

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESTABILIDADE LATERAL DE VIGAS CELULARES DE AÇO COM ABERTURAS NA ALMA DE GEOMETRIA POLIGONAL

Felipe Ozório Monteiro da Gama

felipe_eng_uerj@yahoo.com.br

PGECIV – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UERJ

Luciano Rodrigues Ornelas de Lima

Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco

lucianolima@uerj.br

vellasco@uerj.br

Departamento de Estruturas e Fundações, Faculdade de Engenharia, UERJ

José Guilherme Santos da Silva

jgss@uerj.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, UERJ

Resumo. *Limitações de altura são frequentemente impostas às edificações de múltiplos pavimentos por regulamentos de zoneamento urbano, aspectos econômicos, ambientais, normativos e considerações estéticas. Um pé-direito alto é normalmente requerido para se permitir a passagem de tubulações e dutos de grande diâmetro sob vigas de aço, conduzindo muitas vezes às alturas inaceitáveis entre pavimentos de edificações. Várias são as soluções possíveis para se resolver tal inconveniência, dentre elas pode-se citar: Vigas com inércia variável, stub girders, treliças mistas e vigas misuladas. Outra solução frequentemente utilizada é a abertura de furos na alma das vigas de aço para a passagem das tubulações de serviço. Nesta última solução, em função da alta esbelteza relativa e das significativas áreas das aberturas na alma, um dos possíveis processos de falha do material é o efeito de segunda ordem denominado Flambagem Lateral por Torção (FLT), que remete a um problema de perda de estabilidade lateral que ocorre antes do início da plastificação da seção transversal. Neste caso, a resistência lateral é ainda mais reduzida devido à presença e a natureza das aberturas na alma, bem como, das imperfeições da geometria e do material. O presente artigo foi focado no desenvolvimento de um modelo numérico que permitisse obter os valores do momento crítico para a FLT, em vigas com aberturas celulares de geometria poligonal na alma, através de uma análise numérica com base no método dos elementos finitos através do programa ANSYS. Os valores obtidos para estes momentos foram comparados com os procedimentos de dimensionamento presentes no Eurocode 3. Desta forma, foi objetivo deste artigo, avaliar, quantificar e determinar a influência das diferenças geométricas características da viga com aberturas celulares na alma em relação às vigas maciças com as mesmas dimensões, analisando e descrevendo o comportamento estrutural destas vigas de aço para diferentes perfis, comprimentos, carregamentos, tipos de viga, condições de contorno e de restrições.*

Palavras-Chave: *Elementos Finitos; Estabilidade Lateral; Flambagem Lateral por Torção; Momento Elástico Crítico; Aberturas na alma; Vigas Casteladas;*

1. INTRODUÇÃO

Limitações de altura são frequentemente impostas às edificações de múltiplos pavimentos por regulamentos de zoneamento urbano, aspectos econômicos e considerações estéticas. Um pé-direito alto é normalmente requerido para se permitir a passagem de tubulações e dutos de grande diâmetro sob vigas de aço, conduzindo muitas vezes às alturas inaceitáveis entre pavimentos de edificações. Várias são as soluções possíveis para se resolver tal inconveniência, dentre elas pode-se citar: Vigas com inércia variável, *stub girders*, treliças mistas e vigas misuladas. Outra solução frequentemente utilizada é a abertura de furos na alma das vigas de aço para a passagem das tubulações de serviço. (Rodrigues, 2007)

O presente estudo tem por objetivo desenvolver um modelo numérico que permita obter os valores dos Momentos Elásticos Críticos referentes à Flambagem Lateral por Torção, em vigas com pluralidades de aberturas de geometria poligonal na alma. Isto foi desenvolvido através da análise linear de um problema de autovetores e autovalores referentes aos modos de flambagem, e compará-los com os métodos manuais de cálculo disponíveis em algumas versões do Eurocode com diferentes abordagens e proposições, bem como, com o modelo numérico desenvolvido pelos autores I.Radic, D. MarkulaK, D.Varevac, (I.Radic et al., 2008) o qual motivou e se baseou o desenvolvimento do presente trabalho.

Também é objetivo deste trabalho, avaliar, quantificar e determinar a influência das diferenças geométricas características da viga com aberturas celulares na alma em relação às vigas maciças com as mesmas dimensões, analisando e descrevendo o comportamento estrutural destas vigas de aço para diferentes perfis, comprimentos, carregamentos, tipos de viga, condições de contorno e de restrições. A metodologia empregada para tal estudo baseou-se em uma análise paramétrica com o auxílio do método numérico dos elementos finitos. (I.Radic et al., 2008).

2. MODELO NUMÉRICO

2.1 Introdução

No EC3 (ENV 1992) está apresentado o mais elaborado procedimento de cálculo e detalhamento de vigas casteladas, a classificação das seções transversais e as verificações dos métodos de falha e ruína. Em função da alta esbelteza relativa e das significativas áreas das aberturas na alma, um dos possíveis processos de falha do material é a FLT (Anexo A). Uma verificação simplificada da resistência à FLT é proposta no EC3 (ENV 1992), 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. Isto implica que a validação da resistência à FLT é a mesma em Vigas Casteladas e Maciças, somente com a diferença de considerar nos cálculos as diferentes características geométricas da seção transversal das vigas casteladas, em função das aberturas (I.Radic et al., 2008).

Na última versão do EC3 (EN 2005), este procedimento de cálculo é omitido e a curva da FLT não é apresentada para este tipo de viga. Para efetuar este cálculo deve-se usar a cláusula 6.3.4, do EC3 (EN 2005), que é baseada no Método dos Elementos Finitos, pelo cálculo dos menores valores dos amplificadores de carregamento (I.Radic et al., 2008).

No EC3 (ENV 1992), o procedimento para substituir imperfeições geométricas (usando uma excentricidade inicial ou um arco inicial equivalente no eixo mais fraco) é necessário, somente se, uma análise dos efeitos de segunda ordem for realizada. Entretanto, o procedimento descrito no EC3 (ENV 1992) recomenda somente a aplicação do valor do multiplicador K. Portanto, para calcular a resistência de projeto de uma viga castelada à FLT com maior precisão, uma análise não linear estática completa deve ser efetuada, levando em

consideração ambos os efeitos, do material e da geometria com comportamento não linear com incrementos de carregamentos. A desvantagem desta aproximação é que ela demanda softwares sofisticados para um modelo 3D, bem calibrado e ajustado, o que consome um tempo excessivo, constituindo-se assim, um dos principais motivos da necessidade de desenvolvimento de uma aproximação mais prática e simplificada, porém com resultados ainda satisfatórios. Tanto no EC3 (EN 2005) como no EC3 (ENV 1992), o procedimento de cálculo proposto para a determinação da resistência da viga castelada à FLT, demanda a realização do cálculo do M_{cr} (Anexo A) que é o menor valor de momento fletor que causa a FLT, entretanto o EC3 (EN 2005) não explica e nem define como fazê-lo (I.Radic et al., 2008).

Ante ao exposto acima, e com base no trabalho (I.Radic et al., 2008), foi elaborado uma modelagem numérica parametrizada no ANSYS (Ansys 10.0, 2005), mesma ferramenta que foi utilizada para analisar o comportamento dos diversos perfis, obtendo os momentos críticos para diferentes perfis, comprimentos, carregamentos, tipos de viga, condições de contorno e de restrições. Os resultados destas análises foram comparados analiticamente com o modelo numérico desenvolvido e definido em (I.Radic et al., 2008) e com os resultados calculados através do método teórico proposto em EC3 (ENV 1992), que para vigas com seções de dupla simetria, pode ser calculado com a expressão (1) (I.Radic et al., 2008):

$$M_{cr} = \frac{C_1 \Pi^2 EI_z}{(KL)^2} \left[\sqrt{\left(\frac{K}{K_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(KL)^2 GI_T}{\Pi^2 EI_z} + (C_2 Z_g)^2} - C_2 Z_g \right] \quad (1)$$

Onde,

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

K refere-se às rotações nas seções extremas, em torno do eixo de menor inércia;

K_w refere-se às restrições ao empenamento, também, nas seções extremas;

L é o comprimento da viga entre restrições laterais;

E é o módulo de elasticidade do material;

I_z é o momento de inércia em torno do menor eixo;

I_w é a constante de empenamento;

I_T é a constante de torção;

G é o módulo de elasticidade transversal;

$Z_g = (Z_a - Z_s)$, em que Z_a e Z_s são as coordenadas do ponto de aplicação da carga e do centro de cisalhamento, em relação ao centro de gravidade da seção, estas quantidades tomam valores positivos se localizadas na parte comprimida e valores negativos se localizadas na parte tracionada (Simões, 2007).

Os resultados da expressão (1) acima são muito sensíveis aos fatores K e K_w , os quais, as interpretações geométricas são mostradas na Figura 1. É importante ressaltar que o EC3 (ENV 1992) só fornece os valores de C_1 e C_2 para o caso de $K_w=1$ (sem empenamento restrito). Para o caso de $K_w=0,5$ (com empenamento restrito), estes valores foram conservadoramente estimados para a determinação dos M_{cr} 's utilizados em EC3 (EN 2005), e, conseqüentemente, neste trabalho (I.Radic et al., 2008).

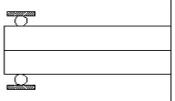
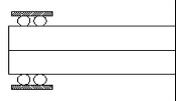
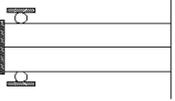
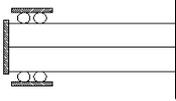
TIPO DE RESTRIÇÃO LATERAL	K	Kw	TIPO DE RESTRIÇÃO LATERAL	K	Kw
Simplesmente Suportada 	1,0	1,0	Flexão Lateral Impedida 	0,5	1,0
Empenamento Impedido 	1,0	0,5	Engastado 	0,5	0,5

Figura 1 – Visão Ilustrativa em Planta das Restrições Ideais

2.2 Método da pesquisa (I.Radic et al., 2008)

Entre outros aspectos, esta pesquisa está focada na influência da geometria da viga castelada no M_{cr} da FLT. Para quantificar esta influência o modelo em MEF (Anexo A) foi desenvolvido utilizando o ANSYS (Ansys 10.0, 2005). A análise do autovalor da flambagem foi baseada em alguns vãos e perfis (Europeus) de vigas casteladas comumente utilizadas nos telhados das construções e edificações europeias. A mesma análise foi empreendida nas vigas maciças com as mesmas dimensões e vãos para comparação dos resultados. Geralmente, os resultados da análise de flambagem linear são equivalentes à solução do seguinte problema de autovalor.

$$[K - K_{cr} \times K_d] \{\phi\} = 0 \quad (2)$$

Onde $[K]$ é matriz rigidez e $[K_d]$ é a matriz de rigidez geométrica da estrutura que considera os termos de ordens maiores (segunda, terceira ...) das relações de deslocamentos e deformações (essas relações são assumidas como formas independentes dos deslocamentos da estrutura causados por um carregamento de intensidade arbitrária). A função do fator escalar multiplicador $[K_{cr}]$ é gerar condições de equilíbrio instáveis na estrutura para diferentes níveis e causar flambagem. Sendo que, este é determinado pelo ANSYS (Ansys 10.0, 2005), para cada uma das diversas situações, as quais, o modelo numérico desenvolvido para este estudo foi submetido. Portanto, multiplicando o primeiro autovalor $[K_{cr}]$ ao carregamento que causa o primeiro modo de flambagem do modelo, obtém-se o autovetor ϕ (do perfil flambado ou deformado por FLT). Com isto, a análise linear de flambagem resulta em um coeficiente de intensidade crítica para cada modo de flambagem, de forma que, o produto de $[K_{cr}]$ pelo carregamento aplicado é o próprio carregamento crítico, que causa perda de estabilidade por FLT. Logo, não é difícil calcular o valor do momento fletor crítico, se o carregamento crítico é conhecido. Este momento depende do sistema estrutural do elemento analisado, tipo e distribuição do carregamento. Este artigo apresenta os resultados de vigas simplesmente suportadas para diversos tamanhos de vãos, para dois tipos de carregamento (Concentrado e Distribuído). Os momentos fletores críticos podem ser calculados através de:

$$M_{cr, MEF} = K_{cr} \left(\frac{qL^2}{8} \right) \quad E \quad M_{cr, MEF} = K_{cr} \left(\frac{PL}{4} \right) \quad (3)$$

Ou então, basta aplicar os carregamentos parametrizados, conforme dispostos abaixo para o carregamento concentrado e distribuído respectivamente, caso se queira obter diretamente o valor da M_{cr} , posto que, desta forma, M_{cr} é igual ao próprio K_{cr} .

$$M_{cr,MEF(2)} = \frac{-4 \times 10^6}{L} E \quad M_{cr,MEF(2)} = \left(\frac{8 \times 10^6}{L^2} \right) \quad (4)$$

2.3 Escopo da análise

A análise foi desenvolvida para vigas casteladas 50% mais altas do que os perfis originais IPE e HE-A, utilizados neste trabalho, tendo em vista que a produção das vigas casteladas, com aberturas hexagonais na alma, como é o caso em questão, se resume executar um corte simétrico em relação às 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 o dobro da altura do perfil maciço original (Figura 2).

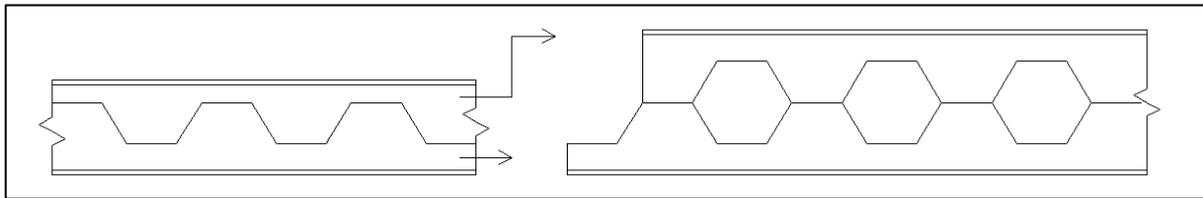


Figura 2 – Processo Fabril da Viga Castelada

As referências geométricas para as vigas casteladas usadas nesta pesquisa estão dispostas abaixo na Figura 3. Somente atentar para o fato que “ b_0 ” é igual à “ W ” e “ A_0 ” tem de ser menor ou igual à “ h_0 ”. No presente trabalho, “ A_0 ” e “ h_0 ” são iguais.

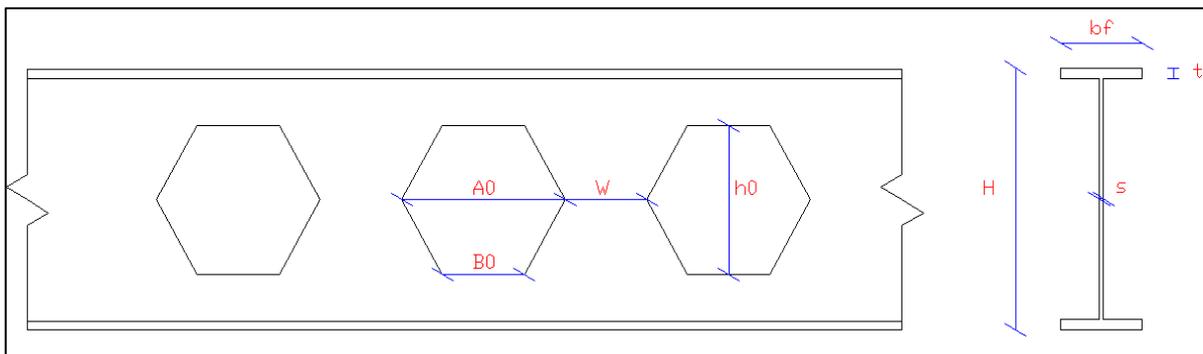


Figura 3 – Características Geométricas das Vigas Casteladas Analisadas

Os perfis com as demais características das vigas casteladas analisadas foram os seguintes apresentados:

Tabela 1 – Dimensões de Geometria das Vigas Casteladas Analisadas

PERFIL	Altura original do perfil (mm)	Altura da viga castel. (mm)	Vão (m)	Dist. entre vigas (m)	Larg. (A0) e altura (H0) da abert. (mm)	Dist. entre as abert. (w) e (B0) (mm)	Larg. da Mesa Bf (mm)	Espes. da Almas (mm)	Espes. da Mesa t (mm)
IPE 240	240	360	8	2,2	253,5	126,75	120	6,2	9,8
IPE 300	300	450	10	2,2	317	158,5	150	7,1	10,7
IPE 360	360	540	12	2,2	380	190	170	8	12,7
HE 220A	210	315	8	2,5	213	106,5	220	7	11
HE 260A	250	375	10	2,5	246	123	260	7,5	12,5
HE 300A	290	435	12	2,5	296	148	300	8,5	14

3. RESULTADOS

Seguem abaixo as tabelas de resultados deste trabalho, que reúne todos os resultados objetos deste estudo, bem como, o gráfico analítico e explicativo das principais análises apresentadas, para um tipo de perfil (IPE 240) como exemplo demonstrativo, além de algumas imagens representativas do comportamento e montagem da peça.

Os percentuais apresentados na Tabela 3 e na Tabela 4 são sempre referentes ao $M_{cr,EC}$, em relação ao $M_{cr,FEM (1)}$ ou $M_{cr,FEM (2)}$ (Anexo A), entretanto, quando estes percentuais estão na cor azul, significam que para aquela determinada condição o $M_{cr,FEM (2)}$ se aproximou mais de $M_{cr,EC}$, do que o $M_{cr,FEM (1)}$, quando não, significam o oposto.

Através da Tabela 3 e Tabela 4 é possível observar a precisão dos modelos numéricos em função dos resultados apresentados, posto que, os $M_{cr,FEM (1)}$ e $M_{cr,FEM (2)}$ obtiveram na maior parte dos casos pequenos percentuais de diferenças em relação aos $M_{cr,EC}$. Notório também, que os resultados obtidos pelo modelo numérico dos $M_{cr,FEM (2)}$ superaram significativamente os $M_{cr,FEM (1)}$, para os casos que haviam restrição ao empenamento em relação à aproximação dos $M_{cr,EC}$, entretanto, foram superados ligeiramente nos que não haviam esta restrição.

Imediatamente abaixo seguem os gráficos comparativos (perfil IPE 240) dos $M_{cr,EC}$ representados na cor vermelha, $M_{cr,FEM (1)}$ representados na cor azul, e, $M_{cr,FEM (2)}$ representados na cor verde, para cada uma das diversas condições analisadas e explicitadas na Tabela 2. Os gráficos a seguir são auto-explicativos, em função das Tabelas – Legendas:

	$M_{cr,EC}$
	$M_{cr,FEM (1)}$
	$M_{cr,FEM (2)}$

Figura 4 – Legenda de Cores: $M_{cr,EC}$; $M_{cr,FEM (1)}$ e $M_{cr,FEM (2)}$

Tabela 2 – Legenda de Condições dos Gráficos

CONDIÇÃO	CARREGAMENTO	VIGA	EMPENAMENTO
COND.1	DISTRIBUÍDO	MACIÇA	SEM EMP. RESTR.
COND.2	DISTRIBUÍDO	MACIÇA	COM EMP. RESTR.
COND.3	DISTRIBUÍDO	CASTELADA	SEM EMP. RESTR.
COND.4	DISTRIBUÍDO	CASTELADA	COM EMP. RESTR.
COND.5	CONCENTRADO	MACIÇA	SEM EMP. RESTR.
COND.6	CONCENTRADO	MACIÇA	COM EMP. RESTR.
COND.7	CONCENTRADO	CASTELADA	SEM EMP. RESTR.
COND.8	CONCENTRADO	CASTELADA	COM EMP. RESTR.

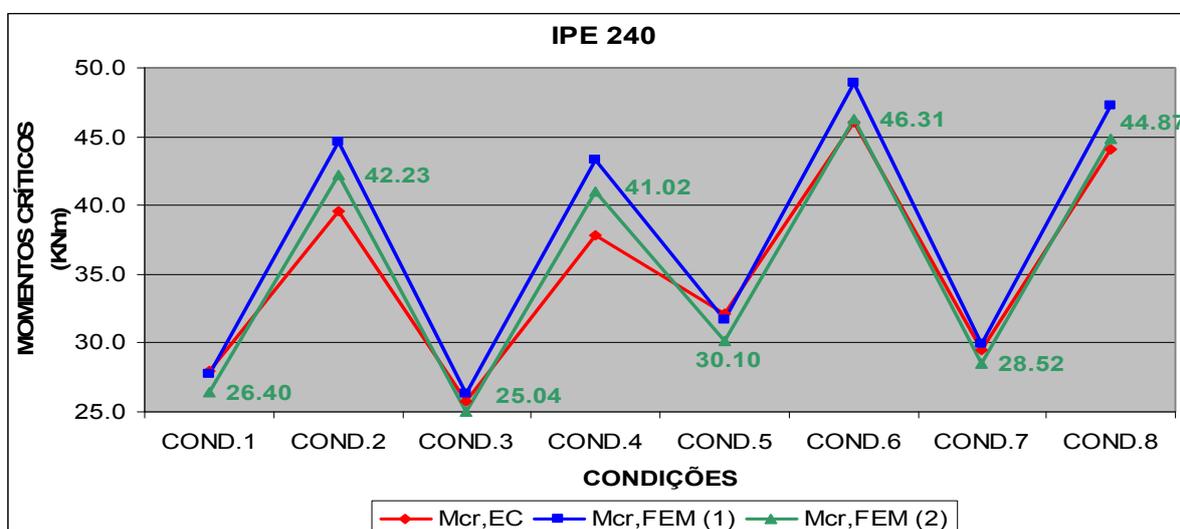


Figura 5 – Gráfico (Linhas) Demonstrativo dos Resultados para o Perfil IPE 240

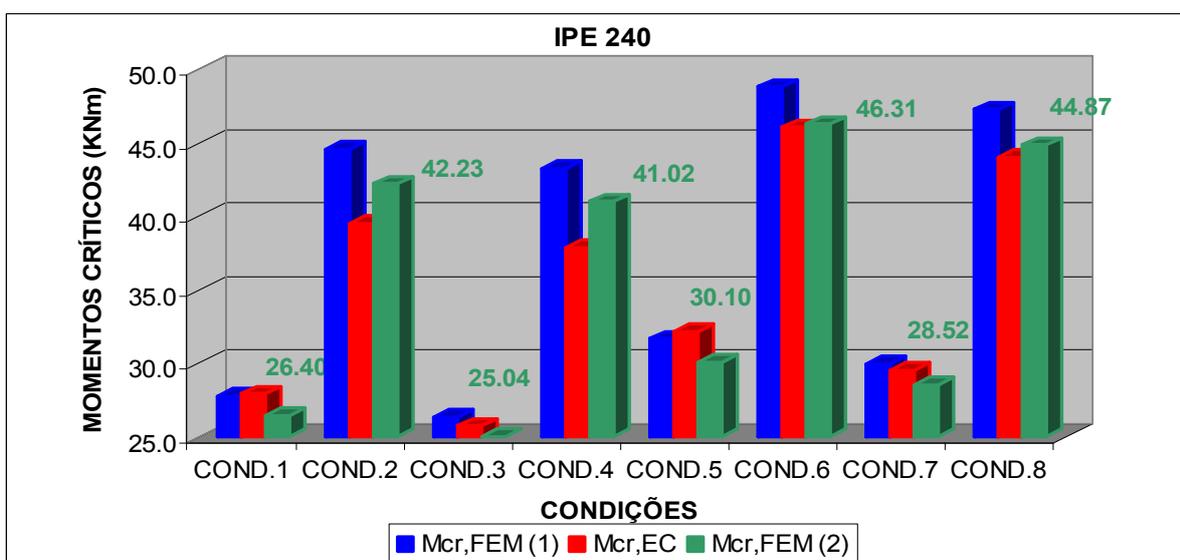


Figura 6 – Gráfico (Barras) Demonstrativo dos Resultados para o Perfil IPE 240

Tabela 3 – Resultados Globais Comparativos dos Mcr's entre Vigas Maciças e Casteladas para Carregamento Concentrado

CROSS SECTION		CARGA CONCENTRADA					
		PLATE BEAMS		CASTELLATED BEAMS		PLATE x CASTEL. ($\Delta\%$)	
		k = 1,0	k = 1,0	k = 1,0	k = 1,0	k = 1,0	k = 1,0
Mcr em KNm		kw = 1,0	kw = 0,5	kw = 1,0	kw = 0,5	kw = 1,0	kw = 0,5
IPE 240	Mcr,EC	32,17	46,09	29,55	44,08	8,14%	4,36%
	Mcr,MEF (1)	31,66	48,85	29,95	47,29	5,40%	3,19%
	$\Delta\%$ (1)	-1,59%	5,99%	1,35%	7,28%		
	Mcr,MEF (2)	30,10	46,31	28,52	44,87	5,25%	3,10%
	$\Delta\%$ (2)	-6,42%	0,47%	-3,47%	1,79%		
IPE 300	Mcr,EC	49,58	74,80	45,11	71,49	9,02%	4,43%
	Mcr,MEF (1)	48,75	78,87	46,03	76,44	5,58%	3,08%
	$\Delta\%$ (1)	-1,67%	5,44%	2,04%	6,92%		
	Mcr,MEF (2)	46,55	74,76	44,04	72,53	5,40%	2,98%
	$\Delta\%$ (2)	-6,10%	-0,05%	-2,37%	1,46%		
IPE 360	Mcr,EC	73,43	109,22	67,35	104,67	8,28%	4,17%
	Mcr,MEF (1)	71,97	115,15	68,15	111,67	5,31%	3,02%
	$\Delta\%$ (1)	-1,99%	5,43%	1,19%	6,69%		
	Mcr,MEF (2)	68,73	109,24	65,19	106,04	5,15%	2,93%
	$\Delta\%$ (2)	-6,40%	0,02%	-3,21%	1,31%		
HE 220A	Mcr,EC	134,62	233,98	130,43	231,11	3,11%	1,23%
	Mcr,MEF (1)	130,51	244,65	126,69	240,72	2,93%	1,61%
	$\Delta\%$ (1)	-3,05%	4,56%	-2,87%	4,16%		
	Mcr,MEF (2)	125,59	231,91	123,34	228,70	1,79%	1,38%
	$\Delta\%$ (2)	-6,71%	-0,88%	-5,43%	-1,04%		
HE 260A	Mcr,EC	192,35	334,74	187,65	331,52	2,44%	0,96%
	Mcr,MEF (1)	185,68	349,57	180,79	344,37	2,63%	1,49%
	$\Delta\%$ (1)	-3,47%	4,43%	-3,66%	3,88%		
	Mcr,MEF (2)	178,73	331,15	176,31	327,19	1,35%	1,19%
	$\Delta\%$ (2)	-7,08%	-1,07%	-6,04%	-1,31%		
HE 300A	Mcr,EC	268,27	465,47	260,90	460,42	2,75%	1,08%
	Mcr,MEF (1)	259,35	486,26	252,25	479,02	2,74%	1,49%
	$\Delta\%$ (1)	-3,33%	4,47%	-3,32%	4,04%		
	Mcr,MEF (2)	249,73	460,36	246,16	454,82	1,43%	1,20%
	$\Delta\%$ (2)	-6,91%	-1,10%	-5,65%	-1,22%		

Tabela 4 – Resultados Globais Comparativos dos M_{cr}'s entre Vigas Maciças e Casteladas para Carregamento Distribuído

CROSS SECTION		CARREGAMENTO DISTRIBUÍDO					
		PLATE BEAMS		CASTELLATED BEAMS		PLATE x CASTEL. ($\Delta\%$)	
		k = 1,0	k = 1,0	k = 1,0	k = 1,0	k = 1,0	k = 1,0
M _{cr} em KNm		kw = 1,0	kw = 0,5	kw = 1,0	kw = 0,5	kw = 1,0	kw = 0,5
IPE 240	M _{cr,EC}	27,92	39,55	25,72	37,87	7,88%	4,25%
	M _{cr,MEF} (1)	27,75	44,58	26,30	43,26	5,23%	2,96%
	$\Delta\%$ (1)	-0,61%	12,72%	2,26%	14,23%		
	M _{cr,MEF} (2)	26,40	42,23	25,04	41,02	5,16%	2,87%
	$\Delta\%$ (2)	-5,45%	6,77%	-2,66%	8,31%		
IPE 300	M _{cr,EC}	43,18	64,27	39,43	61,51	8,68%	4,29%
	M _{cr,MEF} (1)	42,55	72,26	40,58	70,21	4,63%	2,84%
	$\Delta\%$ (1)	-1,46%	12,43%	2,92%	14,14%		
	M _{cr,MEF} (2)	40,97	68,42	38,80	66,53	5,30%	2,76%
	$\Delta\%$ (2)	-5,13%	6,46%	-1,61%	8,17%		
IPE 360	M _{cr,EC}	63,89	93,82	58,78	90,02	8,00%	4,05%
	M _{cr,MEF} (1)	63,27	105,39	59,99	102,45	5,18%	2,79%
	$\Delta\%$ (1)	-0,97%	12,33%	2,06%	13,81%		
	M _{cr,MEF} (2)	60,42	99,88	57,35	97,18	5,07%	2,71%
	$\Delta\%$ (2)	-5,44%	6,46%	-2,43%	7,95%		
HE 220A	M _{cr,EC}	118,44	201,82	114,89	199,42	3,00%	1,19%
	M _{cr,MEF} (1)	115,79	226,34	112,40	223,15	2,93%	1,41%
	$\Delta\%$ (1)	-2,24%	12,15%	-2,17%	11,90%		
	M _{cr,MEF} (2)	111,47	214,13	109,60	211,64	1,68%	1,16%
	$\Delta\%$ (2)	-5,88%	6,10%	-4,60%	6,13%		
HE 260A	M _{cr,EC}	169,23	288,72	165,26	286,02	2,35%	0,94%
	M _{cr,MEF} (1)	164,71	323,43	160,34	319,24	2,65%	1,30%
	$\Delta\%$ (1)	-2,67%	12,02%	-2,98%	11,61%		
	M _{cr,MEF} (2)	158,61	305,77	156,66	302,82	1,23%	0,96%
	$\Delta\%$ (2)	-6,27%	5,90%	-5,20%	5,87%		
HE 300A	M _{cr,EC}	235,96	401,43	229,73	397,21	2,64%	1,05%
	M _{cr,MEF} (1)	230,06	449,78	223,74	443,90	2,75%	1,31%
	$\Delta\%$ (1)	-2,50%	12,04%	-2,61%	11,75%		
	M _{cr,MEF} (2)	221,62	424,93	218,74	420,77	1,30%	0,98%
	$\Delta\%$ (2)	-6,08%	5,85%	-4,78%	5,93%		

A Tabela 3 e a Tabela 4, abordam um dos principais focos pertinentes ao escopo desta pesquisa, trazendo os valores dos $M_{cr,EC}$, $M_{cr,FEM (1)}$, $M_{cr,FEM (2)}$ da viga castelada e maciça com os diferentes perfis (IPE e HE-A). Mostrando que, conforme esperado, os M_{cr} 's obtidos utilizando o MEF para as vigas casteladas são menores quando comparados com os das vigas maciças, entretanto, estas diferenças são relativamente pequenas, como pode-se observar nos gráficos abaixo.

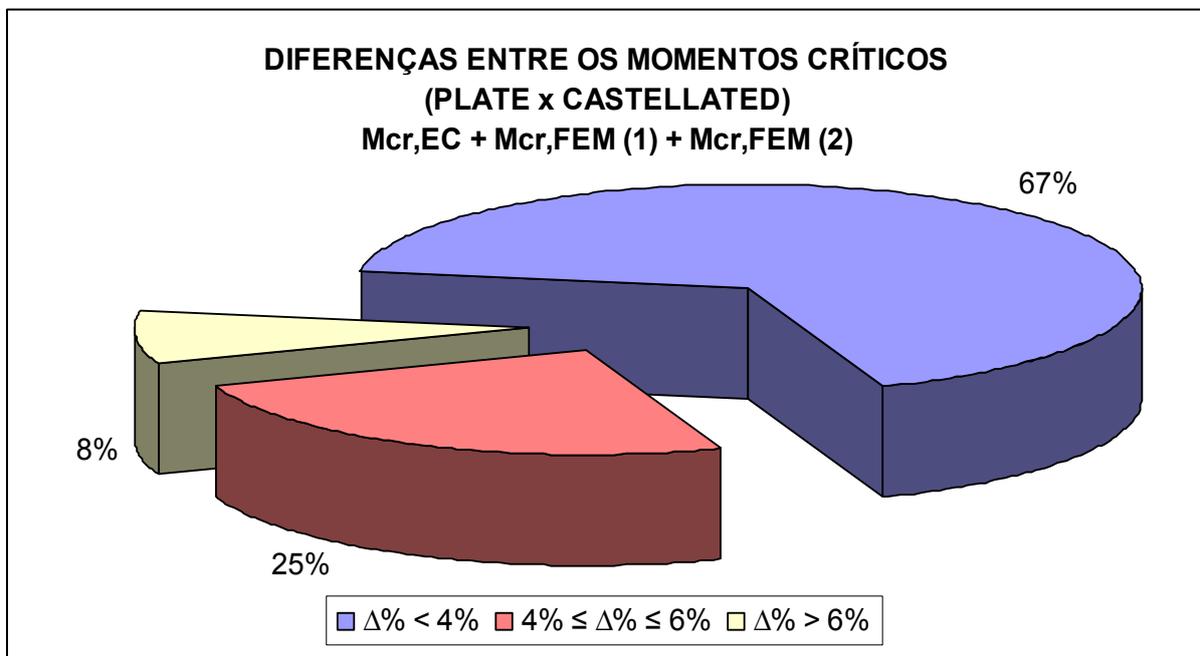


Figura 7 – Demonstrativo dos resultados percentuais totais de diferenças entre as vigas, para os intervalos percentuais discriminados no gráfico

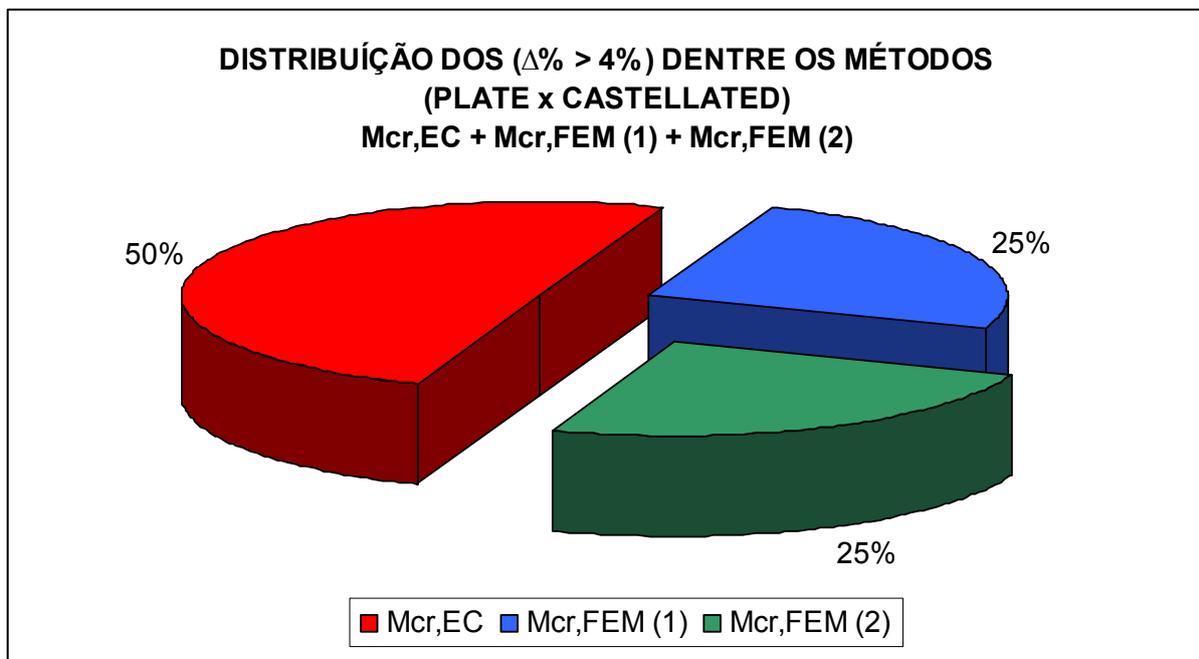


Figura 8 – Demonstrativo da distribuição dos resultados percentuais de diferenças entre as vigas maiores que 4%, entre os M_{cr} 's

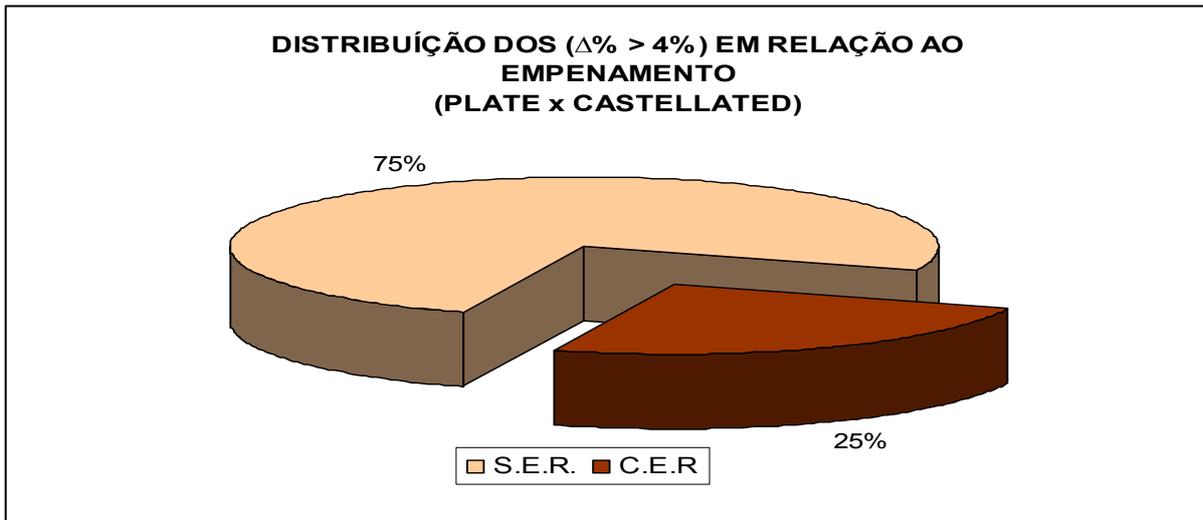


Figura 9 – Demonstrativo da distribuição dos resultados percentuais de vigas maiores que 4%, em relação ao empenamento

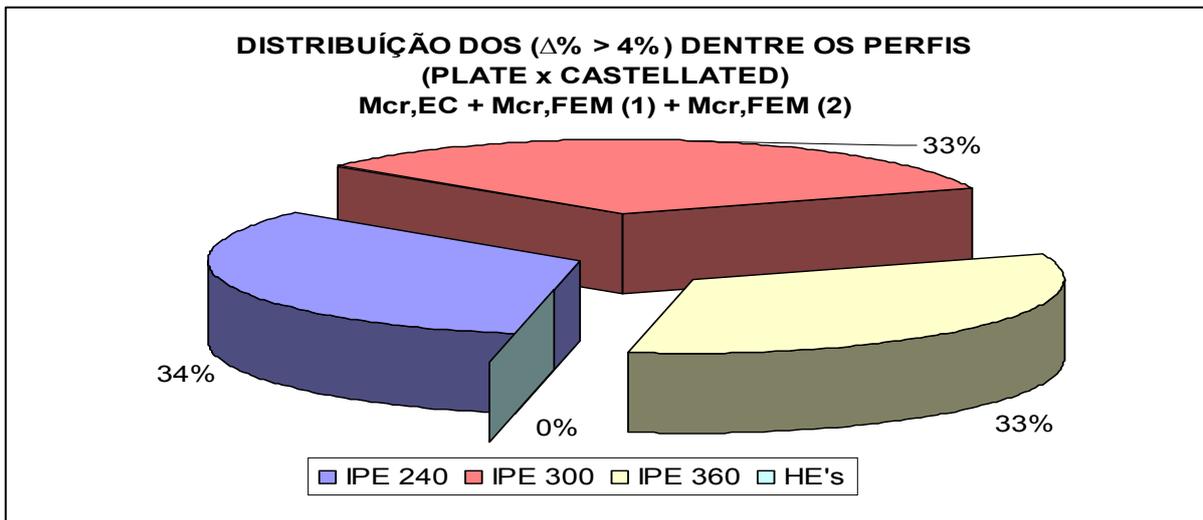


Figura 10 – Demonstrativo da distribuição dos resultados percentuais de diferenças entre as vigas maiores que 4%, entre os perfis

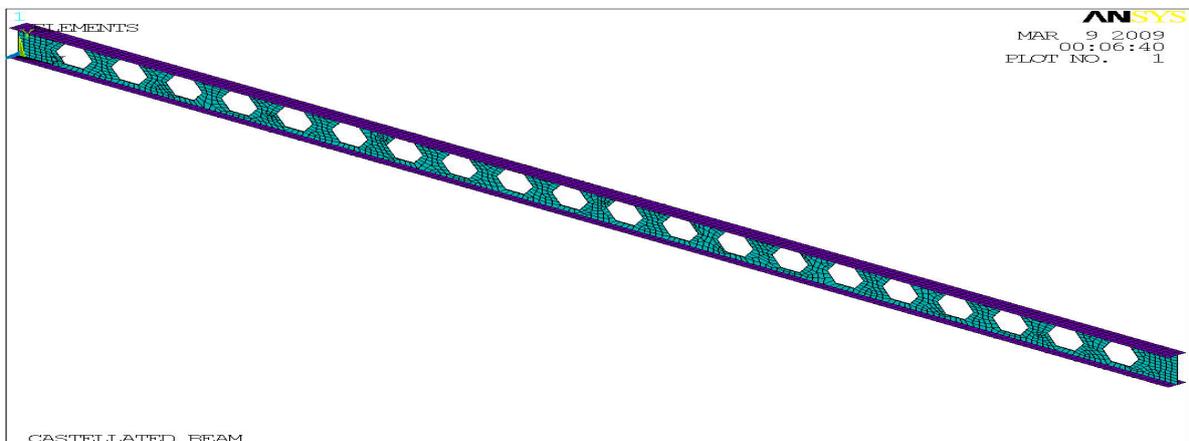


Figura 11 – Viga Castelada Objeto do Estudo

Seguem abaixo exemplos do comportamento das vigas casteladas ao se deformarem por FLT, um para cada modo de flambagem até o quarto, somente como exemplo visual, posto que, para efeito de objetivo deste estudo, não seria necessário ir além do primeiro.

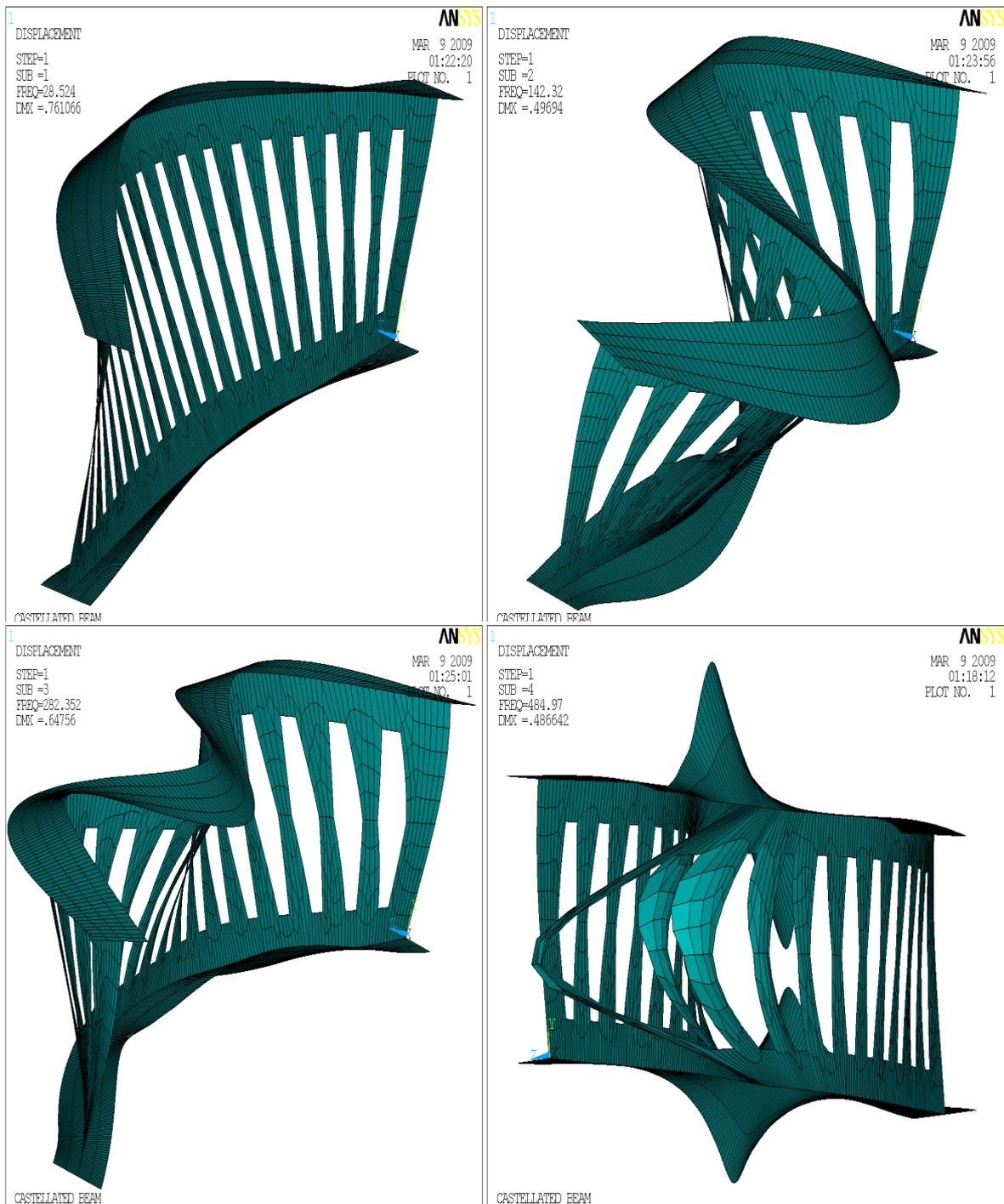


Figura 12 – Modos de Flambagem da Viga Castelada

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 Introdução

O presente trabalho estudou alguns aspectos do comportamento estrutural de vigas de aço com aberturas celulares de geometria hexagonal na alma, bem como, demonstrou que o método numérico dos elementos finitos é bastante adequado para a modelagem e previsão dos Momentos Elásticos Críticos relacionados a Flambagem Lateral por Torção, em relação às orientações e metodologias disponíveis nas normas européias que tratam deste assunto, em especial, o Eurocode 3. Algumas análises paramétricas foram realizadas e diversos aspectos pertinentes às vigas de aço com aberturas na alma (casteladas) foram avaliadas através do método numérico dos elementos finitos.

4.2 Conclusão

O método numérico dos elementos finitos demonstrou-se bastante útil e preciso na avaliação do comportamento estrutural de vigas de aço com aberturas na alma. Foi observado a acuracidade dos modelos numéricos que obtiveram na maior parte dos casos pequenos percentuais de diferenças em relação aos $M_{cr,EC}$. Notório também, que os resultados obtidos pelo modelo numérico dos $M_{cr,FEM}$ (2) superaram significativamente os $M_{cr,FEM}$ (1), para os casos que haviam restrição ao empenamento em relação à aproximação dos $M_{cr,EC}$, entretanto, foram superados ligeiramente nos que não haviam esta restrição.

A principal conclusão pertinente ao escopo desta pesquisa, diz respeito aos valores dos $M_{cr,FEM}$ (2) da viga castelada e maciça com os diferentes perfis (IPE e HE-A). Como esperado, os M_{cr} 's obtidos utilizando o MEF para as vigas casteladas são menores quando comparados com os das vigas maciças, entretanto, estas diferenças são relativamente pequenas. Posto que, conforme foi observado na Tabela 3 e Tabela 4, bem como, nos gráficos apresentados no tópico anterior, somente 8% dos M_{cr} 's, ficaram com diferenças percentuais entre as vigas casteladas e maciças acima de 6% e remetem em sua totalidade ao modelo teórico. Os resultados dos modelos numéricos, ou seja, dos $M_{cr,FEM}$ (1) e $M_{cr,FEM}$ (2), seguem a mesma tendência, haja vista que de uma maneira geral ($M_{cr,EC}$; $M_{cr,FEM}$ (1) e $M_{cr,FEM}$ (2)) somente 33% ficaram com diferenças acima de 4%. Ficando também evidente, que o perfil IPE's são os maiores responsáveis por esta diferença ligeiramente maior entre as vigas, já que dos 33% que ficaram acima de 4% (diferenças percentuais de M_{cr} 's entre as vigas casteladas e maciças), 100% das ocorrências são em função destes perfis.

Pode-se concluir ainda, que para os casos considerados, os M_{cr} 's referentes à FLT, podem ser calculados da mesma forma para as vigas casteladas e maciças, somente levando-se em consideração as diferenças oriundas das características geométricas das seções transversais devido às aberturas celulares na alma. Entretanto, certo dilema ainda permanece em relação à escolha da curva de flambagem, posto que, em EC3 (EN 2005) não apresenta instruções e orientações de cálculo para as vigas casteladas. Conservadoramente, a linha de flambagem "d" para "Outras seções transversais" podem ser utilizadas. Uma análise mais precisa da curva de flambagem requer um cálculo detalhado baseado numa análise estática não linear levando-se em consideração ambos os efeitos dos comportamentos não lineares do material e da geometria, bem como, do acréscimo de carregamento (I.Radic et al., 2008).

Sendo assim, não foram constatadas no presente estudo 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 da utilização das aberturas de diversas geometrias nas almas das vigas, justificam com folgas suas aplicações.

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS

Ansys, Inc. Theory Reference (version 10.0), 2005.

Eurocode 3, ENV 1993-1-3: Design of steel structures: Part 1.1. Genetal rules and rules for buildings, 1992, and Amendment A2 of Eurocode 3: Annex N “Openings in webs”. British Standards Institution, 1998.

Eurocode 3, EN 1993-1-1:2005: Design of steel structures: Part 1.1. Genetal rules and rules for buildings, 2005.

I.Radic, D. MarkulaK, D.Varevac, da “University of J.J. Strossmayer, Faculty of Civil Engineering”, Osijek, Croatia, Numerical Simulation of Lateral Stability of Castellated Beams, EUROSTEEL 2008, Graz, Austria, September 2008, pgs 1593 à 1598.

Rodrigues, F. Comportamento Estrutural de Vigas de Aço com Abertura na Alma.2007. 177f. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2007.

Simões, R. A. D., 2007, Manual de Dimensionamento de Estruturas Metálicas, CMM – Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista, 2º Ed., Fevereiro de 2007.

ANEXO A

Lista de Abreviaturas

ANSYS	Programa Ansys 10.0
APDL	Ansys Parametric Desing Language
EC3	European Committee for Standardisation – Desing of Steel Structures
EC3 (ENV 1992)	(EC3 Parte 1.1, Anexo N, 1998)
EC3 (EN 2005)	(EC3 Parte 1.1, 2005)
FLT	Flambagem Lateral por Torção
Mcr	Momento Elástico Crítico
Mcr,EC	Momento Elástico Crítico Teórico calculado conforme EC3 (ENV 1992), através da expressão (1), (I.Radic et al., 2008)
Mcr,MEF (1)	Momento Elástico Crítico obtido pelo Método dos Elementos Finitos, em modelo numérico (I.Radic et al., 2008)
Mcr,MEF (2)	Momento Elástico Crítico obtido pelo Método dos Elementos Finitos, em modelo numérico desenvolvido pelo presente trabalho, através do ANSYS (Ansys 10.0, 2005).
MEF = FEM	Método Numérico dos Elementos Finitos