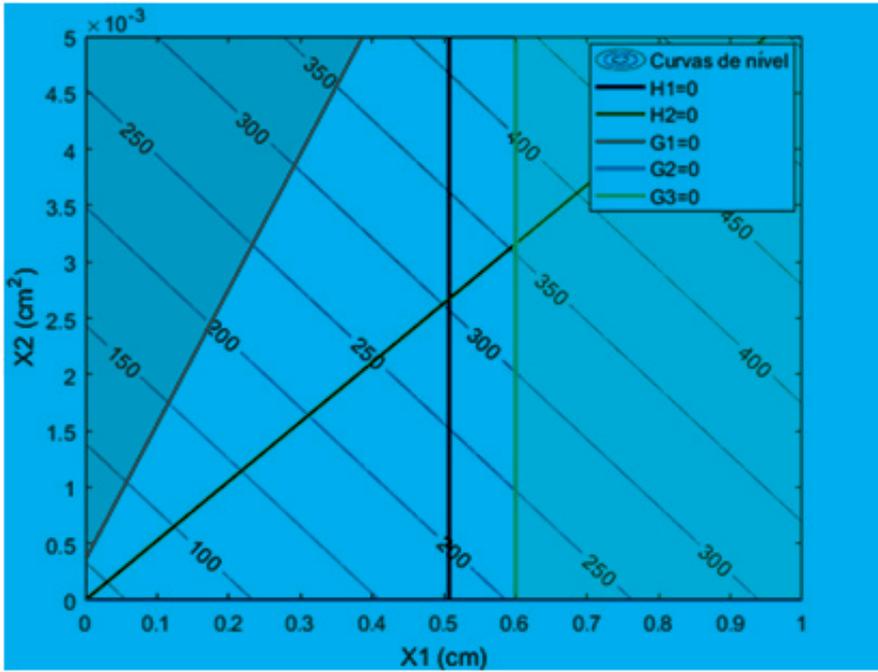


Figura 21.2 Restrições e área de soluções viáveis para o limite dos domínios 3-4.

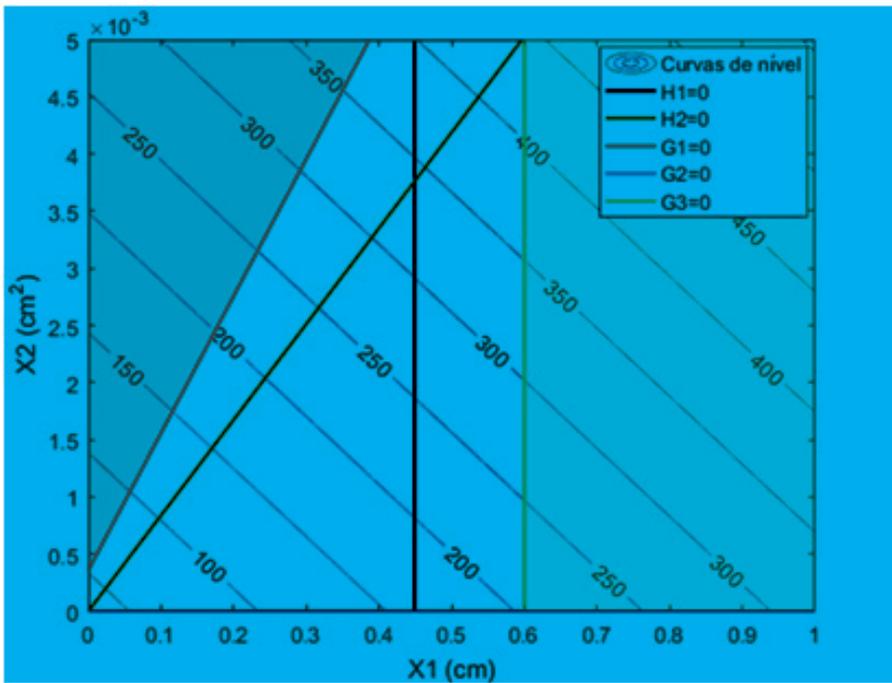


Figura 21.3 Restrições e área de soluções viáveis para o limite dos domínios 4-4a.

Na busca pelos pontos ótimos, primeiramente foi calculado os valores das variáveis de projeto e da função objetivo analiticamente, para os limites dos domínios 2 e 3, 3 e 4, 4 e 4a, conforme Tabela 21.3.

Tabela 21.3 Valores das variáveis de projeto e da função pseudo-objetivo calculados analiticamente.

Método	Domínio	x_1 (cm)	x_2 (cm ²)	x_3 (cm ²)	F
Analítico	Limite 2-3	72,18	15,68	0	R\$ 313,01
	Limite 3-4	50,73	26,71	0	R\$ 304,73
	Limite 4-4a	44,92	37,64	0	R\$ 340,27

Posteriormente, foi utilizado o Método de Powell para se obter os mesmos dados calculados analiticamente. Tais dados estão apresentados na Tabela 21.4, sendo, no entanto, exibidos os menores valores obtidos para o método durante o processo de otimização.

Tabela 21.4 Valores das variáveis de projeto e da função pseudo-objetivo calculados através do Método de Powell.

Método	Domínio	x_1 (cm)	x_2 (cm ²)	x_3 (cm ²)	F	Iterações
Powell	Limite 2-3	72,48	15,74	0	R\$ 314,16*	3000
	Limite 3-4	50,73	26,71	0	R\$ 304,73	97
	Limite 4-4a	44,92	37,64	0	R\$ 340,27	10

* Função não convergiu

Por fim, foi utilizado o Algoritmo Colônia de Vagalumes para se obter as variáveis de projeto e o valor da função objetivo. Nele foram utilizadas uma população inicial de 50 vagalumes com 10000 gerações e semente igual 8, além de, α igual a 0,2 e β_0 igual 0,5. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 21.5.

Tabela 21.5 Valores das variáveis de projeto e da função pseudo-objetivo calculados através do ACV.

Método	Domínio	x_1 (cm)	x_2 (cm ²)	x_3 (cm ²)	F
ACV	Limite 2-3	72,19	15,67	0	R\$ 315,03
	Limite 3-4	50,73	26,71	0	R\$ 304,93
	Limite 4-4a	44,91	37,63	0	R\$ 341,09

Após a obtenção dos dados foi possível verificar que para o limite dos domínios 2-3, tanto para Powell quanto ACV a função não convergiu. Isso ocorreu devido as restrições 1 e 2 de igualdade, que fazem com que a altura útil da viga (x_1) apresente valor superior a 60 cm, violando então a restrição de desigualdade 5. Esta situação pode ser verificada na Figura 21.1, onde a intersecção entre as restrições de igualdade ocorre no espaço não viável de solução. Os valores obtidos analiticamente também provam tal situação.

Já para o limite dos domínios 4-4a, no dimensionamento analítico, Powell e ACV, foi obtido o menor valor da altura útil da viga (x_1), porém um maior valor da área de aço (x_2), conforme também pode ser verificado na Figura 21.3. Com isso, o valor da função objetivo assumiu o maior custo entre os três casos analisados, confirmando a explanação feita por Pinheiro (2007), em que o dimensionamento no domínio 4 é uma solução antieconômica, podendo-se dizer que a seção está superarmada.

A partir dos dados apresentados nas Tabelas 21.3 a 21.5 a situação que apresenta menor custo é aquela situada no limite dos domínios 3-4, justificando o pressuposto apresentado novamente por Pinheiro (2007), de que no domínio 3 é a situação ideal de projeto. Tal resultado está, ainda, de acordo com o estudo de Vianna (2003), que destacou que a situação mais econômica é aquela situada na reta limite entre os domínios 3-4, pois é quando se diz que a seção está normalmente armada. Em comparação entre as Figuras 21.1, 21.2 e 21.3 também é possível notar que o ponto ótimo para esta situação é menor do que o apresentado nos limites de domínio.

Pode-se destacar, então, os dados referentes ao limite dos domínios 3-4, calculados pelos três métodos, conforme Tabela 21.6.

Tabela 21.6 Dados para o limite dos domínios 3-4.

Método	x_1 (cm)	x_2 (cm ²)	x_3 (cm)	F	Iterações
Analítico	50,73	26,71	0	R\$ 304,73	–
Powell	50,73	26,71	0	R\$ 304,73	97
ACV	50,73	26,71	0	R\$ 304,93	10000

Pelos valores é possível notar coerência entre os custos obtidos pelos três métodos abordados. O valor do custo obtido pelo ACV foi um pouco mais elevado que os demais, isto ocorre devido aos valores decimais para a altura útil e área de aço tracionada que não podem ser traduzidos para a realidade construtiva, assim não foram colocados como resultado deste trabalho. Ressalva-se que, o custo obtido pelo ACV pode ser melhorado, porém tem-se um aumento considerável no custo computacional empregado.

Considerações finais

Pelo processo desenvolvido para a situação da viga submetida à flexão simples e pelos resultados obtidos, foi possível notar relevância no método de dimensionamento tradicional e também no método clássico, já que sua implementação é simples e custo computacional pequeno. Se tratando do ACV foi possível concluir que o mesmo exige um custo computacional maior, além do fato de que o mesmo se tornou bastante sensível aos parâmetros, dificultando processos como análise de sensibilidade.

Em termos de otimização os procedimentos adotados chegaram a valores iguais, podendo ser explicado devido à simplicidade do caso adotado, ao qual métodos tradicionais são suficientes para solução. O destaque geral refere-se a análise feita pelo ACV para as barras comprimidas, as quais durante as iterações foram igualadas a zero, conforme adotado para as demais formas.

Em linhas gerais, o uso da otimização na Engenharia Civil é bastante relevante, podendo em casos de maior representatividade facilitar cálculos e obter valores realmente econômicos, fazendo uso de todas as propriedades dos materiais utilizados, fato que em muitas situações pode não ocorrer.

Referências

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- FISTER, I.; Jr. FISTER, I. YANG, X; BREST, J. **Swarm and Evolutionary Computation: A comprehensive review of firefly algorithms**. Elsevier, Londres, 34-36, 24 Jun 2013.
- FRANCISCO, D. O. **Aplicação de algoritmos bio-inspirados ao problema de geração automática de grades horárias**. 2013. Dissertação (Mestrado em Sistemas Dinâmicos) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- GANDOMI, A.H.; YANG, X; TALATAHARI, T.; ALAVI, A.H. **Commun Non-linear Sci Numer Simulat: Firefly algorithm with chaos**. Elsevier, Londres, 89-98, 21 Jun 2012.
- JCONLINE. **Construção Civil foi o setor que mais demitiu durante a crise**. Disponível em: <<http://jconline.ne10.uol.com.br/canal/economia/nacional/noti>

cia/2016/05/12/construcao-civil-foi-o-setor-que-mais-demitiu-durante-cri-se-235488.php> Acesso em: 01 ago. 2016.

LOBATO, F. S. **Guia de Estudos: Algoritmo de Colônia de Vagalumes**. Catalão: UFG/PPGMO, 2016. 8 p. Apostila.

LOPEZ, R. H.; MIGUEL, L. F. **Introdução a otimização estrutural**. Florianópolis: UFSC/PPGEC, 2013. 7 p. Apostila. Disponível em:< http://ppgec.posgrad.ufsc.br/files/2013/05/Topicos_Pesquisa_UFSC-timiza%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2016.

PINHEIRO, L. M. **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 2007.

PORTAL BRASIL. **Índice Nacional de Custo da Construção do Mercado – INC-C-M**. Disponível em:< <http://www.portalbrasil.net/incc.htm>>. Acesso em: 02 ago. 2016.

PRADO, J.; SARAMAGO, S. **Otimização por Colônia de Partículas**. [FAMAT]. Revista Científica Eletrônica da Faculdade de Matemática, n 4, 2005.

PURCINA, L. **Técnicas de Otimização Evolutiva Aplicada às Soluções de Grandes Sistemas Lineares**. 2010. 146 f. Tese – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2010.

RASTGOU, A.; MOSHTAGH, J. **Applied Soft Computing: Application of firefly algorithm for multi-stage transmission expansion planning with adequacy-security considerations in deregulated environments**. Elsevier, Londres, 373-389, 22 JAN 2016.

SANEAGO. **Preço base Saneago: relatório sintético de composições unitárias (construção civil) - adaptado ao SINAPI**. 2015. Disponível em: <https://www.saneago.com.br/supre/TABELADEPRECOS_ConstrucaoCivil.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2016.

SILVA, F. E. C. **Otimização dimensional, de forma e topológica de estruturas treliçadas utilizando um algoritmo híbrido**. 2015. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

- SILVA, P. H. R.; BRANDÃO, M. A. L. Alguns métodos clássicos de otimização. In: **Anais do Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria**, n. 1, v. 1, Caldas Novas, 2014. São Paulo: Blucher, 2015, p. 384-392. Disponível em:< <http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/alguns-mtodos-clssicos-de-otimizao-11922>>. Acesso em: 04 ago. 2016.
- SISNANDO, A. **Otimização de Dispositivos Fotônicos Utilizando Algoritmos Bio-Inspirados**. 2014. 171 f. Tese – Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2015.
- VANDERPLAATS, G. N. **Numerical Optimization Techniques for Engineering Design**. 3 ed. Colorado: Colorada Springs, 1999. 441 p.
- VIANNA, L. C. C. **Otimização de seções transversais de concreto armado: aplicação a pórticos**. 2003,143 f. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2003.

Otimização por colônia de formigas aplicada ao sistema dinâmico com absorvedor linear

Daniela de Oliveira Albanez¹
Sémebber Silva Lino²

Sérgio F. da Silva²

Resumo: Absorvedores dinâmicos de vibrações são constituídos por massa, mola e elementos de amortecimento, que são acoplados a um sistema mecânico para proporcionar a atenuação da vibração. Neste artigo estuda-se o modelo de absorvedor dinâmico de vibração (ADV) eficaz na redução de vibração estrutural sob excitações sísmicas e usa-se um método de otimização evolutiva com base no comportamento social de uma colônia de formigas. Com base nesta metodologia, um modelo na construção predial com duas lajes é utilizado para a simulação numérica e o problema de otimização é definida como a minimização da função objetivo que descreve a amplitude de vibração da estrutura primária. Serão apresentados alguns resultados da análise de sua eficiência e robustez que ilustram o sucesso deste processo.

Palavras-chave: Absorvedor dinâmico de vibração, Otimização por colônia de formigas, Algoritmo de colônia de formigas.

Introdução

As vibrações são movimentos oscilatórios observados em diversas situações no cotidiano, até mesmo em atividades humanas. O simples ato de falar fornece

-
- 1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Programa de Pós-graduação em Modelagem e Otimização. Contato: doalbanez@hotmail.com. Bolsista da Capes.
 - 2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Programa de Pós-graduação em Modelagem e Otimização. Contato: semebber@hotmail.com.³Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Programa de Pós-graduação em Modelagem e Otimização. Contato: sergio.f.silva@gmail.com.

vibrações nas cordas vocais e na língua. A respiração é o ato de vibração dos pulmões e o andar está relacionado com o movimento oscilatório de braços e pernas (RAO, 2009) dentre muitos outros exemplos a considerar.

Estão também presentes em estruturas prediais na construção civil ou no manuseio de máquinas industriais, tais como rolos de compactação do solo ou máquina de lavar roupa. Igualmente, podem trazer danos ao equipamento ou causar algum desconforto e insegurança. Devido a este problema de vibrações no equipamento, há então uma necessidade de controlar os níveis de vibração estrutural, a fim de assegurar condições de operação satisfatória, quanto a segurança e conforto na utilização destes.

Quando este processo de vibração ocorre com certa frequência, uma ótima maneira para reduzi-lo é o uso de absorvedores dinâmicos de vibrações (ADV's). De acordo com Steffen Jr. e Rade (2001), os ADV's são sistemas mecânicos que compreendem inércia, rigidez e amortecedor, que, uma vez ligados a uma determinada estrutura (estrutura primária), são capazes de absorver a energia vibratória no ponto de conexão para atenuar sua resposta vibratória forçada indesejável.

A primeira análise do absorvedor foi apresentada em Ormondroyd e Den Hartog (HARTOG; ORMONDROYD, 1928) e esta análise foi feita completa por Brock quando encontrou parâmetros ótimos de absorção de amortecedor viscoso para dar resposta de frequência maximamente plana (BROCK, 1946).

Warburton (1981) estendeu o procedimento de otimização e determinados parâmetros ótimos para absorvedores com dois graus de liberdade e minimizou a resposta máxima. Thompson (1981) considerou uma força excitada e amortecida com um grau de liberdade a um sistema primário que anexa o absorvedor de vibração. Kitis *et al.* (1983) demonstraram um algoritmo eficiente para minimizar a resposta vibratória para uma gama de frequências de excitação para o problema de dois absorvedores de vibrações dinâmicas. Mais recentemente, amortecedores de vibração inteligentes à base de materiais têm sido utilizados para a atenuação da vibração. Este é o caso para viscoelástico (CHRISTENSEN, 1982) e desvio piezoelétrico (HAGOOD; FLOTOW, 1991).

Este artigo propõe uma técnica de otimização dos parâmetros de um sistema não amortecido submetido a uma força externa harmônica, de modo a reduzir a massa requerida acoplando o ADV a uma massa principal, para atenuar a vibração dos mesmos, denominada de Otimização por Colônia de Formigas, que no inglês é dada por *Ant Colony Optimization* (ACO). Marco Dorigo (1992) a introduziu na sua tese de doutorado para resolver problemas computacionais. Este método é uma técnica inspirada no comportamento das formigas reais e seu esquema de comunicação usando o rastro de feromônio. A formulação do ADV é apresentada e o algoritmo ACO é discutido. Os resultados numéricos são apre-

sentados, ilustrando o sucesso da utilização da metodologia e aplicada à configurações de absorvedores de vibrações dinâmicos.

1 Absorvedor dinâmico de vibração (ADV)

De acordo com Ormondoyd e Den Hartog (1928), Warburton (1981) e Den Hartog (1956) os ADV's são sistemas constituídos por massa, de mola e os elementos de amortecimento (estrutura secundária), que estão acoplados com um sistema mecânico (estrutura primária), a fim de atenuar as vibrações da estrutura primária em uma dada banda de frequência.

A ideia do ADV é a geração de uma força, a qual tem a mesma intensidade da força de excitação, mas na fase oposta. Este fenômeno é conhecido como antirressonância. A afinação do ADV é o procedimento que define a frequência antirressonância a um determinado valor, alterando os parâmetros do ADV (massa, mola e amortecedor).

Considere o sistema vibratório de dois graus de liberdade, sem amortecimento, em que o subsistema (m_1, k_1) associado à estrutura primária cujas vibrações desejam ser atenuadas pelo subsistema de acoplamento (m_2, k_2) constituindo o absorvedor dinâmico de vibração, tal como ilustrado na Fig. 22.1.

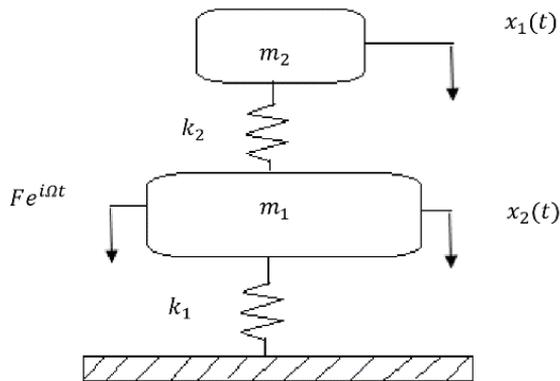


Figura 22.1 Estrutura primária e ADV.

Fonte: Realizado pelo autor.

Assume-se o sistema primário excitado por uma força harmônica de amplitude F e frequência de excitação Ω , valor fixado, não coincidem necessariamente com a frequência natural do sistema expressa por:

$$F(t) = F e^{i\Omega t} \quad (1)$$

A operação do absorvedor, parte do princípio de que os valores dos parâmetros selecionados (m_2, k_2) , de modo que $\Omega^2 = k_2/m_2$, pegue a massa primária (m_1) para responder harmonicamente a esta frequência de excitação com amplitude zero. A frequência natural do sistema de absorção, quando ligados diretamente à base fixa, é definido por: $\omega_a = \sqrt{k_2/m_2}$.

Para demonstrar esta afirmação, as equações são escritas do movimento sistema acoplado:

$$\begin{cases} m_1 \dot{x}_2(t) + (k_1 + k_2)x_1(t) - k_2x_2(t) = F(t) \\ m_2 \dot{x}_2(t) + k_2[x_2(t) - x_1(t)] = 0 \end{cases} \quad (2)$$

As respostas harmônicas são expressadas por:

$$x_1(t) = X_1 e^{i\Omega t} \quad (3)$$

$$x_2(t) = X_2 e^{i\Omega t} \quad (4)$$

Fazendo-se a derivação das respostas harmônicas:

$$\dot{x}_1(t) = (i\Omega)X_1 e^{i\Omega t}; \ddot{x}_1(t) = (i\Omega)^2 X_1 e^{i\Omega t} \quad (5)$$

$$\dot{x}_2(t) = (i\Omega)X_2 e^{i\Omega t}; \ddot{x}_2(t) = (i\Omega)^2 X_2 e^{i\Omega t} \quad (6)$$

Substituindo as segundas derivadas nas equações do movimento sistema acoplado:

$$\begin{cases} m_1((i\Omega)^2 X_1 e^{i\Omega t} + (k_1 + k_2)X_1 e^{i\Omega t} - k_2 X_2 e^{i\Omega t}) = F(t) \\ m_2((i\Omega)^2 X_2 e^{i\Omega t}) + k_2[X_2 e^{i\Omega t} - X_1 e^{i\Omega t}] = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} X_1(-m_1\Omega^2 + k_1 + k_2) - k_2 X_2 = F \\ -k_2 X_1 + X_2(m_2\Omega^2 + k_2) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$X_1(-m_1\Omega^2 + k_1 + k_2) - k_2 X_2 = F \quad (9)$$

$$-k_2 X_1 + (-m_2\Omega^2 + k_2)X_2 = 0 \quad (10)$$

Isolando X_2 em (10):

$$X_2 = \frac{X_1 k_2}{-m_2\Omega^2 + k_2} \quad (11)$$

Substituindo (11) em (9):

$$X_1(-m_1\Omega^2 + k_1 + k_2) - k_2 \frac{X_1 k_2}{-m_2\Omega^2 + k_2} = F \tag{12}$$

$$\frac{X_1(-m_1\Omega^2 + k_1 + k_2)(-m_2\Omega^2 + k_2) - X_1 k_2^2}{-m_2\Omega^2 + k_2} = F \tag{13}$$

$$\frac{X_1(m_1 m_2 \Omega^4 - m_2 \Omega^2 k_1 - m_2 \Omega^2 k_2 - m_1 \Omega^2 k_2 + k_1 k_1)}{-m_2 \Omega^2 + k_2} = F \tag{14}$$

$$X_1 = \frac{(-m_2 \Omega^2 + k_2) F}{m_1 m_2 \Omega^4 + ((-k_1 - k_2) m_2 - m_1 k_2) \Omega^2 + k_1 k_2} \tag{15}$$

Substituindo (15) em (11):

$$X_2 = \frac{k_2(-m_2 \Omega^2 + k_2) F}{m_1 m_2 \Omega^4 + ((-k_1 - k_2) m_2 - m_1 k_2) \Omega^2 + k_1 k_2 (m_2 \Omega^2 + k_2)} \tag{16}$$

$$X_2 = \frac{k_2 F}{m_1 m_2 \Omega^4 + ((-k_1 - k_2) m_2 - m_1 k_2) \Omega^2 + k_1 k_2} \tag{17}$$

Pela equação (7), observa-se que a amplitude da resposta X_1 o sistema principal é cancelada quando $m_2 \Omega^2 = k_2$, o que comprova a afirmação feita anteriormente sobre o funcionamento do DVA é um grau de liberdade.

A equação de amplitude X_1 é ilustrado na Fig. 22.2, onde se pode ver a função de resposta em frequência típica de um sistema de dois graus de liberdade, com a existência de duas frequências naturais. A introdução do ADV permite a geração de um ponto de massa m_1 e frequência $\Omega = \sqrt{k_2/m_2}$.

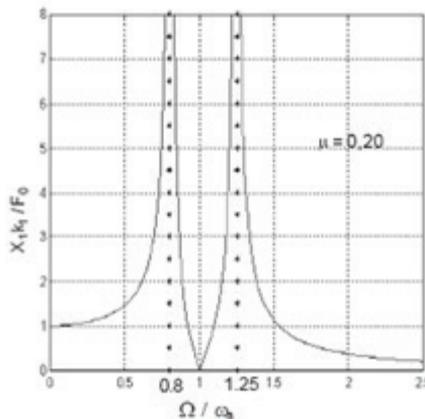


Figura 22.2 Função Resposta de Frequência

Introduzindo $X_1 = 0$ em (9), temos que $\Omega = \sqrt{k_2/m_2}$, a amplitude de vibração de massa m_2 é dada por:

$$X_2 = \frac{-F}{k_2} \quad (18)$$

Assim, a força exercitada pelo sistema de absorção no sistema primário é:

$$F = -k_2 X_2 \quad (19)$$

Portanto, o sistema secundário tem no sistema primário, uma força igual e oposta à força de excitação, resultando em o equilíbrio do sistema. Os ADV's são na maioria das vezes usados para trabalhar, a fim de reduzir os níveis do sistema primário de vibração quando estiver operando em sua frequência natural, ou próximo a ela. Assim, o ADV deve ser projetado de modo a que a sua frequência natural coincide com o sistema primário de modo a satisfazer:

$$\frac{k_2}{m_2} = \frac{k_1}{m_1} \Rightarrow |\omega_n| |\omega_a| \quad (20)$$

Assim, a partir da equação de amplitude X_1 , quando o numerador é zero, a resposta de amplitude X_1 do sistema primário também será zero, e isto ocorre quando a frequência de excitação, que é igual à frequência natural do sistema primário coincidir com a frequência natural do ADV, ω_n .

2 Otimização por colônia de formigas

Otimização por colônia de formigas (ACO) foi introduzido na década de 90 como um método inspirado na natureza para resolver problemas de otimização combinatória (DORIGO,1992; MANIEZZO; COLORNI,1996; DORIGO *et.al*, 1999; DORIGO; STUTZE, 2004; DORIGO; SOCHA, 2008; BLUM, 2005).

Os modelos inspirados na natureza têm atraído a comunidade científica, estes métodos têm várias vantagens, como a facilidade de código, a eficiência na utilização da computação paralela, a capacidade de superar as dificuldades de convergência numérica e a capacidade de lidar com variáveis discretas e contínuas simultaneamente.

Como já foi mencionado o ACO é inspirado no comportamento das formigas reais e seu esquema de comunicação usando rastro de feromônio (DORIGO,1992;MANIEZZO; COLORNI,1996; DORIGO *et. al*, 1999; DORIGO; STUTZE, 2004; DORIGO; SOCHA, 2008; BLUM, 2005).

Uma formiga movendo-se estabelece feromônio no chão, marcando o caminho. O comportamento coletivo que emerge dos agentes participantes é uma

forma de *retorno* positivo, onde as formigas seguem a trilha mais atraente, que possui mais depósito de feromônio.

Ao procurar por comida, as formigas reais começam a se mover aleatoriamente, a fim de encontrar alimento e voltar para sua colônia, enquanto se estabelece as trilhas de feromônio. Isto significa que, se outras formigas encontrarem em um excelente caminho, eles retornam reforçando a trilha.

Mas, ao longo do tempo a trilha de feromônio começa a evaporar, reduzindo a força atrativa. Quando um curto e um longo caminho são comparados, é fácil de ver que um caminho curto fica marcado mais rápido e a densidade de feromônio permanece alta.

Assim, se uma formiga encontra um caminho curto (do ponto de vista da otimização), quando marcha da colônia a uma fonte de alimento, outras formigas são mais propensas a seguir esse caminho, e o *retorno* positivo incentiva todas as formigas em seguir este caminho.

O algoritmo ACO, conforme apresentado abaixo na Fig. 22.3:

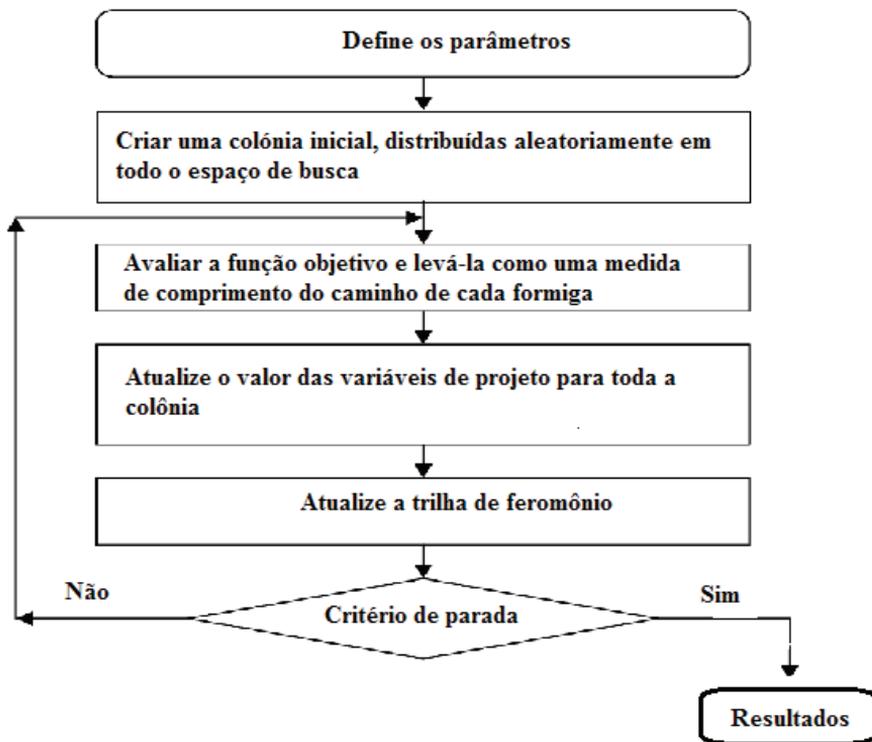


Figura 22.3 Algoritmo ACO

Uma colônia de formigas m pode ser expressado como uma matriz $m \times n$ $X_i = [x_1 x_2 \dots x_n]^T$, onde $x = [x_1 x_2 \dots x_n]^T$ é um vetor com n variáveis de projeto que corresponde a uma formiga simples.

Para o modelo do esquema de comunicação feromônio, como sugerido por Dorigo e Socha (2008) e Pourtakdoust e Nobahari (2004) para a implementação do modelo, usamos uma função densidade de probabilidade normal (PDF) pode ser qualquer função $P(x) \geq 0$ para todo $x \in \mathbb{R}$ (DORIGO; SOCHA, 2008):

$$\int_{-\infty}^{\infty} P(x) dx = 1 \quad (21)$$

A variável de decisão X_i a semente Gaussiana G_i é dada da seguinte forma (DORIGO; SOCHA, 2008; Blum, 2005):

$$G_i(x) = \sum_{j=1}^k \tau_j \frac{1}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_j)^2}{2\sigma_j^2}} \quad (22)$$

Onde a função Gaussiana j th é derivada a partir do elemento j th da e assumindo o alcance de solução j th da população será r , o peso τ_j da função Gaussiana j th é calculada como se segue (DORIGO; SOCHA, 2008; BLUM, 2005):

$$\tau_j = \frac{1}{q\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(r-1)^2}{2q^2k^2}} \quad (23)$$

onde r é definido como peso a ser um valor da função de Gaussiana, com um valor médio de 1,0 e um desvio padrão q . Para as pequenas q , as soluções melhores classificadas está fortemente preferido, e por q grande, a probabilidade se torna mais uniforme.

A probabilidade p_j de escolher a função Gaussiana j th, é denotado por j^* (DORIGO; SOCHA, 2008; Blum, 2005):

$$p_j = \frac{\tau_j}{\sum_{i=1}^k \tau_i} \quad (24)$$

A escolha da amostra da função de Gaussiana j^* a ser feito usando um gerador de números aleatórios que gera números aleatórios de acordo com a distribuição dos parâmetros. No entanto, antes de efetuar a amostra, a média do desvio padrão da função Gaussiana j^* th deve ser especificado.

Para fechar a definição de feromônio, τ , o índice de agregação, σ_{j^*} , deve ser definido. Assim, tomando como y a coluna j da matriz colônia X_i , o índice de agregação para a dimensão j , σ_{j^*} , é dada por (BLUM, 2005):

$$\sigma_{j^*} = \frac{1}{k} \rho \sum_{i=1}^k \sqrt{(x_i^l - x_i^{j^*})^2} \quad (25)$$

onde $\rho \in (0,1)$, quanto menor for a velocidade de convergência do algoritmo.

3 Discussões e resultados

O objetivo deste trabalho é reduzir a amplitude da vibração do sistema primário, ajustando parâmetros da massa e rigidez do ADV, destinado os valores mais baixos possível para eles.

De acordo com Ferreira e Oliveira (2006) como o sistema estrutural, os principais elementos de um edifício são os elementos de suporte de cargas verticais e horizontais. As cargas verticais são transmitidas por lajes dos pisos para os elementos de suporte verticais, incluindo colunas, varandas e paredes cheias. As cargas horizontais são transmitidas por lajes dos pisos para os mesmos elementos de suporte que transmitem para a fundação.

Entre esses elementos para um edifício duas lajes maciças m_1 e m_2 , os pórticos são os principais responsáveis para a transmissão de cargas verticais para a fundação; núcleos fornecem rigidez equivalente (lateral e torsional) k_1 e k_2 apropriados para o edifício e as paredes de cisalhamento. Os pórticos são mais flexível, de modo que eles são muitas vezes negligenciadas na análise global dos elementos de construção, quando se torna importante para a rigidez em geral da mesma.

As paredes de cisalhamento são paredes de concreto armado dimensionados para trabalhar a partir do solo para o console superior em forma. Eles podem ser dispostos em várias paredes de cisalhamento num edifício, por si só ou em conjunto acoplado. Ainda de acordo com Ferreira e Oliveira (2006), a rigidez k_2 pode variar de 65,87kN.m a 690,32kN.m.

Na Fig. 22.4 representa o sistema estrutural da edificação utilizado para a otimização por colônia de formigas.

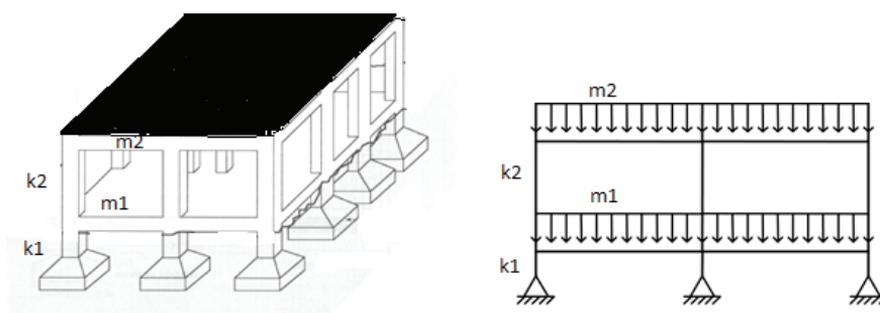


Figura 22.4 O Modelo

Fonte: Concreto Armado Eu te amo p.17

A amplitude do sistema da função objetivo usada é X_1 , descrita na equação 15. Como se deseja que $k_2/m_2 = k_1/m_1$, a mesma torna-se uma restrição de

igualdade relacionada com o projeto. Também deve-se atribuir limites inferiores e superiores para as variáveis de projeto (quanto sua massa e rigidez).

Assim, o projeto é formulado da seguinte forma:

Minimizar:

$$|X_1| = \left| \frac{(k_2 - m_2 \Omega^2) F}{m_1 m_2 \Omega^4 + ((-k_1 - k_2) m_2 - k_2 m_1) \Omega^2 + k_2 k_1} \right| \quad (26)$$

Sujeito a:

$$m_2 = \frac{m_1}{k_1} k_2 \quad (27)$$

$$65.87 \leq k_2 \leq 690.32 \quad (28)$$

$$0.07 \leq m_2 \leq 0.83 \quad (29)$$

Como resultado, é desejável que a frequência natural do sistema primário esteja em equilíbrio com a frequência do absorvente, isto é, $k_2/m_2 = k_1/m_1$ minimizando a amplitude do sistema primário X_1 , em seguida, tomado como uma restrição de igualdade relacionada com o projeto.

A Fig. 22.5 enumera as restrições do ADV, considerando a sua restrição de igualdade, a sua rigidez k_2 e massa m_2 , respectivamente variando de 65,87kN.m para 690,32kN.m e 0,07Ton para 0,83Ton. Com base no trabalho de Ferreira e Oliveira (2006) também propôs que a rigidez e massa do sistema primário foram avaliados em 1000KN/m e 1,2Ton.

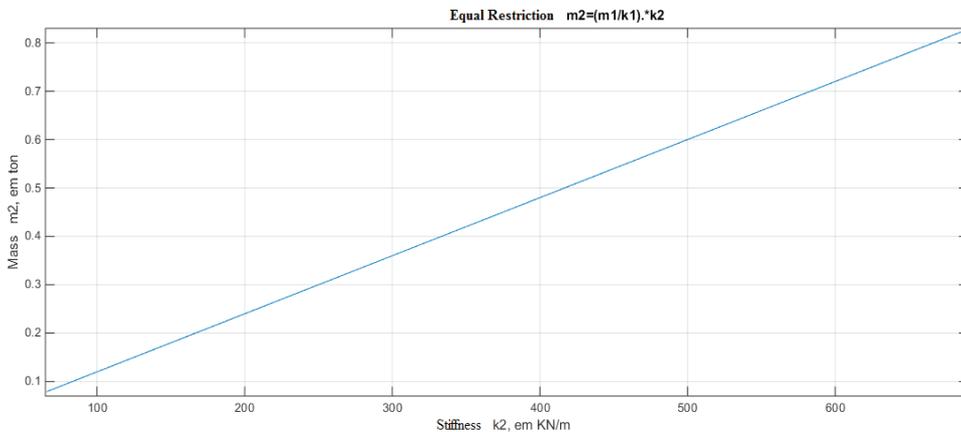


Figura 22.5 Restrição de Igualdade

Fonte: Realizado pelo autor.

Na Fig. 22.6 e na Fig. 22.7, é observado a resposta de amplitude do sistema primário X_1 tende a zero quando atribui valores maiores para rigidez k_2 e massa m_2 do absorvedor, respectivamente.

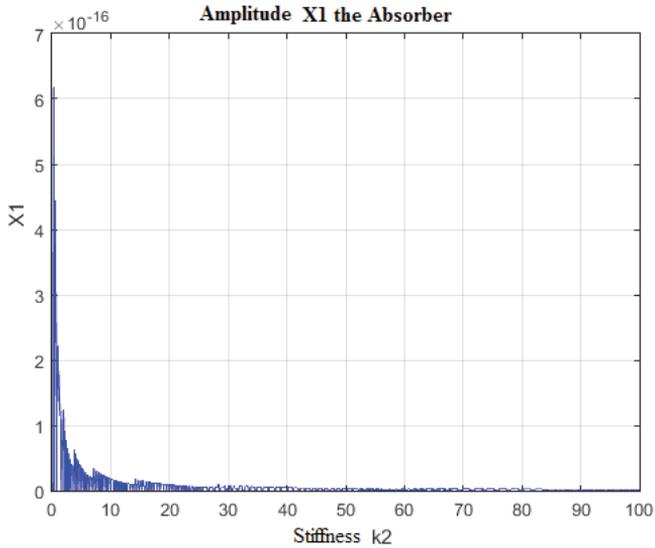


Figura 22.6 Amplitude X_1 do absorvedor em relação a rigidez

Fonte: Realizado pelo autor.

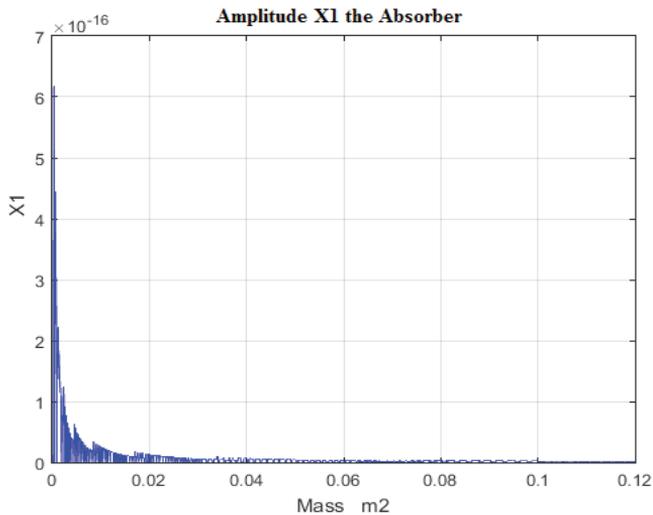


Figura 22.7 Amplitude X_1 do absorvedor em relação a massa.

Fonte: Realizado pelo autor.

Como o algoritmo de otimização colônia de formigas (ACO), formam uma classe de algoritmos enxame de inteligência, cuja representação bem-sucedida é dado pela interação de formigas artificiais para o ambiente e para ser isso, um método robusto, pois geralmente convergem com poucas interações se a função objetivo avaliar não é muito complexo, como o número de variáveis de projeto ou linearidade.

Após a implementação deste método para minimizar a amplitude do sistema primário, os valores ideais para k_2 , m_2 e X_1 já foram obtidas na primeira iteração, devido à linearidade da restrição de igualdade e das restrições laterais e por sua função objetivo ser também uma função de variável modular racional, uma vez que, usando a restrição de igualdade 27. Os resultados $k_2 = 668.9321$, $m_2 = 0.80272$ e $X_1 = 0$ são obtidos na primeira iteração com a aplicação do ACO nesse problema.

De acordo com a Fig. 22.8, observou-se que os resultados obtidos usando o método mostrou uma grande redução na amplitude da vibração do sistema primário, permitindo a redução dos parâmetros.

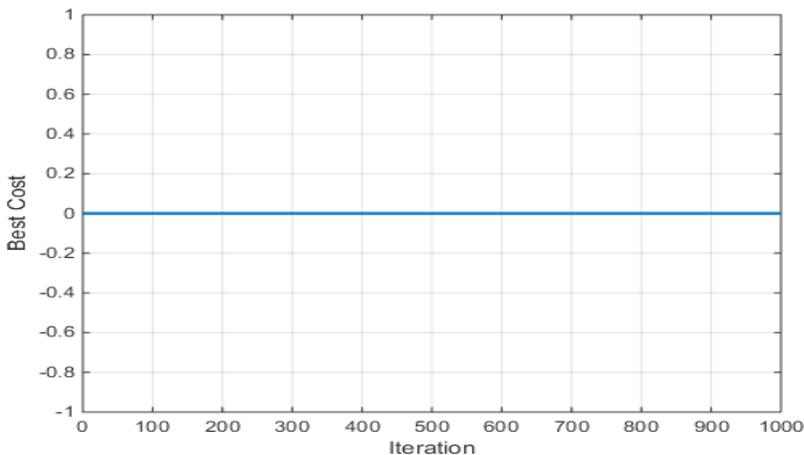


Figura 22.8 Melhor custo x Iteração

Fonte: Realizado pelo autor.

Portanto, o problema de implementação numérica do método de otimização evolutiva colônia de formigas demonstrou praticabilidade de reduzir os parâmetros de massa e a rigidez do amortecedor, sem perda de eficácia, isto é, sem aumentar a amplitude de vibração e obter a eficiência.

A análise do absorvedor com amortecimento, o que contribui para atenuar vibrações numa banda de frequência mais ampla, ao custo de uma eficiência mais

baixa na massa principal do ponto de ressonância é proposta viável de uma publicação futura, utilizando ACO como método de otimização para se obter sua solução ótima.

Conclusão

O objetivo do presente trabalho de pesquisa foi investigar o potencial uso de técnicas heurísticas na concepção ideal de sistemas mecânicos, com foco no método de otimização da colônia de formigas. Um estudo teórico de absorvedor dinâmico de vibração foi apresentado sendo considerada somente as rigidezes e as massas do sistema primário e do absorvedor, que consiste de um grau de liberdade e sem amortecimento.

Portanto, foi proposto o algoritmo de colônia de formigas como um método de otimização, contribuindo significativamente na pesquisa. O desenvolvimento do ACO começou com a formulação das características do algoritmo de colônia de formigas, quanto a sua origem, sua formulação matemática e de como aplicá-la nos absorvedores dinâmicos de vibração. Partindo desses princípios, uma rotina ACO foi desenvolvida e implementada considerando variáveis contínuas, apresentando e discutindo todos os resultados aqui obtidos. Esse algoritmo foi executado com os parâmetros sugeridos por Ferreira e Oliveira (2006) e mostrou eficiente na resolução do modelo proposto.

Referências

- BORNABEU, E.; DORIGO, M.; THERAULAZ, G., **Swarm Intelligence from Natural to Artificial Systems**, 1st ed., Oxford University Press, New York, 1999.
- BLUM, C., **Ant Colony Optimization: Introduction and Recent Trends**, *Physics of Life Reviews*, v.2, 2003.
- BROCK, J.E., **A Note on the Damped Vibration Absorber**, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers Journal applied Mechanics*, v.68, p.248, 1946.
- CARO, G. D.; Dorigo, M.; Gambardella, L., **Ant Algorithm of Discrete Optimization**, *Artificial Life*, v. 5, n. 2, p. 137-172, 1999.
- CHRISTENSES, R. M., **Theory of Viscoelasticity: an Introduction**, 2nd. Ed., New York, Academic Press Inc., 1982.

- COLORNI, A.; MANIEZZO, M. D. V., Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1st ed., 19996.
- DORIGO, M., *Optimization, Learning and Natural Algorithms*, PhDthesis, Politecnico in Milano, Dipartimento di Elettronica, Italy, 1992.
- DORIGO, M.; SOCHA, K., Ant Colony Optimization for Continuous Domains, *European Journal of Operational Research*, v.185, 2008.
- DORIGO, M.; STUTZLE, T., *Ant Colony Optimization*, ISBN 0-262-04219-3, Cambridge Press, Massachusetts, 2004.
- FERREIRA, M. P.; OLIVEIRA, D. R. C., Viabilidade Técnica e Econômica de Sistemas Estruturais em Concreto Armado para Edifício de Múltiplos Pavimentos com Layout Flexível, p.2114-2128, 2006. In: *Anais de VI Simósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto*, Trabalho SIMP0225.
- HAGOOD, N. W.; VON FLOTOW, A., Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks, *Journal of Sound and Vibration*, v.146, n. 2, p. 243-268, 1991.
- HARTOG, J. P. D., *Mechanical Vibrations*, New York: McGraw-Hill, 1956.
- HARTOG, J. P. D.; ORMONDOYD, J., Theory of the Dynamics Vibration Absorver, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, v. 50, p. 9-22, 1928.
- KITIS, L.; PILKEY, W. D.; WANG, B. P., Vibrations Reduction Over a Frequency Range, *Journal of Sound and Vibrations*, v. 89, p. 559, 1981.
- NOBAHARI, H.; POURTAKDOUST, S., An Extension os Ant Colony to Continuous Optimization Problems, Brussels, Belgium, 2004. In: Dorigo, M. editors. *Proceedings in ANTS 2004 – fourth international workshop on ant colony optimization and swarm intelligence*.
- RAO, S., *Vibrações Mecânicas*, Pearson Education do Brasil, São Paulo, 2009.
- RADE, D.; STEFFEN, V., *Dynamics Vibration Absorver Encyclopedia of Vibration*, Academic Press, ISBN 0-12-227085-1, Springer, 2001.

THOMPSON, A. G., Optimum Tuning and Damping of a Dynamics Vibration Absorber Applied to a Force Excited and Damped Primary System, **Journal of Sound and Vibration**, v. 77, p.403, 1981.

WABURTON, G. B., Optimum Absorber Parameters for Structural Dynamics, **Earth-quake Engineering and Structural Dynamics**, v. 9, p. 251, 1981

Análise paramétrica de vigas de concreto com fibras metálicas

Wanderlei Malaquias
Pereira Junior¹

José Júlio de Cerqueira Pituba²

Resumo: Este trabalho trata de uma abordagem numérica da aplicação do modelo constitutivo de mecânica do dano na análise do comportamento estrutural do concreto armado reforçado com fibras metálicas. Essa abordagem ainda é nova visto que o Brasil não possui nenhuma normatização em relação ao procedimento de cálculo desse tipo de material. O presente estudo expõe como objetivo fundamental a análise paramétrica das vigas estudadas por Lopes (2005) e Pereira Junior (2014). Nesse trabalho, variações de altura (h), largura (b_w), área de aço (A_s) e vão (L) são empregadas de forma a verificar a influência de cada parâmetro no estudo numérico da deformabilidade de peças fissuradas compostas por este material. Observa-se que os resultados obtidos com o emprego de modelagem a dano refletem o comportamento real das estruturas analisadas, onde parâmetros de maior influência são destacados.

Palavras-chave: Mecânica do dano, Concreto com fibra, Vigas, Modelos constitutivos.

Introdução

Modelos constitutivos têm fundamental importância na Engenharia de Estruturas visto que os mesmos auxiliam na determinação do comportamento mecânico de sistemas mecânicos em geral. Pereira Junior (2014) descreve uma

-
- 1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Laboratório de Mecânica Computacional. Contato: wanderlei.malaquias.pereira.jr@gmail.com.
 - 2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Laboratório de Mecânica Computacional. Contato: Julio.pituba@pq.cnpq.br. Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq.

série de modelos utilizados para a análise de estruturas, como os modelos de plasticidade, fratura e dano, sendo o último, foco desse trabalho.

Na Engenharia Civil, três materiais se destacam e são amplamente utilizados como material estrutural, sendo: aço; madeira; concreto. Porém, no Brasil, o concreto tem um destaque maior entre os três tipos, sendo que desde a década de 1950, um dos mais utilizados como material estrutural em construção de pequeno a grande porte.

De maneira geral, entender o comportamento mecânico do concreto não é uma tarefa simples, então modelos como os citados acima são importantes para o entendimento desse comportamento mecânico visto que ensaios tem um alto custo financeiro, além do que a simulação numérica auxilia na calibração de modelos reais, permitindo uma maior amplitude de testes quando comparada ao processo experimental.

O trabalho tem como objetivo tratar do estudo paramétrico de estruturas de vigas com concreto armado reforçado com fibras metálicas verificando assim a deformabilidade de cada variação estudada. Como o modelo constitutivo utilizado foi baseado na Mecânica do Dano, verificou-se então o deslocamento das peças utilizando esse tipo de modelo constitutivo.

Esse trabalho justifica-se devido à necessidade do melhor entendimento do comportamento de estruturas quando executadas em concreto armado e reforçadas com fibras metálicas. Outro fator importante é o fato de que o Brasil ainda não tem nenhum procedimento para verificação no Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS) para peças de concreto reforçada com fibras metálicas.

1 Desenvolvimento

No item 1 é apresentando o material estrutural, concreto com fibras, utilizado nas simulações. Logo após, toda a formulação matemática do modelo de dano e homogeneização dos materiais é discutida.

1.1 Concreto com fibras metálicas

Segundo Scoaris (2005), a fibra de aço é usada principalmente para controle da fissuração e, em determinados casos, a armadura principal pode ser substituída pela mesma, por exemplo, em pisos de concreto. Este material pode ser utilizado em lajes de edifícios, pavimentos e túneis, como também em recuperações de estruturas.

A fibra de aço quando misturada ao concreto simples se comporta como uma barreira para a propagação da fissuração ao longo da peça de concreto. Todavia a

capacidade de impedir estes efeitos de tração causados pela fissuração é principalmente determinada pela interação entre a matriz cimentícia e a fibra em questão, tornando então o estudo do comportamento mecânico entre a fibra e a matriz cimentícia de grande importância na determinação das propriedades mecânicas finais do concreto (PEREIRA JUNIOR, 2014)

Portanto, a fibra metálica tem a capacidade de promover o grampeamento das fissuras reduzindo assim a concentração de tensões na ponta da trinca. Esse efeito mitiga o processo de fissuração por completo na peça aumentando assim a capacidade portante da peça, visto que a mesma terá um comportamento mais dúctil.

Pasa (2007) cita alguns fatores que interferem no comportamento da fibra metálica na matriz cimentícia, são elas:

- A condição da matriz, antes ou após a fissuração;
- Propriedades mecânicas da matriz e da fibra;
- Geometria da fibra (comprimento, forma, diâmetro e mecanismos de ancoragem);
- Teor de fibras no compósito.

O Brasil ainda não possui nenhum processo normativo que regulamenta o dimensionamento de peças de concreto armado com fibras metálicas. O único procedimento normativo relativo a esse assunto foi criado recentemente, porém com o intuito apenas de classificar as fibras metálicas pela sua tipologia. Portanto, somente a NBR 15530 (ABNT, 2007) trata de forma mais direta da fibra metálica em misturas de concreto. Existe também outro procedimento normativo que cita o uso de fibras metálicas que é a norma NBR 8890 (ABNT, 2007), a qual prevê o uso de fibras metálicas na fabricação de tubos ou manilhas de concreto para águas pluviais.

1.2 Descrição dos modelos computacionais utilizados

Os modelos computacionais são descritos nos itens 1.2.1 ao item 1.2.3, tendo como base a formulação desenvolvida em Pituba e Fernandes (2011), Pereira Junior (2014) e Pereira Junior et al. (2016), onde maiores detalhes podem ser encontrados.

1.2.1 Modelo das armaduras

Neste trabalho foi utilizado um modelo constitutivo unidimensional simulando o comportamento mecânico das armaduras longitudinais no concreto armado. Sendo que o modelo aqui utilizado é um modelo de diagrama bilinear para representação do comportamento tensão *versus* deformação desse material.

1.2.2 Modelo de dano para concreto

O modelo utilizado para descrever o comportamento do concreto é baseado na mecânica do dano. Esse modelo é embasado na análise da microfissuração do material, sendo que a variável de dano é representada por um escalar D que penaliza o módulo de elasticidade E do material. No caso desse modelo desenvolvido por Pituba e Fernandes (2011) foi adotado apenas a sua versão unidimensional, visto que esta é mais simplificada e pode ser utilizada como um critério para análise do comportamento carga *versus* deslocamento, apresentando bons resultados como descrito em Pituba (2003) e Pereira Junior (2014).

O modelo de dano simula o comportamento de uma peça em processo de fissuração através de um sólido deformado equivalente, chamado de sólido de volume representativo, para que as funções que representam o comportamento do mesmo sejam contínuas. Para tal processo o valor do escalar de dano é dado pela equação (1.1).

$$D_n = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{S_0}{S} \quad (1.1)$$

Onde:

S_0 – Área de defeitos ou microfissuras;

S – Área total da seção;

A área que efetivamente resiste aos esforços ou simplesmente S_d é definida pela equação (1.2), apresentada logo abaixo.

$$S_d = S - S_0 \quad (1.2)$$

Considerando o princípio da equivalência de energia para verificação do sólido equivalente chega-se a equação (1.3) que representa o escalar de dano considerando os valores dos módulos de elasticidade antes e após a penalização causada pela danificação.

$$D = 1 - \left(\frac{E_e}{E} \right)^{1/2} \quad (1.3)$$

Onde:

E_e – Módulo de elasticidade efetiva;

E – Módulo de elasticidade inicial;

O modelo de dano em estudo está implementado em linguagem Fortran em um código computacional baseado no Método dos Elementos Finitos para a análise numérica de estruturas em barras discretizadas com seção transversal estratificada (ver Figura 23.1), permitindo assim considerar na seção transversal camadas

equivalentes de aço ou concreto. Tal código é identificado aqui como EFICOS. Ao longo deste trabalho admite-se perfeita aderência entre concreto e aço, definindo assim para cada camada suas características, como módulo de elasticidade e deformações anelásticas equivalentes, utilizando regra de homogeneização para tal fim (PEREIRA JUNIOR, 2014).

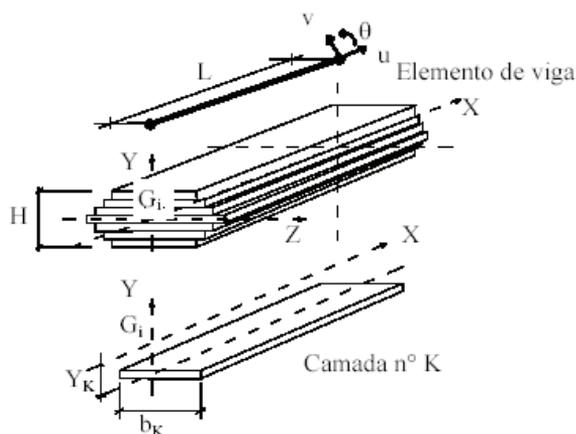


Figura 23.1 Elemento finito empregado no código computacional (PITUBA, 2003)

Para o modelo de elementos finitos, o valor do dano é dado pela equação (1.4), representando assim o valor do dano escalar.

$$D_i = 1 - \frac{1 + A_i}{A_i + e^{[B_i(Y_i - Y_{oi})]}} \quad (1.4)$$

Os parâmetros A , B e Y estão relacionados com o comportamento da curva tensão *versus* deformação do sólido. Em Pereira Junior (2014) foi realizada uma simulação para verificar a influência de cada parâmetro no comportamento da peça.

O sub-índice i denota se a variável de dano indica uma danificação por tração ou compressão. Maiores detalhes sobre a formulação encontram-se em Pituba e Fernandes (2011) e Pereira Junior (2014).

1.2.3 Modelo de homogeneização para consideração da presença das fibras no concreto

O comportamento mecânico de estruturas de concreto reforçado com fibras, quando submetidas a situações de carregamento e descarregamento, depende das interações da matriz cimentícia. Neste artigo, o procedimento utilizado para consideração das interações entre fibra/matriz é o procedimento de La Borderie (1991).

Por outro lado, via método de homogeneização cinemática de Voigt, La Borderie (1991) propõe a expressão (1.5) para o cálculo da tensão homogeneizada do compósito de concreto reforçado com fibras metálicas:

$$\sigma_{CRFA} = (1 - C)\sigma_m + C\sigma_f \quad (1.5)$$

Onde:

σ_{CRFA} : Tensão do material homogeneizado, dito CRFA;

C : Fração volumétrica de fibras de aço;

σ_m : Tensão na matriz cimentícia;

σ_f : Tensão na interface fibra tracionada imersa no concreto.

Observa-se que foi introduzida uma hipótese simplificadora, onde a deformação é suposta idêntica para a matriz e a fibra. Além disso, a orientação das fibras, que é aleatória e não privilegiada no sentido da sollicitação, não é levada em conta na modelagem proposta (PEREIRA JUNIOR, 2014).

2 Metodologia / procedimentos utilizados

O procedimento desse trabalho baseia-se em testes numéricos de vigas, onde o foco é a análise carga *versus* deslocamento em vigas de seção retangular. O método utilizado consiste em variar dimensões da peça como, altura, largura e vão e também a área de aço da seção transversal da viga.

O modelo inicial, denominado aqui de s0, é o mesmo do trabalho experimental de Lopes (2005) e os dados iniciais do modelo constitutivo de dano e fibras metálicas são os mesmos obtidos por Pereira Junior (2014) para a viga com concentração de 2,00 % de fibras metálicas. As Tabelas 2.1 e 2.2 apresentam os valores utilizados para o modelo de dano e para as variáveis que consideram as fibras no problema, respectivamente.

Tabela 23.1 Variáveis de dano para os testes numéricos (PEREIRA JUNIOR, 2014)

Módulo de Elasticidade (MPa)	At	Ac	Bt	Bc	Y0t	Yoc	Betat	Betac
30190,00	15,00	0,70	1290	2,5	9E-05	0,005	5E-07	3E-04

Tabela 23.2 Variáveis da fibra metálica para os testes numéricos (PEREIRA JUNIOR, 2014)

Tensão de Pico (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Deformação de Ruptura (%)	Concentração de fibras (%)
525,00	420,00	2,50	2,00

Essas variáveis são mantidas fixas durante os testes visto que as variáveis de dano e das fibras são obtidas através de ensaios experimentais do material. Esses ensaios são descritos com mais detalhes em Pituba e Fernandes (2011) e Pereira Junior (2014).

Neste trabalho, como descrito anteriormente, apenas alguns parâmetros da peça foram alterados, e para descrever melhor esses testes as Tabelas 2.3 a 2.6 são apresentadas.

As duas primeiras Tabelas (ver Tabelas 2.3 e 2.4) são referentes a mudanças na seção transversal do elemento, primeiramente mudanças na altura e depois mudanças na largura da peça de viga. Para efeito de testes, ou b ou h foram mantidas constantes ao longo desses dois testes iniciais, dependendo do que era variável.

Tabela 23.3 Teste 1 realizado para mudança de altura

Situações	h (cm)	b (cm)	L (cm)	A_s (cm ²)	h/b
0	25,0000	12,5000	230,0000	4,0220	2,00
1	26,2500	12,5000	230,0000	4,0220	2,10
2	28,1250	12,5000	230,0000	4,0220	2,25
3	31,2500	12,5000	230,0000	4,0220	2,50
4	34,3750	12,5000	230,0000	4,0220	2,75
5	37,5000	12,5000	230,0000	4,0220	3,00

Tabela 23.4 Teste 2 realizado para mudança de largura

Situações	h (cm)	b (cm)	L (cm)	A_s (cm ²)	b/h
0	25,0000	12,50	230,0000	4,0220	0,50
1	25,0000	52,50	230,0000	4,0220	2,10
2	25,0000	56,25	230,0000	4,0220	2,25
3	25,0000	62,50	230,0000	4,0220	2,50
4	25,0000	68,75	230,0000	4,0220	2,75
5	25,0000	75,00	230,0000	4,0220	3,00

As reduções de armadura simulam valores de perda de 10% a 50% do valor inicial dado no teste 0 que é de 4,02 cm² de aço.

Tabela 23.5 Teste 3 realizado para mudança da área de aço

Situações	h (cm)	b (cm)	L (cm)	A_s (cm ²)	redução armadura %
0	25,0000	12,50	230,0000	4,02	---
1	25,0000	12,50	230,0000	3,62	10,00
2	25,0000	12,50	230,0000	3,22	20,00
3	25,0000	12,50	230,0000	2,82	30,00
4	25,0000	12,50	230,0000	2,41	40,00
5	25,0000	12,50	230,0000	2,01	50,00

O teste 4 é realizado com uma mudança no vão da peça. É importante ressaltar que nessa simulação a distância entre as cargas da flexão a 4 pontos foi sempre mantida em uma faixa próxima de $L/3$, garantindo assim que o teste tenha sempre o mesmo padrão dos anteriores permitindo que a comparação da carga *versus* deslocamento seja feita de maneira adequada. Toda a área de aço é mantida constante em $A_s=4,02 \text{ cm}^2$.

Tabela 23.6 Teste 4 realizado para mudança do vão

Situações	h (cm)	b (cm)	L (cm)	vão livre (cm)	Ponto da carga 1 ^o carga (cm)	distância entre cargas (cm)
0	25,0000	12,50	230	200	80	70
1	25,0000	12,50	280	250	97,5	85
2	25,0000	12,50	330	300	115	100
3	25,0000	12,50	380	350	130	120
4	25,0000	12,50	430	400	147,5	135
5	25,0000	12,50	480	450	165	150

3 Discussão e Resultados

A primeira análise é realizada de acordo com a proposição da Tabela 2.3, onde o foco é a mudança de altura de forma que o coeficiente h/b aumente de 2 para 3.

Para essa análise a Figura 23.1 apresenta os resultados obtidos através da simulação numérica da influência da variação de altura. Lembrando que em todos os itens dessa análise não houve variação no volume de fibras metálicas.

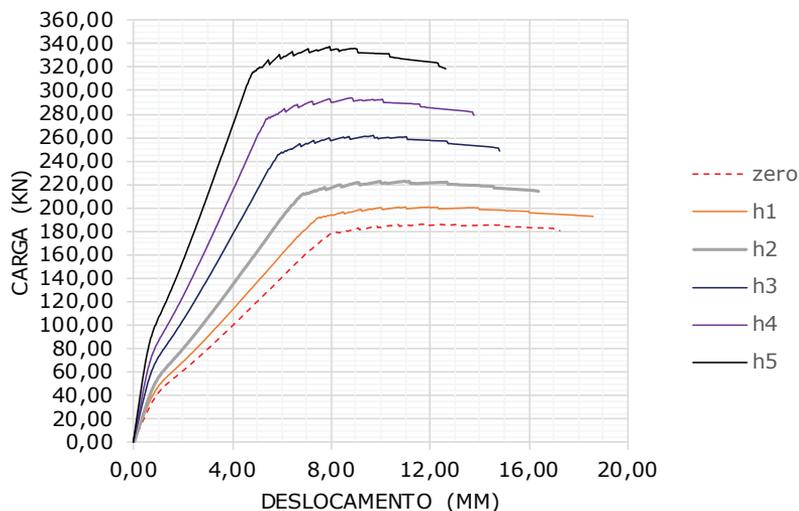


Figura 23.2 Carga *versus* deslocamento para mudança de altura

Pode-se afirmar que os ganhos de resistência e de rigidez foram bastante acentuados para incrementos de altura. É possível observar a Figura 23.1 e detectar que o aumento da mesma proporciona um ganho de resistência na peça como um todo, desde seu Estado Limite de Serviço (ELS) até o seu Estado Limite Último (ELU). O aumento da carga última da estrutura para o caso $h5$ foi elevado em até 81,56% quando comparado ao teste 0. A Tabela 3.1 apresenta de forma mais detalhada o ganho total em cada teste realizado e para verificar que o aumento da carga não é linear apresenta-se a Figura 23.2.

Tabela 23.7 Cargas totais para os testes com mudança de altura

Teste	Carga máxima (kN)	Carga do ELS (kN)	Aumento de carga em kN	Aumento de carga em %
0	186,17	74,468	----	----
1	200,422	80,1688	14,252	7,66%
2	223,022	89,2088	36,852	19,79%
3	262,359	104,9436	76,189	40,92%
4	294,479	117,7916	108,309	58,18%
5	338,001	135,2004	151,831	81,56%

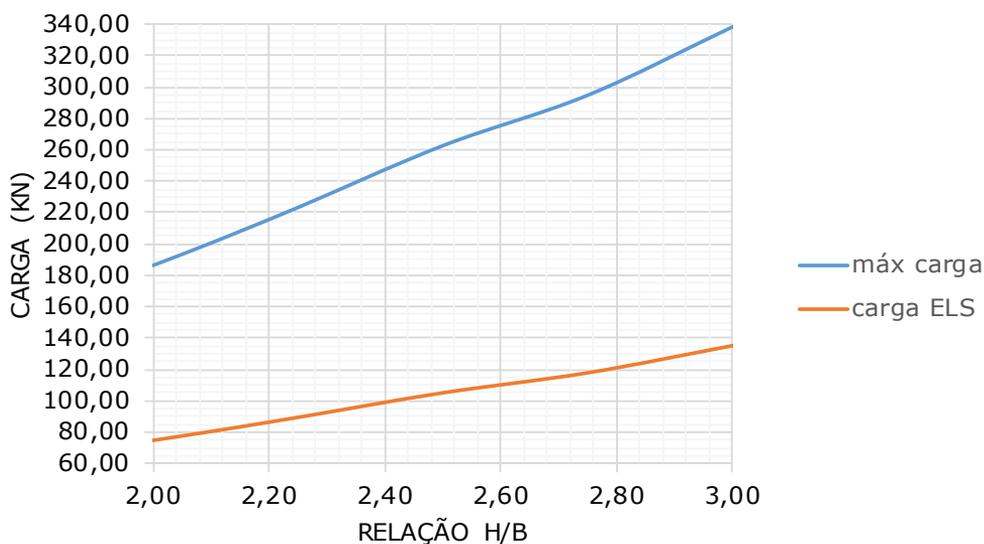


Figura 23.3 Comparativo de cargas para a relação h/b

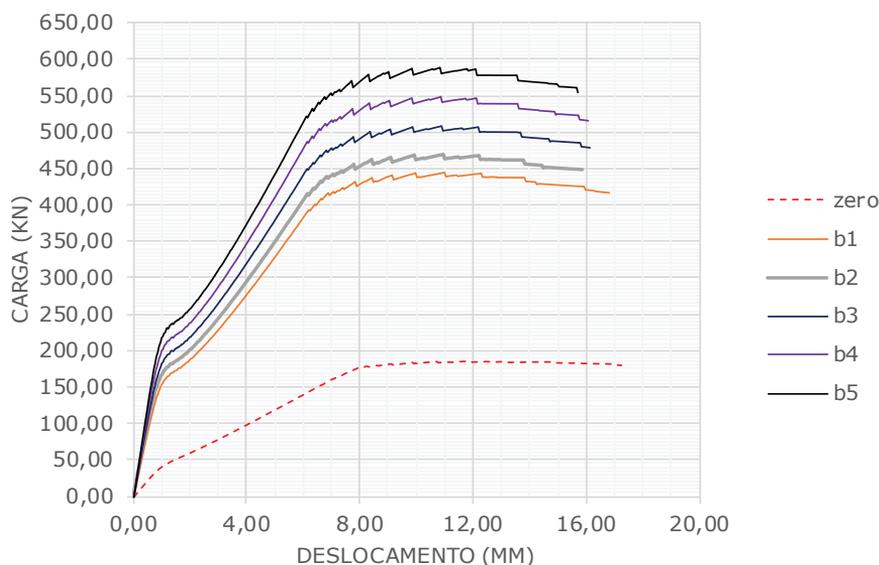
Avaliando o aumento dos deslocamentos da peça, a Tabela 3.2 apresenta a comparação do ganho de carga em função de pontos de medidas de deslocamentos, que nessa Tabela foram cerca de: (a) 4 mm; (b) 8 mm; (c) 12 mm.

Tabela 23.8 Comparativo carga e deslocamento para 4, 8 e 12 mm aproximadamente

Teste	Desloc. 4 mm (mm)	Carga a 4 mm (kN)	Desloc. 8 mm (mm)	Carga a 8 mm (kN)	Desloc. 12 mm (mm)	Carga a 12 mm (kN)
0	4,01	99,51	8,01	178,43	12,03	185,24
1	4,01	112,80	8,01	193,43	12,00	199,73
2	4,01	134,87	8,01	217,37	12,02	221,62
3	4,01	177,10	8,03	258,03	12,02	258,19
4	4,01	214,35	8,03	290,78	12,03	285,81
5	4,00	269,41	8,00	334,93	12,01	324,98

É possível verificar que o carregamento a 4 mm, 8 mm e 12 mm aumentou consideravelmente visualizando que a peça adquiriu resistência com o aumento da altura.

O próximo teste realizado foi do aumento da largura com os mesmos valores propostos em h/b. A proposição dos testes realizados foi feita na Tabela 2.4. A Figura 23.3 apresenta os resultados gráficos da curva carga versus deslocamento para essa situação.

**Figura 23.4** Carga versus deslocamento para mudança da largura

É possível perceber que o aumento de largura proporciona resistências superiores ao aumento da altura, porém ressalta-se que isso se deve ao fato que a largura foi praticamente duplicada para os testes realizados e que isso leva a um aumento de quantidade relativa de fibras. Já na Figura 23.4 são comparados os gráficos das Figuras 23.1 e 23.3, onde percebe-se que o ganho de resistência rela-

tiva de um teste de altura é maior que o ganho de resistência relativa de um teste de largura.

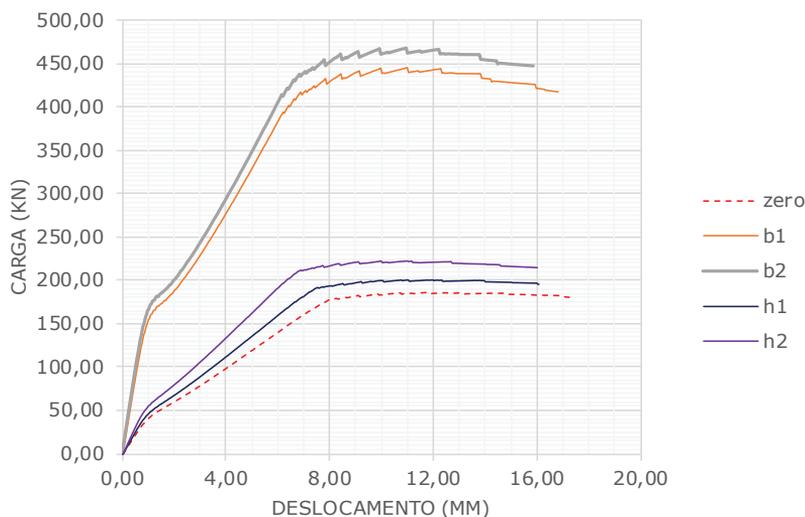


Figura 23.5 Comparação dos valores de aumento da altura e da largura

Analisando de forma mais detalhada os gráficos, o incremento de altura proporciona um ganho mais acentuado de resistência. Para o teste apresentado na Figura 23.4 esse ganho total é de 11,28% enquanto incrementos de altura proporcionam um aumento de 5,37% de resistência.

Conforme as análises anteriores a Tabela 23.3 apresenta os valores de aumento de resistência para o incremento de largura.

Tabela 23.9 Cargas totais para os testes com mudança de altura

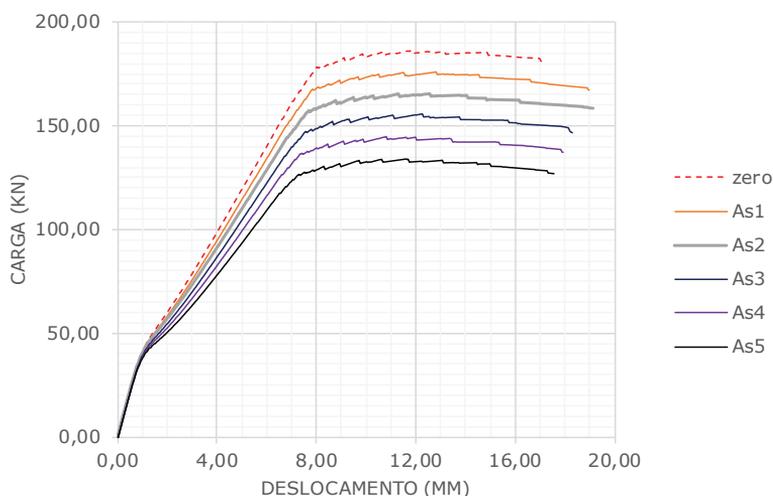
Teste	Carga máxima (kN)	Carga do ELS (kN)	Aumento de carga em kN	Aumento de carga em %
0	186,17	74,468	----	----
1	444,51	177,8032	258,338	138,76%
2	468,37	187,348	282,2	151,58%
3	508,19	203,2768	322,022	172,97%
4	548,13	219,25	361,955	194,42%
5	587,95	235,1812	401,783	215,82%

Esse valor de aumento maior que 100% se deve ao fato que o valor da largura foi dobrado para o processo iterativo. A Tabela 3.4 apresenta os valores de carga e deslocamento para três momentos da análise.

Tabela 23.10 Comparativo carga e deslocamento para 4, 8 e 12 mm aproximadamente

Teste	Desloc. 4 mm (mm)	Carga a 4 mm (kN)	Desloc. 8 mm (mm)	Carga a 8 mm (kN)	Desloc. 12 mm (mm)	Carga a 12 mm (kN)
0	4,01	99,51	8,01	178,43	12,03	185,24
1	4,00	277,80	8,02	429,20	12,02	442,15
2	4,00	294,09	8,02	452,85	12,02	466,07
3	4,00	321,27	8,03	491,85	12,03	505,91
4	4,00	348,55	8,03	531,27	12,03	545,83
5	4,01	375,48	8,03	570,59	12,03	585,64

O próximo teste realizado trata da redução da área de aço na seção transversal considerando perdas de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% conforme Tabela 2.5. A apresentação dos resultados é feita na Figura 23.5.

**Figura 23.6** Comparação dos valores de redução da área de aço

Conforme já era esperado, reduções de armadura comprometem a resistência da peça. Para visualizar a queda na resistência da peça as Tabelas 3.5 e 3.6 são apresentadas logo abaixo:

Tabela 23.11 Redução da carga para situações das armaduras

Teste	Carga máxima (kN)	Carga do ELS (kN)	Redução de carga em kN	Redução de carga em %
0	186,17	74,468	----	----
1	176,34	70,5376	9,826	5,28%
2	165,71	66,2852	20,457	10,99%
3	155,75	62,3004	30,419	16,34%
4	144,96	57,9844	41,209	22,14%
5	134,22	53,6872	51,952	27,91%

Tabela 23.12 Comparativo carga e deslocamento para 4, 8 e 12 mm aproximadamente

Teste	Desloc. 4 mm (mm)	Carga a 4 mm (kN)	Desloc. 8 mm (mm)	Carga a 8 mm (kN)	Desloc. 12 mm (mm)	Carga a 12 mm (kN)
0	4,013	99,509	8,01	178,43	12,03	185,24
1	4,02	95,60	8,02	168,76	12,01	175,06
2	4,02	91,65	8,00	158,40	12,02	165,16
3	4,02	87,61	8,01	148,68	12,03	155,35
4	4,02	83,31	8,01	139,58	12,00	144,67
5	4,02	78,91	8,03	129,15	12,02	132,97

Observando a Tabela 3.5 é possível verificar que, mesmo para situações de 50% de redução na armadura longitudinal, a carga não sofreu alterações maiores que 20% em redução da carga máxima. Esse fato pode ser devido a presença de fibras metálicas na composição do concreto armado. Para situações sem a presença da fibra metálica esses valores seriam mais acentuados conforme observações do trabalho de Schmaltz *et al.* (2011).

Finalizando a composição de resultados do problema, variou-se o vão de forma a obter os valores de carga *versus* deslocamento. Os valores dessas simulações seguem na Tabela 3.7. Maiores detalhes dessa simulação são apresentados nas Figuras 23.6 e Tabela 23.8.

Para o aumento de vão é possível verificar que a carga decresce em valores na faixa de 21,23% a 62,93%. Quando comparado aos valores de armadura esse decréscimo é bem mais acentuado devido ao aumento do valor de momento fletor na peça, enquanto o problema de armadura mantém o momento na seção transversal.

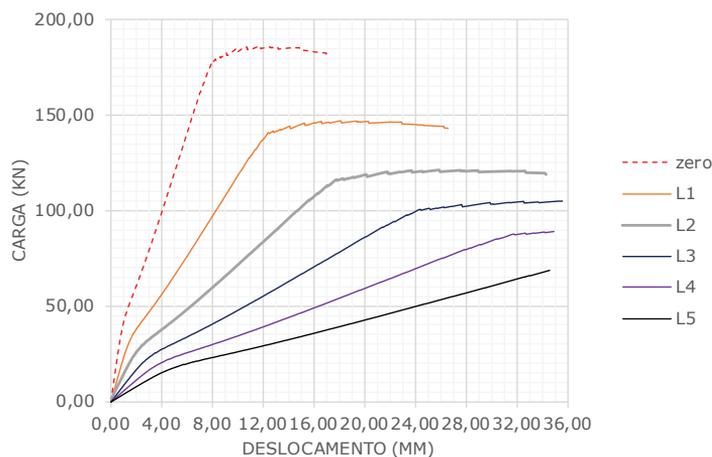
**Figura 23.7** Comparação dos valores para aumento do vão

Tabela 23.13 Redução da carga para situações do vão

Teste	Carga máxima (kN)	Carga do ELS (kN)	Redução de carga em kN	Redução de carga em %
0	186,17	74,468	----	----
1	146,655	58,662	39,515	21,23%
2	121,027	48,4108	65,143	34,99%
3	105,202	42,0808	80,968	43,49%
4	88,8438	35,53752	97,3262	52,28%
5	69,0139	27,60556	117,1561	62,93%

Verificando os valores de carga *versus* deslocamento do problema com a mudança de vão apresenta-se a Tabela 3.8.

Tabela 23.14 Comparativo carga e deslocamento para 4, 8 e 12 mm aproximadamente

Teste	Desloc. 4 mm (mm)	Carga a 4 mm (kN)	Desloc. 8 mm (mm)	Carga a 8 mm (kN)	Desloc. 12 mm (mm)	Carga a 12 mm (kN)
0	4,013	99,509	8,01	178,43	12,03	185,24
1	4,00	56,06	8,01	97,02	12,01	136,98
2	4,01	37,27	8,02	59,32	12,02	83,20
3	4,00	27,52	8,01	40,80	12,00	55,36
4	4,00	20,57	8,02	30,03	12,01	39,18
5	4,01	15,35	8,02	23,32	12,03	29,50

Conclusões ou considerações finais

Os resultados elencados no item 3 mostram que altura e vão talvez sejam as propriedades mais influentes no quesito de análise da deformabilidade de peças fissuradas. Os estudos apontaram que para aumento da altura da seção transversal, observam-se aumentos sensíveis de aproximadamente 80,00% para as simulações indicadas. Já para o vão, a mudança é sensível no sentido de redução da carga máxima da peça. A situação 4 e 5 apontam uma baixa de mais de 50,00%.

Provavelmente esses aumentos de carga foram incrementados pela presença da fibra metálica na matriz de concreto, visto que a concentração utilizada para essas simulações foi de 2,00% de fibras.

Outro fato importante se dá na análise das reduções de armadura longitudinal, onde foi possível verificar que em reduções expressivas como de 50,00% a menos de armadura a queda de resistência da peça foi de apenas de aproximadamente 27,00%. Portanto, observa-se que a presença de fibras na matriz cimentícia reduz o nível de deslocamento na peça, mesmo que haja uma redução na armadura. Fato o qual é explicado pelo efeito de grampeamento das fissuras.

As sugestões para trabalhos futuros são verificar experimentalmente a influência dos parâmetros geométricos na deformabilidade da peça fissurada, além da utilização de outros tipos de concreto e concentração de fibras na mistura, permitindo assim criar um campo de resultados que permitam conclusões mais abrangentes sobre tal tema, além de contribuir para uma discussão sobre o cálculo de deslocamentos em peças de concreto reforçado com fibras.

Referências

- _____. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15530: Fibras de aço para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2007, p. 7.
- _____. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8890: Tubo de concreto de seção circular para águas pluviais e esgotos sanitários – Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2007, 30 p.
- LA BORDERIE, C. *Phenomenes unilateraux dans un materiau endommageable: modelisation et application a l'analyse de structures en beton*. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de Paris, Paris, 1991.
- LOPES, M. M. *Substituição parcial de armadura de flexão por fibras de aço em vigas de concreto*. 2005. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- PASA, V. F. *Análise do comportamento de estruturas de concreto reforçado com fibras de aço via método dos elementos finitos*. 2007. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- PEREIRA JUNIOR, W. M. *Análise numérica de estruturas de concreto com fibras utilizando mecânica do dano*. 2014. 157 f. Dissertação (Mestrado em Mecânica das Estruturas) – Escola de Engenharia de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.
- PEREIRA JUNIOR, W. M.; PITUBA, J. J. C.; ARAÚJO, D. L. (2016). Análise numérica de vigas de concreto com fibras de aço utilizando mecânica do dano. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 9, pp 153-191.
- PITUBA, J. J. C. *Sobre a formulação de um modelo de dano para concreto*. 2003. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

PITUBA, J. J. C.; FERNANDES, G. R. (2011). An Anisotropic Damage Model for Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 137, pp 610-624.

SCOARIS, M. R. **Concretos Reforçados com Fibras: Avaliação das Propriedades Mecânicas Através do Método da Maturidade**. 2005. 260 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

SCHMALTZ, F. A. V.; PEREIRA JUNIOR, W. M.; BATISTA, C. M. P.; SALES, M. W. R. (2015). Efeito paramétrico da armadura em pórticos de concreto armado utilizando mecânica do dano. *Revista eletrônica de Educação da Faculdade Araguaia*, v. 8, pp 224-245.

Otimização da faixa de frequência no estudo da integridade de estruturas utilizando os métodos de busca aleatória e colônia de formigas

João Paulo Moreira Bento¹
Bruno Pereira Barella²

Romes Antônio Borges³
José dos Reis Vieira de
Moura Júnior⁴

Resumo: As técnicas de monitoramento da integridade estrutural nas últimas décadas vêm sendo foco de muitas pesquisas, e o método de impedância eletromecânica é uma das tecnologias utilizadas para realizar o monitoramento de estruturas. A partir deste procedimento são fornecidos dados onde pode-se comparar o componente defeituoso e o não defeituoso. O objetivo deste trabalho é encontrar o melhor intervalo de frequência o qual é possível identificar a falha. Para tanto, os métodos de otimização de busca aleatória e algoritmo de colônia de formigas foram implementados para avaliar a função objetivo métrica de dano a cada intervalo e fornecer informações sobre maior ou menor divergência de características estruturais do componente em estudo. Por fim, os resultados obtidos nos mostram que ambos os métodos de otimização utilizados

-
- 1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, aluno de mestrado em Modelagem e Otimização da Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: joaopaulo.moreira.bento@gmail.com. Bolsista de mestrado CAPES.
 - 2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, aluno PIVIC do curso de Matemática Industrial. Contato: brunobarella@hotmail.com.
 - 3 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, professor da Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: romes@ufg.br.
 - 4 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, professor da Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: zereis@ufg.br.

convergem para faixa de maior diferença entre os sinais do componente com falha e sem falha.

Palavras-chave: Falha estrutural, Integridade estrutural baseado em impedância, Otimização numérica.

Introdução

O Monitoramento da Integridade Estrutural ou mais conhecido como *SHM* do inglês – Structural Health Monitoring – é uma tecnologia que lida com o desenvolvimento e implementação de técnicas de detecção, inspeção e monitoramento de danos em estruturas. Esta tecnologia vem sendo utilizada principalmente nas áreas da engenharia aeronáutica, civil e mecânica (MOURA JUNIOR, 2008). Existem variados procedimentos para realizar o monitoramento da integridade estrutural atualmente, neste trabalho o processo que será abordado é o do método de impedância eletromecânica.

O *SHM* utilizando a técnica da Impedância Eletromecânica é baseado na excitação de altas frequências na estrutura através de um sensor/atuador, pois são nas altas frequências que existe a possibilidade de se encontrar danos de pequenas intensidades, como trincas, furos, entre outros, na estrutura analisada (AFSHARI, 2012). Este é um método de análise da integridade estrutural que está classificado como sendo não destrutivo, pois ele não afeta as características mecânicas da estrutura após serem concluídos os ensaios, segundo Bray e McBride (1992) e Palomino (2008).

O funcionamento deste método é simples. Sobre a estrutura em estudo é colada um sensor/atuador *PZT* (Titanato-Zirconato de Chumbo). Este *PZT* é excitado em alta frequência e sofre uma deformação. Essa deformação causa uma excitação (vibração) na estrutura. É realizada então a medição da impedância (resistência da estrutura) através do *PZT*. Ela possui duas parcelas, a parte imaginária (representa alterações capacitivas do *PZT*) e a parte real (representa a resistência mecânica da estrutura quanto a vibração induzida pelo *PZT*). Quando houver uma mudança de rigidez ou da massa da estrutura (falha), os picos do sinal da impedância serão alterados (MOURA JUNIOR, 2008).

Utilizando de métodos de otimização busca-se encontrar o intervalo de frequência com a maior diferença entre dois sinais obtidos pelo método da impedância, os quais indicam que podem existir danos estruturais no objeto de estudo, tais como trincas, furos ou corrosões. A otimização de acordo com Vanderplaats (1999), tem o propósito de analisar determinado problema e encontrar os melhores valores para as variáveis de projeto. Desta forma algumas técnicas podem ser usadas ou implementadas para atingir o propósito: maximizar ou minimizar um índice de desempenho ou uma dada função objetivo.

Para realizar esta análise, adotou-se o método de otimização de busca aleatória por se tratar de um método simples e eficaz, que procura aleatoriamente a melhor faixa de frequência onde há a maior divergência dos sinais. E também o método de colônia de formigas, que é um método bioinspirado no comportamento de formigas que deixam rastros de feromônios para que os próximos passos a serem analisados, se acumulem nas proximidades do possível intervalo ótimo.

Este trabalho está estruturado como segue. Na Seção 1 é apresentada a formulação matemática e a resolução do problema de otimização utilizando os algoritmos de busca aleatória e ACF. Na seção 2 é abordado o procedimento experimental utilizado para obter os sinais da viga com e sem falha através do método de impedância eletromecânica. Na seção 3 são apresentados e discutidos os resultados obtidos. E ao final do trabalho são apresentadas as conclusões obtidas.

1 Desenvolvimento

Este trabalho tem como principal foco obter a melhor faixa de frequência para o estudo de danos estruturais a partir de sinais obtidos pelo método de impedância eletromecânica. Para realizar a otimização a função objetivo utilizada para ambos os métodos será a métrica de danos.

1.1 Função objetivo – métrica de danos

De acordo com Palomino (2008), as métricas de danos são técnicas estatísticas que podem ser utilizadas para avaliar melhor a medida realizada pelo método da impedância eletromecânica. Para que este método seja capaz de mensurar as variações entre os sinais, deve-se realizar medidas que correspondam a um sinal de referência, ou seja a estrutura sem danos. Desta maneira as comparações entre o sinal da estrutura sem danos e com danos podem ser mensuradas.

Segundo Bitencourt e Steffen Júnior (2010) os gráficos apresentados pelos sinais medidos através do método da impedância eletromecânica, nos permitem apenas avaliar qualitativamente se a estrutura possui alguma falha ou não, entende-se então que o principal propósito da métrica de dano neste problema é poder avaliar de forma quantitativa a diferença entre as medições realizadas pelo método da impedância quando uma estrutura está sem danos e quando ela tem algum tipo de dano.

A métrica de dano que foi utilizada neste trabalho foi inicialmente apresentada por Sun *et al.* (1995) e é descrita como sendo o “desvio médio da raiz quadrada (RMSD)”, ela é indicada na Equação 1.

$$M = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(Re(z_{i1}) - Re(z_{i2}))^2}{(Re(z_{i1}))^2}} \quad (1)$$

Da equação 1, temos que M representa a métrica de dano calculada, $Z_{i,1}$ representa o sinal medido da estrutura sem danos e $Z_{i,2}$ representa o sinal medido da estrutura com danos no intervalo de frequência i , e n representa a quantidade de frequências avaliadas no intervalo definido (BITTENCOURT; STEFFEN JUNIOR, 2010). Quanto maior o valor apresentado por M , maior é a diferença entre os sinais da estrutura com e sem falha.

1.2 Restrições do problema

Para este trabalho, as duas restrições para a avaliação da melhor faixa de frequência para estudo serão:

- A quantidade de pontos do sinal obtido. A placa que adquire os sinais de impedância nos fornece 501 pontos para avaliar a estrutura entre a faixa de frequência de 25Khz e 40Khz.
- O range para encontrar a melhor faixa de frequência para estudo. Foi determinado que para este trabalho será usada uma variação entre ± 10 e ± 20 do ponto ótimo escolhido, ou seja, a melhor faixa de frequência para análise poderá variar entre 21 e 41 pontos.

1.3 Método da busca aleatória

Os métodos de ordem zero geralmente são confiáveis e fáceis de programar, são bem eficazes quando trabalham com funções não convexas e descontínuas e em muitos casos podem trabalhar com valores discretos nas variáveis de projeto. O preço pago por esta generalidade é que os métodos de ordem zero geralmente necessitam que a função seja avaliada milhares de vezes para encontrar o ponto ótimo, mesmo o problema sendo muito simples. O método escolhido para se trabalhar neste problema foi o método da busca aleatória. De acordo com Vanderplaats (1999) este método é considerado o método de ordem zero mais simples de ser implementado e por isso ele é tão utilizado.

O método da busca aleatória utilizada neste trabalho consiste em selecionar um ponto aleatoriamente dentro de uma região delimitada e fazer a comparação com o seu vizinho, se o vizinho escolhido não for melhor, é realizada uma nova busca, este processo se repete até o número fixado de iterações ocorrer. Pode acontecer de a solução final apresenta não ser a solução global do problema, mas apenas uma solução local (SOUZA, 2003). Deve-se deixar claro que para encontrar a melhor faixa de frequência serão utilizadas as posições (variáveis inteiras) que a mesma possui dentro do vetor sinal obtido pelo experimento, ou seja, como dado de entrada do algoritmo é fornecida uma posição aleatoriamente dentro do espaço determinado (cada posição possui um valor associado) são realizados os

cálculos utilizando a métrica de danos e o dado de saída é também uma posição dentro do espaço determinado.

1.4 Algoritmo de colônia de formigas

O algoritmo de colônia de formiga (ACF), que é mais conhecido por sua sigla em inglês ACO (Ant Colony Optimization) foi idealizado por Marco Dorigo e seus colegas no início da década de 90, como sendo um novo modelo de método metaheurístico inspirado na natureza (DORIGO *et al.*, 1991).

De acordo com Bonabeau *et al.* (1999), os insetos que vivem em colônias são extremamente organizados e disciplinados em relação as suas atividades coletivas, como por exemplo a busca pela comida. E o algoritmo de colônia de formigas é baseado nesta busca que as formigas realizam atrás de alimento.

Dorigo *et al.* (1991), baseou-se no brilhante experimento realizado por Deneubourg *et al.* (1990) para desenvolver o ACF. O experimento que consistia basicamente em uma ponte dupla onde uma colônia de formigas da espécie *I. humilis* era ligada a uma fonte de alimentos. Observou-se que inicialmente as formigas escolhiam o caminho a ser percorrido aleatoriamente. Após ter encontrado o alimento, elas voltavam ao ninho, e no percurso de volta eram deixadas trilhas de feromônio. Após um certo período as formigas deixavam de percorrer o caminho aleatoriamente e se organizavam e seguiam o fluxo deixado pelos seus próprios rastros de feromônio, que era também o menor caminho a ser percorrido.

Para o ACF utilizou-se da mesma concepção empregada ao método da busca aleatória, onde que para obter a melhor faixa de frequência serão utilizadas as posições (cada posição possui um valor associado) dentro do espaço determinado como dados de entrada e saída.

A Figura 24.1 ilustra o comportamento das formigas no final deste experimento.

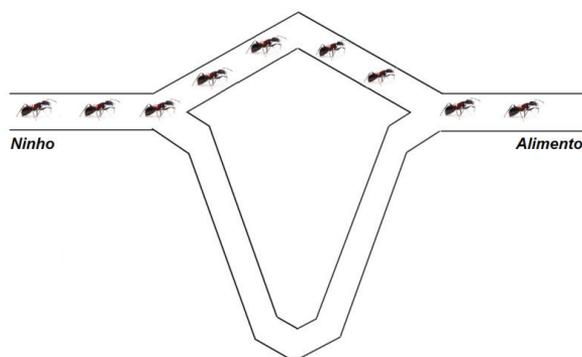


Figura 24.1 Comportamento das formigas no experimento da ponte dupla.

Fonte: Adaptado de Dorigo e Stützle (2004)

2 Procedimentos utilizados

O experimento consiste em realizar a medição dos sinais de impedância em uma viga em diferentes condições, para então poder realizar a implementação dos algoritmos propostos e fornecer no final a melhor faixa de estudo para análise.

O monitoramento do sinal de impedância eletromecânica da viga é feito através da placa EVAL-AD5933EBZ, que é apresentada na Figura 24.2.

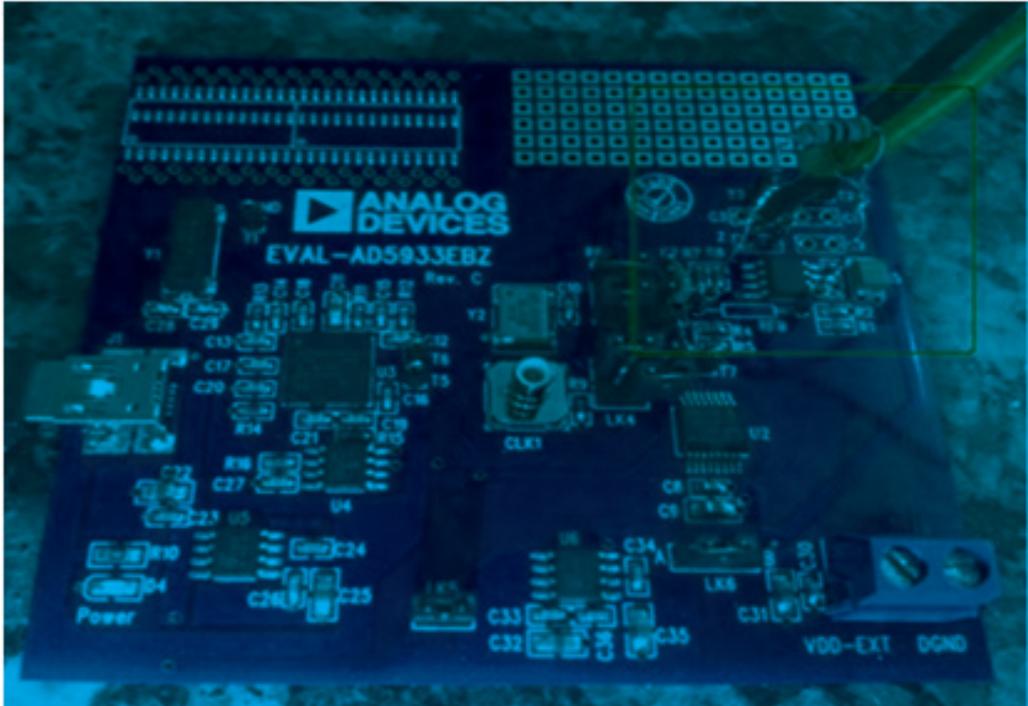


Figura 24.2 Placa utilizada para realizar a leitura dos sinais.

Fonte: Elaborado pelos autores

Para o experimento, foi utilizada uma viga dobrada com dimensões de $150 \times 25 \times 3 \text{ mm}$ e a extremidade dobrada tem 35 mm de comprimento. A Figura 24.3.a apresenta a viga na condição sem danos, e a Figura 24.3.b apresenta a mesma viga na condição com dano (o parafuso simula um dano físico na viga, ele é preso com porca e arruelas na ponta da viga). Na Figura 24.3 também é possível observar o sensor/atuador Piezoelétrico na viga, o modelo utilizado neste experimento é o do tipo Titanato-Zirconato de Chumbo (PZT) com dimensões de $73 \times 25 \text{ mm}$.



Figura 24.3.a Placa sem parafuso
(placa em perfeito estado).



Figura 24.3.b Placa com parafuso
(simulando a falha).

Fonte: Elaborado pelos autores

A faixa de frequência utilizada neste experimento foi de 25–40KHz com um passo de 30Hz, totalizando 501 pontos para análise. Deve-se trabalhar apenas com a parte real do sinal da impedância medida para poder realizar as análises, devido ao fato de que as propriedades mecânicas da estrutura estão armazenadas neste sinal. A Figura 24.4 apresenta o sinal plotado das duas vigas em questão.

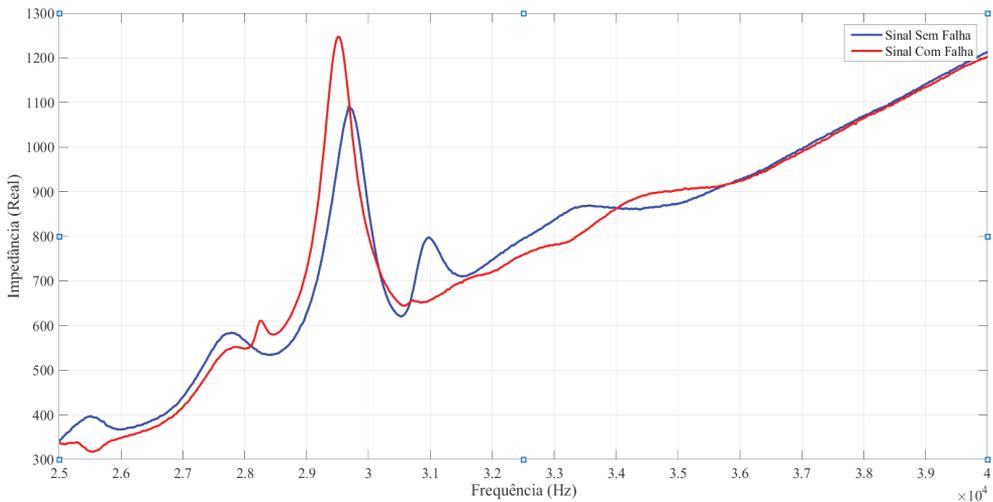


Figura 24.4 Sinal da parte real da impedância obtido pelo experimento.

Fonte: Elaborado pelos autores

3 Discussão e resultados

Utilizando o método da busca aleatória optou-se por realizar 5000 iterações para que o resultado pudesse se estabilizar no ponto de máxima diferença entre os sinais. Com este método, após serem realizadas 20 simulações, conclui-se que o melhor ponto está na posição 135 que corresponde a frequência de 29020Hz. A melhor faixa de frequência por este método foi compreendida entre 28420-29620Hz. A Tabela 24.1 apresenta os resultados para a melhor posição em cada uma das 20 simulações realizadas pelo método de busca aleatória.

Tabela 24.1 Tabela de simulação (método de busca aleatória).

<i>Simulação</i>	<i>Melhor Posição</i>
1	134
2	135
3	135
4	134
5	135
6	134
7	135
8	135
9	134
10	135
11	135
12	136
13	134
14	135
15	133
16	135
17	135
18	135
19	135
20	136
<i>Média</i>	<i>135</i>

(Fonte: Elaborado pelos autores)

A Figura 24.5.a apresenta a faixa otimizada pelo método da busca aleatória no sinal da impedância obtido pelo experimento, e a Figura 24.5.b apresenta esta faixa isolada.

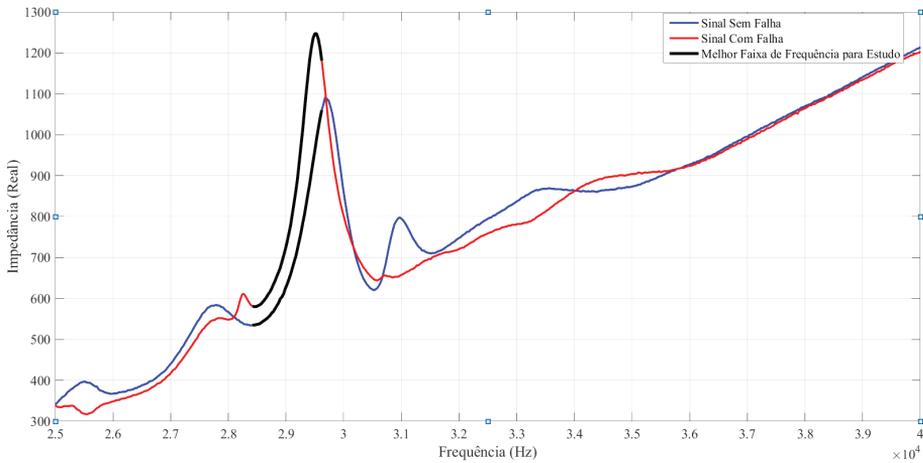


Figura 24.5.a Faixa ótima utilizando o método da busca aleatória.

Fonte: Elaborado pelos autores

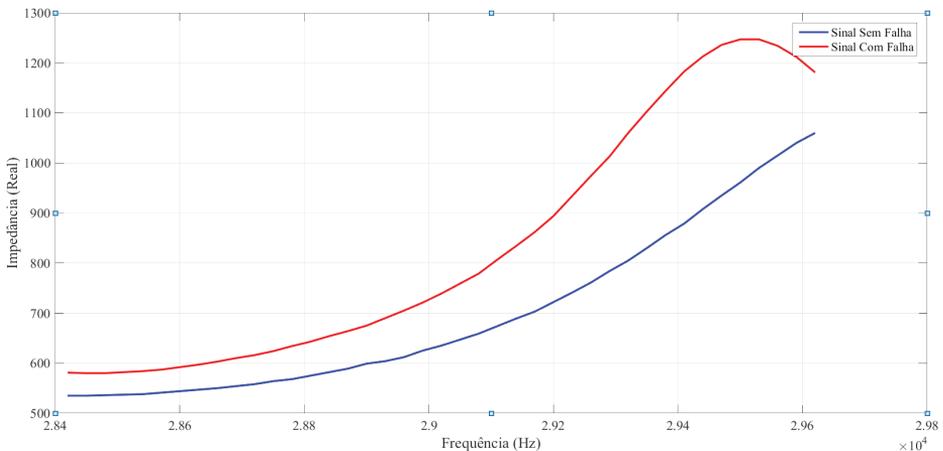


Figura 24.5.b Faixa ótima utilizando o método da busca aleatória.

Fonte: Elaborado pelos autores

Utilizando o ACF (algoritmo de colônia de formigas) foram produzidas 20 simulações e em cada simulação foram realizadas 100 iterações. O resultado obtido em todas as simulações foi de que o melhor ponto está localizado na posi-

ção 135 que corresponde a frequência de 29020Hz, e a melhor faixa de frequência otimizada por este método foi compreendida entre 28420-29620Hz. A Tabela 24.2 apresenta os resultados para a melhor posição em cada uma das 20 simulações pelo método do ACF.

Tabela 24.2 Tabela de simulação (ACF).

<i>Simulação</i>	<i>Melhor Posição</i>
1	135
2	135
3	135
4	135
5	135
6	135
7	135
8	135
9	135
10	135
11	135
12	135
13	135
14	135
15	135
16	135
17	135
18	135
19	135
20	135
<i>Média</i>	<i>135</i>

(Fonte: Elaborado pelos autores)

A Figura 24.6.a apresenta a faixa otimizada pelo algoritmo da busca aleatória no sinal da impedância obtido pelo experimento, e a Figura 24.6.b apresenta esta faixa isolada.

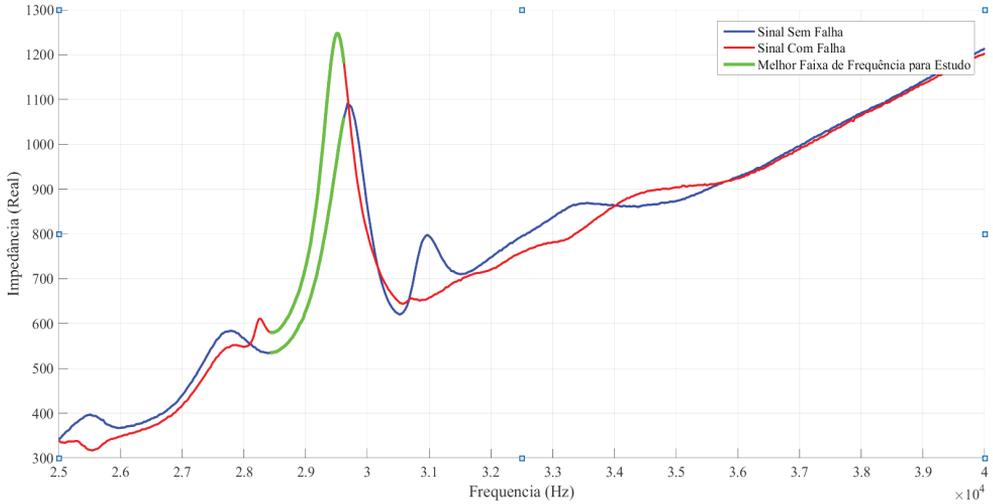


Figura 24.6.a Faixa ótima utilizando o ACF.

Fonte: Elaborado pelos autores

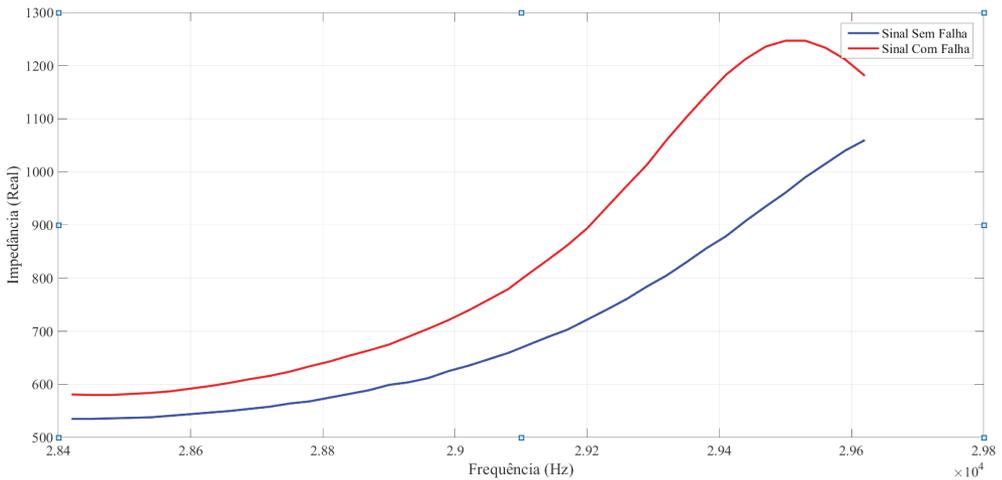


Figura 24.6.b Faixa ótima utilizando o ACF.

Fonte: Elaborado pelos autores

A Figura 24.7 apresenta o sinal obtido pelo experimento (em azul o sinal sem falha e em vermelho o sinal com falha), e a faixa ótima para estudo pelos dois métodos de otimização (em cor verde a melhor faixa de frequência utilizando o método do ACF e em preto tracejado a melhor faixa de frequência utilizando o método de

busca aleatória). Observa-se que ambos os métodos de otimização convergiram para o mesmo resultado, e por isto estão sobrepostos no gráfico abaixo.

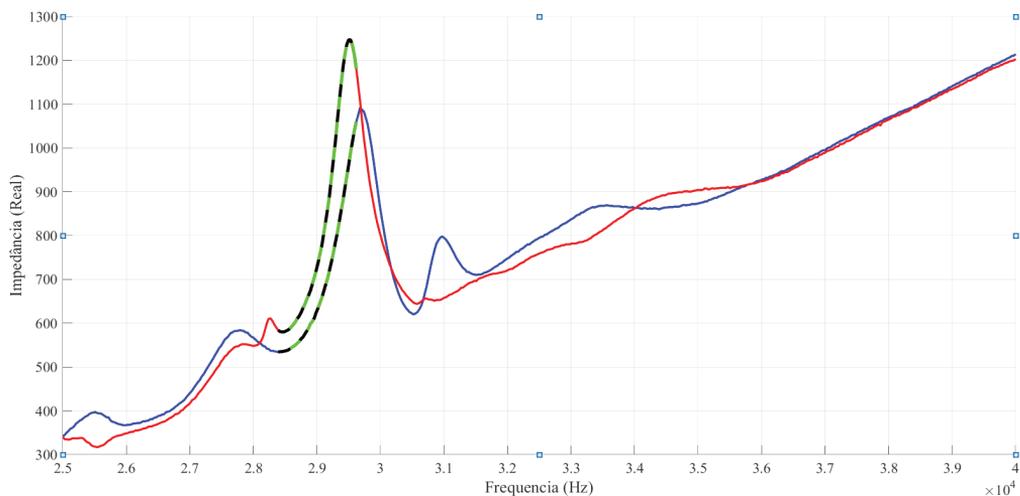


Figura 24.7 Melhor faixa de frequência otimizada pelos métodos da busca aleatória e ACF.

Fonte: Elaborado pelos autores

Conclusão

Este trabalho apresentou duas formas alternativas de identificar a melhor faixa de frequência de sinais obtidos através do método da impedância eletromecânica, utilizando métodos de otimização. Ao trabalhar com toda a faixa de frequência medida pelo experimento pode-se encobrir a diferença entre os sinais que apresenta a falha. Deve-se então utilizar a métrica de danos como função objetivo para encontrar a faixa de frequência onde está a maior diferença entre os sinais das estruturas com e sem falha, reduzindo assim a quantidade de pontos a serem analisados e tornando a faixa mais sensível.

Utilizando o método da busca aleatória, mesmo com as 5000 iterações, verificou-se que o ponto ótimo variava entre as posições 133, 134, 135 e 136. Já o algoritmo de colônia de formigas utilizou apenas 100 iterações, alcançando o ponto 135. Apesar desta pequena divergência entre os pontos ótimos, pode-se concluir que ambos os métodos convergiram para a mesma faixa de frequência.

Ao utilizar o algoritmo de busca aleatória pode-se concluir que ele é um algoritmo mais simplificado, de fácil implementação e são necessárias muitas iterações para poder chegar ao ponto ótimo da função. Já o ACF é um código mais sofisticado e de maior complexidade para ser implementado, mas em contrapartida são necessárias poucas iterações para chegar ao ponto ótimo da função.

Referências

- AFSHARI, M. **Vibration- and Impedance-based Structural Health Monitoring Applications and Thermal Effects**. 144 f. Tese (Doutorado) – Curso de Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, 2012.
- Bitencourt, T. F.; Steffen Júnior, V. **Monitoramento da integridade estrutural de aeronave**. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de engenharia mecânica. 2010.
- BONABEAU, E.; DORIGO, M.; THERAULAZ, G. **Swarm Intelligence From Natural to Artificial Systems**. Oxford University Press, New York, 1999.
- Bray, D. E.; McBRIDE, D. **Non-destructive Testing Techniques**. N.Y.: AWiley-Interscience Publications, 1992.
- Deneubourg, J. L.; Aron, S.; Goss, S.; Pasteels, J. M. **The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant**. vol. 3, pp. 159–168. 1990.
- Dorigo, M.; Maniezzo, V.; Colorni, A. **Positive Feedback as a Search Strategy**. 1991.
- DORIGO, M.; Stützle, T. **Ant Colony Optimization**. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, 2004.
- MOURA JÚNIOR, J. R. V. **Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural aplicada a estruturas aeronáuticas e espaciais**. 268 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- PALOMINO, L. V. **Análise das métricas de dano associadas à técnica da impedância eletromecânica para o monitoramento de integridade estrutural**. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- SOUZA, M. J. F. **Inteligência Computacional para Otimização**. Notas de aula. Departamento de Computação. Universidade Federal de Ouro Preto. 2003.
- Sun, F.P.; ChaudHry, Z.; Liang, C.; Rogers, C.A. **Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor-Actuator**. Vol. 6. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**: 1995.

VANDERPLAATS, G. N. **Numeric Optimization Techniques for Engineering Design**. 3^a ed. Vanderplaats Research & Development: 1999.

Modelo de dispositivo para reabilitação de dedos da mão

Bruno Rodrigues de Oliveira¹
Bruno Alves Maia²

Guilherme Ferreira Neto³
Marcelo Henrique Stoppa⁴

Resumo: Em aplicações diárias, a utilização das mãos é indispensável na realização de grande número de tarefas. Diversas situações, como acidentes automobilísticos, trabalhistas ou vasculares, prejudicam a mobilidade e maneabilidade das mãos, obrigando o indivíduo a procurar métodos de reabilitação. Este estudo apresenta o modelo para um dispositivo para reabilitação dos dedos da mão que possibilita realizar movimentos de flexão/extensão, respeitando os limites de cada articulação. Avaliando tipos de dispositivos de reabilitação de dedos da mão existentes, são observadas suas particularidades e principais vantagens, culminando na proposição de um modelo eficiente. Assim, esta pesquisa apresenta o modelo para um dispositivo de baixo custo que atenda às necessidades dos pacientes, auxiliando na recuperação de suas atividades normais.

Palavras-chave: Dedos das Mãos, Reabilitação, Tecnologia Assistiva, Modelagem

Introdução

O trabalho realizado pelo homem em sua rotina cotidiana tem sido objeto de estudo de modo a otimizar e reduzir o esforço necessário. Várias são as ferra-

- 1 Instituto Federal do Triângulo Mineiro – IFTM. Campus Paracatu, Professor EBTT Eletrônica – Controle e Automação. Mestrando POSMOT Universidade Federal de Goiás – UFG, Regional Catalão. Contato: brunorodrigues@iftm.edu.br.
- 2 Mestrando POSMOT Universidade Federal de Goiás – UFG, Regional Catalão. Contato: brnomaia@gmail.com.
- 3 Mestrando POSMOT Universidade Federal de Goiás – UFG, Regional Catalão. Contato: guilhermefneto@gmail.com.
- 4 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Laboratório. Contato: mhstoppa@pq.cnpq.br.

mentas adaptadas para auxiliar na execução de tarefas, sendo elas compatíveis com a forma da mão humana, de modo a proporcionar conforto em sua utilização (MORAES; MONT'ALVÃO, 2000).

Para qualquer atividade realizada, as mãos são responsáveis pela mecânica do movimento ou tarefa, sendo difícil a realização de um trabalho sem elas. Movimentos de preensão, pinçamento, pressão ou de precisão são exemplos destas tarefas (COUTO, 1995). Sendo assim, dos movimentos realizados pelo corpo humano, os de maior precisão são executados pelas mãos, possibilitando movimentos mais rápidos e precisos, resultando na destreza da mão humana, permitindo a execução de tarefas ou envio informações por meio de gestos. Os dedos da mão são tão vitais no desenvolvimento das tarefas que um indivíduo que não possui os dedos é considerado 54% capaz do que uma pessoa com todos membros intactos (ENGELBERG, 1990).

O número de combinações possíveis de movimento que podem ser criados pelo sistema biomecânico da mão é enorme. Dentre as várias funções que a mão apresenta, pode-se destacar a função de transmitir sensações, de segurar, conduzir e de manipular objetos de diferentes formas. Estando o controle do movimento dos dedos e preensão entre as mais preciosas atividades do movimento humano. Durante a realização dessas atividades é evidente a importância da coordenação e do padrão de movimento dos dedos (LEVANGIE; NORKIN, 2005).

A alteração da movimentação da mão humana pode estar ligada a inúmeras patologias, sendo que quanto mais tardia a identificação correta, mais difícil pode ser o tratamento. Muitas vezes é necessária a utilização de uma órtese para restaurar o movimento ou até mesmo uma prótese para substituir o membro perdido. Desde que o homem começou a desenvolver próteses de membros superiores, sendo a primeira datada de mais de 200 a.C. (CARVALHO, 2000), o objetivo é recuperar as principais características do membro perdido.

Algumas patologias podem afetar o normal funcionamento dos membros superiores, atingindo de forma mais ou menos seletiva um ou mais funcionalidades da mão (FREIVALDS, 2011; NETTER, 2006). As doenças musculares iniciam-se por uma simples mialgia, a popular dor muscular, podendo evoluir para inflamação muscular e tornar-se algo mais grave.

Os traumatismos de mão atingem pessoas na faixa etária produtiva, e qualquer lesão, por menor que seja, leva a um grau de incapacidade que pode limitar o indivíduo na realização de atividades laborais e cotidianas (GASPAR, 2010). Acidentes de trabalho são apontados como uma das principais causas de afastamento de trabalhadores do campo produtivo e constituem um importante problema de saúde pública no Brasil (SANTANA, 2003). Por isso, a reintegração ao trabalho é considerada um importante parâmetro quando se analisa o impacto desses acidentes na vida dos trabalhadores (TURNER; FRANKLIN; TURK, 2000).

De acordo com o Anuário Estatístico do Ministério da Previdência e Assistência Social (MPAS, 2013), durante o ano de 2013, foram registrados no INSS cerca de 717,9 mil acidentes do trabalho. No ano de 2013, dentre os 50 códigos da Classificação Internacional de Doenças (CID) com maior incidência nos acidentes de trabalho, os de maior participação foram ferimento do punho e da mão (S61), fratura ao nível do punho ou da mão (S62) e traumatismo superficial do punho e da mão (S60) com, respectivamente, 9,59%, 6,91% e 4,84% do total. Nas doenças do trabalho os CID mais incidentes foram lesões no ombro (M75), sinovite e tenossinovite (M65) e dorsalgia (M54), com 21,91%, 13,56% e 6,36%, do total (CIPA, 2015).

No contexto mundial, a reabilitação teve grande impulso e desenvolvimento no século XX, sobretudo no período posterior às grandes guerras mundiais, em função das lesões e sequelas provocadas (DELLON; MATSUOKA, 2007). A reabilitação baseia-se na assistência ao doente com o tratamento mais efetivo, barato, com poucos efeitos secundários que permita a este regressar à sua vida normal e ao seu local de trabalho.

A proposta deste estudo é desenvolver um mecanismo que possibilite a reabilitação dos dedos da mão, utilizando tecnologia de baixo custo, podendo contribuir com um dispositivo eficiente, melhorado a partir dos modelos existentes, garantindo o conforto e segurança do usuário. No capítulo de Desenvolvimento, é apresentada uma revisão bibliográfica, exibindo a anatomia da mão, tipos de preensão, tipos de sistemas de reabilitação atuais e suas características. No capítulo de Modelo Matemático, pelo estudo da estrutura anatômica geométrica do dedo, é apresentada a modelagem matemática do dispositivo para realizar os movimentos de flexão/extensão do dedo indicador da mão. Finalmente, são apresentados os resultados e considerações finais.

1. Desenvolvimento

1.1 Anatomia da mão

A mão está localizada na parte mais distal dos membros superiores (HALL, 2000), podendo alcançar pontos distantes em qualquer posição, dentro de certos limites com qualquer orientação, graças a mobilidade de todas as articulações do braço, principalmente do ombro, que é a articulação que possui a maior mobilidade de todo o corpo (TUBIANA, 1981). A funcionalidade da mão, assim como sua capacidade de mudar de forma, adaptando-se à diferentes tipos de objetos, deve-se ao fato da existência de 23 graus de liberdade (GDL), sendo 5 para o polegar, 4 para cada um dos outros dedos e mais 2 para a palma da mão (POLIS, 2009).

A literatura de anatomia (FREIVALDS, 2011; GRAAFF, 1991; SOBOTTA, 2006; NETTER, 2006), traz a nomenclatura e divisão dos vinte e sete ossos em três partes. São divididos em Carpo (Escafoíde, Semilunar, Piramidal, Pisiforme, Trapézio, Trapezóide, Capitato), Metacarpo (são cinco e numerados a partir do polegar) e Falanges (Proximal, Medial e Distal, com exceção do polegar que não possui falange medial) (Figura 25.1).

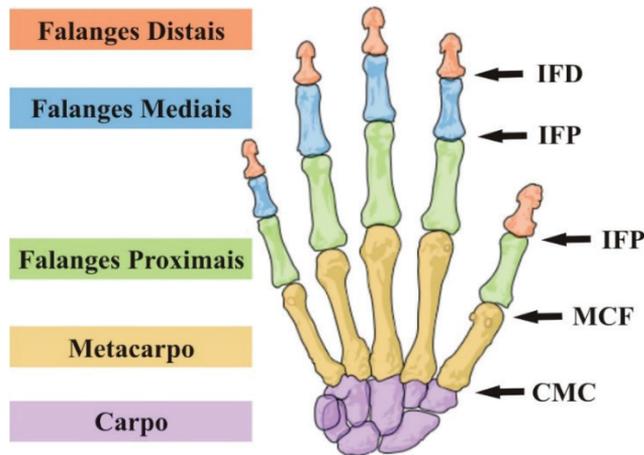


Figura 25.1 Vista Posterior da Mão Direita Humana – Ossos e Articulações.

Fonte: (Adaptado de VILLARREAL, 2007)

As articulações entre os ossos são nomeadas de acordo com sua localização, por exemplo a articulação Carpometacarpal (CMC) está situada entre os ossos da linha distal e os ossos do metacarpo. Entre os ossos do metacarpo e as falanges proximais, está a articulação Metacarpofalângica (MCF). A articulação Interfalângica Proximal (IFP) entre as falanges proximais e as falanges mediais. Por fim a articulação Interfalângica Distal (IFD) entre as falanges mediais e distais.

1.2 Movimentos da mão

Os movimentos são originados nas articulações entre os ossos e cartilagens, a partir da posição anatômica da mão, que é a posição do corpo de pé, face para frente, braços ao lado do corpo com as palmas e os dedos da mão voltados para frente (FREIVALDS, 2011). Os principais movimentos realizados pelas mãos são:

Flexão: variação angular no sentido de fechamento da mão.

Extensão: variação angular no sentido de abertura da mão. O movimento de abertura de um membro além da posição anatômica é chamado de hiperextensão.

Abdução: movimento de afastamento dos dedos em relação ao dedo médio.

Adução: movimento de reaproximação dos dedos em relação ao dedo médio.

Oposição: movimento onde a polpa do polegar é aproximada da polpa de outro dedo.



Figura 25.2 Movimentos dos Dedos.

Fonte: (Adaptado de DALLEY; MOORE, 2007)

Com o advento das análises anatômicas e cinemáticas dos movimentos, dois tipos principais de movimento foram destacados, recebendo a nomenclatura de preensão de força e preensão de precisão (NAPIER, 1956). Fatores como conformidade, conectividade, força de fechamento, manipulação, resistência ao deslizamento e estabilidade são diretrizes para definir a análise e descrição de cada tipo de preensão. Outras combinações dos movimentos dos dedos nos permitem realizar as demais tarefas que vão desde pegar uma moeda até segurar uma maleta. Na Figura 25.3, podem ser visualizados os seguintes tipos de preensão: (A) Preensão em Garra, (B) Preensão em Polpa, (C) Preensão em Ponta, (D) Preensão em Gancho, (E) Preensão Lateral e (F) Preensão em Chave (CUTKOSKY, 1989).

2. Modelo matemático

Em situações onde as funções motoras da mão são perdidas, terapias são usadas para devolver, ou até mesmo desenvolver, o movimento das mãos mais rapidamente, de forma que o indivíduo retorne as suas atividades normais (GASPAR, 2010). Novas tecnologias estão sendo empregadas no aspecto de auxiliar este processo, de forma a agregar mais possibilidades para exercitar o membro lesionado, um dos exemplos é a utilização da tecnologia assistiva em métodos de reabilitação, aplicando exoesqueletos para realizar a movimento de flexão e extensão. Como se trata de um membro lesionado, a segurança do mecanismo torna-se um fator importante, pois um movimento que exceda os limites ou que exerça uma força maior que o quadro clínico do paciente suporte, agravaria a lesão do paciente (HEO, 2012).

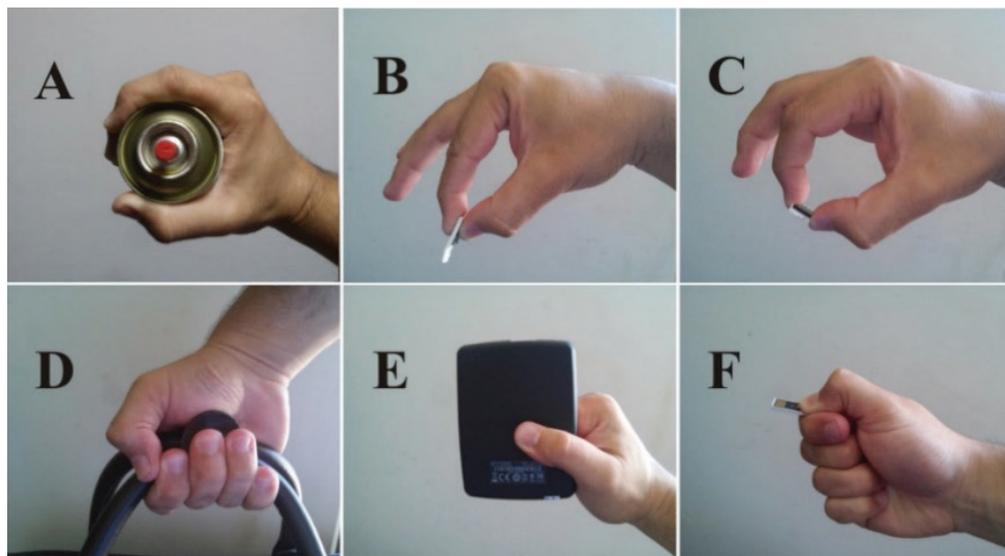


Figura 25.3 Tipos de Preensão.

Fonte: (Adaptado de CUTKOSKY, 1989)

Para representar o movimento de flexão e extensão dos dedos, é necessário realizar uma análise da angulação permitida a cada articulação. Com exceção do polegar, cada dedo possui quatro graus de liberdade, sendo dois nas articulações interfalângicas realizando o movimento de flexão/extensão, mais dois na articulação MCF referente aos movimentos de flexão/extensão e abdução/adução.

Partindo da articulação MCF, para obter as coordenadas x e y relativas ao Ponto D, utiliza-se a matriz de transformação homogênea de rotação local em cada articulação, analisando-se a estrutura em partes (Figura 25.6), podendo-se obter as posições de cada ponto em relação a angulação da articulação.

Depois de analisar individualmente cada estrutura, descrevendo cada matriz local, deve-se considerar o movimento de rotação nas três articulações simultaneamente, gerando-se uma matriz de transformação homogênea global, onde o deslocamento é relacionado com a variação dos três ângulos α , β e γ simultaneamente, a posição final do Ponto D são as coordenadas x e y .

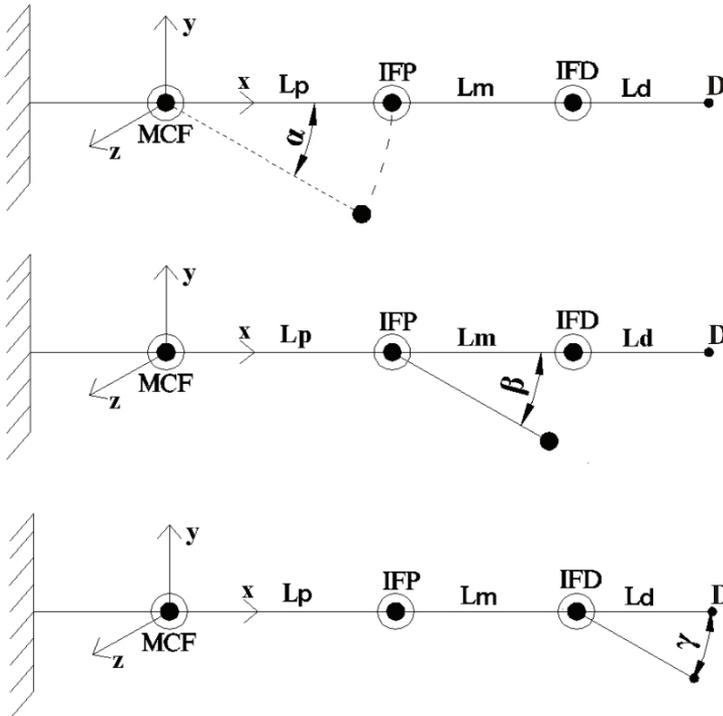


Figura 25.5 Modelo esquemático para os ângulos da matriz de transformação homogênea.

Fonte: O Autor

Seguindo o raciocínio desenvolvido por SILVA, 2011, por se tratar de uma estrutura serial, a matriz de transformação global é o produto das matrizes locais ($T_{Global} = T_{MCF} \cdot T_{IFP} \cdot T_{IFD} \cdot T_D$), encontrando-se as equações as Equações 1 e 2 referentes às coordenadas x e y (Equações 1 e 2, respectivamente), do ponto D em função de cada ângulo (α , β e γ) nas articulações e do comprimento das falanges (LP , LM e LD) (SILVA, 2011).

$$x = L_P \cos(\alpha) + L_M \cos(\alpha + \beta) + L_D \cos(\alpha + \beta + \gamma) \tag{1}$$

$$y = L_P \sin(\alpha) + L_M \sin(\alpha + \beta) + L_D \sin(\alpha + \beta + \gamma) \tag{2}$$

2.1. Proposta de Estrutura Mecânica

A partir do estudo dos modelos de exoesqueleto existentes, torna-se clara a necessidade da busca por um mecanismo simples e eficiente que garanta a amplitude total do movimento, além de fatores como mobilidade e peso do mecanismo. Seguindo a linha de pesquisa do Núcleo de Tecnologia Assistiva *NENA* da UFG - Regional Catalão, que se baseia na busca por pesquisa de baixo custo, definiu-se utilizar um servo atuador linear elétrico, com dimensões reduzidas de 47,5 x 21,5 x 15mm, com curso máximo de 20mm e massa de 15g, atualmente produzido pela empresa canadense *Firgelli Technologies*. Este atuador é fabricado para operar com tensão de alimentação de 6 ou 12V, sendo compatível com a placa de controle de código aberto Arduino®, possibilitando futuramente realizar o controle do dispositivo

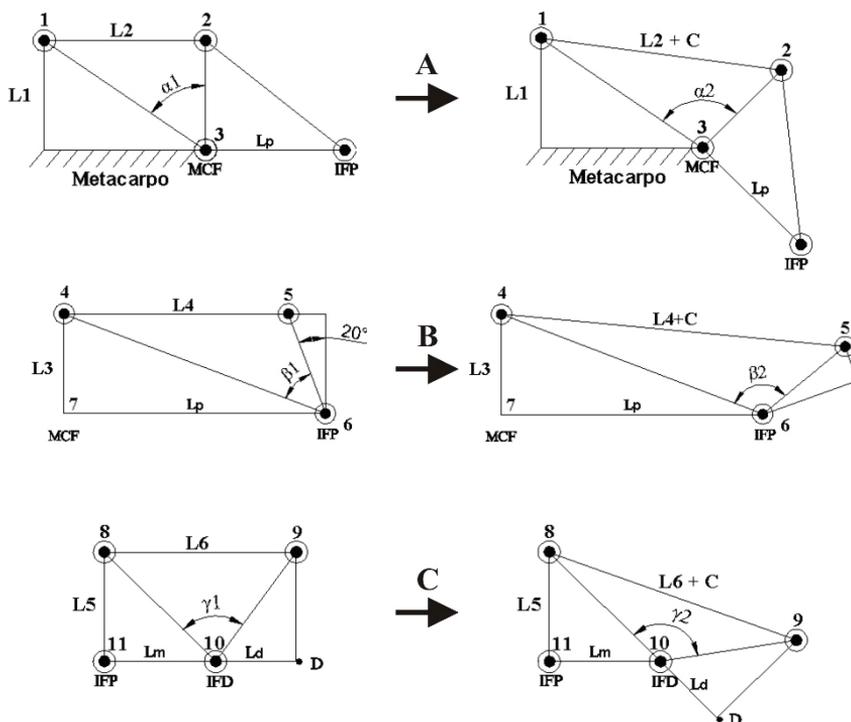


Figura 25.6 Configuração geométrica do acoplamento.

Fonte: O Autor.

Como o movimento do atuador é linear, foi necessário desenvolver uma estrutura que converta deslocamento linear (Translação) em deslocamento rotativo (Rotação), por meio de acoplamentos tipo pinhão/cremalheira ou biela/manivela. Para transmitir este movimento, propôs-se inicialmente um modelo geométrico com três pontos de articulação (Figura 25.6 – A).

Percebe-se na Figura 25.6 - A um quadrilátero com os três pontos de articulação (1, 2 e 3) com a base fixa. A dimensão $L1$ é referente à altura do dispositivo e conecta a base ao ponto articulável 1, a dimensão $L2$ é referente ao comprimento do atuador em posição recuado (42mm) entre os pontos articulados 1 e 2 e a dimensão $L2+C$ referente a soma do comprimento do atuador $L2$ com o curso de avanço do atuador C .

Por se tratar de um quadrilátero, o avanço do atuador altera a dimensão $L2$ para $L2+C$, causando o deslocamento do ponto superior da lateral direita (Ponto 2). Como a lateral direita está fixa pelo ponto de articulação inferior (Ponto 3), o Ponto 2 realiza uma trajetória circular. No primeiro instante, com o atuador recuado, um ângulo $\alpha1$ é formado, referente a posição de repouso, e com o avanço do atuador, há uma variação para o ângulo $\alpha2$, sendo esta diferença a angulação necessária para cada articulação.

Sabendo-se que o ângulo α está em função do avanço linear do atuador, pela Lei dos Cossenos, são verificados os limites do movimento e a relação entre o curso do atuador e a angulação da articulação. Tem-se como resultado a Equação 3, referente ao cálculo do ângulo α em função do curso do atuador (C).

$$\cos \alpha = \frac{2L_1^2 + L_2^2 - (L_2 + C)^2}{2L_1 \sqrt{L_1^2 + L_2^2}} \quad (3)$$

Visando alcançar a angulação necessária para a articulação MCF, foram considerados os valores $L2 = 50\text{mm}$, $L2+C = 70\text{mm}$ e a diferença $\alpha2 - \alpha1 = 90^\circ$ resultando no valor de $L1 = 17.72\text{mm}$, possibilitando, que a rotação sobre MCF realize totalmente a angulação desejada.

Para rotacionar sobre IFP, é proposta a estrutura (Figura 25.6 - B), onde a base da estrutura é a falange proximal LP , a altura da estrutura é $L3$, sendo a lateral direita fixa no ponto 7 e rotacionando sobre o ponto 4. Na posição de repouso ($C=0$), a $L4$, possui tamanho igual a LP , resultando em um ângulo $\beta1$.

Como o atuador é fixado nos pontos 4 e 5, com 100% do avanço, o ponto 5, descreve trajetória circular com centro no ponto 6, que coincide com o centro de rotação de IFP, resultando em um $\beta2$. Por se tratar de um atuador linear, a angulação máxima que a estrutura permite sem colisão de partes do mecanismo

é 90°, o que não satisfaz a angulação total desejada, necessitando de alteração no mecanismo. No modelo alterado, foi adicionada uma angulação de 20°, para que com o atuador 100% avançado, soma-se os 20° fixos aos 90° graus possíveis pela estrutura (Figura 25.6 – B).

Utilizando novamente a Lei dos Cossenos, assim como no primeiro modelo, obtêm-se a Equação 4. Como no modelo anterior, além do ângulo sobre IFP, são variáveis o comprimento da falange proximal L_p a altura da estrutura L_3 e o ângulo β .

$$\cos\beta = \frac{L_3^2 + L_p^2 + \left(\frac{L_3}{\cos 20^\circ}\right) - (L_p - L_3(\tan 20^\circ) + C)^2}{2 \left(\frac{L_3}{\cos 20^\circ}\right) \sqrt{L_3^2 + L_p^2}} \quad (4)$$

Utilizando a Equação 4, determina-se a altura da estrutura fixando o valor da falange proximal ($L_p=43,4\text{mm}$) e a angulação máxima (IFP=110°), da diferença entre a angulação final e a angulação inicial ($\beta_2-\beta_1$) obtêm-se ($L_3= 12,9854\text{mm}$), que também satisfaz ao valor máximo que o ângulo β deve atingir.

Para realizar o movimento na articulação IFD, é importante considerar que, normalmente, a dimensão da falange L_M não é maior do que o comprimento inicial do atuador linear (42mm). Com esta informação, foi desenvolvido um modelo cujo ponto articulável 10 corresponde com o centro de articulação de IFD (Figura 25.6 – C). Observa-se que na figura que a altura da estrutura é L_5 a base da estrutura é dividida presa as falanges L_M e L_D e a dimensão L_6 é o comprimento do atuador na posição de repouso, equivalente à soma de L_M e L_D , formando assim o ângulo γ_1 . Usando estes valores e a Lei dos Cossenos, obtêm-se a Equação 5.

$$\cos\gamma = \frac{2L_5^2 + L_M^2 + L_D^2 - (L_M + L_D + C)^2}{2 \sqrt{L_5^2 + L_M^2} \sqrt{L_5^2 + L_D^2}} \quad (5)$$

Os pontos fixos da estrutura são os pontos 11 e o ponto D, que coincidem respectivamente com o centro de rotação de IFP e a ponta do dedo. Os pontos articuláveis são 8, 9 e 10. Assumindo que o atuador avance 100%, a dimensão L_6 é alterada para L_6+C , resultando em um novo ângulo γ_2 . Considerando que o atuador opere com 100% do curso, fixando os valores de $L_M = 25,3\text{mm}$, $L_D = 17\text{mm}$ e a diferença ($\gamma_2 - \gamma_1=80^\circ$), calcula-se o valor de $L_5= 23,0772\text{mm}$, novamente atendendo a angulação desejada para realizar o movimento de flexão na articulação IFD.

3. Avaliação da amplitude do movimento realizado pelo mecanismo

Com base nos estudos de Kapandji, para que o dedo indicador realize totalmente o movimento de flexão, os valores de α variam de 0 a 90° (articulação MCF), os valores de β variam de 0 a 110° (articulação IFP) e os valores de γ variam de 0 a 80° (articulação IFD) (KAPANDJI, 2003). Somando-se ao comprimento das falanges LP , LM e LD , obtêm-se o espaço de trabalho do dedo indicador como mostrado na Figura 25.7.

Com as equações das coordenadas x e y do Ponto D (Equações 1 e 2), pelos valores das falanges e dos ângulos (α , β e γ), que estão em função do curso de avanço do atuador linear, que varia de 0 a 20mm, obtêm-se os valores das coordenadas x e y da ponta do dedo, em cada milímetro do avanço do curso do atuador. Deve-se atentar que as coordenadas demonstradas nos gráficos a seguir, são resultantes do avanço dos três atuadores simultaneamente.

Com $L1 = 17,72mm$, $L2 = 50mm$, $L3 = 12,9854mm$, $LP = 43,4mm$, $L5 = 23,0772mm$, $LM = 25,3mm$, $LD = 17mm$, das Equações 3, 4 e 5, obtêm-se a angulação de cada articulação a partir do avanço do curso do atuador, conforme Tabela 25.1. Para analisar graficamente os resultados, deve-se visualizar que o dedo inicia o movimento em posição anatômica e o movimento de flexão é realizado no sentido horário. Como mencionado anteriormente, o movimento de rotação é realizado no sentido anti-horário no eixo Z de cada articulação, resultando em uma representação $2D$, tendo a referência do eixo cartesiano ((x,y)=(0,0)) na articulação MCF. Explicando assim os valores alguns valores negativos nas coordenadas x e todos valores negativos nas coordenadas y .

A Figura 25.7, exibe a trajetória do Ponto D , descrevendo o espaço de trabalho do dedo indicador, comparando-a com os pontos vermelhos, que são as coordenadas do Ponto D para cada milímetro de avanço dos atuadores simultaneamente. Verifica-se que o Ponto D alcança o limite do espaço de trabalho da trajetória do dedo indicador, uma vez que a trajetória é resultante do aumento dos ângulos (α , β e γ) em função do curso do atuador. Os valores dos ângulos com as respectivas coordenadas são elencados na Tabela 25.1.

Tabela 25.1 Relação Entre os ângulos das Articulações e o Curso do Atuador.

Curso	α	β	γ	x	Y
0	0	0	0	85,700	0,000
1	-3	-5	-3	85,082	-9,036

Continua

Tabela 25.1 Relação Entre os ângulos das Articulações e o Curso do Atuador. (Continuação)

Curso	α	β	γ	x	Y
2	-6	-9	-6	83,471	-17,176
3	-9	-13	-8	81,045	-24,766
4	-13	-17	-11	77,028	-33,565
5	-16	-22	-14	72,121	-40,935
6	-19	-26	-16	67,167	-46,888
7	-23	-30	-19	60,429	-53,331
8	-26	-34	-22	54,023	-57,770
9	-30	-39	-25	45,466	-62,278
10	-34	-43	-29	36,985	-65,262
11	-37	-47	-32	29,853	-66,559
12	-41	-52	-36	20,731	-66,949
13	-46	-57	-39	11,060	-66,337
14	-50	-62	-43	3,0122	-63,888
15	-55	-68	-48	-5,676	-59,428
16	-60	-74	-52	-12,781	-54,007
17	-65	-80	-57	-18,145	-47,476
18	-72	-88	-63	-22,795	-38,335
19	-79	-97	-70	-23,871	-28,837
20	-90	-110	-80	-20,822	-18,005

Fonte: O Autor.

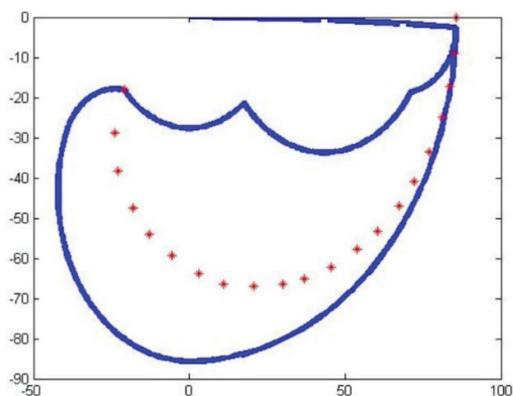


Figura 25.7 Coordenadas Ponto D x Espaço de Trabalho.

Fonte: O Autor.

Considerações finais

Além do avanço simultâneo dos três atuadores, é possível simular quais seriam as coordenadas do ponto D quando houvesse diferentes deslocamentos dos atuadores individualmente (Figura 25.9). Confirma-se que, qualquer combinação utilizada variando-se os ângulos de trabalho (α , β e γ) das articulações MCF, IFP e IFD, faz com que a trajetória da ponta do dedo (Ponto D), permaneça dentro do espaço de trabalho. Destaca-se que o limite do movimento representado pelo espaço de trabalho é coincidente com o último ponto obtido com o curso total dos três atuadores, de modo que o limite do movimento do dedo saudável é obtido pelo mecanismo de reabilitação. Portanto, este modelo é referência para o desenvolvimento de um mecanismo capaz de reabilitar os dedos das mãos, devido a relação entre os ângulos de articulação, comprimentos das falanges e curso do atuador. Finalizando no processo de montagem do mecanismo, o estudo do sistema de acionamento e do sistema de controle como proposta de estudos futuros.

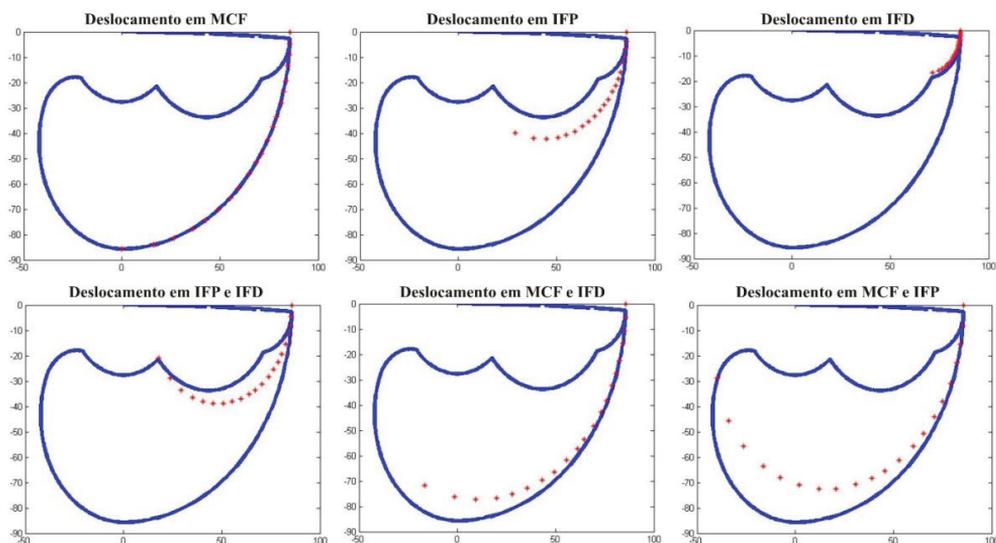


Figura 25.8 Trajetórias do ponto D.

Fonte: O Autor.

Referências

CARVALHO, D. et al. Adaptação dos pacientes ao uso de próteses mioelétricas: Estudo do tratamento fisioterápico e possíveis alterações fisiológicas. São Paulo: USP, 2000.

- CIPA, C. I. de Prevenção de A. Ministério da Previdência e Assistência Social divulga Anuário Estatístico 2013. 2015. Disponível em: <<http://revistacipa.com.br/ministerio-da-previdencia-e-assistencia-social-divulga-anuario-estatistico-2013/>>. Acesso em: 12/07/2016.
- COUTO, H. D. A. Ergonomia aplicada ao trabalho: o manual técnico da máquina humana. Belo Horizonte: Ergo, v. 1, p. 353, 1995.
- CUTKOSKY, M. R. On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on, IEEE*, v. 5, n. 3, p. 269-279, 1989.
- DALLEY, A. F.; MOORE, K. Anatomia orientada para a clínica. 5a. ed., Rio de Janeiro: Guanabara, Koogan, 2007.
- DELLON, B.; MATSUOKA, Y. Prosthetics, exoskeletons, and rehabilitation. *IEEE Robotics and Automation magazine, Citeseer*, v. 14, n. 1, p. 30, 2007.
- ENGELBERG, A. M. A. Guides to the evaluation of permanent impairment. [S.l.]: American Medical Association Press, 1990.
- FREIVALDS, A. Biomechanics of the upper limbs: mechanics, modeling and musculoskeletal injuries. [S.l.]: CRC Press, 2011
- GASPAR, H. M. S. Estudo da Biomecânica da Mão por aplicação do Método dos Elementos Finitos. Tese (Doutorado) – Universidade do Porto, 2010.
- GRAAFF, K. V. D. Human Anatomy. McGraw-Hill Higher Education, 1991. ISBN 9780697078964.
- HALL, S. J. Biomecânica básica. [S.l.]: Grupo Gen-Guanabara Koogan, 2000.
- HEO, P. et al. Current hand exoskeleton technologies for rehabilitation and assistive engineering. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, v. 13, n. 5, p. 807-824, 2012.
- KAPANDJI, A. Fisiologia articular: Membro superior (298 p.) v. 2. Membro inferior (280 p.) v. 3. Tronco e coluna vertebral (253 p.). Medicina Panamericana, 2003. (Fisiologia articular: esquemas comentados de mecânica humana). ISBN 9788530300425.

- LEVANGIE, P.; NORRIN, C. Joint structure and function. a comprehensive analysis. FA Davis Co, 2005.
- MORAES, A. D.; MONT'ALVAO, C. Ergonomia – Conceitos e Aplicações: Metodologia Ergonômica. 2AB EDITORA, 2000. ISBN 9788590286240.
- NAPIER, J. R. The prehensile movements of the human hand. Bone & Joint Journal, Bone and Joint Journal, v. 38, n. 4, p. 902-913, 1956.
- NETTER, F. H. et al. Atlas of human anatomy. [S.l.: s.n.], 2006. v. 11.
- POLIS, J. E. Projeto e construção de parte estrutural de prótese de mão humana com movimentos. Biblioteca Digital da Unicamp, 2009.
- SANTANA, V. et al. Acidentes de trabalho não fatais: diferenças de gênero e tipo de contrato de trabalho non-fatal occupational injuries: gender and job contract differences. Cad. Saúde pública, SciELO Brasil, v. 19, n. 2, p. 481-493, 2003.
- SILVA, A. L. Desenvolvimento de um sistema para reabilitação de dedos. 2011
- SOBOTTA, J. Sobotta Atlas de anatomia humana. Guanabara-Koogan, 2006. ISBN 9788527711944.
- TUBIANA, R. Architecture and functions of the hand. The hand, WB Saunders Philadelphia, v. 1, p. 19-93, 1981.
- TURNER, J. A.; FRANKLIN, G.; TURK, D. C. Predictors of chronic disability in injured workers: a systematic literature synthesis. American journal of industrial medicine, Wiley Online Library, v. 38, n. 6, p. 707-722, 2000.
- VILLARREAL, M. R. 2007. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Scheme_human_hand_bones-en.svg. Acesso em: 04/08/2016.

Otimização de um modelo de via férrea com vistas à minimização de vibrações

Gabriel Gomes Silva¹

Romes Antônio Borges²

Resumo: Vibrações transmitidas no solo oriundas da passagem de trens em vias férreas tem sido foco de diversos estudos na atualidade na busca por soluções que visem à minimização dos efeitos causados por esta dinâmica, como desconforto nos passageiros, danos na própria via férrea e em estruturas próximas a mesma. O presente trabalho busca, a partir de análise de um modelo de via férrea, minimizar os deslocamentos na fundação do sistema. O modelo da via férrea consiste em um acoplamento entre trilhos, dormentes e fundações, sendo o movimento dos trens representado por força de impulso pontual sobre os trilhos. Técnicas numéricas como as da família de Newmark foram utilizadas para resolução do modelo matemático. A partir das respostas de vibração obtidas utilizou-se do algoritmo de colônia artificial de abelhas com objetivo de otimizar o sistema, permitindo encontrar valores ótimos para as variáveis de projeto que atenuaram significativamente os deslocamentos nas fundações.

Palavras-chave: Vibrações, Vias Férreas, Otimização.

Introdução

A busca pelo entendimento acerca de vibrações mecânicas vem sendo continuamente investigadas por boa parte dos pesquisadores. De acordo com Inman (2001), vibrações em dispositivos de engenharia muitas vezes são fatores limi-

1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Contato: gabriel_gomess@hotmail.com.

2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: kvrtborges@gmail.com.

tantes para o seu desempenho. Assim as vibrações podem estar inseridas em um contexto que as tornam prejudiciais, devendo ser evitadas.

Em vias férreas, as vibrações na estrutura da via e no solo, devido à passagem de trens sob altas velocidades podem causar inúmeros problemas, como danos na estrutura férrea, danos em estruturas próximas (edifícios, casas, equipamentos etc), desconforto nos passageiros, ruídos entre outros, assim, um modelo representativo para uma via férrea pode ser bastante útil quando se busca reduzir vibrações causadas pela dinâmica do sistema férreo.

Usualmente considera-se um modelo simplificado do sistema de modo que o comportamento global do sistema físico complexo possa ser determinado de uma maneira mais rápida e prática (RAO, 2011). Porém, no caso de vibrações em ferrovias, um modelo matemático representativo envolve diversos mecanismos interdependentes, o que nem sempre permite uma simplificação (OLIVEIRA, 2012).

Kouroussis (2011) propôs um modelo de múltiplas fundações o qual pode ser bastante útil para representar de maneira adequada a transmissão das vibrações no solo, porém este também é um modelo complexo, onde é fundamental que se tenha uma boa relação entre o modelo numérico e o sistema real. Neste modelo, tem-se o acoplamento entre os elementos de massa que representam a fundação, de modo a garantir a sua interação dinâmica.

Um modelo acoplado de trilhos, dormentes e múltiplas fundações foi então proposto, baseado no modelo de Kouroussis (2011), onde a previsão dos deslocamentos ocasionados pela passagem dos trens sob as linhas férreas pôde ser determinado, permitindo assim definir as medidas mais adequadas com vista à redução ou eliminação dos efeitos das vibrações.

Analisando os deslocamentos no domínio do tempo do modelo acoplado, um estudo voltado para otimização também pôde ser proposto, visando à redução dos deslocamentos na fundação. Para a otimização, utilizou-se o algoritmo colônia artificial de abelhas, buscando alcançar valores ótimos das variáveis de projeto, de modo a atenuar ao máximo os efeitos das vibrações na fundação em um sistema férreo.

Logo, este trabalho tem por objetivo apresentar a otimização das respostas de deslocamentos no domínio do tempo para um modelo acoplado de trilhos, dormentes e múltiplas fundações de um sistema férreo, visando reduzir os efeitos causados pelas vibrações.

1 Elementos da via férrea

De modo a descrever o sistema, serão apresentados alguns conceitos referentes aos principais elementos constituintes de uma via férrea balastrada.

Segundo Oliveira (2012), uma via balastrada, também denominada via convencional ou tradicional, tem esta designação por apresentar em sua constituição lastro, que nada mais é que um material de granulometria granular, basicamente um agregado britado o qual confere um comportamento elástico a via.

Analisando os componentes de uma via-férrea tradicional têm-se sua divisão em subestrutura e superestrutura, como ilustrado pela Figura 26.1.

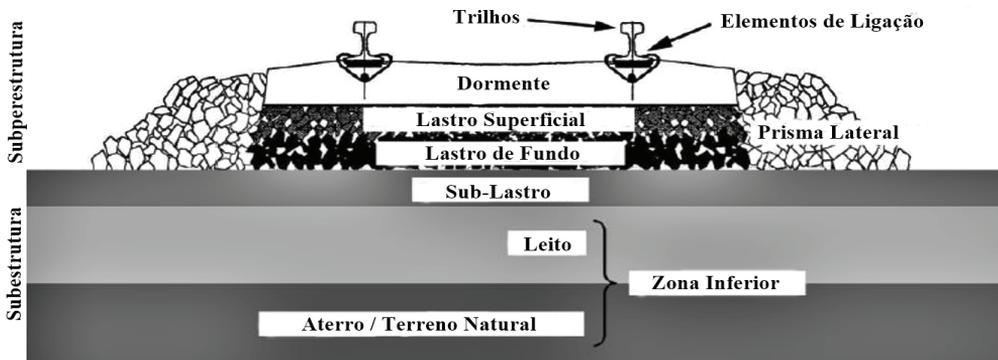


Figura 26.1 Estrutura de uma via balastrada, adaptado de Oliveira (2012).

A subestrutura consiste de um conjunto de componentes de via que lhe agregam comportamento estável, ou seja, permite que a circulação dos veículos seja feita de forma cômoda e segura. A sua principal função é suportar os elementos e cargas acima da mesma. Já a superestrutura consiste de todos os elementos situados acima da camada de sub-lastro, como o lastro de fundo, lastro superficial, os dormentes, os trilhos e os respectivos elementos de fixação.

Segundo Quesado (2010), Oliveira (2012) e Esveld (2001) a principal função do lastro é absorver as tensões de compressão, dadas através de seu atrito interno, ou seja, ele tende a atenuar e distribuir de maneira uniforme os esforços e vibrações provindos da ação dinâmica da interação veículos, trilhos e dormentes. Os dormentes, ou travessas, têm objetivo de distribuir uniformemente os esforços gerados pelas cargas verticais impostas pelos trens para os lastros, enquanto que os trilhos são os elementos responsáveis por guiar as rodas do veículo e pela transmissão das forças que lhe são impostas aos dormentes.

De acordo com Departamento Nacional de infraestrutura e Transporte (DNIT) os trilhos são classificados em tipo conforme sua massa por metro, em kg/m. No presente trabalho faz-se a modelagem do sistema acoplado trilhos, dormentes e múltiplas fundações utilizando como base os parâmetros apresentados pelos trilhos do tipo UIC 60.

Alguns elementos complementares também merecem atenção, pois auxiliam na redução de custos e na melhoria das características das vias férreas, além de atenuar os problemas causados pelas vibrações. Estes elementos têm como principal função fornecer elasticidade extra à via-férrea dissipando o ruído e as vibrações, normalmente estão localizados sob o trilho (palmilhas de trilhos ou *railpads*), sob os dormentes (palmilhas de dormentes ou de travessas) ou ainda sob a camada de lastro (manta de lastro).

2 Metodologia

O modelo proposto baseia-se em um sistema de massa concentrada, ou seja, apenas os movimentos verticais são estudados neste modelo, devido a sua grande influência na geração de vibrações no solo. Desse modo um modelo 2D é perfeitamente capaz de representar com boa precisão o sistema como um todo. De acordo com Kouroussis (2011) e Knothe (1993), esta representação é suficiente para prever o comportamento do sistema ferroviário, para calcular as forças que atuam na superfície do solo, e para avaliar as vibrações no solo da vizinhança induzidas pela passagem de um veículo.

O modelo geral é representado na Figura 26.2.

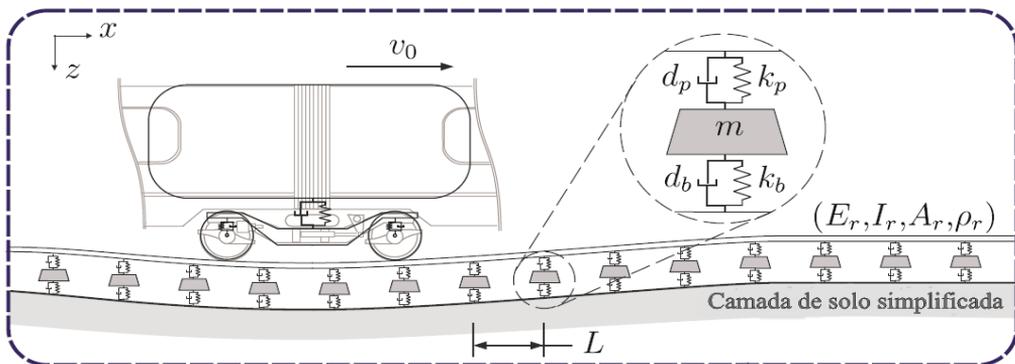


Figura 26.2 Modelo veículo/trilhos, adaptado de Kouroussis (2011).

Como a aproximação do modelo é baseada na simulação pelo domínio do tempo, as evoluções de tempo do movimento ferroviário também são de interesse, logo o modelo é baseado em um carregamento transiente aplicado em uma superfície quadrada acima dos trilhos, sendo definida por uma função de decaimento, onde os parâmetros foram ajustados para se aproximar de um carregamento por impulso, correspondente a um peso caindo sobre uma superfície, o que permitiu a representação da dinâmica de um trem sobre uma via acima da fundação (KOUROUSSIS 2014). A função de decaimento é representada da seguinte forma:

$$f_{entrada} = \begin{cases} 0, & \text{se } t < t_0 \\ Ae^{-(t-t_0)/t_d}, & \text{se } t \geq t_0 \end{cases} \quad (1)$$

onde o parâmetro A relaciona-se a amplitude máxima e t_d é ajustado para cobrir uma excitação com uma faixa de frequência adequada.

O modelo de múltiplas fundações proposto por Kouroussis (2011) é ilustrado na Figura 26.3 e consiste no acoplamento de massas, molas e amortecedores discretos. Desenvolvido a partir do modelo análogo de Lysmer, que propõe uma modelagem discreta da fundação, tem-se neste que, cada fundação é ligada a fundação adjacente por molas (parâmetro k_c) e amortecedores (parâmetro d_c).

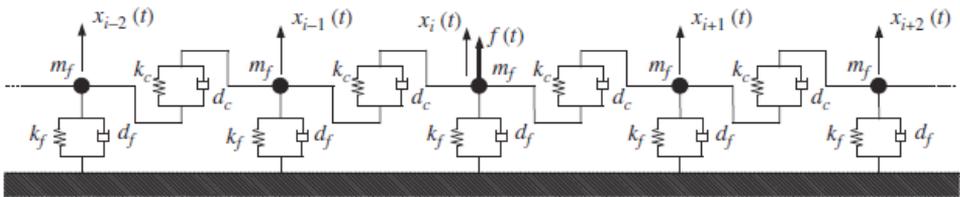


Figura 26.3 Modelo de múltiplas fundações de solo - interação fundação-fundação através de amortecedores e molas, adaptado de Kouroussis (2011).

Considerando que a força $f(t)$ é aplicada no elemento i , a equação do movimento pode ser escrita como:

$$f(t) = m_f \ddot{x}_i + d_f \dot{x}_i + k_f x_i + d_c (\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) + k_c (x_i - x_{i-1}) + d_c (\dot{x}_i - \dot{x}_{i+1}) + k_c (x_i - x_{i+1}) \quad (2)$$

Generalizando a equação do movimento para os demais sistemas de fundação, temos que:

$$0 = m_f \ddot{x}_j + d_f \dot{x}_j + k_f x_j + d_c (\dot{x}_j - \dot{x}_{j-1}) + k_c (x_j - x_{j-1}) + d_c (\dot{x}_j - \dot{x}_{j+1}) + k_c (x_j - x_{j+1}) \text{ com } (\forall j \neq i) \quad (3)$$

Onde o termo i refere-se à fundação onde se tem aplicada uma carga $f(t)$ e o termo j refere-se às fundações acopladas à fundação carregada, com $j = -\infty$ à $+\infty$;

O modelo de múltiplas fundações de uma via férrea foi desenvolvido considerando 7 fundações acopladas, ou seja, com $i = 1, 2, \dots, 5, 7$. Parte do sistema geral (fundações acopladas com os sistemas de dormentes) é mostrada na Figura 26.4.

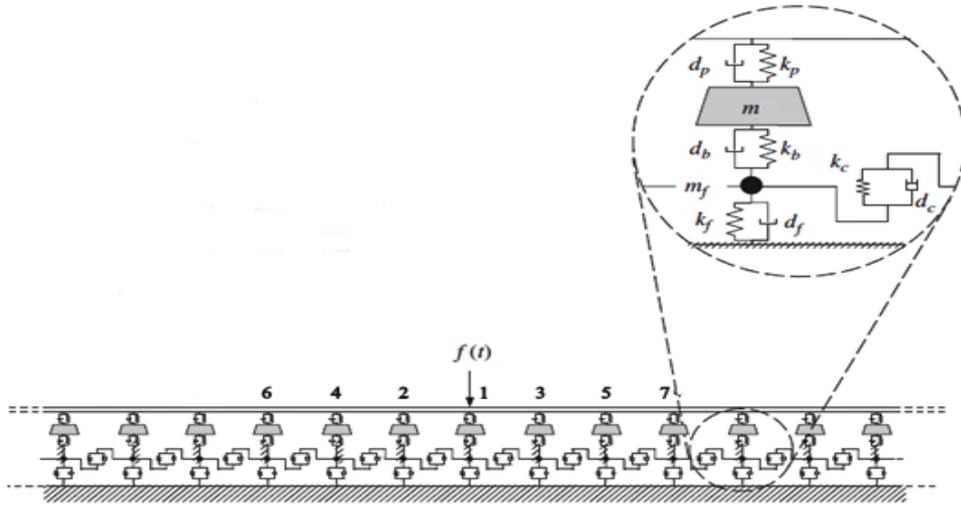


Figura 26.4 Modelo generalizado de múltiplas fundações de solo acopladas ao sistema de trilhos e dormentes, adaptado de Kouroussis (2011).

O sistema de equações representativas do modelo considerando 7 fundações acopladas pode ser descrito por:

$$f(t) = m_f \ddot{x}_1 + d_f \dot{x}_1 + k_f x_1 + d_c (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_c (x_1 - x_2) + d_c (\dot{x}_1 - \dot{x}_3) + k_c (x_1 - x_3) \quad (4)$$

$$0 = m_f \ddot{x}_2 + d_f \dot{x}_2 + k_f x_2 + d_c (\dot{x}_2 - \dot{x}_4) + k_c (x_2 - x_4) + d_c (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_c (x_2 - x_1) \quad (5)$$

$$0 = m_f \ddot{x}_3 + d_f \dot{x}_3 + k_f x_3 + d_c (\dot{x}_3 - \dot{x}_1) + k_c (x_3 - x_1) + d_c (\dot{x}_3 - \dot{x}_5) + k_c (x_3 - x_5) \quad (6)$$

$$0 = m_f \ddot{x}_4 + d_f \dot{x}_4 + k_f x_4 + d_c (\dot{x}_4 - \dot{x}_6) + k_c (x_4 - x_6) + d_c (\dot{x}_4 - \dot{x}_2) + k_c (x_4 - x_2) \quad (7)$$

$$0 = m_f \ddot{x}_5 + d_f \dot{x}_5 + k_f x_5 + d_c (\dot{x}_5 - \dot{x}_3) + k_c (x_5 - x_3) + d_c (\dot{x}_5 - \dot{x}_7) + k_c (x_5 - x_7) \quad (8)$$

$$0 = m_f \ddot{x}_6 + d_f \dot{x}_6 + k_f x_6 + d_c (\dot{x}_6) + k_c (x_6) + d_c (\dot{x}_6 - \dot{x}_4) + k_c (x_6 - x_4) \quad (9)$$

$$0 = m_f \ddot{x}_7 + d_f \dot{x}_7 + k_f x_7 + d_c (\dot{x}_7 - \dot{x}_5) + k_c (x_7 - x_5) + d_c (\dot{x}_7) + k_c (x_7) \quad (10)$$

A partir do sistema de equações diferenciais, um estudo das repostas dos deslocamentos, velocidades e acelerações no domínio do tempo em cada um dos elementos de massa da fundação seria possível.

Kouroussis (2011) cita em seu trabalho que, para evitar problemas de defasagem no tempo de propagação das ondas conforme as mesmas vão sendo transmitidas de elemento de massa da fundação a elemento de massa na fundação, alguns procedimentos devem ser adotados, como por exemplo, a possibilidade de se adotar valores negativos para o amortecimento do elemento de ligação entre as fundações (d_c). Quando o amortecimento estrutural é atribuído na modelagem do sistema de múltiplas fundações, o termo d_c contém uma contribuição de atraso na transmissão das ondas vibracionais (defasagem do tempo de propagação real e modelado) podendo assim assumir valores negativos.

Definido o modelo de múltiplas fundações foi possível analisar e desenvolver um modelo completo representativo de uma via férrea, ou seja, pode-se propor um modelo acoplado entre trilhos, dormentes e múltiplas fundações, o qual é apresentado na Figura 26.5.

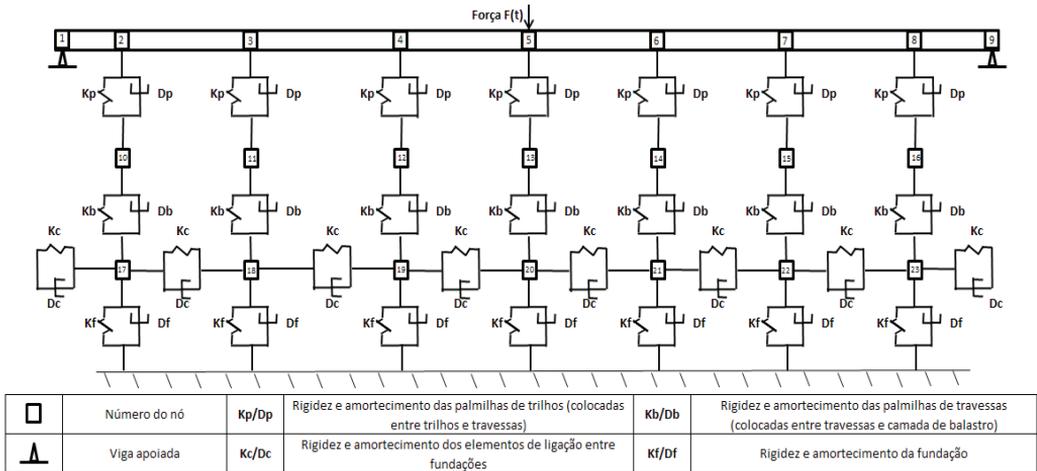


Figura 26.5 Modelo do sistema acoplado trilhos, dormentes e múltiplas fundações.

O modelo acoplado foi desenvolvido a partir de uma viga de Euler-Bernoulli simplesmente apoiada (MELLO, 2014), que representa os trilhos, abaixo dos mesmos têm-se os parâmetros k_p e d_p , que são a rigidez e amortecimento dos elementos de palmilhas aplicadas entre os trilhos e os dormentes. Sob os dormentes têm-se os parâmetros k_b e d_b , que são a rigidez e amortecimento dos elementos de palmilhas aplicadas entre os dormentes e a fundação. A fundação é acoplada ao solo rígido pelos parâmetros k_f e d_f , que representam a rigidez e amortecimento da fundação.

A fim de representar mais fielmente a resposta da fundação quando sujeita a vibrações, elementos de rigidez k_c e amortecimento d_c interligam os elementos de massa da fundação – múltiplas fundações acopladas.

A força aplicada pela passagem do trem sobre os trilhos é representada como um esforço concentrado aplicado no elemento central da viga de Euler-Bernoulli.

O modelo matemático foi desenvolvido a partir do método de elementos finitos considerando como condições de contorno acoplamentos nos limites externos do trilho, ou seja, uma viga de Euler-Bernoulli simplesmente apoiada, onde os deslocamentos verticais seriam nulos (flexão nula e rotação não nula), enquanto que nos nós internos consideraram-se como condições de contorno apenas deslocamentos verticais permissíveis (flexão não nula e rotação nula).

Conhecendo o modelamento matemático, têm-se as equações do movimento do sistema acoplado representadas genericamente como:

$$[M]_{30 \times 30} \ddot{X}(t) + [D]_{30 \times 30} \dot{X}(t) + [K]_{30 \times 30} X(t) = F(t) \quad (11)$$

Devido a maior complexidade do sistema apresentado, o modelo proposto foi resolvido através da integração numérica pelo método de Newmark.

A resolução do modelo matemático foi obtida considerando como base de cálculo os valores dos parâmetros apresentados na Tabela 26.1.

Tabela 26.1 Parâmetros utilizados para resolução do modelo matemático da via férrea.

Parâmetros Utilizados	Valores
Massa da fundação (m_f)	1000,00 kg
Massa do dormente (m_d)	150,00 kg
Constante de amortecimento – fundação (d_f)	1000,00 Ns/m
Constante de rigidez – fundação (k_f)	50000,00 N/m
Constante de amortecimento – ligação entre fundações (d_c)	-200 Ns/m
Constante de rigidez – ligação entre fundações (k_c)	200000,00 N/m
Constante de amortecimento – palmilha entre trilhos/dormentes (d_b)	72,00 Ns/m
Constante de rigidez – palmilha entre trilhos/dormentes (k_b)	47000,00 N/m
Constante de amortecimento – palmilha entre dormentes/fundação (d_p)	4,00 Ns/m
Constante de rigidez – palmilha entre dormentes/fundação (k_p)	120000,00 N/m
Área da seção transversal do trilho	76,88 cm ²

Continua

Tabela 26.1 Parâmetros utilizados para resolução do modelo matemático da via férrea. (Continuação)

Parâmetros Utilizados	Valores
Momento de inércia do trilho	3055,00 cm ⁴
Espaçamento entre os dormentes	0,60 m
Módulo de elasticidade dos trilhos	210,00 Gpa
Densidade dos trilhos	7850 Kg/m ³

A partir da análise do modelo generalizado da via férrea, pode-se realizar a otimização do modelo, buscando encontrar os valores ótimos para os parâmetros de rigidez e amortecimento dos elementos de palmilhas alocados entre os trilhos e dormentes e entre os dormentes e os lastros da fundação, além dos valores ótimos de massa dos dormentes, de modo a encontrar soluções que minimizassem os deslocamentos causados pela passagem de um trem sobre os trilhos.

A otimização foi realizada por simulações numéricas no software Matlab® utilizando o Algoritmo Colônia de Abelhas Artificiais. Este algoritmo é inspirado no comportamento social observado em colônias de abelhas reais, baseado em Enxames Inteligentes propostos para a solução de problemas de otimização numérica multidimensional e multimodal.

A função objetivo do problema foi obtida a partir das respostas de deslocamentos no domínio do tempo da equação do movimento apresentada pela equação (11).

As variáveis de projeto que foram avaliadas de modo a obter-se valores ótimos são representadas pelos parâmetros de rigidez e amortecimento dos elementos localizados acima do elemento de massa da fundação, ou seja, os parâmetros k_p e d_p , k_b e d_b , além da massa dos dormentes m_t (nós 10 à 16 representados na Figura 26.6).

As restrições são dadas a partir dos valores máximos e mínimos que as variáveis de projeto podem assumir, que são:

- $1 \text{ Ns/m} \leq d_p \leq 50 \text{ Ns/m}$;
- $10000 \text{ N/m} \leq k_p \leq 160000 \text{ N/m}$;
- $20 \text{ Ns/m} \leq d_b \leq 120 \text{ Ns/m}$;
- $10000 \text{ N/m} \leq k_b \leq 90000 \text{ N/m}$;
- $0.900 \text{ Kg} \leq m_t \leq 500 \text{ Kg}$;

3 Discussão e resultados

Com base no modelo matemático da via férrea, apresentado na 26.6, obtido pela formulação matemática via elementos finitos, puderam-se determinar os

resultados referentes aos deslocamentos em cada um dos nós do modelo quando sujeito a esforços verticais. Assim, os resultados apresentados referem-se aos deslocamentos no domínio do tempo nos nós da fundação (nós 17 a 23) devido à aplicação de uma força de impulso concentrada no nó central da viga (nó 5).

A Figura 26.6 apresenta as respostas dos deslocamentos no domínio do tempo para os elementos de massa da fundação (nós 17 a 23). Pode-se perceber pela figura que as respostas de deslocamentos apresentam valores muito baixos, o que é usual de ocorrer em solos e em fundações para vias férreas (KOUROUSSIS 2011). Como a força de impulso começa a agir apenas no momento de 0,05 segundos, percebe-se que as respostas também apresentam valores não nulos apenas a partir deste momento, tendendo a atenuá-los com o tempo. Como a força está aplicada no elemento central da viga (nó 5), as respostas próximas ao elemento central da fundação apresentam um maior deslocamento com relação aos demais nós da fundação, onde nós equidistantes deste elemento central da fundação tendem apresentar resultados de deslocamento próximos, com exceção com os deslocamentos apresentados nos nós externos (nó 17 e nó 23). Um dos prováveis motivos pelo qual os nós posteriores ao nó central apresentarem deslocamentos ligeiramente maiores aos nós dos elementos localizados a uma mesma distância do centro de aplicação da força reside no fato da consideração de amortecimentos dos elementos de interligação entre fundações poder assumir valores negativos, devido a consideração de defasagem na transmissão das ondas vibracionais entre elementos de fundação.

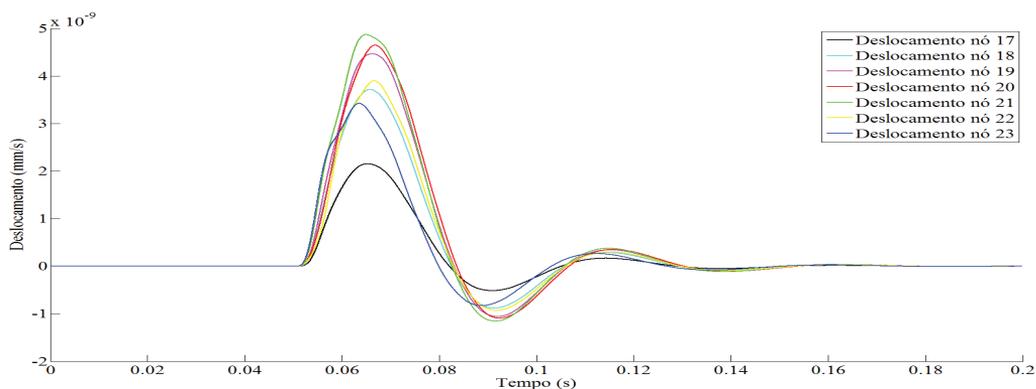


Figura 26.6 Resposta de deslocamentos no domínio do tempo nos nós da fundação considerando uma força de impulso aplicada no nó central da viga (nó 5).

Buscando reduzir os valores das respostas de deslocamentos no domínio do tempo para o sistema acoplado, o modelo matemático foi otimizado pelo método de colônias artificiais de abelhas variando-se os valores das variáveis de projeto: massa dos dormentes, rigidez e amortecimento das palmilhas de trilhos, rigidez e amortecimento das palmilhas de dormentes.

Utilizou-se como parâmetros iniciais para o algoritmo uma quantidade de 50 iterações, considerando uma população inicial de 100 indivíduos.

Os valores das variáveis de projeto antes da otimização e os valores ótimos encontrados pelo método colônia artificial de abelhas estão apresentados na Tabela 26.2.

Tabela 26.2 Soluções das variáveis de projeto otimizadas para o modelo de via férrea

Variáveis de Projeto	Valores iniciais	Valores Ótimos
Massa do dormente (mt)	150,00 kg	112,51 Kg
Constante de amortecimento – palmilha entre trilhos/dormentes (db)	72,00 Ns/m	29,91 Ns/m
Constante de rigidez – palmilha entre trilhos/dormentes (kb)	47000,00 N/m	69293,86 N/m
Constante de amortecimento – palmilha entre dormente/fundação (dp)	4,00 Ns/m	16.66 Ns/m
Constante de rigidez – palmilha entre dormente/fundação (kp)	120000,00 N/m	17789,17 N/m
Função Objetivo	Redução em 51,06% do valor do deslocamento no elemento central da fundação para a função objetivo.	

A Figura 26.7 apresenta os resultados dos deslocamentos no domínio do tempo do ótimo da função objetivo para os elementos de massa da fundação (nós 17, 20 e 23). Percebe-se que foi possível obter reduções significativas nos valores dos deslocamentos, além de permitir que a resposta entrasse em regime de estabilidade mais rapidamente, uma grande vantagem quando se busca atenuar vibrações. Logo, o objetivo do trabalho foi obtido com êxito, sendo as vibrações transmitidas no solo e nas fundações devido à dinâmica de uma via férrea minimizados significativamente através do método de otimização.

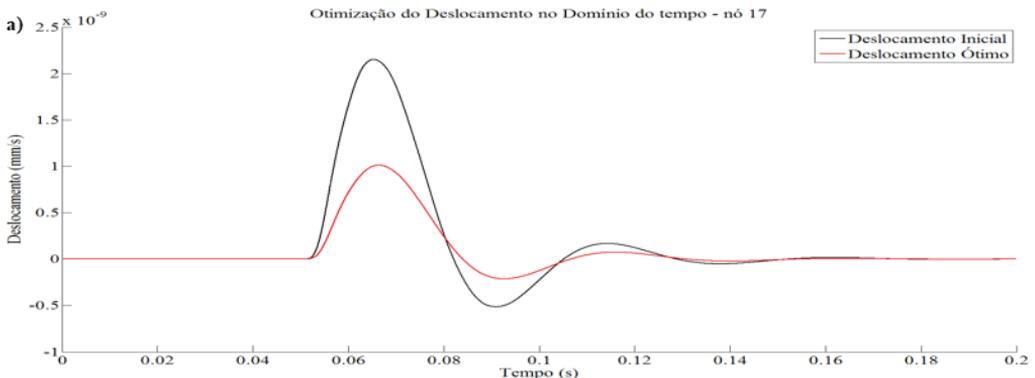


Figura 26.7 Resposta ótima dos deslocamentos no domínio do tempo nos nós 17 (a), 20 (b) e 23 (c) da fundação considerando uma força aplicada no nó central da viga (nó 5). (Continua)

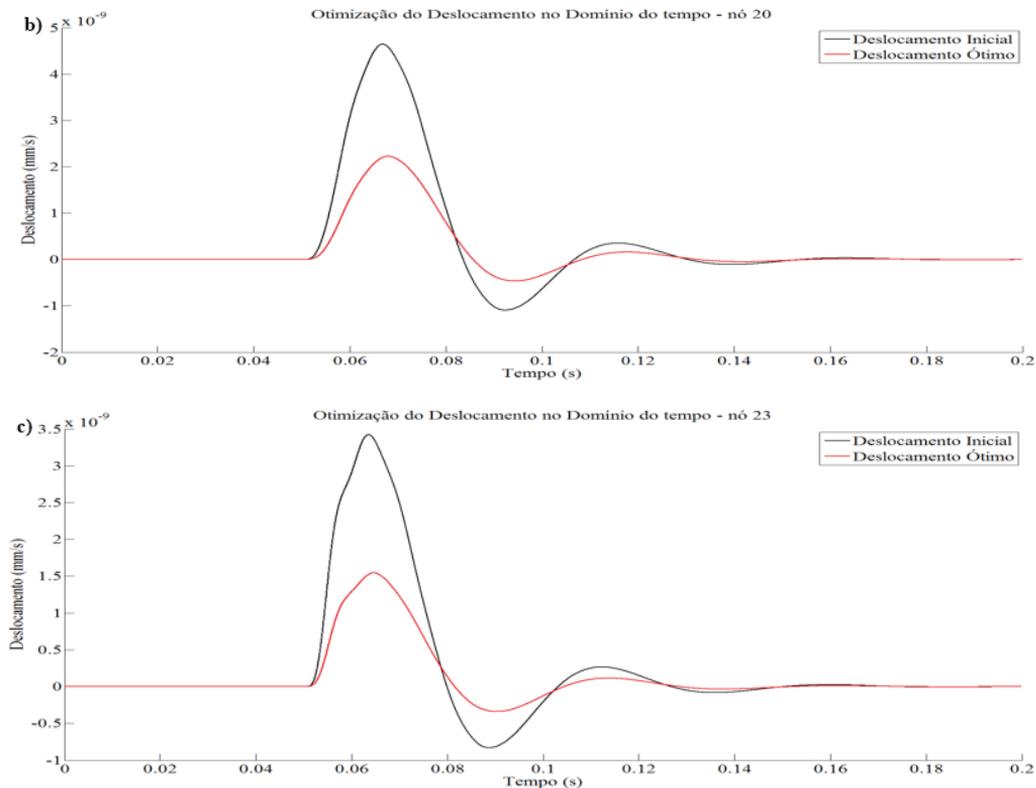


Figura 26.8 Resposta ótima dos deslocamentos no domínio do tempo nos nós 17 (a), 20 (b) e 23 (c) da fundação considerando uma força aplicada no nó central da viga (nó 5). (Continuação)

Conclusões

Neste trabalho foi realizado um estudo voltado à investigação das vibrações causadas pela passagem de trens sobre vias férreas. Buscou-se obter reduções nas vibrações transmitidas ao solo e as fundações por meio da otimização de um modelo proposto para o sistema férreo.

Através do uso do método de elementos finitos pode-se propor um modelo matemático para o sistema acoplado trilhos, dormentes e múltiplas fundações.

A análise do comportamento dinâmico das fundações do sistema no domínio do tempo foi obtida através da resolução do modelo matemático previamente proposto com auxílio do método de Newmark, que permitiu rápida solução para o equacionamento realizado pelo método de elementos finitos.

A otimização através do uso do algoritmo de colônia de abelhas permitiu encontrar valores para as variáveis de projeto (massa dos dormentes e os

parâmetros de rigidez e amortecimento das palmilhas de trilhos e dormentes) que reduzissem os valores de deslocamento no domínio do tempo para os elementos situados na fundação de maneira significativa. Como resultado do projeto ótimo, obteve-se redução dos valores dos deslocamentos na fundação de 51,06%.

Para estudos futuros pretende-se buscar novas metodologias para redução das vibrações em solos e fundações, como a utilização de medidas de atenuação entre a via férrea e estruturas próximas, como barreiras, poços, muros etc. Além da análise no domínio da frequência e modelagem a partir de outros *softwares*.

Referências

- DNIT.; Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Disponível em <http://www.dnit.gov.br/download/ferrovias/consulta-publica/101-pim-trilho.pdf>. Acesso em: 03 set. 2016.
- ESVELD, C.; **Model Railway Track**. 2^a ed. Delft: MRT-Productions. ISBN 90-800324-3-3, 2001
- INMAN, D. J.; **Distributed Parameter Systems**. In: _____. **Engineering vibration**. 2.ed. Upper Saddle River: Printice Hall, 2001.
- KNOTHE K.; Grassie S. L. **Modelling of railway track and vehicle/track interaction at high frequencies**. Vehicle System Dynamics, 1993.
- KOUROUSSIS G, Van Parys L., Conti C., Verlinden O. **Using three-dimensional finite element analysis in time domain to model railway-induced ground vibrations**. Advances in Engineering Software 70, 63–76, 2014
- KOUROUSSIS G., Gazetas G., Anastasopoulos I., Conti C., Verlinden O.; **Discrete modelling of vertical track-soil coupling for vehicle-track dynamics**. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 31(12): 1711–1723, 2011.
- KOUROUSSIS G, Verlinden O, Conti C.; **Ground propagation of vibrations from railway vehicles using a finite/infinite-element model of the soil**. Proceedings of the IMechE, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2009.
- LYSMER J.; Kuhlemeyer R. L. **Finite dynamic model for infinite media**. Journal of the Engineering Mechanics Division, Proceedings of the ASCE, 1969.

OLIVEIRA, A. F. F. P.; **Via Balastrada versus Via Não Balastrada**. Lisboa: Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Especialização em Vias de Comunicação e Transportes. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2012.

QUESADO, A. M. S.; **Análise e Mitigação de Vibrações Induzidas por Tráfego Ferroviário na Vizinhança de Vias de Alta Velocidade**. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2010.

Considerações sobre a substituição da armadura por fibras metálicas em vigas de concreto

Wanderlei Malaquias
Pereira Junior¹

José Júlio de Cerqueira Pituba²

Resumo: Este trabalho trata da aplicação de modelos de dano e de homogeneização em simulações numéricas de vigas de concreto fibroso. Objetiva-se iniciar uma discussão sobre a substituição da armadura de flexão, em parte, por fibras metálicas. Para tanto, um modelo de dano para o concreto é empregado, assim como um modelo de homogeneização para se levar em conta a presença de fibras metálicas. Os modelos foram implementados em código de cálculo via Método dos Elementos Finitos. Observa-se que no exemplo analisado, a inserção de fibras metálicas provoca um ganho de rigidez e resistência na viga de concreto, inclusive diminuindo o fenômeno de fissuração.

Palavras-chave: Mecânica do dano, Concreto fibroso, Modelos constitutivos.

Introdução

A modelagem constitutiva de materiais compósitos está em fraco desenvolvimento, incluindo a busca por modelos que balizem discussões sobre o emprego de materiais com propriedades adequadas que ao serem incorporados a um material base, melhore suas características mecânicas. Dentro desse contexto, o concreto fibroso merece destaque. O concreto é o material mais empregado na construção

-
- 1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Laboratório de Mecânica Computacional. Contato: wanderlei.malaquias.pereira.jr@gmail.com.
 - 2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Engenharias. Laboratório de Mecânica Computacional. Contato: julio.pituba@pq.cnpq.br. Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq.

de edificações e obras civis em geral, porém por seu comportamento frágil quando submetidas a esforços que levem a solicitações de tração, o concreto tem limitações de uso. A incorporação de fibras metálicas gerando o concreto fibroso pode levar a ganhos, principalmente no comportamento mecânico do concreto fissurado. Estudos experimentais sobre o concreto fibroso são onerosos, portanto, a modelagem numérica surge como uma ferramenta auxiliar para balizar discussões e orientar análises experimentais para a obtenção de materiais com propriedades adequadas.

A normalização para o concreto simples já está muito bem difundida no país através da NBR 6118 (ABNT, 2011). Contudo, cabe ressaltar que o Brasil ainda não tem nenhum procedimento para verificação no Estado Limite Último (ELU) e Estado Limite de Serviço (ELS) para peças de concreto reforçada com fibras metálicas. Portanto, trabalhos que estudem esse material são necessários para o entendimento de seu comportamento mecânico e balizar futuras discussões de norma técnica.

Dentro do contexto de modelagem do concreto, a Mecânica do Dano no Contínuo (MDC) vem despertando interesse na área de Mecânica Computacional. Modelos desse tipo intencionam reproduzir o comportamento mecânico de materiais fissurados através da quantificação de uma variável denominada dano. Por outro lado, modelos de homogeneização são necessários para a simulação de materiais compósitos como é o caso do concreto fibroso. Em suma, neste trabalho é empregado o modelo de dano formulado por Pituba (2003) e seus desenvolvimentos em Pituba e Fernandes (2011), Pituba (2006), Piuba e Proença (2008), em conjunto com a proposta de homogeneização apresentada em Pereira Júnior (2014) e Pereira Júnior et al. (2016). O objetivo consiste em verificar a empregabilidade da ideia em substituir parte da armadura de flexão por fibras metálicas. Para tanto, análises numéricas serão apresentadas e conclusões iniciais do emprego desta modelagem serão descritas ao final.

1 Desenvolvimento

No item 1 é apresentada a formulação matemática do modelo constitutivo para o concreto proposto por Pituba (2003) e seus desenvolvimentos constantes em Pituba (2006), Pituba e Proença (2008) e Pituba e Fernandes (2011). Em seguida, é abordada a incorporação das fibras metálicas na matriz cimentícia levada em conta por Pereira Júnior (2014) e Pereira Júnior et al. (2016) através de um processo de homogeneização.

1.1 Modelos Constitutivos

Segundo Pituba e Proença (2008), para modelar o comportamento do concreto, pode-se assumir que o meio pertence a uma categoria de materiais que

podem ser considerados inicialmente isotrópicos e unimodulares, porém, quando danificados passam a exibir anisotropia e bimodularidade (diferentes comportamentos em estados predominantes de tração e compressão). Dentro desse contexto, uma formulação de leis constitutivas para materiais com isotropia ou anisotropia elástica que apresentam diferentes comportamentos em tração e em compressão é apresentada em Pituba e Fernandes (2011) no espaço das tensões e de deformações no âmbito tridimensional. Ainda segundo Pituba e Proença (2008) e Pituba (2006), admite-se que para a modelagem de um material hiperelástico bimodular, a densidade de energia potencial elástica W deve ser uma vez diferenciável continuamente (em qualquer ponto), porém diferenciável duas vezes continuamente apenas por partes. A relação tensão-deformação derivada de tal potencial tem continuidade (em qualquer ponto) e apresenta um tensor de elasticidade descontínuo em relação a uma hipersuperfície que contém a origem do espaço das deformações; nessas condições torna-se possível reproduzir uma resposta diferente em tração e em compressão. Com o intuito de se levar em conta os efeitos da danificação no meio, os módulos volumétricos (λ_{ab}) e de cisalhamento (μ_a) são considerados como funções do estado de dano tal que a relação tensão-deformação é influenciada pelas variáveis de dano. Como o critério para a identificação das respostas constitutivas de compressão ou de tração, hiperplano separador $g(\epsilon, D_i)$, é função das componentes de deformação, este critério passa então a ser influenciado pelas variáveis de dano. Da formulação proposta em Pituba e Fernandes (2011) foi derivado um modelo constitutivo considerando o concreto como um meio inicialmente isotrópico com anisotropia (isotropia transversal) e bimodularidade induzidas pelo dano. A classe de anisotropia induzida, adotada no modelo, decorre do pressuposto que localmente o concreto solicitado apresenta sempre uma distribuição de danificação com orientação bem definida. Essa suposição, aliás, está justificada na observação do comportamento do material em ensaios experimentais.

A formulação do modelo tem por base o formalismo apresentado em Pituba (2003), Pituba (2006) e Pituba e Proença (2008) e, além disso, procura atender ao princípio de equivalência de energia entre meio real danificado e meio contínuo equivalente estabelecido na Mecânica do Dano. Para a definição de D , opta-se por uma forma dita de dano escalar dada por: $D = f_j(D_i) M_j$, onde $f_j(D_i)$ são funções de valores escalares das variáveis escalares de dano escolhidas e M_j são tensores de anisotropia (PITUBA e PROENÇA, 2008). No caso deste modelo, adotam-se para M_j tensores que permitem representar a isotropia transversal. Portanto, para estados predominantes de tração, apresenta-se o tensor:

$$D_T = f_1(D_1, D_4, D_5)(A \otimes A) + 2f_2(D_4, D_5)[(A \otimes I + I \otimes A) - (A \otimes A)] \quad (1.1)$$

sendo $f_1(D_1, D_4, D_5) = D_1 - 2 f_2(D_4, D_5)$ e $f_2(D_4, D_5) = 1 - (1-D_4) (1-D_5)$. A variável D_1 representa a danificação na direção perpendicular ao plano local de isotropia transversal do material e D_4 é a variável representativa da danificação gerada pelo escorregamento entre as bordas das fissuras pertencentes àquele plano. A terceira variável de dano D_5 é ativada somente se tiver havido compressão prévia com danificação correspondente. Na Eq. (1.1), o tensor I é o tensor identidade de segunda ordem e o tensor A é, por definição (PITUBA e PRIENÇA, 2008), formado pelo produto tensorial do vetor perpendicular ao plano de isotropia transversal por ele mesmo. As operações de produtos tensoriais entre os tensores de segunda ordem I e A são utilizadas durante toda a formulação e estão descritas em Pituba e Fernandes (2011).

Para estados predominantes de compressão, apresenta-se o seguinte tensor de dano:

$$D_C = f_1(D_2, D_4, D_5) (A \otimes A) + f_2(D_3) [(I \otimes I) - (A \otimes A)] + 2f_3(D_4, D_5) [(A \otimes I + I \otimes A) - (A \otimes A)] \quad (1.2)$$

sendo $f_1(D_2, D_4, D_5) = D_2 - 2 f_3(D_4, D_5)$, $f_2(D_3) = D_3$ e $f_3(D_4, D_5) = 1 - (1-D_4) (1-D_5)$. Notam-se três variáveis escalares na sua composição: D_2 , D_3 e D_5 , além de D_4 , relacionada a efeitos de tração pré-existent. A variável D_2 (danificação perpendicular ao plano local de isotropia transversal do material) penaliza o módulo de elasticidade nessa direção e juntamente com D_3 (representante da danificação no plano de isotropia transversal) penaliza o coeficiente de Poisson em planos perpendiculares ao de isotropia transversal. Observa-se que, é possível capturar a danificação dos módulos de cisalhamento e ao mesmo tempo atender à hipótese de salto tangencial nulo do tensor constitutivo, implícita na modelagem da bimodularidade (PITUBA e PROENÇA, 2008).

Atendendo ao formalismo proposto e ao princípio de equivalência de energia estabelecido pela MDC, o tensor constitutivo do modelo é escrito como:

$$E(\varepsilon) := \begin{cases} E_-(\varepsilon) & \text{se } g(\varepsilon, D_T, D_C) < 0, \\ E_+(\varepsilon) & \text{se } g(\varepsilon, D_T, D_C) > 0, \end{cases} \quad (1.3)$$

$$E_+(\varepsilon) = \lambda_1 [I \otimes I] + 2\mu_1 [I \otimes I] - \lambda_2^+ (D_1, D_4, D_5) [A \otimes A] - \lambda_2^+ (D_1) [A \otimes I + I \otimes A] - \mu_2 (D_4, D_5) [A \otimes I + I \otimes A] \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned}
 E_-(\varepsilon) = & \lambda_1 [I \otimes I] + 2\mu_1 [I \otimes \bar{I}] - \lambda_2^-(D_2, D_3, D_4, D_5) [A \otimes A] \\
 & - \lambda_2^-(D_2, D_3) [A \otimes I + I \otimes A] - \lambda_1^-(D_3) [I \otimes I] \\
 & - \frac{(1 - 2\nu_0)}{\nu_0} \lambda_1^-(D_3) [I \otimes \bar{I}] - \mu_2(D_4, D_5) [A \otimes \bar{I} + I \otimes \bar{A}]
 \end{aligned} \tag{1.5}$$

Observa-se que para valores nulos das variáveis de dano, o material se comporta como um meio isótropo e unimodular, onde $\lambda_{11} = \lambda_0$; $\mu_1 = \mu_0$ são as constantes usuais de Lamé.

Por outro lado, o hiperplano $g(e, D)$ é definido por sua normal unitária N ($\|N\| = 1$) e caracterizado por sua dependência dos estados de deformação e de danificação. Por simplificação, restringindo-se o estudo ao caso em que o sistema local de referência adotado para o material é aquele obtido impondo-se a direção 1 como sendo perpendicular ao plano local de isotropia transversal, e em correspondência aos casos gerais de solitação, tem-se:

$$g(e, D_T, D_C) = N(D_T, D_C) \cdot e^e = g_1(D_1, D_2) \varepsilon_v^e + g_2(D_1, D_2) \varepsilon_1^e \tag{1.6}$$

onde $g_1(D_1, D_2) = \{1 + H(D_2)[H(D_1) - 1]\}h(D_1) + \{1 + H(D_1)[H(D_2) - 1]\}h(D_2)$ e $g_2(D_1, D_2) = D_1 + D_2$. As funções de Heaveside empregadas na última relação são dadas por:

$$H(D_i) = 1 \text{ para } D_i > 0; H(D_i) = 0 \text{ para } D_i = 0 \text{ (} i = 1, 2 \text{)} \tag{1.7}$$

Já as funções $h(D_1)$ e $h(D_2)$ são definidas, respectivamente, para os casos de tração, supondo que não tenha danificação prévia de compressão, e de compressão, supondo que não tenha havido danificação prévia de tração, sendo dadas por:

$$h(D_1) = \frac{-D_1 + \sqrt{3 - 2D_1^2}}{3}; h(D_2) = \frac{-D_2 + \sqrt{3 - 2D_2^2}}{3} \tag{1.8}$$

Por outro lado, tendo-se em vista que a danificação induz anisotropia no meio inicialmente isótropo, é conveniente separar os critérios de dano em: critério para início de danificação, quando o material deixa de ser isótropo; e critério para carga e descarga, entendido aqui num sentido de evolução ou não das variáveis de dano, quando o material já se apresentar como transversalmente isótropo. Este segundo critério identifica se existe ou não evolução das variáveis de dano. Esta divisão é justificada pela diferença existente entre as energias de deformação

elástica complementares de um material isotrópico e um outro com isotropia transversal.

Nos casos onde se configura carregamento é necessário atualizar os valores das variáveis escalares de dano que aparecem nos tensores DT e DC, considerando-se suas leis de evolução, que por sua vez são escritas como funções das variáveis associadas. Considerando o caso de carregamento monotônico, as leis de evolução propostas são resultantes de ajustes sobre resultados experimentais e apresentam características similares àquelas encontradas nos trabalhos em Pituba (2003). A forma dada à equação é:

$$D_i = I - \frac{I + A_i}{A_i + \exp[B_i(Y_i - Y_{0i})]} \text{ com } i = 1, 5 \quad (1.9)$$

onde A_i , B_i e Y_{0i} são parâmetros a serem identificados mediante experimentos, onde estados de tensão uniaxial e biaxial são induzidos.

Segundo Pituba e Proença (2008), quando o processo de danificação é ativado, a formulação passa a envolver o tensor \mathbf{A} que, por sua vez, depende do conhecimento da normal ao plano de isotropia transversal. Então, devem-se definir regras para a localização dessa normal para um dado estado de deformação. Inicialmente estabelece-se um critério geral para a existência do plano de isotropia transversal. Propõe-se que a isotropia transversal decorrente da danificação se manifesta somente se existirem taxas positivas de deformação, ao menos em uma das direções principais. Estabelecido o critério geral, algumas regras para identificar sua localização são definidas.

A versão unidimensional do modelo leva em conta deformações permanentes induzidas pela evolução da danificação (PITUBA e PROENÇA, 2008). Assume-se, por simplicidade, que as deformações permanentes são compostas exclusivamente pelas deformações volumétricas, e ainda levando-se em conta o efeito unilateral, a lei de evolução resulta em:

$$\dot{\epsilon}^p = \left(\frac{\beta_1}{(I - D_1)^2} \dot{D}_1 + \frac{\beta_2}{(I - D_2)^2} \dot{D}_2 \right) \mathbf{I} \quad (1.10)$$

Observa-se que β_1 e β_2 são parâmetros diretamente relacionados com as evoluções das deformações permanentes induzidas pelo dano em tração e compressão, respectivamente.

Vale destacar que para modelar o comportamento mecânico das armaduras de aço, um modelo constitutivo elastoplástico é utilizado.

O modelo de dano em estudo está implementado em linguagem Fortran em um código computacional baseado no Método dos Elementos Finitos para

a análise numérica de estruturas em barras discretizadas com seção transversal estratificada, permitindo assim considerar na seção transversal camadas equivalentes de aço ou concreto. Tal código é identificado aqui como EFICOS. Ao longo deste trabalho admite-se perfeita aderência entre concreto e aço, definindo assim para cada camada suas características, como módulo de elasticidade e deformações anelásticas equivalentes, utilizando regra de homogeneização para tal fim (PEREIRA JUNIOR, 2014).

Por outro lado, para modelar o concreto fibroso, em especial a interação fibra/matriz, um procedimento proposto por La Borderie (1991) é utilizado.

De forma resumida, tal modelo é expresso por (1.11) para o cálculo da tensão homogeneizada do compósito de concreto reforçado com fibras metálicas:

$$\sigma_{CRFA} = (1 - C)\sigma_m + C\sigma_f \quad (1.11)$$

Onde:

σ_{CRFA} : Tensão do material homogeneizado, dito CRFA;

C : Fração volumétrica de fibras de aço;

σ_m : Tensão na matriz cimentícia;

σ_f : Tensão na interface fibra tracionada imersa no concreto.

Observa-se que foi introduzida uma hipótese simplificadora, onde a deformação é suposta idêntica para a matriz e a fibra. Além disso, a orientação das fibras, que é aleatória e não privilegiada no sentido da sollicitação, não é levada em conta na modelagem proposta (PEREIRA JUNIOR, 2014).

2 Metodologia / procedimentos utilizados

O presente trabalho empregou os modelos constitutivos descritos anteriormente via Método dos Elementos Finitos para simular o comportamento mecânico de vigas de concreto armado e concreto armado reforçado com fibras. As vigas foram ensaiadas por Álvares (1993) estando descritas naquele trabalho.

Na confecção das vigas empregou-se um concreto com $E_c = 29200$ MPa. Para o aço das armaduras adotou-se $E_a = 196000$ MPa e tensão de escoamento de 420 MPa, admitindo-se um comportamento elasto-plástico perfeito. O coeficiente de Poisson adotado foi de 0,20. Maiores detalhes sobre a resposta experimental de cada tipo de viga, colhida a partir de provas realizadas com controle de carga, encontram-se em Álvares (1993). Na Fig. 2.1 são fornecidos os detalhes de geometria e armação das vigas.

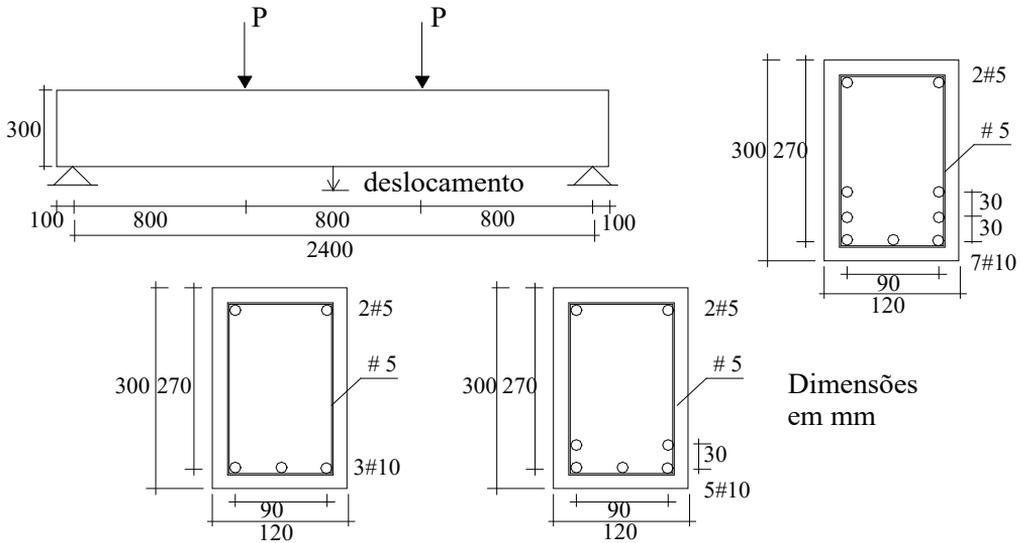


Figura 27.1 Geometria e armação das vigas

Os parâmetros de compressão do modelo foram identificados a partir de medidas de ensaios experimentais em espécimes de concreto submetidos a estados de compressão uniaxial (Álvares, 1993). Os parâmetros de tração foram identificados a partir de respostas de tração uniaxial descritas por Álvares (1993) para o concreto das vigas.

Os resultados da identificação paramétrica encontram-se na Figura 27.2 e 27.3. Os valores dos parâmetros obtidos para o modelo de dano estão relacionados na Tabela 27.1.

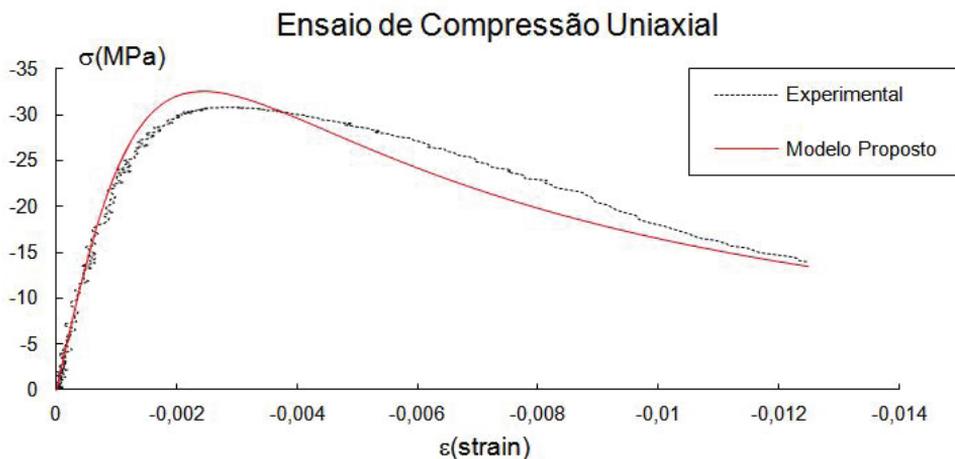


Figura 27.2 Identificação paramétrica na compressão uniaxial

Ensaio de Tração Uniaxial

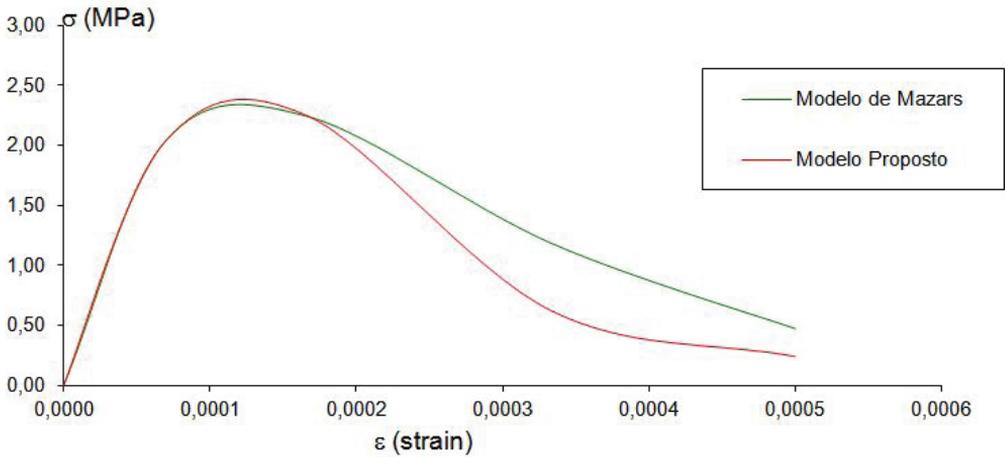


Figura 27.3 Identificação paramétrica na tração uniaxial

Tabela 27.1 Valores dos parâmetros do modelo de dano

Parâmetros de Tração	Parâmetros de Compressão
$Y_{01} = 0,72 \times 10^{-4} \text{MPa}$	$Y_{02} = 0,5 \times 10^{-3} \text{MPa}$
$A_1 = 50$	$A_2 = -0,9$
$B_1 = 6700 \text{MPa}^{-1}$	$B_2 = 0,4 \text{MPa}^{-1}$

O concreto utilizado possui um módulo de elasticidade longitudinal no valor de 29200 MPa, resistência à compressão de 30,8 MPa e resistência à tração de 2,25 MPa. Já o aço utilizado para as armaduras possui módulo de elasticidade longitudinal no valor de 196 GPa, limite de escoamento inicial de 500 MPa.

Os valores dos parâmetros do modelo de homogeneização para a concentração de fibras de 2% utilizada aqui, estão descritos na Tabela 2.2. Os dados das fibras metálicas foram propostos por Pereira Junior (2014).

Tabela 27.2 Variáveis da fibra metálica para os testes numéricos (PEREIRA JUNIOR, 2016)

Tensão de Pico (MPa)	Tensão de escoamento (MPa)	Deformação de Ruptura (%)	Concentração de fibras (%)
525,00	420,00	2,50	2,00

3 Discussão e resultados

As análises apresentadas correspondem aos gráficos de carga x deslocamento. A carga representa a força aplicada no terço do vão das vigas, enquanto que o deslocamento obtido correspondente ao ponto central das vigas. Vale ainda ressaltar que foram empregados 20 elementos finitos de barra e 21 nós na discretização longitudinal de metade das vigas devido às suas simetrias. Já as seções transversais foram discretizadas em 15 camadas, sendo uma camada de aço no caso da viga com 3#10.0 mm e 2 camadas para o caso da viga com 5#10.0mm. O restante das camadas são consideradas de concreto e/ou concreto fibroso, dependendo da análise.

A figura 27.4 apresenta inicialmente a faixa de respostas experimentais para a viga em concreto armado com 3#10.0mm e a resposta numérica com o emprego da modelagem proposta. Também é apresentada a curva carga x deslocamento com a adição de 2% de fibras metálicas. Neste último caso, observa-se o elevado ganho de rigidez e resistência quando comparado com a viga de concreto armado, principalmente quando há uma quebra de rigidez inicial devido à concentração de dano na viga. Portanto, a inclusão de fibras diminui bastante o processo de fissuração da viga conferindo-lhe resistência e rigidez elevadas.

Já a Figura 27.5 apresenta as curvas de respostas experimentais da viga de concreto armado com 5#10.0mm (normalmente armada), assim como a resposta numérica com a viga considerando apenas a armadura de flexão com 5#10.0mm. Também observa-se a resposta numérica da viga com a retirada de 2 barras de 10.0mm e a substituição destas por fibras metálicas na concentração de 2 %. Neste último caso, a viga com a substituição por concreto fibroso apresenta uma rigidez inicial similar à viga com 5#10.0 mm, porém, após o processo de início de fissuração, a viga normalmente armada apresenta uma forte perda de rigidez, o que não acontece com a viga armada reforçada com 2% de fibras. Inclusive esta reforçada encontra-se ainda dentro das respostas experimentais esperadas para uma viga com 5#10.0mm, evidenciando portanto que é possível substituir parte da armadura de flexão por fibras metálicas.

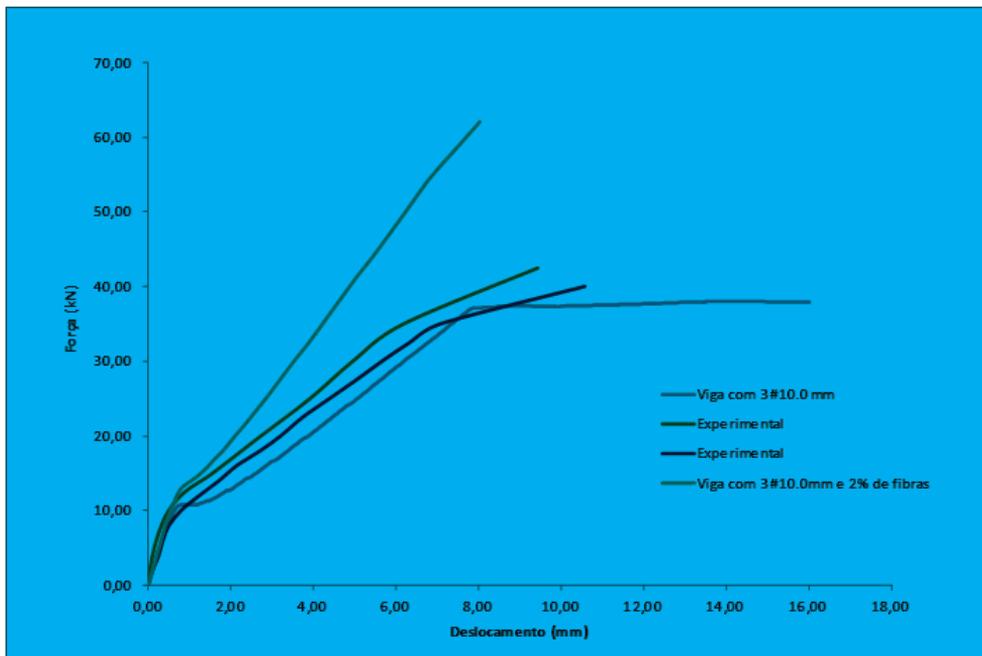


Figura 27.4 Carga versus deslocamento – viga com 3#10.0mm

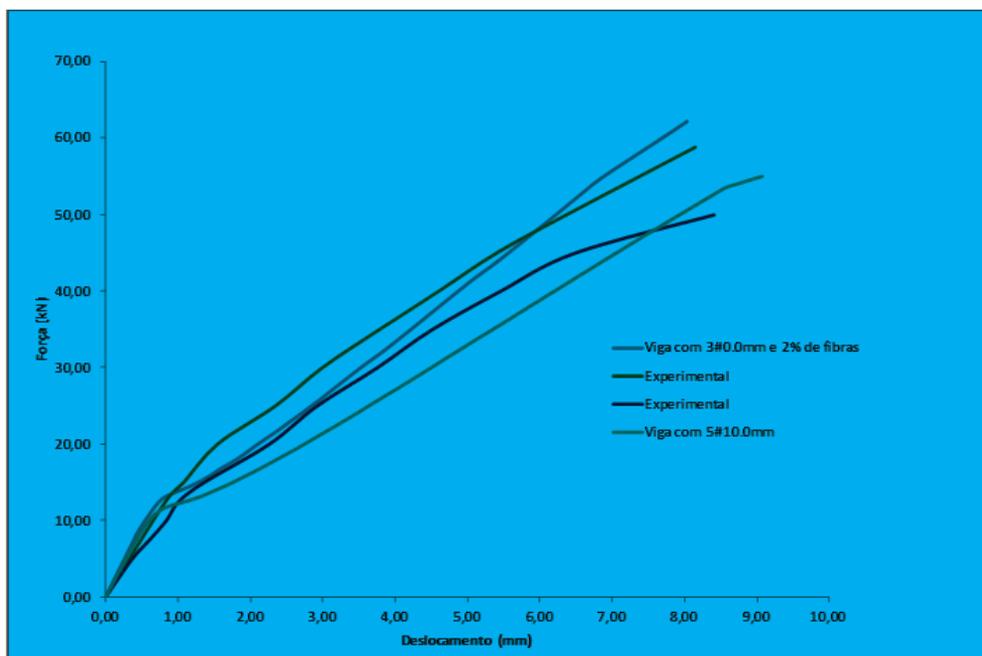


Figura 27.5 Carga versus deslocamento – viga com 5#10.0mm

Conclusões ou considerações finais

Os resultados apresentados neste trabalho são parte de uma pesquisa mais abrangente que trata do emprego do concreto reforçado com fibras metálicas. Os resultados evidenciam que a modelagem a dano é uma ferramenta numérica capaz de simular o comportamento mecânico do concreto e, associada a uma regra de homogeneização, pode também simular o comportamento mecânico do concreto fibroso.

As análises apresentadas mostram que as fibras metálicas são importantes aditivos para a correção do processo de fissuração do concreto, auxiliando na obtenção de rigidez e resistência satisfatórias. Portanto, as fibras metálicas podem ser empregadas como substitutas parciais da armadura de flexão. Cabe fazer a ressalva que esses são estudos iniciais que se mostram bastante promissores.

Referências

- _____. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto Armado - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014, 238 p.
- ÁLVARES, M. S. Estudo de um Modelo de Dano para o Concreto: Formulação, Identificação Paramétrica e Aplicação com o Emprego do Método dos Elementos Finitos. 1993. Dissertação de Mestrado, EESC – Universidade de São Paulo, 1993.
- LA BORDERIE, C. *Phenomenes unilateraux dans un materiau endommageable: modelisation et application a l'analyse de structures en beton*. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de Paris, Paris, 1991.
- PEREIRA JUNIOR, W. M. *Análise numérica de estruturas de concreto com fibras utilizando mecânica do dano*. 2014. 157 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil s) – Escola de Engenharia Civil da Universidade de Goiás, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.
- PEREIRA JUNIOR, W. M.; PITUBA, J. J. C.; ARAÚJO, D. L. (2016). Análise numérica de vigas de concreto com fibras de aço utilizando mecânica do dano. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, v. 9, pp 153-191.
- PITUBA, J. J. C. *Sobre a formulação de um modelo de dano para concreto*. 2003. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

PITUBA, J. J. C.; FERNANDES, G. R. (2011). Anisotropic Damage Model for Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 137, pp 610-624.

PITUBA, J. J. C. (2006). Formulação de modelos de dano para meios anisótropos e bimodulares. *Revista Sul-americana de Engenharia Estrutural*, v. 3, pp 7-29.

PITUBA, J. J. C.; PROENÇA, S. P. B. (2008). Sobre a formulação de um modelo de dano para o concreto. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, v. 10, pp 117-146.

