

ANÁLISE ESTRUTURAL VIA METODOLOGIA FEA: ESTUDO DE UM MACACO AUTOMOTIVO CORRELACIONANDO O TESTE FÍSICO DE UM PROTÓTIPO EM LABORATÓRIO E A SIMULAÇÃO VIRTUAL

Evandro Secchi de Oliveira¹ e Roderley Camargo²

¹UNISAL Centro Universitário Salesiano de São Paulo

²Robert Bosch Ltda

E-mails: evandroweg@gmail.com, roderley.camargo@br.bosch.com

RESUMO

O macaco mecânico é um componente obrigatório nos veículos automotores, e essencial nos momentos em que haja a necessidade de uma intervenção humana, para uma manutenção ou mesmo uma troca de pneu avariado. Tendo como base os aspectos de manufatura, igual importância tem o projeto deste componente, como forma de adequar os requisitos de qualidade, custo e conformidade ambiental, fazendo aderência as diversas normas de segurança humana e ambiental. Neste sentido, apresenta-se neste trabalho um estudo de análise estrutural dos braços de um macaco mecânico, confeccionados em aço estrutural NBR6656-LNE-500 com 2mm de espessura, por meio da metodologia FEA (*Finite Element Analyze*), obtendo os resultados de deslocamento (Δl) e tensão (σ), gerado pela carga de 2500 kg em forma de dados de entrada. Os resultados matemáticos obtidos foram correlacionados com o teste de bancada indicando uma divergência de 1.5% entre o comportamento do protótipo e a simulação computacional. Assim, validou-se o resultado da análise estrutural e aplicou-se as condições de contorno as modificações de *design* do produto, tendo em vista que a simulação computacional FEA representa uma condição real de teste.

INTRODUÇÃO

A análise estrutural via método dos elementos finitos é muito utilizada para validar o *design* de novos produtos, em sua fase inicial do processo de desenvolvimento do produto (PDP) [1]. Visando acelerar o processo de projeto e orientando os engenheiros a obter um produto com qualidade e com uma perda mínima de material. Objetivando trabalhar com espessuras de chapas cada vez menores, para macacos mecânicos, é necessário utilizar métodos de análise estrutural para acelerar o desenvolvimento e obter um menor custo no desenvolvimento de protótipos. Porém, há que se preocupar com a precisão e a confiabilidade do software escolhido para fazer a análise por elementos finitos, pois os resultados serão comparados com o teste físico. Além disto, esta ferramenta de simulação deve ser robusta o suficiente, para superar com eficiência, as demandas de tempo, custo de projeto e qualidade final da análise FEA [2].

Para obter a solução e ter um parâmetro de referência, foi realizada uma análise FEA com o software CREO *Simulate* 2.0 para validar os "braços" do macaco tipo sanfona, na condição de 66% da altura máxima e com uma carga de 2.500 kg. Desta forma, consegue-se representar virtualmente, a severidade de uso deste componente simulando as condições reais.

A principal motivação para este estudo de análise estrutural, via métodos dos elementos finitos, foi a incerteza inicial dos resultados entre a simulação virtual e o teste de laboratório, relacionado a um macaco mecânico do tipo sanfona. Ao validar o processo de elementos finitos a serem utilizados para gerar a malha ideal para a solução do problema os produtos que possuir as mesmas características de um Macaco Sanfona poderão obter seu design visando otimização de matéria prima sem comprometer a qualidade e obtendo uma redução de custo do produto.

Para iniciar o estudo, foi modelado virtualmente com o auxílio do Software CREO 2.0, um Macaco Sanfona com um design de braço simples, pois o ponto crítico de falha deste tipo de Macaco são os braços, com isso foi confeccionado um protótipo cujos braços foram estampados com aço NBR6656-LNE-500 [3]. O protótipo com todas as características do modelo matemático foi testado em laboratório em uma máquina desenvolvida para realizar a compressão em Macacos Mecânicos, na condição da altura de 66% da capacidade de altura máxima e 2.500 kg de carga aplicada. O produto suportou a carga sem demonstrar nenhum sinal visível de deformação plástica nos braços ou qualquer outro componente.

1. INFORMAÇÕES GERAIS

Para se desenvolver produtos inovadores e bem-sucedidos no atual cenário global e competitivo, há que ter recursos de informática científica e fazer uso de simulação. Neste senso, para que a empresa sobreviva neste ambiente de competição, a simulação deve fazer parte do projeto, já na fase inicial do processo de desenvolvimento do produto [4]. A capacidade de analisar as características multicorpos do desempenho físico de um projeto, antes de criar um primeiro protótipo, pode aumentar de forma significativa a produtividade. As empresas precisam de ferramentas de simulação robustas o suficiente para superar com eficácia as demandas de prazo, custo e qualidade final do produto [5]. A tecnologia de simulação permite a utilização de modelagem matemática, baseada em computador, para aproximar e simular os fenômenos complexos do universo físico, tendo como dados de entrada o modelo CAD 3D [6]. De posse do modelo matemático CAD, que mais caracteriza o produto macaco mecânico, deu-se início a análise estrutural via formulação pelo método dos elementos finitos (FEA), dentro do ambiente CAE. Depois das diversas iterações entre os ambientes CAD e CAE, chegou-se a uma solução de design que atendesse aos interesses de projeto, sem contudo prejudicar as exigências de função do produto. Para validar os dados teorizados pela análise FEA, iniciou-se a construção de um protótipo físico com as características mais relevantes e observando as condições geométricas providas pelo modelo 3D. Depois, realizou-se um teste prático de compressão no protótipo recém construído e os resultados práticos foram comparados com a análise estrutural FEA. As conclusões e desdobramentos deste trabalho estão destacados em detalhes no tópico estudo de caso.

1.1. METODOLOGIA

A metodologia utilizada foi a aplicação da técnica FEA e posterior comparação com um protótipo físico, construído e testado em laboratório. O espectro da análise e síntese do modelo matemático 3D, será obtido via pacote de simulações do módulo CREO *Simulate*. Este software de CAE, utiliza modelos digitais 3D para simular fenômenos físicos reais via métodos numéricos convergentes e realizações de cálculos estruturais e seus deslocamentos correlatos. Assim, três etapas complementam este método: Input, Solver e Output [7]. Na fase

de Input, são considerados os seguintes requisitos: Geometria, Material, Forças aplicadas, Restrições, Propriedades físicas e Elementos. Na fase de Solver, considera-se o critério do método “P”, cuja polinomial pode atingir até o 9º. grau. Na fase de Output, considera-se os resultados: Tensão, Deslocamento, Deformação e Tomografia virtual evidenciando as *isosurfaces*. Neste momento, a intenção é convalidar estes resultados no intervalo de validação da lei de Hooke, especificamente mantendo o componente na região elástica do diagrama “Tensão x Deformação” [8].

Quanto ao delineamento, a metodologia assume uma abordagem orientada ao estudo de caso, em que será demonstrado via projeto de simulação virtual, e confirmado na prática, por meio da construção material de um macaco mecânico tipo sanfona, como forma de constatação física do que fora teorizado.

1.2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fim de comprovar a eficácia do aplicativo tridimensional e visando também prever uma possível falha de função, a teoria matemática a ser comprovada é: $E = \sigma / \epsilon$, no limite da fase elástica, considerando o coeficiente de segurança. A resposta da estrutura as solicitações virtuais, serão expressas em tensões de Von Mises (MPa) e *Displacement* (mm), seguida de otimização topológica do conjunto formado pelo produto.

A equação da análise estática é [9]:

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (1)$$

Em que,

“K” é a matriz de rigidez do sistema gerada automaticamente pelo CREO *Simulate* com base na geometria e propriedades aplicadas.

“F” é o vetor de forças aplicadas (o qual é especificado).

“u” é o vetor de deslocamentos que são computados pelo CREO *Simulate* (elementos de força, tensão, reação, etc.).

1.3. ARQUITETURA BÁSICA DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A confiabilidade dos resultados obtidos a partir do uso da metodologia FEA, se comparada aos diversos outros métodos empregados nos dias de hoje, se resume na facilidade de interface com o software de análise. O programa de elementos finitos busca na simplificação de operação, uma maneira de adequar os recursos de equações matemáticas e orientá-las ao objeto de análise [10].

Assim, três etapas contemplam uma programação via FEA, como forma de orientação a lógica computacional, quais sejam [11]:

$$INPUT \rightarrow SOLVER \rightarrow OUTPUT$$

A fase de *Input* contempla os dados do material e os requisitos do projeto, quais sejam: Geometria, Material, Forças, Restrições e Tipos de elementos. Nesta fase, é de suma importância a representação gráfica da geometria do modelo CAD, com os principais detalhes construtivos, envolvendo a fabricação, montagem e o projeto de fato. Também é importante a entrada dos dados do material a ser utilizado na análise. Faz parte deste tópico: Módulo de elasticidade, Coeficiente de Poisson, Tensão de escoamento, Tensão de Ruptura e Densidade.

Além disso, a leitura das condições de contorno pode ser feita nesta fase, como também as condições de carregamento são introduzidas nesta etapa. Neste trabalho utilizou-se a formulação de malhas automáticas encapsuladas no método “P”, sendo elevado até o 9º. grau do polinômio interpolador [11]. A Figura 1 ilustra a arquitetura do método FEA.

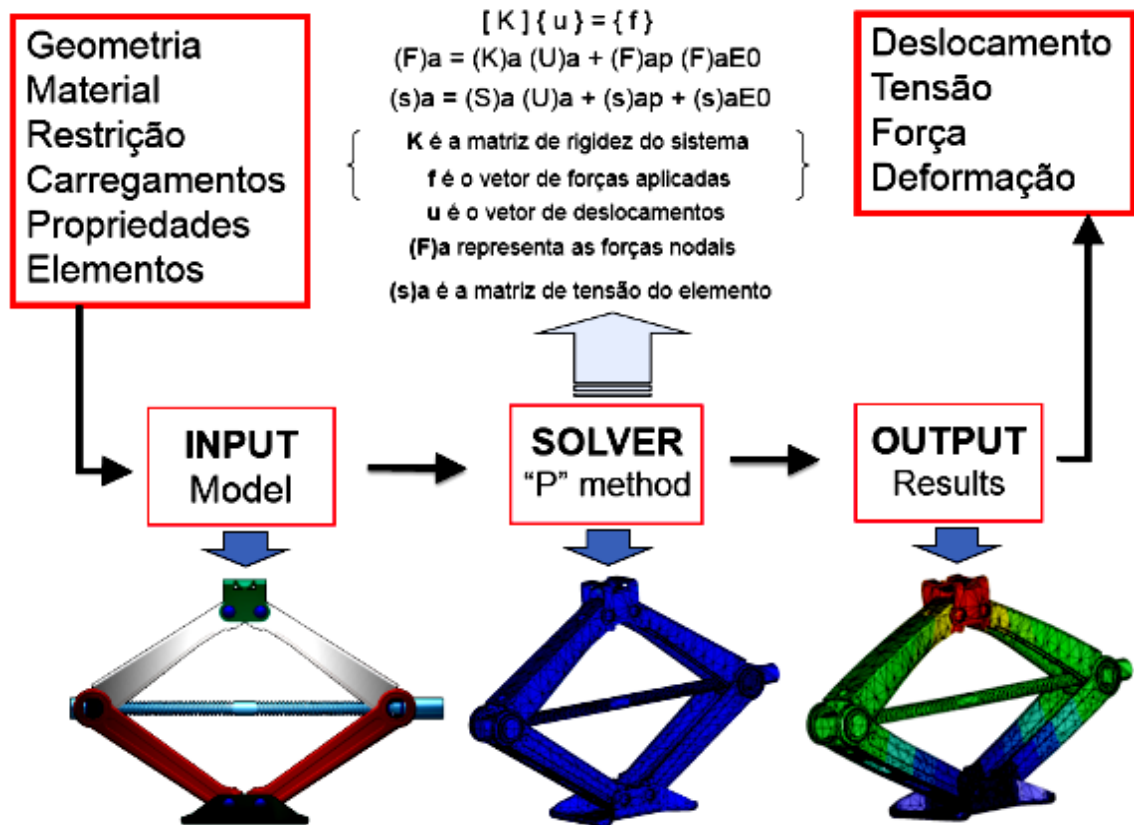


Figura 1 – Arquitetura computacional do método FEA

A fase do *Solver* diz respeito ao algoritmo computacional que está implementado na rotina de cálculo do método. Existem dois tipos de formulações referentes aos tipos de processamentos: Método “P” e Método “H” [10] [9].

No método “H”, que é um acrônimo para “*height*”, procura-se discretizar a estrutura, formando um reticulado de nós, cuja somatória forma um elemento. Este elemento tem suas características primárias de sólido de engenharia bem definidas e tecnicamente conhecidas. Assim, quanto mais complexa for a geometria da estrutura, mais refinamento terá de ser feito, visando a construção de uma malha robusta.

No método “P”, acrônimo para polinomial, tem-se as equações baseadas no polinômio interpolador, podendo chegar até o 9º. grau. Este polinômio pode atingir a eliminação de Gauss, Lagrange, entre outros [10]. Neste trabalho, optou-se por usar o método “P” com base no algoritmo do aplicativo CREO 2.0 Simulate, por entender-se que a orientação a objeto e a geometria da peça como um todo, gere uma maior confiabilidade de análise.

Na fase de *Output*, tem-se o resultado da análise estrutural em diversos formatos de saída, de acordo com o critério de falha determinado no escopo da análise estrutural. São

exemplos de saída de resultados: Tensões, Deformações, Deslocamentos, Gráficos, Diagramas, Temperaturas, Pressões entre outros. A saída gráfica dos resultados, incluindo os aspectos de simulação, dão ao engenheiro analista a noção exata do que está ocorrendo em termos de realidade aumentada, e convergindo para uma solução computacional robusta, no que se refere as condições de entrada [10].

1.3.1. Definição da técnica de Elementos Finitos

É uma técnica matemática que consiste em discretizar uma estrutura, - modelo matemático tridimensional - em elementos paramétricos ou isoparamétricos conhecidos e conectados por “nós”. As propriedades dos Materiais e Elementos são especificados afim de representarem as propriedades físicas do modelo, conforme ilustrado na Figura 2 [12].

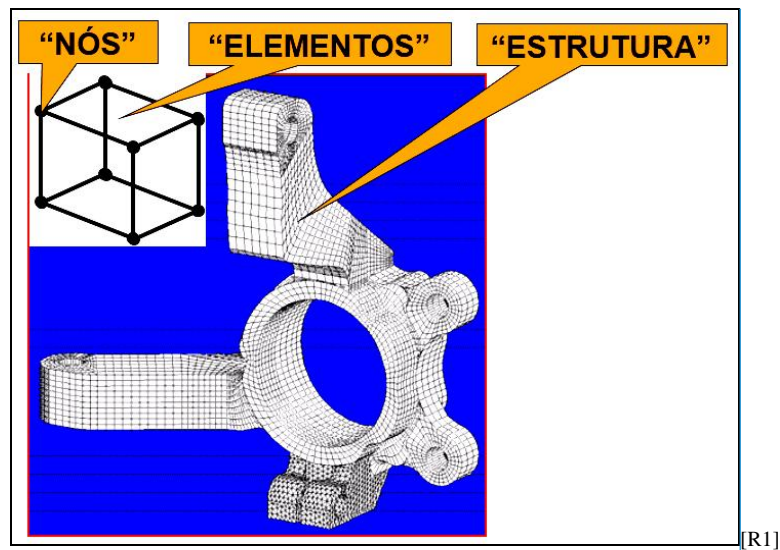


Figura 2 – Definição de estrutura, elementos e “nós”

Também há que se envolver todo o modelo matemático, inserindo as mesmas condições de contorno, consideradas no protótipo, e refinando a malha nos locais em que são mais relevantes, para que o resultado desta análise venha a convergir com o resultado do teste. Ao inserir a localização e a intensidade da carga, os nós gerados inicialmente sofrerão uma deformação, ou seja, um deslocamento entre os próprios nós. O solver irá interpretar estes deslocamentos, tratando cada nó como um vetor, e a partir daí, cria-se uma matriz que por sua vez, indica qual a tensão gerada em cada nó que foi deslocado, em função da carga aplicada.

1.3.2. Entendendo a teoria FEA

As condições de contorno são especificadas de acordo como tipo de vinculação do problema, obedecendo as regras da mecânica dos sólidos e da resultante do vetor das forças atuantes. A análise estrutural FEA, deve satisfazer os seguintes requisitos [13]:

- Obter equilíbrio entre: Forças e Momentos;
- Relacionar de forma compatível: Deformação x Deslocamento;
- Relacionar em forma de regra constitutiva: Tensão x Deformação.

As condições acima, são usadas para gerar um sistema de equações, em que os Deslocamentos são desconhecidos.

1.3.3. Métricas da análise FEA

Para simular com precisão, acuracidade e eficácia a complexidade dos fenômenos físicos do mundo real, e por consequência tratar seus efeitos nos projetos, há que se considerar:

- Compatibilidade: Correlação dos deslocamentos dos “nós” externos, fazendo uma solução convergente com a deformação dos elementos;
- Relação “Força/Deslocamento” se estabelece entre: “Elemento *end force*” e “Elemento *end deformation*” e também entre as “Forças Nodais e Deslocamentos”;
- Equilíbrio imposto entre: Forças Internas e Externas dos Nós.

1.3.4. Equação constitutiva reduzida

A tensão em um ponto tem que ser representada por um tensor para poder expressar o vetor força em qualquer direção. Para o estudo do estado de tensões no interior do corpo deformado, isola-se um elemento infinitesimal de um volume de dimensões : x, y, z, conforme ilustrado na Figura 3 [10].

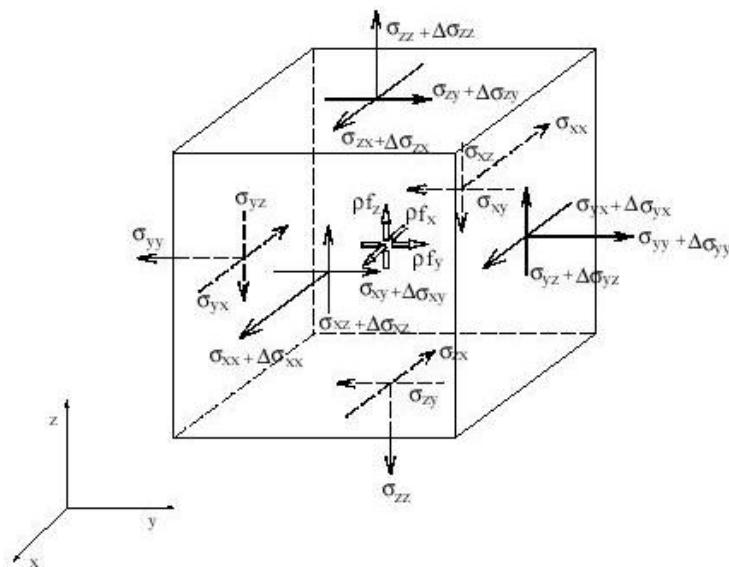


Figura 3 – Estado de tensões em um elemento infinitesimal [10]

A matriz de rigidez [K] é usada para relacionar **FORÇA NODAL** para **DESLOCAMENTO NODAL**.

Sendo os K_{ij} os coeficientes de influência de rigidez (relaciona a força da *constraint* no DOF i), o termo típico K_{ij} é definido como uma força no i-ésimo nó devido a um deslocamento unitário no j-ésimo nó, sendo os demais deslocamentos nulos.

1.3.5. Passos para a análise FEA

A análise FEA pressupõe algumas etapas para a correta aplicação das condições de contorno de acordo com Figura 4, quais sejam: Modelamento geométrico, Definir

simulação, Modelo de elementos finitos, Solver, Avaliar resultados e Otimização [9] [11].

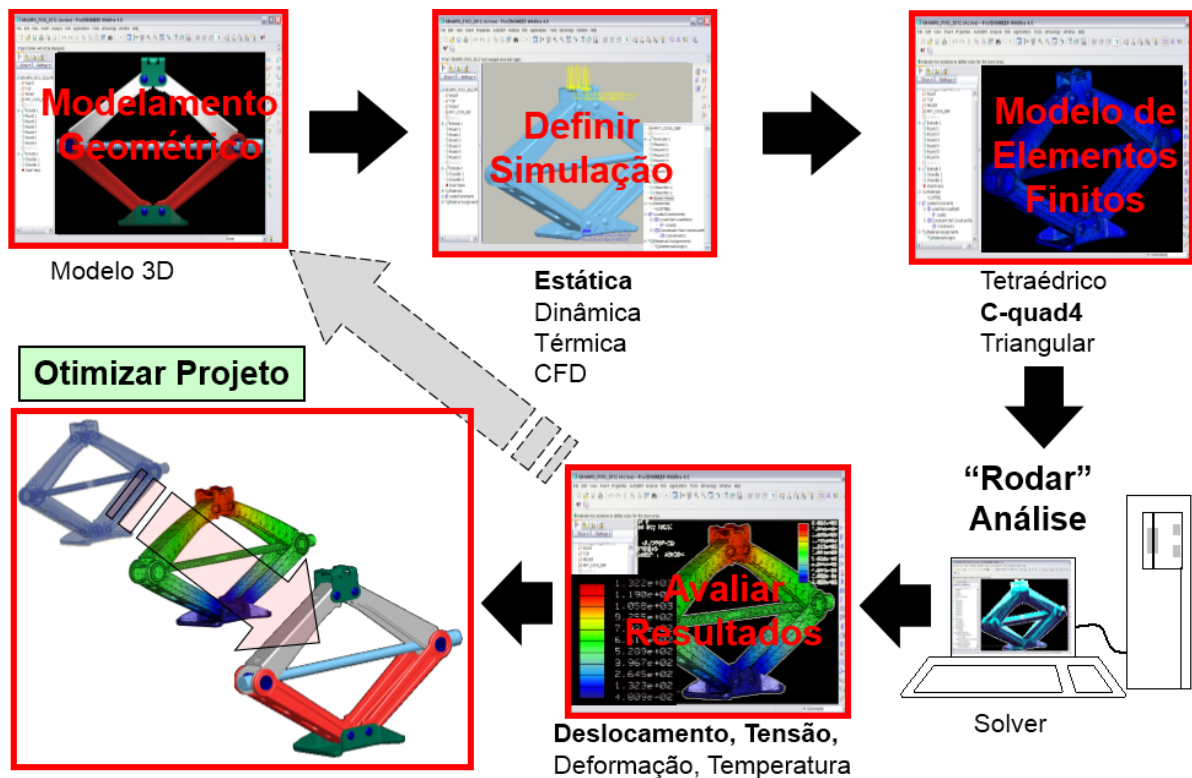


Figura 4 – Topologia computacional da análise FEA

1.4. ESTUDO DE CASO: MACACO MECÂNICO TIPO SANFONA

Inicialmente foi criado o modelo do macaco baseado em produtos existentes, para facilitar o estudo e reduzir a complexidade para a construção do protótipo. Cada componente foi modelado no software CREO 2.0 dentro de um ambiente CAD 3D. Visando simplificar a simulação do modelo virtual, alguns componentes como fuso, arraste e rolamento, foram suprimidos por não serem os objetos de estudo durante um teste de compressão, pois, quando o macaco mecânico é submetido à este teste, o conjunto do fuso executa a tarefa de não permitir que os braços do macaco se fechem, com isso, este conjunto foi substituído por uma barra que simule exatamente a função do fuso, ou seja, travar os braços em uma determinada posição não permitindo que o mesmo se feche (Figura 5).

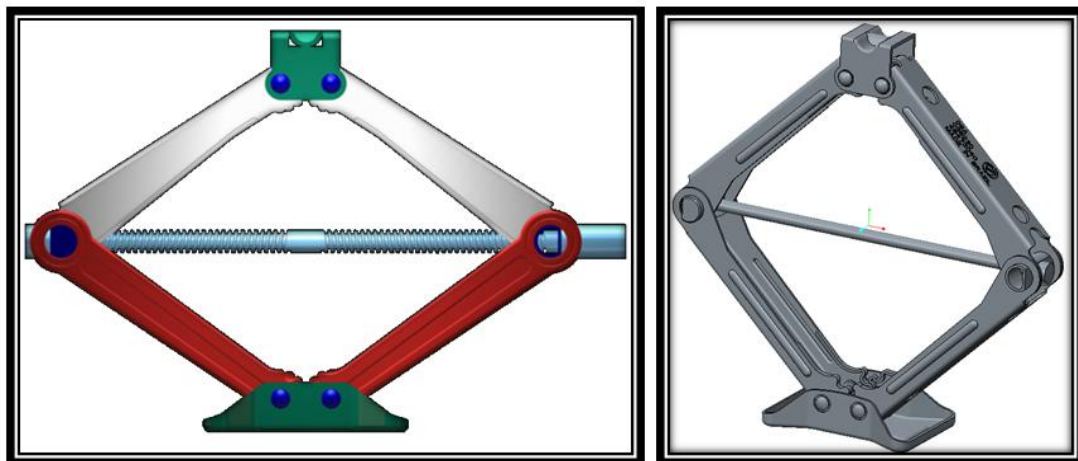


Figura 5 – Modelo matemático tridimensional

Após concluído a vetorização do modelo matemático, iniciou-se o processo de simulação no CREO SIMULATE 2.0.

O primeiro passo da simulação foi inserir as condições de contorno (Figura 6), que irão envolver o modelo virtual, ou seja, inserir em os graus de liberdade em cada componente, o contato que cada parte exerce sobre outra, a localização onde as forças irão atuar e a intensidade da força.

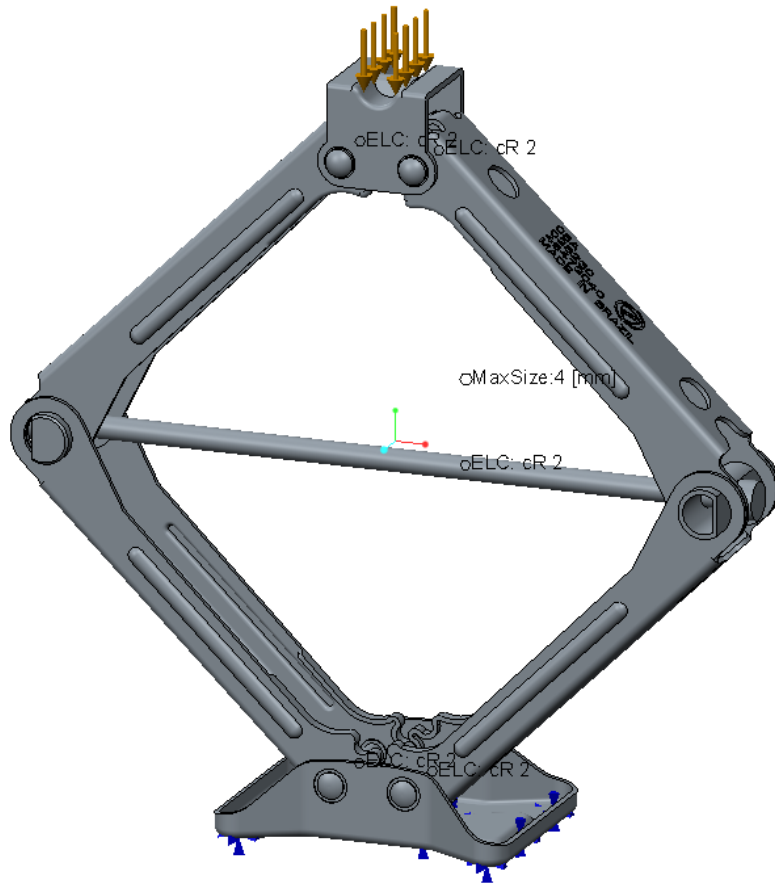


Figura 6 – Condições de contorno (*boundary conditions*)

Com as condições de contorno definidas, criou-se a malha que irá envolver o modelo que será a base que o solver irá utilizar para os cálculos de análise estrutural (Figura 7).

Porém, foi necessário refinar a malha por meio da adição de mais elementos em determinados lugares do modelo, onde é necessário uma precisão maior, e foi removido alguns elementos em regiões onde não era necessário um refinamento maior que o padrão.

Ao ajustar a malha para este tipo de parâmetro, o tempo de compilação do solver é reduzido para os locais em que não se deseja uma maior precisão de calculo, e nas regiões críticas, o tempo é acrescido devido ao refinamento da malha.

A lógica para definir onde seriam os locais críticos do produto, foi baseado em testes de produtos existentes, e foi rodado uma simulação com uma malha padrão, para analisar o comportamento da simulação, com as condições de contornos impostas no modelo

matemático. Após esta análise foi refinado a malha conforme mencionado anteriormente e os resultados acham-se ilustrados conforme a Figura 8.

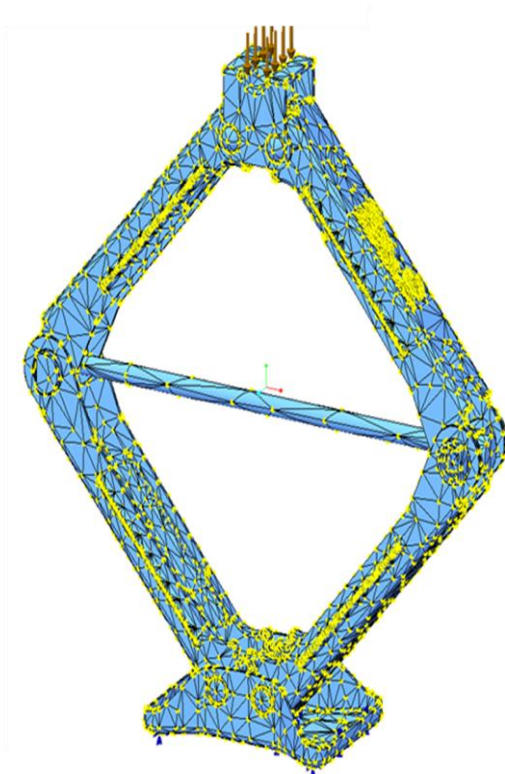


Figura 7 – Malha padrão

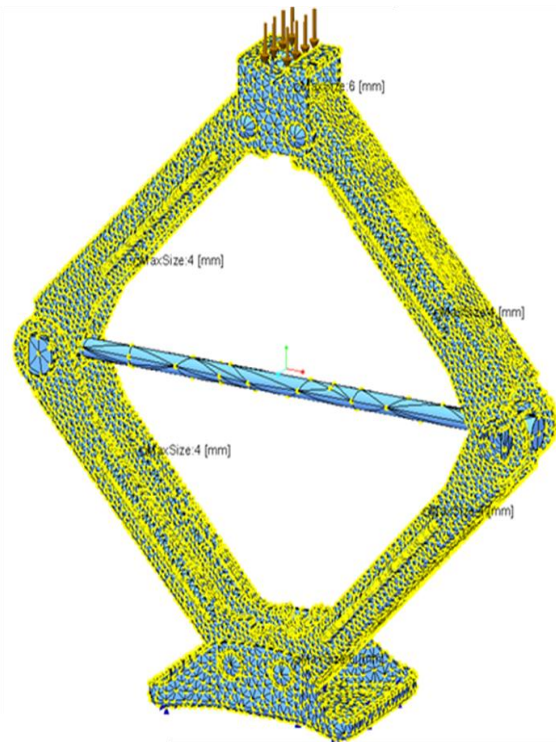


Figura 8 – Malha refinada

Definida a condição de contorno para o modelo matemático, o próximo passo foi configurar o solver para a condição de *Multiple-Pass*, com o grau 9 e convergência de 5% para o algoritmo interpolador da função polinomial.

Com o solver devidamente configurado, iniciou-se a análise computacional, em que o solver iniciou os cálculos de análise estrutural. Após a finalização dos cálculos, o solver apresentou os resultados graficamente, "pintando" ou seja, indicando no modelo matemático os deslocamentos (Δl) (Figura 9) e as tensões (σ) (Figura 10).

A Figura 9 ilustra o deslocamento de 2 mm, sofrido pelo macaco devido a carga de 2500 kg.

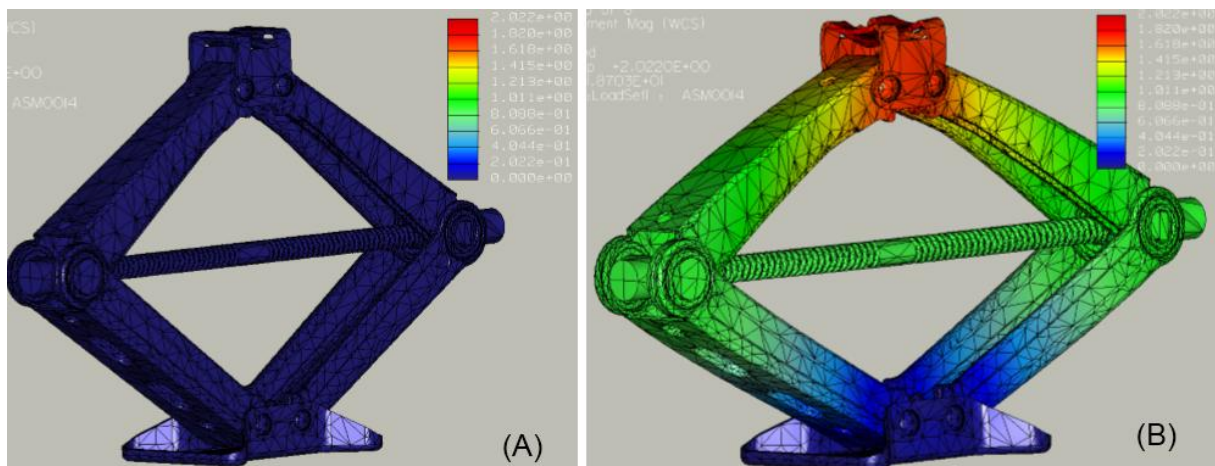


Figura 9 – Deslocamentos (Δl): (A) Inicial, (B) Deslocado

A Figura 10 ilustra as tensões de 362 MPa sofridas pelo macaco devido ao deslocamento. Percebe-se uma maior concentração de tensões nas regiões evidenciadas pelas bases superior e inferior, fuso roscado e mancal.

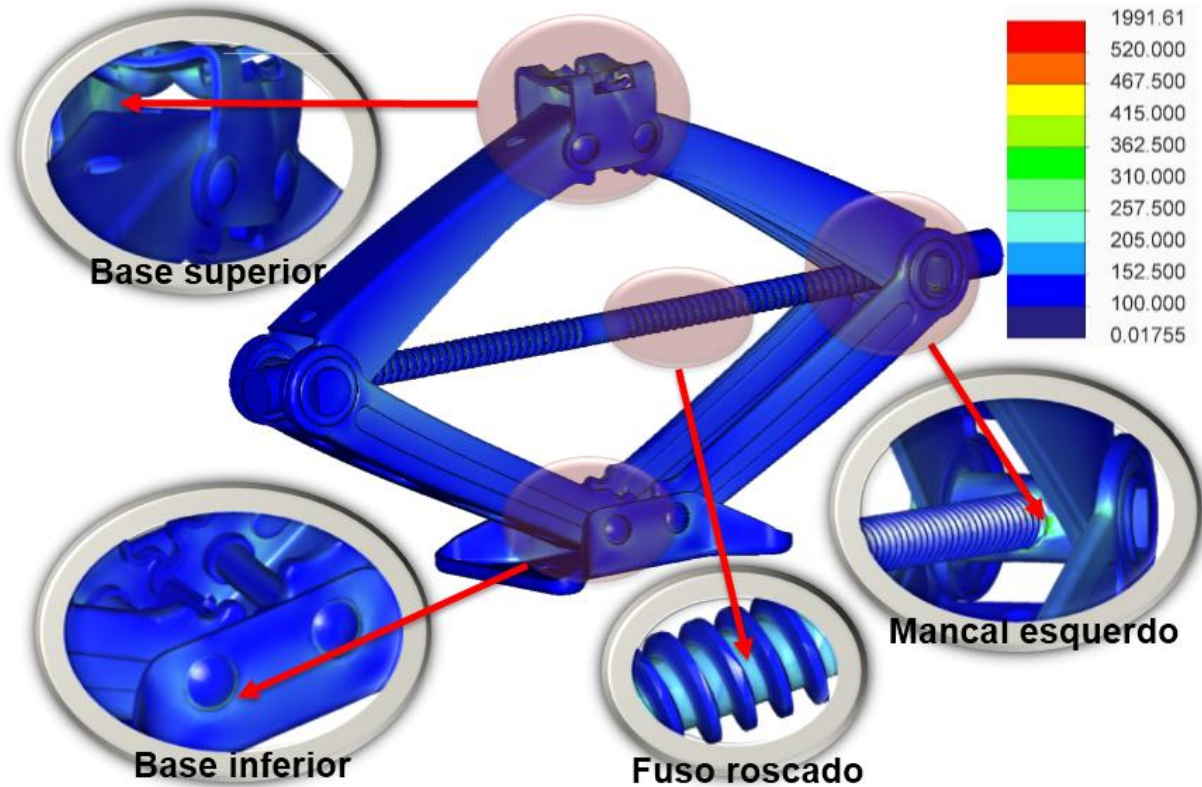


Figura 10 – Tensões (σ) de von Mises

Com a análise estrutural finalizada, o próximo passo foi construir um protótipo e iniciar o teste de compressão para compara-lo com a análise estrutural. Pelo fato de que o objeto de estudo do Macaco mecânico eram os braços, o protótipo foi fiel a condição dos braços, porém para a base, foi utilizado um componente padrão de fábrica, que está superdimensionado para a condição de teste em que irá ser submetida, ou seja, não haverá problemas com a base que possa prejudicar o teste do macaco. A Figura 11 ilustra o protótipo manufaturado para o teste.

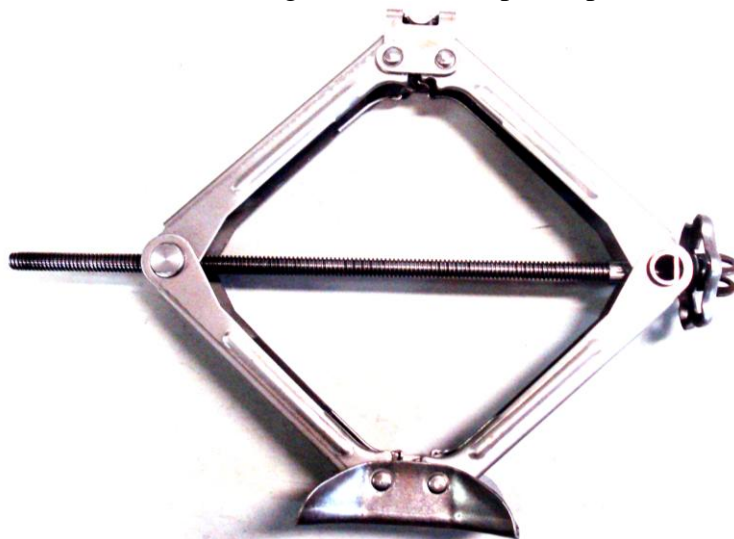
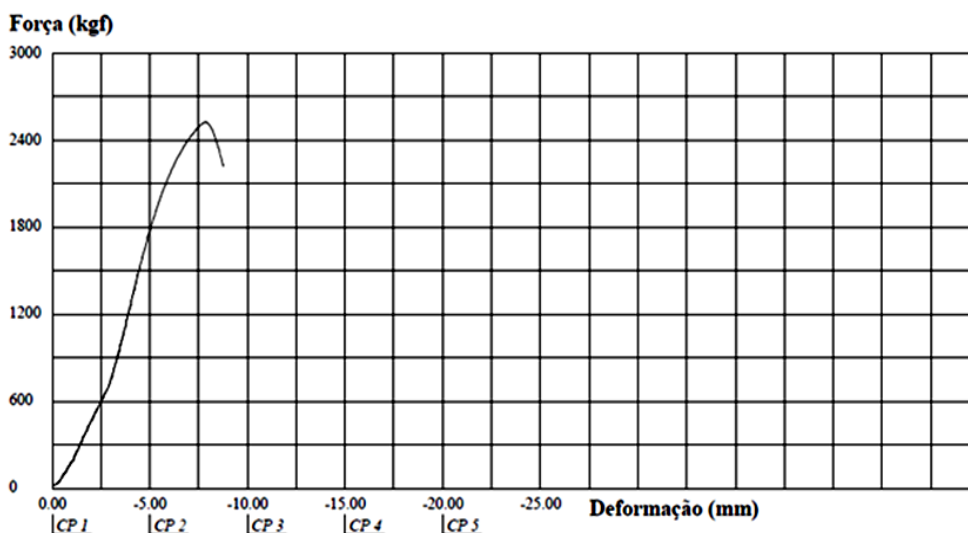


Figura 11 – Protótipo confeccionado para o teste

Conforme especificado no início do projeto, a carga que o produto deve suportar é 2.000 kg para validar o teste. O aparelho utilizado para realizar este tipo de teste foi a EMIC - DL10.000, que suporta uma carga de 100 kN. A maquina registra a força e o deslocamento do objeto em teste, e emite um gráfico indicando o comportamento do teste. A Figura 12 ilustra o resultado do teste de compressão.

[illegible]

Corpo de Prova	Força @Força Max. (kgf)	Força @Ruptura (kgf)	Deformação @Força Max. (mm)
CP 1	2526	*	-8



O resultado do teste demonstrou que o protótipo suportou 2.500 kg de carga, ou seja, está superior ao requisitado como dado de entrada para o projeto. Com isto pode-se comparar com a simulação e verificar se o modelo matemático está condizente com a realidade, ou seja, verificar se é possível confiar em uma análise virtual para reduzir o tempo de projeto e desenvolver um produto com uma mínima perda de material.

Desta forma, fica fácil a localização da parte da peça que ocorrerá maior tensão, e assim, o engenheiro pode de forma preventiva, melhorar a geometria nesta região, tornando-a mais robusta. Também é possível gerar uma imagem tomográfica orientada ao estudo de translação (deslocamento), desta forma, é possível observar as regiões que têm maiores variações dimensionais.

Neste trabalho, gerou-se a tomografia virtual em forma de *iso surfaces*, somente orientada aos aspectos de tensões de von Mises, e que está ilustrado na Figura 13.

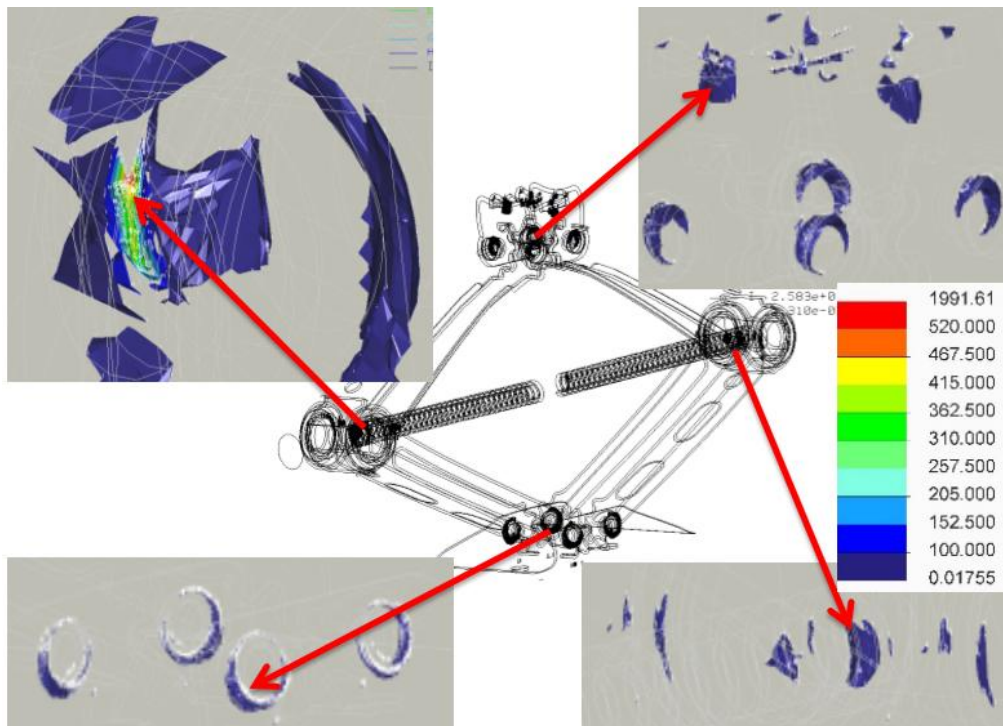


Figura 13 – Tomografia virtual evidenciando as tensões de von Mises

Como sugestão para futuros trabalhos, considerando os aspectos de robustez estrutural aliado aos resultados dos testes de laboratório, aponta-se para um modelo de relacionamento de “causa e efeito”, em que o resultado da simulação servirá de base para consolidar a teoria matemática, ao mesmo tempo em que o experimento físico dará credibilidade a teoria e a simulação, estabelecendo que a simulação deve fazer parte integrante do projeto (Figura 14).

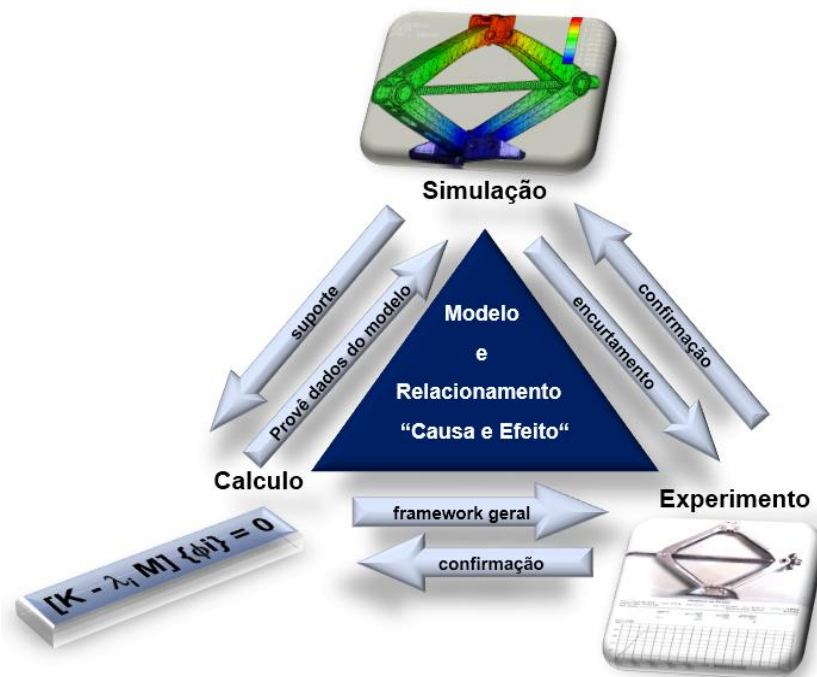


Figura 14 – Modelo e relacionamento “Causa e Efeito”

1.5. BULK DATA

Foram realizadas análises estruturais lineares no macaco mecânico, para obtenção de resultados de tensões e seus devidos carregamentos inerciais e pressões advindas do processo de combustão automotiva, simulando as condições reais de funcionamento.

Para esta análise, utilizou-se um processador Intel Xeon W3565, 3.2 GHz, 64 bits, 10 GB RAM e disco rígido de 3,5 TB e 4 GB de *swap_space*, além de:

- Tempo de processamento total = 2:10 hs, incluindo *Remesh*
- Espaço em disco requisitado = 1392 MB
- No. de Elementos Tetra = 55092
- No. de Elementos Edges = 89697
- No. de Elementos Faces = 126718

Quanto as condições de contorno, utilizou-se um modelo matemático 3D gerado no CREO 2.0, para atender as condições de contorno iniciais. Posteriormente, adentrou-se ao módulo CAE que está encapsulado no aplicativo CREO, denominado agora de CREO *Simulate*.

1.5.1. Margem de segurança

Para o calculo da margem de segurança, a seguinte fórmula foi aplicada:

$$\text{Margem de Segurança} = (\sigma_{\text{esc}} / \sigma_{\text{calculado}}) - 1 = [* 100 \text{ p/ \%}] \quad (2)$$

1.5.2. Dados do material

Tabela 1 – Características físicas do material NBR-6656-380

Material	E [GPa]	ν	ρ [g/cc]	σ_{rup} [MPa]	σ_{esc} [MPa]
NBR6656-LNE-500	205	0.3	7.85	630	380...520 (450)

Em que:

E - módulo de elasticidade

ν - coeficiente de Poisson

ρ - densidade

σ_{rup} – tensão de ruptura

σ_{esc} – tensão limite de escoamento

CONCLUSÃO

O resultado da simulação indicou que o macaco mecânico submetido a uma carga de 2.500 kg, proporcionou um deslocamento máximo de 2mm, considerando todo o conjunto mecânico. O teste pratico indicou um deslocamento de 8mm, sendo que esta divergência foi devido a folgas no fuso roscado, mancais e pinos, não sendo representativos para o foco da análise. Este deslocamento gerou tensões resultantes máximas de 362 MPa, distribuídas nas regiões das bases superior e inferior, mancais, região central do eixo roscado e braços. Uma

vez que o material NBR6656-LNE-500 suporta tensões na faixa limite de escoamento de 380 - 520 MPa, e considerando então uma tensão média de 450 MPa, conclui-se que o resultado da simulação virtual corresponde a uma margem de segurança de 25%, em relação a tensão de escoamento do material. Assim, a simulação indica que o limite máximo de carga que os braços suportam, na melhor condição de material será de 2500 kg. O teste prático indicou que os braços do macaco suportaram uma carga de 2526 kg, ou seja, convergiu com o resultado da simulação com uma divergência de 1.5%, o que é perfeitamente previsto. Visto isto, conseguiu-se validar um processo de simulação virtual utilizando os argumentos da mecânica dos sólidos, por meio da técnica FEA com o protótipo físico, construído especificamente para convalidar a prova do erro. Para futuros trabalhos, indica-se uma melhor acuracidade no momento da imposição das condições de contorno, mais especificamente com relação a análise de contato de um macaco mecânico tipo sanfona.

REFERÊNCIAS

- [1] Rozenfeld, H., Forcellini, F.A., Amaral, D.C., Toledo, J.C., Silva, S.L., Alliprandini, D.H., Scalice, R.K., **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: Uma referência para a Melhoria do Processo**, Saraiva, São Paulo, 2006
- [2] Alves Filho, A., **Elementos Finitos - A Base da Tecnologia CAE**, Editora Erica, 1º Edição, São Paulo, 2000
- [3] Normas técnicas Brasileiras, **ABNT NBR 6656**, Segunda Edição, válida a partir de 28/05/2008
- [4] Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K.-H., **Projeto na Engenharia**, 1ª ed., Edgard Blücher, São Paulo, 2005
- [5] Ehrlenspiel, K., Kiewert, A., Lindemann, U., **Cost-Efficient Design**, ASME Press, ISBN 0-7918-0250-7, New York, 2007
- [6] Back, N., Ogliari, A., Dias, A., Da Silva, J.C., **Projeto Integrado de Produtos: Planejamento, Concepção e Modelagem**, ISBN: 9788520422083, Editora Manole, 2008
- [7] Camargo, R., **CAE/CAD/CAM “Uma Ferramenta para Otimização de Projetos de Cames, Recursos e Aplicações de Cálculos pelo Método dos Elementos Finitos”**, UNIMEP, 1990
- [8] Timoshenko, S.P., **Mecânica dos Sólidos Vol. 1/2**, Editora LTC, RJ, 1998
- [9] MacNeal, R., **MSC/NASTRAN for Window: Finite Element Modeling**, MacNeal Schwendler Corporation, San Diego / Califórnia, 1997
- [10] Fonseca, J.S.O., Selk, C.A.C., Pereira, L.T.V., Marczak, R.J., Alves, D.B., Luersen, M.A., **Ferramentas de Simulação em Mecânica: Elementos Finitos**, UFRGS, 2002
- [11] Camargo, R., **Topologia de Projeto Robusto aplicando o método dos Elementos Finitos**, Revista Ciência e Tecnologia, v. VII, p. 13-29, 2004
- [12] Zienkiewicz, O. C. e Taylor, R. L., **Finite Element Method- Basic Formulation and Linear Problems**, Vol.1, McGraw-Hill Co., New York, 1989
- [13] Bathe, K. J.: **Finite Element Procedures**, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1995