

AValiação Numérica de Estabilidade Lateral de Vigas Casteladas

Felipe O. M. Gama¹, Luciano R. O. Lima², Pedro C. G. S. Vellasco³, José G. S. Silva¹

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro
(felipe_eng_uerj@yahoo.com.br)

^{2,3,4}Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Resumo. *Restrições de espaço e altura são frequentemente impostas às edificações residenciais, comerciais e industriais com um ou mais pavimentos em função de aspectos de regulamentos regionais, técnicos, econômicos ou de natureza estética. A fim de proporcionar a passagem de tubulações de grande diâmetro sob vigas de aço, grandes alturas são normalmente requeridas, demandando por vezes, magnitudes de altura inviáveis entre pavimentos de edificações. Dentre outras, as vigas casteladas são uma possível solução estrutural para superar tais obstáculos. Nestas vigas, a estabilidade é sempre um motivo de preocupação devido ao comprimento destravado. Todavia, o acréscimo substancial da resistência à flexão de tais membros devido ao aumento da altura oriundo de seu processo fabril em relação ao perfil matriz, aliada a economia de material e utilidade fim de serviço, garante a atratividade no aproveitamento destas, para grandes vãos junto aos projetistas. Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver um modelo numérico que permita a realização de uma avaliação paramétrica com o auxílio do método numérico dos elementos finitos, a partir da calibração do modelo com resultados experimentais, efetuar a análise do comportamento de vigas casteladas e verificar seus mecanismos de falha, considerando comportamento elasto-plástico, além das não-linearidades geométricas. Os resultados obtidos apresentaram coerência e coesão, e desta forma, não foram constatadas objeções de ordem técnica significativas, em relação à utilização de vigas casteladas em alternativa às tradicionais vigas maciças, tendo em vista que os benefícios advindos das aberturas nas almas das vigas, quando existir tal demanda, justificam suas aplicações.*

Keywords:.

Keywords: Estabilidade lateral; Flambagem lateral com torção; Aberturas na alma; Vigas casteladas.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

Restrições de espaço e altura são frequentemente impostas às edificações residenciais, comerciais, industriais, depósitos e galpões comuns ou diversos pavimentos em função de aspectos de regulamentos regionais, técnicos, econômicos ou ainda de natureza estética. A fim de proporcionar a passagem de tubulações e dutos de grande diâmetro sob vigas de aço ou ainda em função de demandas oriundas de aspectos arquitetônicos, grandes alturas serão normalmente requeridas, demandando por vezes, magnitudes inviáveis entre pavimentos de edificações. Diversas soluções podem ser utilizadas para equacionar tais obstáculos, onde dentre outras, pode-se citar: as vigas com inércia variável, stub-girders, treliças mistas, vigas misuladas e vigas com uma ou múltiplas aberturas na alma e com geometrias variadas.

A viga com inércia variável é projetada para proporcionar resistência ao momento fletor e ao esforço cortante de maneira proporcional à magnitude destes ao longo dos trechos do vão. O vazio criado adjacente às colunas pode ser utilizado para a passagem de tubulações de serviço.

A solução estrutural conhecida como stub-girder compreende uma viga inferior, que atua em tração, e uma série de vigas curtas que conectam a viga inferior à laje de concreto. Os espaços que são criados adjacentes às vigas curtas são utilizados para a passagem das tubulações de serviço.

Já as treliças mistas ou simplesmente metálicas, não necessitam de equipamentos especiais em seu processo fabril, mas ainda sim, demandam maiores custos de fabricação em relação às diversas outras alternativas. Todavia, disponibilizam grandes espaços para a alocação dos dutos, tubulações de serviços e o que mais necessitar de espaços adicionais ao atravessar a seção da viga.

As vigas misuladas são geralmente constituídas pela formação de uma ligação rígida à flexão entre as vigas e as colunas. A altura da mísula é selecionada inicialmente para proporcionar um método econômico de transferência de momento para a coluna. O comprimento da mísula é selecionado para reduzir a altura da viga para o mínimo possível. Assim, a área criada entre as mísulas e sob a viga, limitada também pela altura da própria mísula, gera uma zona livre por onde as tubulações de serviços podem ser posicionadas, oferecendo flexibilidade para a passagem de várias formas de tubulações.

Uma solução frequentemente utilizada é a abertura ou projeto de vigas e colunas com uma ou mais aberturas com geometrias diversas na alma das vigas de aço para a passagem das tubulações de serviço dentre outras finalidades. Dentre as geometrias de aberturas existentes e disponíveis no mercado, as mais clássicas e de maior utilização são as celulares (circulares) e casteladas (hexagonais) - sendo esta última o objeto de estudo do presente trabalho.

Neste contexto, as vigas casteladas são caracterizadas por seu processo fabril e por suas múltiplas aberturas poligonais simetricamente posicionadas e distribuídas ao longo do comprimento da alma da viga. Em síntese, seu processo fabril resume-se em executar um corte simétrico em um perfil laminado matriz, em relação às suas distâncias verticais na forma de um trapézio sem a base maior, invertendo-se a posição da base menor intercaladamente (uma

para baixo e outra para cima), separando as peças, defasando-as em uma base menor, e então soldando-as, compondo o perfil castelado, com uma altura 50% maior do que a do perfil maciço original, mas com as mesas e espessura da alma preservadas (vide Figura 1).

Dentre outras, as principais vantagens da fabricação e utilização das vigas casteladas são [7]:

- A majoração da altura da seção que resulta em um aumento da resistência à flexão e rigidez, devido ao maior momento de inércia resultante no plano principal de flexão;
- Minoração do peso do perfil que por consequência reduz o peso próprio da estrutura como um todo, gerando redução dos custos totais da obra;
- Utilização otimizada dos perfis matrizes;
- A passagem dos dutos e tubulações de serviços através das aberturas.



a) Procedimento de corte à laser em “zigzag” b) Procedimento de soldagem-viga castelada
Figura 1. Fabricação de vigas casteladas [3].

1.2. Objetivos e metodologia

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver um modelo numérico que permita a realização de uma avaliação paramétrica a partir da calibração do modelo com resultados experimentais obtidos por [7], efetuar a análise do comportamento de vigas casteladas e verificar seus mecanismos de falha, considerando comportamento elasto-plástico, além das não-linearidades geométricas. Em um primeiro momento, são obtidos os valores dos momentos elásticos críticos para o efeito de segunda ordem denominado Flambagem Lateral com Torção (FLT), através da análise linear de um problema de autovetores e autovalores referentes aos modos de flambagem e cargas críticas. Utilizar estas configurações deformadas elásticas resultantes para gerar uma imperfeição inicial normatizada conforme premissas do CEN (1993) [2] com o intuito de fundamentar os alicerces de contorno da análise não-linear, que proverá os valores críticos últimos que serão comparados com os métodos manuais de cálculo dispo-

níveis no Eurocode 3 [5]. Estes métodos, no entanto, abrangem as vigas casteladas de forma indireta somente, haja vista que as formulações lá propostas são aplicáveis às vigas de alma cheia apenas considerando as diferenças geométricas existentes entre as seções cheias e perfuradas para o perfil estudado. Desta forma, será possível também verificar a consistência destas formulações.

Também é objetivo deste trabalho, avaliar, quantificar e determinar a influência das diferenças geométricas características das vigas casteladas em relação às vigas maciças com as mesmas dimensões, analisando e descrevendo o comportamento estrutural destas vigas de aço para diversos comprimentos de vãos.

A metodologia empregada para tal estudo baseou-se em uma análise paramétrica com o auxílio do método numérico dos elementos finitos [1].

2. NORMAS E PROCEDIMENTOS DE CÁLCULOS

2.1. Introdução

Atualmente já existem diversas normas e procedimentos de dimensionamento para vigas de aço que prevêem a possibilidade de fabricação e execução aberturas na alma. Contudo, de uma maneira geral, estas se limitam a restringir cenários e parâmetros onde as aberturas podem ou não ser aplicáveis em função das configurações geométricas do elemento estrutural em questão, quase sempre considerando fatores de posicionamento e conformação geométrica das aberturas.

Neste tópico, serão apresentados os procedimentos utilizados na execução dos cálculos realizados para obtenção dos parâmetros teóricos que compõem e foram analisados no presente trabalho, bem como, algumas normas relacionadas.

2.2. Procedimentos de cálculos

Considerando-se a norma europeia Eurocode 3 [5] como referência para as considerações teóricas, bem como, com o intuito de embasar e prover robustez aos resultados que foram obtidos nas análises dos modelos numéricos desenvolvidos, foram calculados os valores teóricos dos momentos elásticos críticos, utilizando-se duas maneiras distintas:

- procedimento geral, aplicável a todos os casos e configurações de carregamento e condições de contorno, desde que exista simetria ao menos em relação ao eixo de menor inércia, conforme Eurocode 3 [5];
- procedimento particular, conforme explica Simões [6], que propõe também com base no Eurocode 3 [5], uma alternativa de cálculo para os momentos críticos que parte de um caso padrão particular - equação (4) - para então, em função das diferentes especificidades de condições de contorno e carregamento, inserir coeficientes e considerações na equação padrão original, que juntos compõem o resultado final, por vezes, muito similares ao da formulação geral.

Para vigas com seções de dupla simetria, na qual se inserem os perfis das vigas caste-ladas estudados neste trabalho, o procedimento geral de cálculo explicitado acima, pode ser representado pela equação (1), que foi utilizada primeiramente para o cálculo dos momentos críticos.

$$M_{cr} = \frac{C_1 \times \pi^2 \times E \times I_z}{(k_z \times L)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{k_z}{k_w} \right)^2 \times \frac{C_w}{I_z} + \frac{(k_z \times L)^2 \times G \times I_T}{\pi^2 \times E \times I_z} + (C_2 \times z_g)^2} - C_2 \times z_g \right]. \quad (1)$$

onde:

C_1 e C_2 = coeficientes dependentes do tipo de carregamento e das condições de contorno e restrições especiais;

k_z = rotações nas seções extremas, em torno do eixo de menor inércia;

k_w = restrições ao empenamento, também, nas seções extremas;

L = comprimento da viga entre restrições laterais;

E = módulo de elasticidade longitudinal do material;

G = módulo de elasticidade transversal;

I_z = momento de inércia em torno do menor eixo;

C_w = constante de empenamento;

I_T = constante de torção;

z_g = distância entre o ponto de aplicação do carregamento e do centro de corte, em relação ao centro de gravidade da seção; os valores são positivos se localizados na parte comprimida e negativos se localizados na parte tracionada.

Para o procedimento particular de cálculo, já considerando às configurações de con-torno aplicáveis às vigas ora estudadas, foi utilizada a equação (2) a seguir:

$$M_{cr} = \alpha_m \times M_{cr}^E \times \left(\sqrt{1 + \left(\frac{0,4\alpha_m y_Q}{M_{cr}^E / N_{cr,z}} \right)^2} + \frac{0,4\alpha_m y_Q}{M_{cr}^E / N_{cr,z}} \right). \quad (2)$$

onde:

α_m = fator que considera às condições de carregamento, sendo igual a 1,35 para as configura-ções referentes às vigas estudadas;

y_Q = distância entre o ponto de aplicação das cargas e o centro de gravidade (neste caso coin-cidente com o centro de corte). Para cargas no sentido descendente, a distância y_Q deve ser tomada como negativa ou positiva consoante as cargas sejam aplicadas acima ou abaixo do centro de corte;

$N_{cr,z}$ = calculado conforme a equação (3) abaixo, sendo I_z o momento de inércia em relação ao eixo de menor inércia e L a distância entre seções contraventadas lateralmente;

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \times E \times I_z}{L^2}. \quad (3)$$

M_{cr}^E = momento crítico de vigas de alma cheia submetidas à momento fletor constante, bem como, outras configurações aplicáveis às vigas estudadas, e, pode ser calculado conforme equação (4) abaixo, cujo os demais parâmetros são os mesmos apresentados na equação (1).

$$M_{cr}^E = \frac{\pi}{L} \times \sqrt{G \times I_T \times E \times I_z \left(I + \frac{\pi^2 \times E \times I_w}{L^2 \times G \times I_T} \right)}. \quad (4)$$

Uma vez calculado o momento crítico elástico do elemento, conforme um dos métodos explicitados acima, faz-se necessário verificar a resistência deste elemento à flambagem lateral com torção (FLT), que diferentemente do momento crítico elástico, insere na análise das condições iniciais de dimensionamento, fatores reais relativos aos efeitos das imperfeições, de consideração imprescindível na verificação da resistência da estabilidade do elemento, tais como [6], deslocamentos laterais iniciais, rotações de torção iniciais e excentricidade do plano de aplicação das cargas transversais em relação ao centro de corte das seções, entre outras.

Desta forma, adicionalmente procedeu-se cálculo e verificação da resistência à FLT dos membros analisados, embora objeto principal deste trabalho é avaliar e comparar os resultados numéricos e teóricos no que tange aos valores dos momentos críticos elásticos das vigas casteladas.

Conforme o Eurocode 3 [5], tal verificação pode ser realizada através da equação (5). Essa norma discrimina detalhadamente todos os parâmetros de cálculo das variáveis da equação abaixo relacionada.

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \times \frac{W_y \times f_y}{\gamma_{M1}}. \quad (5)$$

onde:

W_y = momento estático da seção que varia de acordo com sua classe;

f_y = tensão de escoamento do material;

γ_{M1} = fator de segurança;

χ_{LT} = coeficiente de redução devido à flambagem lateral.

Embora oriunda de perfis laminados, a viga castelada também possui características de perfis soldados, face seu processo intrínseco de soldagem durante a fabricação. Desta forma, a equação (5) foi utilizada para cálculo de ambos os momentos resistentes (laminados e soldados), onde suas diferenças são incorporadas através das respectivas curvas de flambagem incidentes sobre o coeficiente de redução apresentado na expressão acima.

Dando continuidade aos levantamentos teóricos, faz-se não menos importante, a necessidade de se avaliar a capacidade resistente das vigas casteladas quanto à plastificação da seção transversal, visando assegurar e confirmar a ideia de que o estado limite último destes elementos é a flambagem. Conforme Eurocode 3 [5] o momento plástico resistente pode ser calculado segundo a equação (6). Tal norma ainda discrimina os parâmetros de cálculo das variáveis abaixo, já definidas na equação (5).

$$M_{pl,Rd} = \frac{(W_y \times f_y)}{\gamma_{M0}}. \quad (6)$$

3. MODELO NUMÉRICO

3.1. Modelo experimental de calibração

A calibração do modelo numérico foi realizada com os dados experimentais disponibilizados por Zirakian e Showkati [7], para a viga castelada experimental (C180-3600) com as seguintes dimensões (mm): altura nominal (h) = 180 e medida = 176; mesas com largura (b) = 64 e espessura (t) = 6,3; alma com espessura (s) = 4,4; raio de curvatura (r) = 7 e comprimento (L) = 3600. A geometria das aberturas das vigas casteladas em análise são constituídas por polígonos hexagonais não-regulares de forma que a largura e a altura máxima da abertura sejam iguais, assim como o comprimento dos lados (horizontais) e as menores distâncias entre elas que ocorrem entre suas extremidades. Esta descrição pode ser facilmente observada na Figura 2.

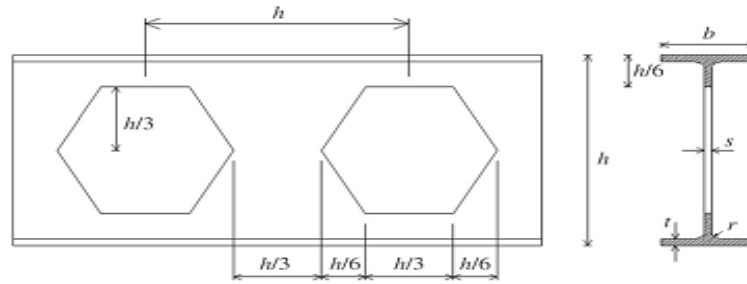


Figura 2. Geometria da abertura e seção transversal [7].

Os ensaios experimentais foram realizados em vigas bi-apoiadas isostáticas (Figura 3), com dois enrijecedores próximos a cada um dos apoios com o intuito de se evitar a flambagem local da alma nestes pontos devido à concentração de esforços cisalhantes existentes na região.

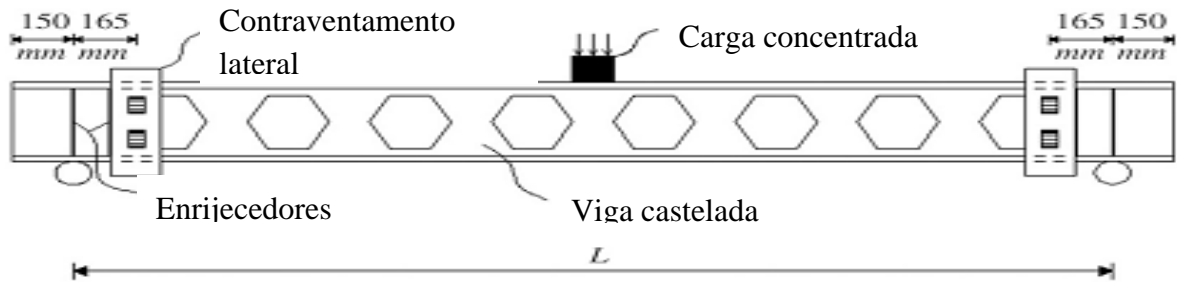


Figura 3. Visão esquemática das condições de contorno [7].

Os parâmetros medidos do material que foram utilizados no modelo experimental e numérico da viga C180-3600 estão discriminados na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos materiais do modelo [7]

Perfil Fabricado	Parte	Tensão de Escoamento	Tensão de Ruptura	Módulo de Elasticidade
C180-3600	Mesa (MPa)	279,31	894,35	206.010
	Alma (MPa)	233,93	892,23	

3.2. Modelo numérico e resultados da calibração

O modelo numérico desenvolvido durante a fase de calibração teve sua geometria, condições de carregamento e contorno espelhadas na configuração da viga experimental.

Almas esbeltas, assim como vigas com grandes comprimentos, na prática, não são perfeitamente retas. Adicionalmente, em vigas casteladas, o extenso comprimento de soldagem demandado em seu processo fabril constitui um grande potencializador dos mais diversos gêneros de imperfeições geométricas. Torna-se essencial portanto, representar apropriadamente estas imperfeições no modelo numérico em elementos finitos, o que foi realizado resumidamente de acordo com o descrito a seguir.

A viga inicialmente perfeita (sem qualquer tipo de imperfeição), foi processada de maneira linear em regime elástico, a avaliação da flambagem elástica foi executada com base no método dos autovetores (vetores deslocamento) e autovalores (carga crítica), sendo que estes são determinados pelo programa ANSYS [1], para cada uma das diversas situações, as quais o modelo numérico desenvolvido foi submetido. Da configuração deformada resultante do primeiro modo da flambagem elástica da viga, referente à sua carga crítica, extraiu-se desta configuração, os vetores deslocamentos (tridimensionais) na forma de uma matriz geométrica, que foram introduzidos na mesma viga (inicialmente perfeita) dentro dos limites estabelecidos por norma ([2]), constituindo-se assim, as imperfeições iniciais consideradas no modelo.

Posteriormente, já com as imperfeições, a viga foi novamente processada, agora de maneira não-linear elasto-plástica com a introdução de incrementos de deslocamentos prescritos até que a ocorrência da flambagem lateral com torção ocorresse, e ainda, até que o descarregamento em função da perda da capacidade resistente da viga em função da FLT fosse verificado.

Todavia, ainda que dentro dos limites permitidos por norma, a magnitude ótima dos valores dos deslocamentos constantes da matriz geométrica (imperfeições iniciais) são inicialmente uma incógnita que precisa ser aferida. Assim sendo, procedeu-se então, uma análise de sensibilidade do modelo numérico, em função da variação dos parâmetros de imperfeição representados na forma de fatores multiplicadores dos vetores da matriz geométrica, os quais estão abaixo demonstrados na Tabela 2 e Figura 4.

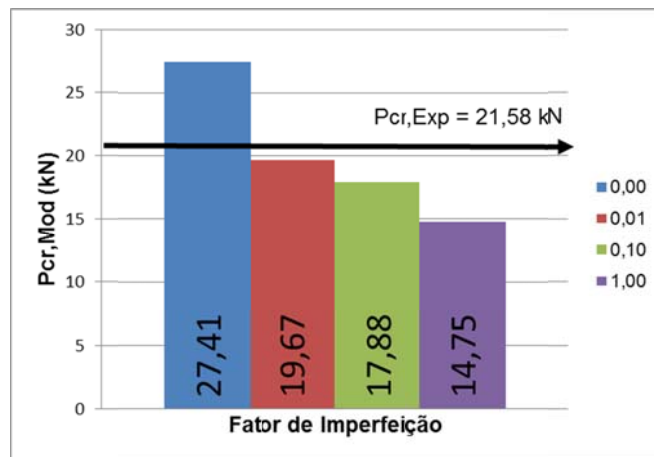


Figura 4. Gráfico carga-fator de imperfeição-carga experimental (C180-3600).

Tabela 2. Resultados da variação do fator de imperfeição (C180-3600)

Viga	Fator de Imperfeição	Valor de Imperfeição (mm)	Vão (%)	$P_{cr,Mod}$ (kN)	$P_{cr,Exp}$ (kN)	Diferença (%)
C180-3600	0,00	0,000	0	27,41	21,58	27,02%
C180-3600	0,01	0,108	0,003	19,67		-8,85%
C180-3600	0,10	1,08	0,03	17,88		-17,15%
C180-3600	1,00	10,82	0,3	14,75		-31,65%

Como foi verificado, entre os dois extremos do intervalo analisado, a carga crítica praticamente dobrou, o que indica a grande sensibilidade do modelo às variações das imperfeições geométricas iniciais. O valor ótimo para o fator de imperfeição no entanto, foi encontrado próximo aos valores mínimos de imperfeição (Figura 4), o que vai de encontro com o entendimento comum sobre a predisposição das vigas casteladas esbeltas flambarem lateralmente, haja vista que a menor imperfeição lateral existente potencializa em muito esta tendência inicial.

Mediante tais resultados o fator de imperfeição de 0,01 foi adotado e aplicado para a análise não linear. Adicionalmente com o intuito de prover robustez aos resultados obtidos, vigas maciças equivalentes às vigas casteladas objeto da calibração em curso foram processadas com configurações idênticas.

Neste contexto, na Figura 5 e Figura 6 estão apresentados os resultados obtidos das variações e análises comentadas, bem como, dos alvos de validação almejados. A Tabela 3 apresenta as siglas que foram utilizadas na Figura 5.

Tabela 3. Legenda e resultados consolidados (kN)

Descrição	Carga Crítica	C180-3600
Carga Crítica, Viga Castelada, Análise Plástica, Modelo Experimental	$P_{cr,Exp}$	21,58
Carga Crítica, Viga Castelada, Análise Elástica, Modelo Numérico	$P_{cr,C,EL,Mod}$	21,94
Carga Crítica, Viga Castelada, Análise Plástica, Modelo Numérico	$P_{cr,C,PL,Mod}$	19,67
Carga Crítica, Viga Maciça Equiv., Análise Elástica, Modelo Numérico	$P_{cr,MEq,EL,Mod}$	22,82
Carga Crítica, Viga Maciça Equiv., Análise Plástica, Modelo Numérico	$P_{cr,MEq,PL,Mod}$	20,47

Como pode ser inferido da Figura 5, para as cargas críticas das vigas C180-3600 dos modelos numéricos referentes à análise não-linear foram encontrados valores 8,85% menores dos que os experimentais alvo, bem como, cargas críticas elásticas cerca de 11,5% maiores do que as obtidas na análise não linear, indicando coerência com as relativas pequenas imperfeições geométricas iniciais impostas quando da análise plástica, ratificando assim a boa concordância dos valores e aferição do modelo.

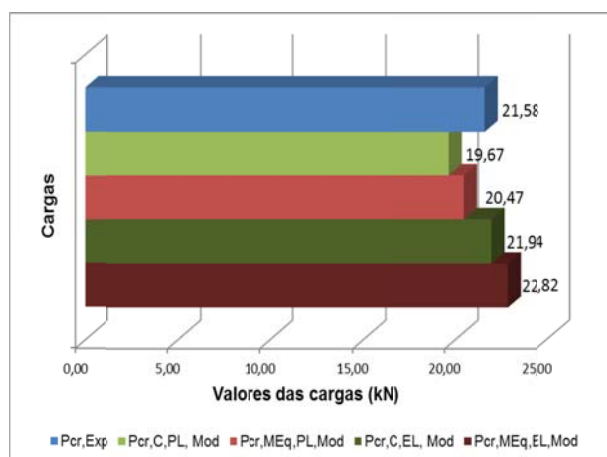


Figura 5. Comparação das cargas obtidas (C180-3600).

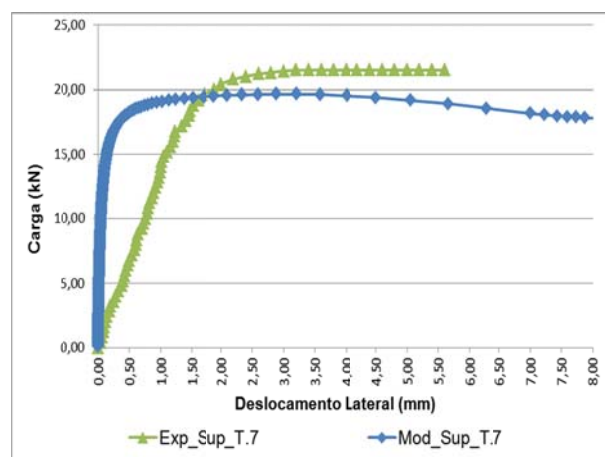


Figura 6. Carga-deslocamento lateral (numérica e experimental) – Mesa Superior.

Já na Figura 6 são apresentadas as curvas carga-deslocamento lateral obtidas no modelo numérico e nos resultados experimentais, sobrepostas graficamente, para a região mais crítica da altura da seção (mesa comprimida) para a viga C180-3600. As curvas numéricas mensuradas na altura do topo das mesas superiores das seções transversais de ambas as vigas, embora com graus de deslocamento inicialmente menores, em função da elevada rigidez encontrada nos modelos numéricos quando comparados aos experimentais e devido a não ocorrência de distorção da seção associada ao mecanismo da FLT, acompanharam a tendência e a direção dos observados nas curvas experimentais. A mesa tracionada apresentou o comportamento clássico observado nos elementos submetidos à flambagem lateral com torção, onde permaneceu com deslocamentos muito pequenos, restringindo a flambagem lateral plena como um todo (seções 100% comprimidas) ou o deslocamento lateral da seção transversal por

igual. Tal situação permanece até um ponto limite de carregamento onde a mesma passa a se deslocar com maior significância, permitindo assim que a parte superior (comprimida) da altura da seção complete o seu ciclo de flambagem e apresente o descarregamento e a perda da capacidade resistente da viga.

Desta forma, o fator de imperfeição de 0,01 foi aplicado nos modelos numéricos objeto de análise deste trabalho, tendo em vista que apresentou para a carga crítica o resultado mais próximo daquele obtido experimentalmente.

4. ANÁLISE PARAMÉTRICA E RESULTADOS

4.1. Introdução e escopo da análise

No Anexo N do Eurocode 3 [4] está apresentado o mais elaborado procedimento de cálculo e detalhamento de vigas casteladas, bem como, demais vigas com aberturas na alma de diferentes geometrias, além da classificação das seções transversais e as verificações dos métodos de falha e ruína.

Uma verificação simplificada da resistência à FLT é proposta no Eurocode 3 [4], que nada mais é do que um método de cálculo similar ao que é usado nas vigas maciças, com a consideração da redução das características geométricas da seção transversal em função das aberturas.

Desta forma, foi elaborada uma modelagem numérica parametrizada no programa ANSYS [1], com o intuito de se obter o momento crítico elástico a fim de verificar a aderência da formulação acima abordada, bem como, todos os demais resultados e análises almejadas.

Uma vez calibrado o modelo numérico, passou-se então ao desenvolvimento do modelo que foi aplicado a todos os vãos das vigas objeto de análise, constituídas pelos perfis europeus IPEs (200, 300, 400, 500 e 600), com o intuito de abranger a maior gama de condições de projeto possíveis, desde a concepção de simples telhados residenciais e pequenos pórticos (pipe racks, etc.) até grandes estruturas como viadutos e pontes. Os perfis a serem analisados foram escolhidos de forma que contemplasse todas as possibilidades possíveis de projeto. Todavia, no presente trabalho será destacado em representação aos demais o IPE 200.

Ressalta-se que não foram efetuadas alterações nas diretrizes e premissas de modelagem utilizadas, mas sim, nas condições de contorno e de características do material a fim de adequar o modelo final às proposições abordadas no escopo do trabalho.

4.2. Características do modelo e processamento

As referências geométricas para as vigas casteladas usadas nesta pesquisa estão dispostas na Figura 7. Observa-se que B_0 é igual a W e A_0 tem que ser menor ou igual a h_0 . No presente estudo, A_0 e h_0 são iguais. As aberturas da alma tiveram sempre uma geometria hexagonal clássica.

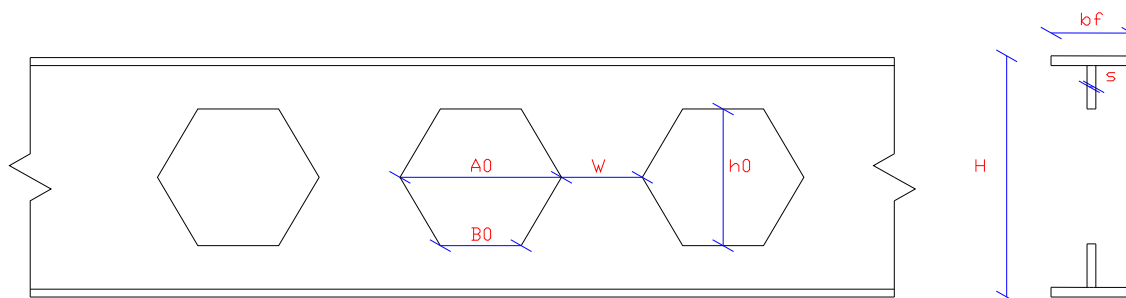


Figura 7. Características geométricas das vigas casteladas analisadas.

No caso do IPE 200, os parâmetros geométricos valiam (mm): Altura Original (H_i)=200; largura da mesa (b_f) = 100; espessuras da alma (t_w ou s) = 5,6 e mesas (t_f) = 8,5; raio de curvatura (r) = 12; altura castelada (H_n) = 300; altura do furo ($H0$) = 200; largura do furo ($A0$) = 200; Base do Furo ($B0$) = 100; área (A) = 2.164,8 mm².

O material constituinte permaneceu sendo um aço elasto-plástico perfeito, bilinear e isotrópico, todavia as propriedades e características foram alteradas e trabalhadas da seguinte forma, considerando-se valores nominais: Módulo de Elasticidade (E) = 210 GPa; tensão de escoamento (σ_y) = 275 MPa. As condições de contorno de uma maneira geral foram mantidas, a única alteração refere-se à localização dos contraventamentos laterais que passaram a ser posicionados sobre os apoios, mas ainda, atuando em ambas as extremidades e lados da viga, bem como, nas mesas superior e inferior. A Figura 8 apresenta de uma maneira completa, a nova configuração das vigas que foram processadas. Ressalta-se que, o empenamento encontra-se livre nas seções dos apoios. O carregamento foi aplicado às vigas novamente sob a forma de deslocamento prescrito.

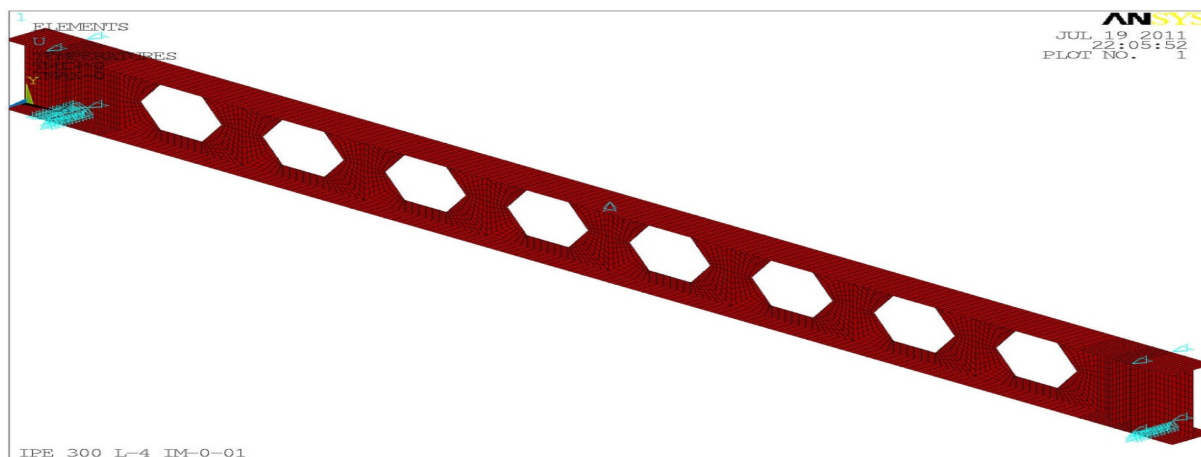


Figura 8. Condições de contorno da viga castelada objeto do projeto.

4.3. Resultados

A Tabela 4 traz a correlação das siglas utilizadas especificamente nos resultados com as suas respectivas descrições.

Tabela 4. Correlação das siglas com a descrição dos momentos

Sigla	Descrição
$M_{cr,1}$	Momento Elástico Crítico - Caso Padrão
$M_{cr,2}$	Momento Elástico Crítico - Caso Geral
$M_{b,Rd,Lami}$	Momento Resistente à FLT - Perfis Laminados
$M_{b,Rd,Sold}$	Momento Resistente à FLT - Perfis Soldados
$M_{pl,Rd}$	Momento Resistente à Plastificação da Seção
$M_{cr,el}$	Momento Elástico Crítico - Modelo Numérico
$M_{cr,pl}$	Momento Plástico Crítico - Análise Não-Linear
$M_{cr,pl,MEq}$	Momento Plástico Crítico - Análise Não-Linear - Maciça Equivalente
$M_{cr,1,MOr}$	Momento Elástico Crítico - Caso Padrão - Viga Maciça Original
$M_{cr,2,MOr}$	Momento Elástico Crítico - Caso Geral - Viga Maciça Original

Momento resistente plástico da seção do IPE 200 ($M_{pl,Rd}$) equivale à 83,57 kNm. Os demais momentos calculados e obtidos no modelo numérico estão representados na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5. Valores dos momentos analisados – IPE 200

Momentos (Comparação)									
$L_{cr,z}$	$M_{cr,el}$	$M_{cr,pl}$	$M_{cr,1}$	$M_{cr,2}$	$M_{b,Rd,Lami}$	$M_{b,Rd,Sold}$	$M_{cr,pl,MEq}$	$M_{cr,1,MOr}$	$M_{cr,2,MOr}$
m	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	kNm
2	327,47	55,01	102,98	98,92	54,23	42,63	33,67	78,83	75,95
4	169,23	38,11	37,16	35,98	27,87	22,58	39,68	33,02	32,15
6	62,17	23,92	23,24	22,65	18,80	15,76	25,09	21,87	21,44
8	31,98	17,87	17,31	16,96	14,51	12,42	18,94	16,63	16,38
10	19,76	14,61	13,95	13,71	11,95	10,37	15,48	13,50	13,33
12	13,50	12,47	11,74	11,57	10,21	8,95	13,22	11,40	11,27
14	9,98	10,88	10,17	10,04	8,94	7,90	11,58	9,87	9,78
16	7,73	9,72	8,98	8,88	7,96	7,08	10,33	8,71	8,64

Na Figura 9 abaixo, estão plotadas as curvas referentes aos valores da Tabela 5.

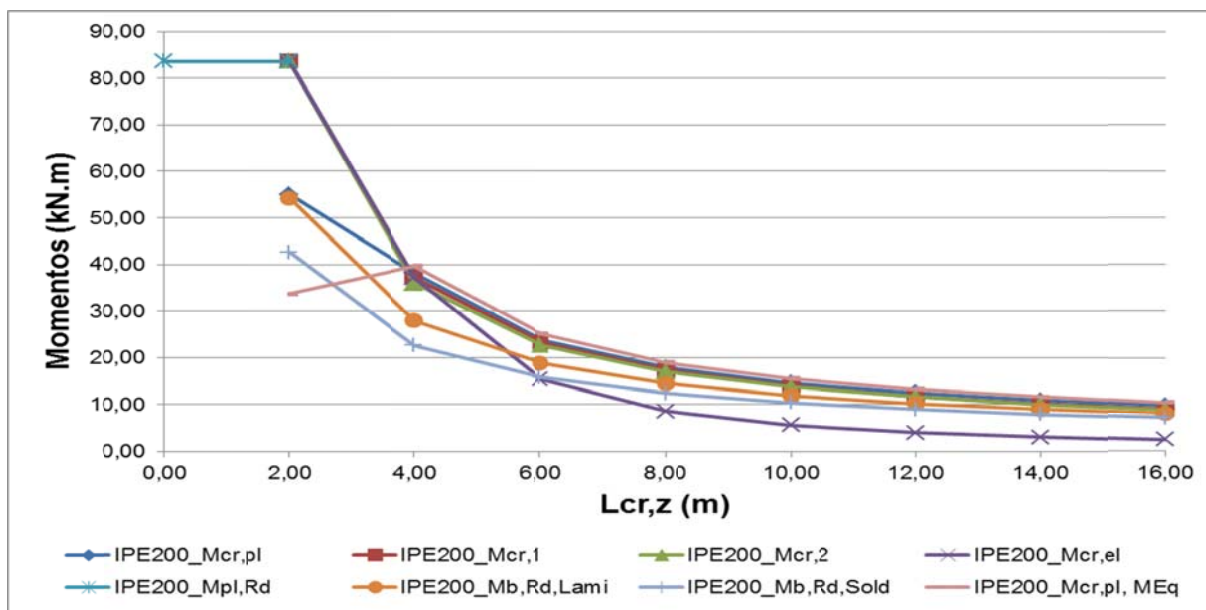


Figura 9. IPE200 - Curvas momentos-vãos analisados.

Com o intuito de ilustrar os mecanismos de falha verificados, flambagem do montante da alma (FMA) e a flambagem lateral com torção (FLT), de maneira objetiva, foram selecionados estrategicamente os vãos constantes da Figura 10, Figura 11 e Figura 12 abaixo, para representar com o seu relatório de imagens as mais diversas ocorrências. Tais situações se sucederam de maneira repetida e frequente, logo mapeável, para todos os demais vãos analisados.

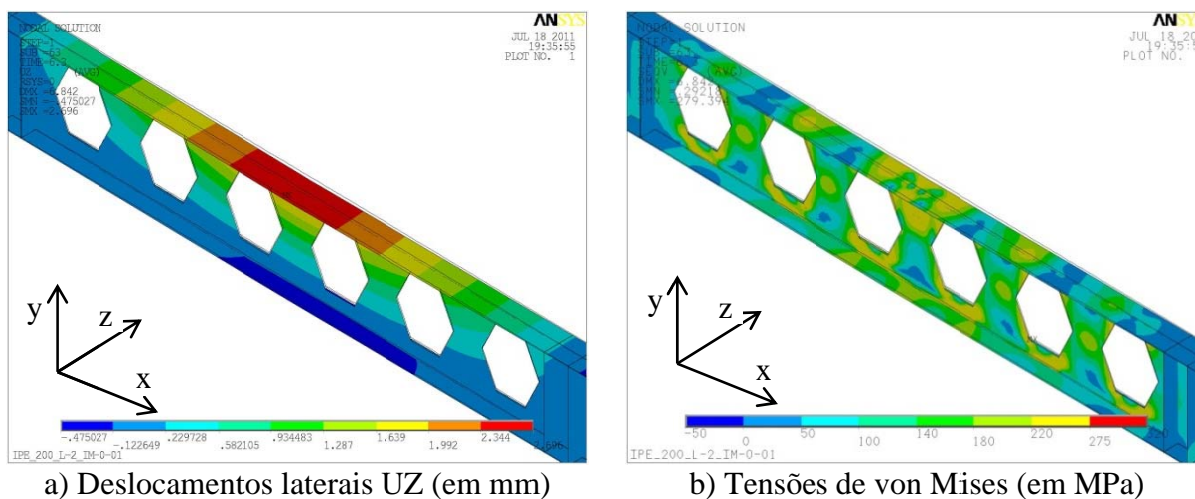
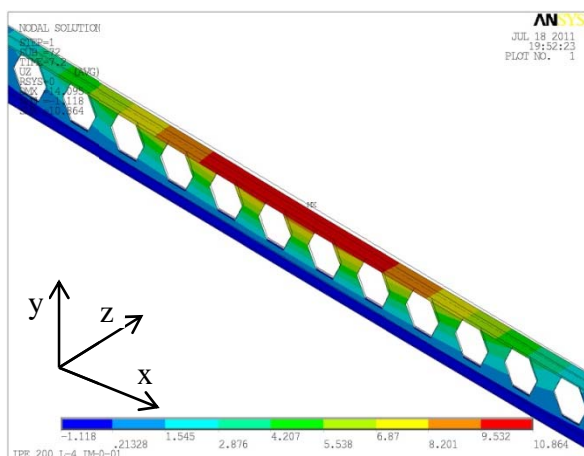
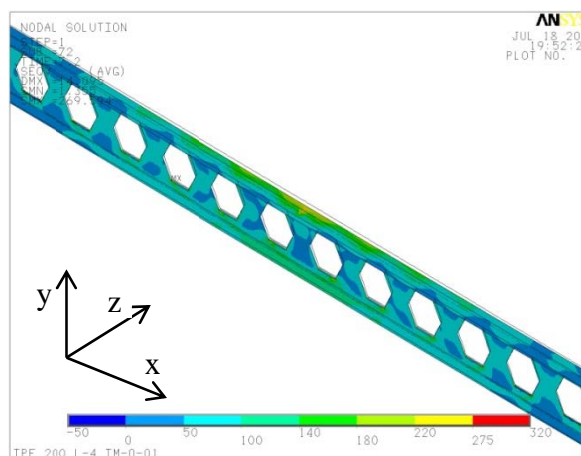


Figura 10. IPE200 (2m) - $M_{cr,pl}$.

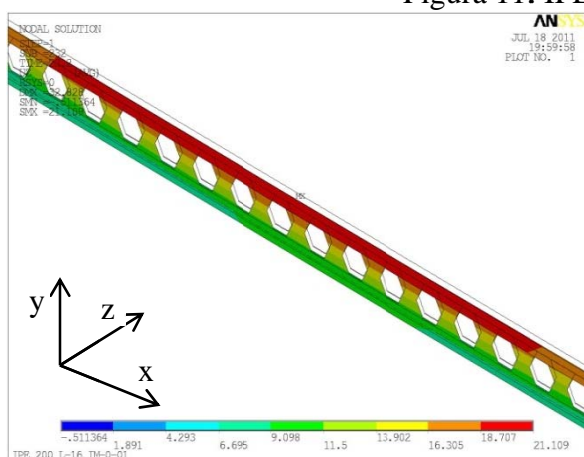


a) Deslocamentos laterais UZ (em mm)

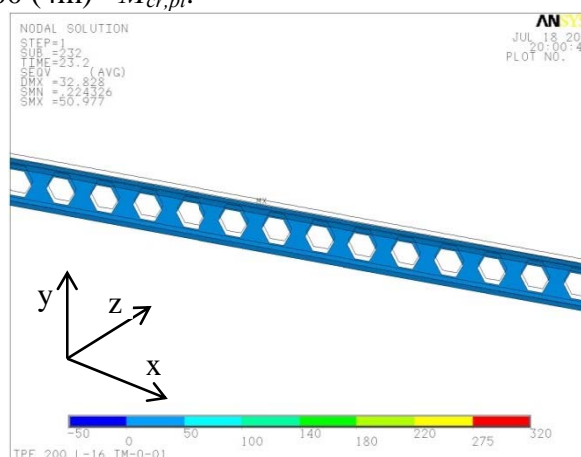


b) Tensões de von Mises (em MPa)

Figura 11. IPE200 (4m) - $M_{cr,pl}$.



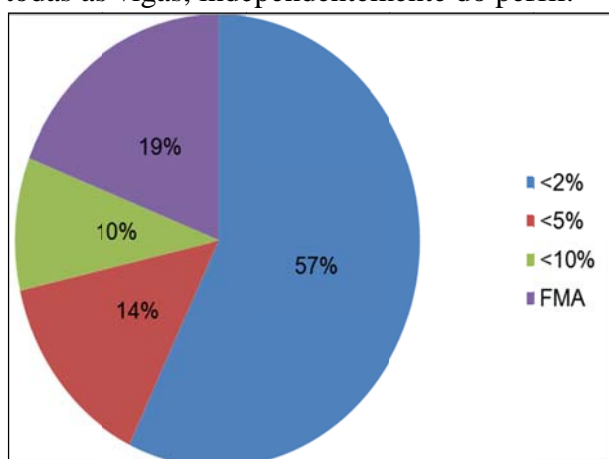
a) Deslocamentos laterais UZ (em mm)



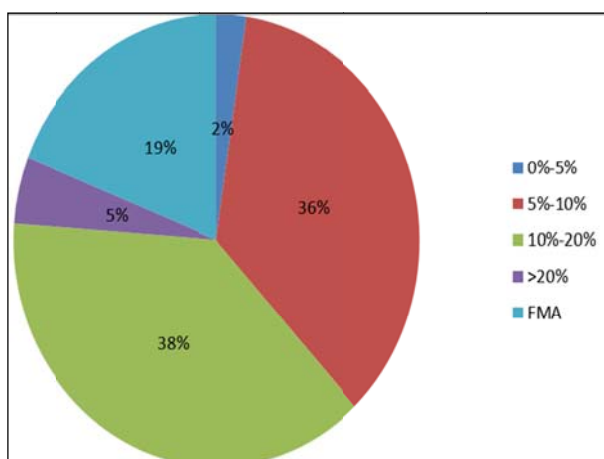
b) Tensões de von Mises (em MPa)

Figura 12. IPE200 (16m) - $M_{cr,pl}$.

Não obstante a Figura 10, Figura 11 e Figura 12 acima, se referir somente ao IPE 200, abaixo (Figura 13) seguem alguns dados estatísticos consolidados com os demais perfis analisados para os mesmos vãos, tendo em vista que comportamento semelhante foi observado em todas as vigas, independentemente do perfil.



a) $M_{cr,pl} \times (M_{cr,1} \text{ e } M_{cr,2})$



b) $M_{cr,pl} \times M_{cr,pl,MEq}$

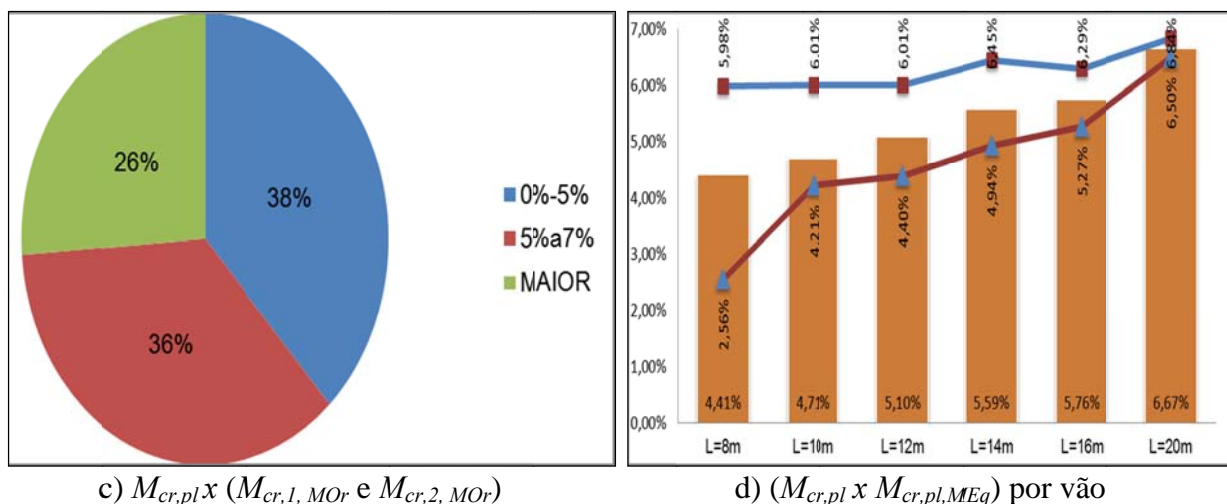


Figura 13. Distribuição de diferenças percentuais.

5. CONCLUSÕES

5.1. Introdução

O presente trabalho apresentou alguns aspectos do comportamento estrutural de vigas de aço com aberturas de geometria hexagonal na alma ou simplesmente de vigas casteladas. Foram apresentadas algumas normas e procedimentos de dimensionamento para as vigas de aço, com atenção especial voltada ao estado limite último da flambagem lateral com torção, considerando inclusive possíveis imperfeições iniciais nos cálculos teóricos e numéricos. Não obstante, esta pesquisa demonstrou que o método numérico dos elementos finitos é adequado para a modelagem e previsão dos momentos críticos quando considerados ou não, os efeitos das não-linearidades geométricas.

Desta forma, cenários e condições foram variadas a fim de se gerar dados suficientes à avaliação qualitativa e quantitativa dos resultados ora obtidos, bem como, prover aos mesmos a robustez e a confiabilidade esperada.

5.2. Conclusões

Diversas conclusões podem ser extraídas dos resultados obtidos, dentre as quais, abaixo são tecidas àquelas principais atinentes aos objetivos iniciais deste trabalho.

Dentre os resultados apresentados foi possível constatar que a grande maioria das diferenças percentuais obtidas entre os momentos ($M_{cr,pl}$ x ($M_{cr,1}$ e $M_{cr,2}$)) não foram maiores do que 2% (Figura 13a), o que indica que a proposição do Eurocode 3 [4], para cálculo do momento elástico crítico para vigas casteladas utilizando a formulação aplicável às vigas maciças, mas considerando as diferenças geométricas entre as seções transversais, pode ser utilizada com aparente eficácia para verificação deste estado limite último especificamente, desde que as vigas em análise tenham um rigoroso controle tecnológico fabril em sua confecção de modo que não ocorram grandes imperfeições iniciais, principalmente no que tange ao arco de

curvatura lateral da viga. O entendimento proveniente deste trabalho é de que a proposição pautada é válida para a gama de perfis estudados.

Desta forma, como neste trabalho não foram previstos mecanismos que avaliassem a influência da solda nos valores dos momentos críticos plásticos, os resultados dos momentos resistentes ($M_{b,Rd,Sold}$ e $M_{b,Rd,Lami}$) foram coerentes com o modelo desenvolvido, tendo em vista que as curvas referentes à resistência à FLT dos perfis laminados ($M_{b,Rd,Lami}$) ficaram mais próximas das curvas obtidas com a modelagem numérica não-linear ($M_{cr,pl}$). Coesão também foi observada para os resultados teóricos pelo fato destes momentos resistentes tanto para perfis soldados, quanto para perfis laminados terem apresentados valores menores do que os do momento elásticos críticos ($M_{cr,1}$ e $M_{cr,2}$) considerando às formulações aplicáveis ao caso geral e particular, já que os momentos resistentes consideram, ainda que de maneira estimada, a influência de imperfeições geométricas iniciais.

Infere-se das análises realizadas, que para vãos menores, até quatro metros em geral, o mecanismo que determina a falha da peça estrutural é a FMA, que ocorre devido ao excesso de esforços longitudinais na alma da viga, que por sua vez, em função da conformação geométrica das vigas casteladas favorece tal ocorrência, haja vista os limitados espaçamentos existentes entre as aberturas. A FMA se sucede com uma carga levemente superior àquela que gera as primeiras deformações no local.

Foi ratificada a idéia de que a medida que os vãos livres aumentam, se torna mais evidente à instabilidade lateral como agente controlador do mecanismo de falha, haja vista a convergência e tendência comum de tangenciamento constatado para todas as curvas.

Verificou-se, como esperado, que em função dos maiores valores das propriedades geométricas obtidos para as seções transversais das vigas maciças em relação às casteladas, os valores dos momentos críticos, tanto os oriundos das análises elásticas quanto os da análise plástica (não-linear) foram cerca de 9% e 6,5% respectivamente maiores nas vigas maciças. Contudo, estes valores permaneceram próximos, aos obtidos numericamente e experimentalmente, apresentando desta forma a concordância e coesão esperada para todos os valores envolvidos. Assim sendo, como na prática as vigas casteladas são provenientes de perfis de aço 33,3% menores dos que os maciços equivalentes, quando adicionado dos ganhos imediatos inerentes à redução do peso global da estrutura como um todo e da possibilidade da passagem de tubulações serviços diversos, fica evidente, a economicidade disponibilizada por esta solução estrutural quando comparadas com as vigas maciças equivalentes.

Não obstante, mesmo raciocínio pode ser aplicado assertivamente aos perfis maciços originários das vigas casteladas, que submetidos à pequenos investimentos adicionais referentes à industrialização fabril de montagem das vigas casteladas, ofertam ganhos de resistência à momentos no plano de flexão das vigas, variando entre 5% à 20% para a grande maioria das vigas (74%) analisadas.

Certamente tais vantagens serão ainda mais robustas, se analisadas sob a ótica do projeto como um todo e de maneira planejada, desde a concepção da estrutura fim.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem a UERJ, ao CNPq e a CAPES, pelo apoio financeiro.

6. REFERENCES

- [1] ANSYS, version 12.0 (2009). Inc. Theory Reference.
- [2] CEN (1993) – EN 10034:1993 – “Structural steel I and H sections” – “Tolerances on shape and dimensions”. *European Comittee for Standardization*, Brussels.
- [3] Estrada, H., Jimenez, J., and Aguiñiga, F. (2006). “Cost Analysis in the Design of Open-Web Castellated Beams. Building Integration Solutions”. *Proceedings of the 2006 Architectural Engineering National Conference*. ASCE Conf. Proc. doi:10.1061/40798(190)53.
- [4] Eurocode 3 (1998). EN 1993-1-1. Design of steel structures: Part 1.1. General rules and rules for buildings, *Amendment A2 of Eurocode 3: Annex N*, “Openings in webs”. British Standards Institution (1992).
- [5] Eurocode 3 (2005). EN 1993-1-1. Design of steel structures: Part 1.1. “General rules and rules for buildings”.
- [6] Simões, R. A. D., (2007). “Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas”, 2º Edição, CMM, *Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista*.
- [7] Zirakian, T., Showkati, S. (2006). “Distortional buckling of castellated beams”. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 62, p. 863-871.