

ANÁLISE DAS CURVAS DE FLAMBAGEM DISTORCIONAL DE VIGAS DE AÇO EM PERFIL FORMADO À FRIO VIA MRD E GBTUL

Emerson Rodrigues da Silva

emersonrodrigues.72@gmail.com

Universidade Federal de Uberlândia

Av. João Naves de Ávila, 212 - Santa Mônica, Uberlândia - 38408-100, Minas Gerais, Brazil

Gregório Sandro Vieira

gregorio.vieira@ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia

Av. João Naves de Ávila, 212 - Santa Mônica, Uberlândia - 38408-100, Minas Gerais, Brazil

Abstract. Due to the wide variety of transverse shapes as well as their good mass / strength ratio, cold formed steel (CFS) components are gaining prominence among metal structures. However, this material is more susceptible to local, distorted and global buckling. The Direct Strength Method (DSM) requires obtaining the full limb buckling critical loads and applying these data in conjunction with a series of resistance curves to determine the final cross section strength. This study aims to investigate the behavior of different buckling modes for a supported single beam CFS, and to compare the results obtained through DSM and GBTUL (program responsible for numerical computational analysis). To obtain the data, the Finite Element Method (FEM) was used, which, in turn, uses the geometries and flow stresses to be studied in this work, as well as the understanding of the influence that the bending moment diagram has on the behavior. buckling and post buckling. For this analysis, a cold-formed, non-drilled, multi-dimension steel member design was chosen. From the analyzes presented in this paper it was noticed that the distortive curves available in the Brazilian standard underestimate the final strength of the bars simply supported by cold formed steel members when subjected to uniform bending.

Keywords: Buckling, Cold-formed steel; Direct Strength Method; Distortional curves; Finite Element Method.

1 Introdução

Nas últimas décadas houve uma grande evolução da indústria da construção civil impulsionando o desenvolvimento de novas tecnologias, que buscam materiais de baixos custos, versáteis e de alta qualidade. Os perfis de aço formados a frio (PFF) são um material atrativo dentro da construção civil por apresentarem alta relação resistência/peso das estruturas, melhor aproveitamento de espaço no canteiro de obras e grande facilidade de obtenção de seções abertas, devido a sua maleabilidade, lhe conferindo grande empregabilidade em obras que necessitem de uma maior liberdade arquitetônica. Dentre as seções mais comuns em perfis formados a frio, tem-se por exemplo o U enrijecido e a seção tipo rack ou garrafa. Tais perfis são apresentados na Fig 1.

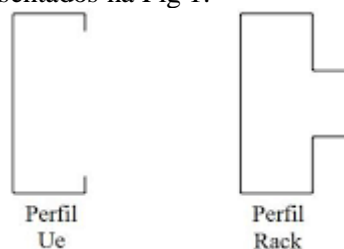


Figura 1 Tipos mais comuns de PFF

Por se tratar de perfis desenvolvidos a partir da dobra de chapas finas, estes estão mais suscetíveis aos fenômenos de flambagem, com destaque para flambagem local, global e distorcional. A flambagem afeta diretamente a resistência do PFF, sendo assim necessária a determinação dos possíveis modos de flambagem e a obtenção dos respectivos esforços críticos. Com o avanço tecnológico e desenvolvimento de computadores com processadores mais potentes, os métodos numéricos, principalmente o método dos elementos finitos (MEF), ganham cada vez mais espaço no mercado se notabilizando pela eficiência no processamento de estruturas bastante complexas.

Para a determinação de tais esforços pode-se fazer uso de programas de computador como o ABAQUS, ANSYS e GBTUL ou os procedimentos normativos descritos na norma brasileira ABNT NBR 14762:2010 [1] que define os cálculos necessários para o dimensionamento de perfis de paredes finas. Os programas de computador se baseiam no Método dos Elementos Finitos, já grande parte das normas de dimensionamento se baseiam no Método da Largura Efetiva. Nem tão recente, o Método da Seção Efetiva desenvolvido por Batista [2], e foi incorporado a norma brasileira em sua última versão. Além destes o Método da Resistência Direta desenvolvido por Schafer [3], também é apresentado na NBR 14762:2010, e na norma americana AISI S100-16 [4].

1.1 Flambagem Local

Segundo Santos [5], flambagem local é o fenômeno de instabilidade de elementos estruturais bidimensionais, como chapas componentes de PFF para barras metálicas. Os elementos envolvidos nesse tipo de instabilidade sofrem translações normais ao seu plano médio configurando assim a flambagem local. A Figura 1.1 apresenta um exemplo de flambagem local em perfis tipo rack e U enrijecido.

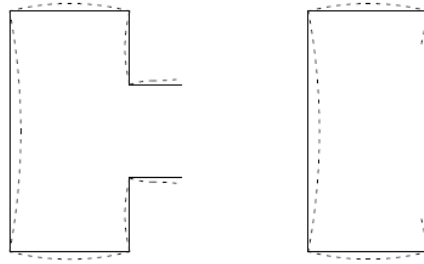


Figura 1.1 Flambagem Local em seções tipo rack e U enrijecido
Fonte: Faria [6].

1.2 Flambagem Global

Segundo Melo [7], flambagem global é um tipo de instabilidade que ocorre, de modo geral, em barras de comprimento longo e está relacionado às propriedades geométricas da seção do perfil, à excentricidade da carga aplicada e às condições de contorno da barra.

1.3 Flambagem distorcional

Segundo Depolli [8], flambagem distorcional é um tipo de instabilidade onde ocorre a flexão de um ou mais elementos juntamente com deslocamento das arestas comuns desses elementos. O modo distorcional é caracterizado pela distorção da geometria original da seção. A Figura 1.3 apresenta as condições de flambagem distorcional em PFF segundo a NBR 14762:2010.

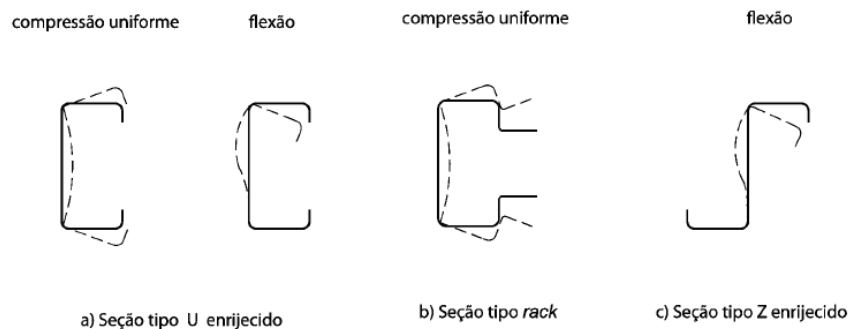


Figura 1.3 Exemplos de flambagem distorcional na compressão e flexão simples

1.4 Método dos Elementos Finitos

Neste método a geometria do elemento é subdividida em pequenas partes, chamados elementos. Esta divisão da geometria em elementos permite resolver problemas complexos, isso porque este é subdividido em problemas mais simples. Os elementos são conectados por nós e esta estrutura formada por nós e elementos é chamada de malha, como mostrado na Fig. 1.4. Estas divisões podem ter diferentes formas em função do tipo e da dimensão do problema.

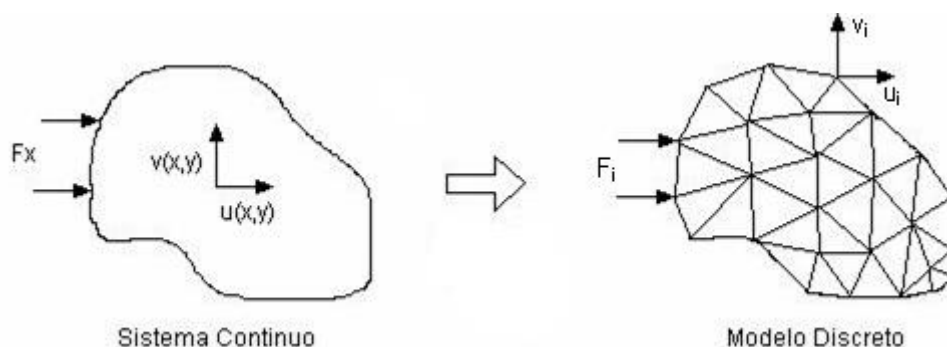


Figura 1.4 Discretização do problema via elementos finitos

Nesta investigação a análise de estabilidade da flambagem se dá pela utilização do programa GTul, sendo este, ferramenta primordial para a obtenção do modo de flambagem distorcional.

1.5 Método da Resistência Direta

O MRD foi inicialmente formulado para colunas submetidas à compressão. Este método tem-se mostrado simples e preciso por, através de cálculos diretos, dimensionar barras submetidas à compressão centrada e à flexão simples. O cálculo das tensões críticas via MRD se utiliza das dimensões da seção bruta e realiza uma interação entre os elementos que a compõe, mantendo suas condições de equilíbrio e compatibilidade.

Em sua investigação numérica e experimental, Yu e Schafer [9] obtiveram resultados que foram utilizados para calibração da curva codificada distorcional do MRD. Através de análise elástica, o método obteve os valores críticos para os momentos de flambagem distorcional, tais valores são fundamentais para o dimensionamento por meio da curva normativa do MRD. A curva apresentada está presente na norma americana AISI (*American Iron and Steel Institute*). Nos Estados Unidos tal curva é usada para vigas submetidas à flexão simples, simétricas em relação ao eixo de flexão e com escoamento inicial nas fibras mais comprimidas.

A ABNT NBR 14762:2010 [1] faz uso do MRD, onde a curva distorcional do MRD se dá por:

$$M_{Rdist} = M_y \quad \text{para } \lambda_{dist} \leq 0,673. \quad (1)$$

$$M_{Rdist} = (1 - 0,22\lambda^{-1})\lambda^{-1}M_y \quad \text{para } \lambda_{dist} > 0,673. \quad (2)$$

Onde, M_{Rdist} refere-se ao valor característico do momento fletor resistente, associado a flambagem distorcional, M_y é o seu momento de escoamento e λ_{dist} é o índice de esbeltez distorcional da barra.

1.6 Teoria da viga Generalizada (GBT)

A GBT foi originalmente desenvolvida por Schardt [10] sendo grande responsável pelo aprimoramento do entendimento do modo de flambagem distorcional. Segundo Silvestre e Camotim [11] a GBT tem-se provado uma ferramenta muito eficiente e elegante de investigação do comportamento de flambagem de perfis formados à frio. A partir da teoria da viga generalizada, Bebiano *et. al.* [12] desenvolveram o programa GTul, com o intuito de determinar os modos de flambagem e tensões críticas, tendo como diferencial a possibilidade de decomposição modal.

O programa GTul, tendo como princípio a teoria generalizada de vigas (GBT), é um dos métodos numéricos adotados neste trabalho. Segundo Faria [6] a ferramenta permite a avaliação dos modos de flambagem e das cargas críticas da seção para diversos comprimentos da viga.

Na análise de flambagem pelo programa GTul tem-se como resultado uma curva de carga de flambagem pelo comprimento da barra. Segundo Depolli [8] o primeiro ponto de mínimo da curva corresponde ao modo flambagem crítica local, o segundo ponto de mínimo da curva irá corresponder ao

modo de flambagem crítica distorcional. O colapso devido à flambagem global estará associada aos maiores comprimentos.

2 Objetivos

Estudos anteriores mostram que a atual curva distorcional se mostra conservadora em relação a resistência última das barras simplesmente apoiadas de perfis formados à frio. Fazendo-se necessário a investigação por meio de programas numéricos computacionais a investigação sobre a curva distorcional codificada do MRD a partir dos valores de momento último distorcional.

O presente trabalho trata do estudo do modo de flambagem distorcional em seções tipo rack sem furos, sob flexão simples, de forma a realizar um comparativo entre as curvas de flambagem obtidas a partir do método da resistência direta presente na ABNT NBR 14762:2010 [1] e das obtidas com o uso do programa GBTul.

2.1 Objetivos Secundário

Objetiva-se entender a relação entre a variação das dimensões da seção transversal (variável do presente trabalho) e as cargas críticas de flambagem obtidas pelos dois métodos já citados anteriormente.

Também serão analisados os fatores que influenciam nas diferenças de cargas críticas de flambagem de um modelo de viga para outro.

3 Metodologia

A Metodologia adotada para a obtenção dos resultados constitui-se das seguintes etapas: seleção das vigas, definição dos apoios e carga aplicada para análise computacional, análise linear de estabilidade e obtenção das cargas de flambagem via programa GBTul, obtenção da curva distorcional do MRD presente na ABNT NBR 14762:2010 [1] e por fim análise comparativa entre os valores normativos e os encontrados via programa computacional.

3.1 Seleção das Vigas

Para esta investigação foram selecionadas 8 vigas de aço em perfis formados a frio tipo rack sem furos com 3 metros de comprimento. As vigas foram chamadas de modelos e enumeradas de 1 a 8. A Figura 3.1 apresenta os elementos da seção transversal de um perfil tipo rack.

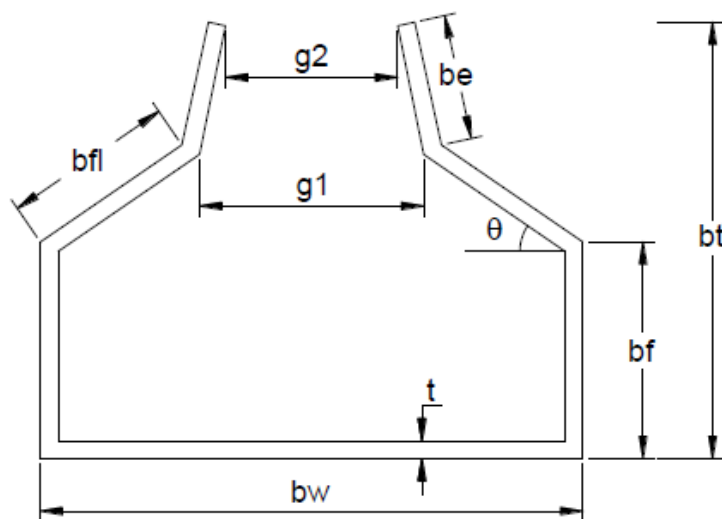


Figura 3.1 Elementos da seção transversal do perfil rack

No presente trabalho foram utilizadas vigas com diferentes seções transversais (variável a ser analisada) a fim de se obter uma relação entre a carga de flambagem e seção transversal. Na Figura 3.1 apresentada anteriormente nota-se que o elemento da seção transversal “be” possui uma angulação, para este artigo considerou-se tal ângulo como 0°. A Tabela 1 apresenta as seções transversais das vigas estudadas.

Tabela 1 Seções transversais das vigas estudadas

Modelos de viga	bw (mm)	bf (mm)	bfl (mm)	be (mm)	θ_1 (°)	θ_2 (°)	t (mm)	Área (cm ²)	I (cm ⁴)
1	100	40	35	25	32	0	1,5	4,5	67,64
2	96	35	32	23	32	0	1,5	4,14	57,13
3	94	32	29	20	32	0	1,5	3,84	51,22
4	92	30	27	18	32	0	1,5	3,63	46,57
5	90	30	26	18	32	0	1,5	3,57	44,06
6	88	28	24	16	32	0	1,5	3,36	39,78
7	85	28	23	16	32	0	1,5	3,285	36,49
8	80	30	22	15	32	0	1,5	3,21	32,20

A partir dos valores apresentados na Tab.1, foram determinados a área e o momento de inércia das 8 vigas estudadas. Para o presente estudo foi-se adotado para todos os modelos de vigas um módulo de elasticidade E de 210 GPa, coeficiente de Poisson de 0,3 e uma massa específica de 7850 Kg/cm³. A Tabela 2 apresenta os valores de módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e massa específica.

Tabela 2 Propriedades das vigas estudadas

Modelos	E (GPa)	ν	ρ (Kg/cm ³)
1	210	0,3	7850
2	210	0,3	7850
3	210	0,3	7850
4	210	0,3	7850
5	210	0,3	7850
6	210	0,3	7850
7	210	0,3	7850
8	210	0,3	7850

3.2 Definição dos Apoios e Momento fletor aplicado

Para o presente trabalho foi-se determinado que as vigas seriam bi-apoiadas e submetidas à um momento fletor de 100 kNm em ambas as extremidades da viga configurando uma situação de flexão

simples. A Figura 3.2 mostra um exemplo, retirado do programa GBTul, da configuração das vigas junto aos apoios e submetidas ao momento fletor nas extremidades.



Figura 3.2 Configuração de viga bi-apoiada submetida a momento fletor nas extremidades

4 Resultados e Discussões

Os resultados apresentados neste trabalho foram coletados a partir de análises realizadas no programa GBTul e no Método da Resistência Direta (MRD) que se encontra na ABNT NBR 14762:2010 [1].

4.1 Análises via GBTul

A partir dos dados já apresentados anteriormente foi-se possível obter, através do programa GBTul, a curva de carga de flambagem *versus* comprimento para cada uma das 8 vigas estudadas. A Figura 4.1 e as Tabelas 3, 4 apresentam os valores encontrados de carga de flambagem pelos comprimentos analisados pelo programa.

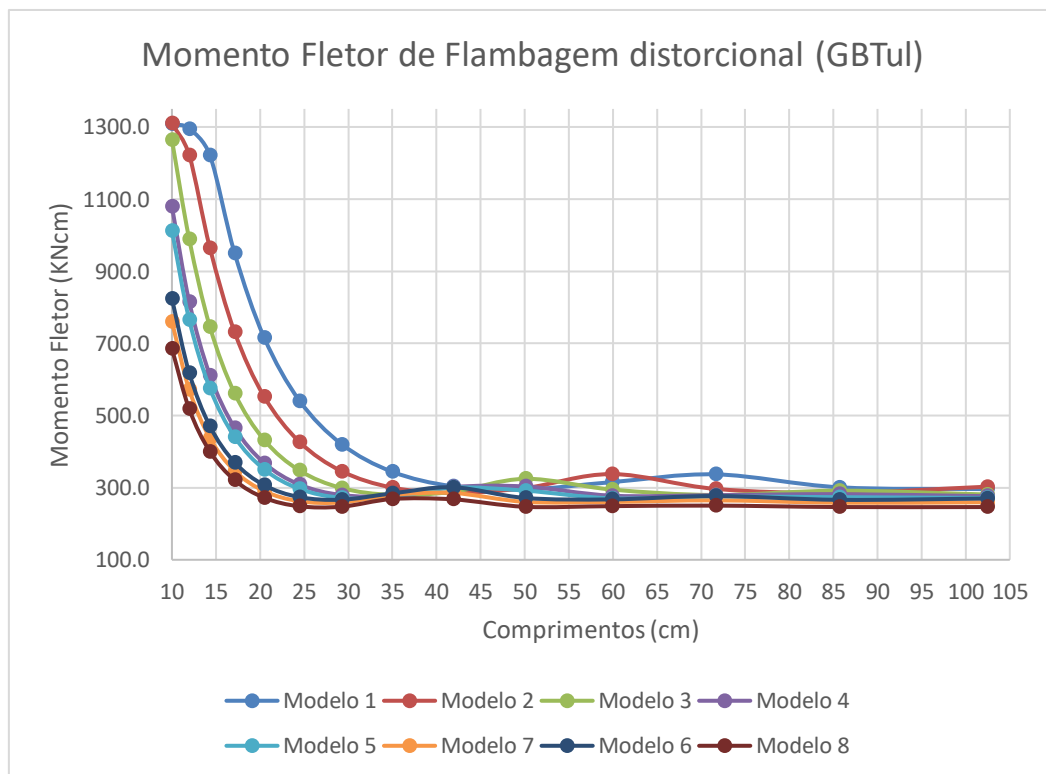


Figura 4.1 Cargas de flambagem dos modelos de vigas

Tabela 3 Cargas de flambagem dos modelos de vigas 1 ao 4

L (cm)	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
	P. Crit. (kNcm)	P. Crit. (kNcm)	P. Crit. (kNcm)	P. Crit. (kNcm)
10	1308,8	1310,2	1264,4	1079,3
11,96	1295,1	1221,7	989,0	815,6
14,304	1221,4	964,8	746,1	611,7
17,109	949,9	731,0	561,6	466,0
20,463	715,6	552,0	432,1	368,2
24,474	540,7	426,5	347,4	308,3
29,272	420,0	345,2	298,6	279,4
35,01	343,8	300,0	279,9	277,5
41,874	303,8	285,4	288,6	301,8
50,082	294,9	298,9	324,5	303,1
59,9	315,3	337,6	294,7	277,7
71,643	336,8	296,5	279,6	279,1
85,687	301,0	285,6	291,6	281,8
102,48	295,9	302,7	281,0	276,3
122,57	307,5	285,8	285,9	276,8
146,6	294,5	294,0	279,9	280,2
175,34	299,1	286,5	280,8	278,3
209,71	297,7	286,2	281,7	278,7
250,82	295,8	287,0	282,2	279,6
300	296,5	288,1	283,5	247,1

Tabela 4 Cargas de flambagem dos modelos de vigas 5 ao 8

L (cm)	Modelo 5	Modelo 6	Modelo 7	Modelo 8
	P. Crit. (kNcm)	P. Crit. (kNcm)	P. Crit. (kNcm)	P. Crit. (kNcm)
10	1012,5	823,9	760,0	685,1
11,96	765,5	618,2	571,8	518,0
14,304	575,7	470,4	437,3	400,1
17,109	440,6	369,9	346,5	320,8
20,463	350,6	306,8	290,3	271,9
24,474	296,4	273,7	262,3	248,3
29,272	271,6	266,6	259,1	247,3
35,01	273,0	284,1	279,6	268,5
41,874	300,0	301,0	285,3	267,6
50,082	291,7	271,4	260,6	246,9
59,9	270,4	267,4	260,4	248,8
71,643	275,1	276,8	264,8	250,2
85,687	273,6	266,2	258,2	246,2
102,48	271,4	269,9	259,6	246,2
122,57	269,9	269,0	262,3	249,0
146,6	272,4	267,3	259,8	247,9
175,34	273,5	267,8	260,2	248,3
209,71	273,2	269,5	262,1	248,8
250,82	272,9	251,8	233,9	221,4
300	233,3	183,6	170,9	162,4

A partir da Figura 4.1 observa-se que os valores das cargas de flambagem diminuem com o aumento do comprimento da viga a ser analisada, este fato foi constatado em todas as vigas. Isto acontece devido ao fato da carga de flambagem ser inversamente proporcional a esbeltez da peça. Para esta investigação, o programa GBTul analisou todas as vigas partindo de um comprimento de 10 cm até o comprimento 300 cm, contudo, a partir dos 100 cm não houve uma grande variação dos valores críticos de flambagem sendo assim, a fim de se ter uma melhor ideia visual do comportamento das flambagens em cada viga, a Fig. 4.1 delimita o comprimento analisado partindo dos 10 até 105 cm.

Observa-se nas Tabelas 3 e 4 que os valores críticos de flambagem diminuem de um modelo para o outro, no modelo de viga 1 por exemplo, para o comprimento de 10 cm, tem-se um valor crítico de flambagem de 1308,8 **kNcm** e já no modelo de viga 8, para o mesmo comprimento, o valor crítico de flambagem diminui bruscamente para 685,1 **kNcm**, diminuindo o valor crítico de flambagem da viga 1 pra viga 8 em 623,7 **kNcm**, tal fato é observado em todos os comprimentos. Em todas as vigas as análises foram realizadas variando apenas as seções transversais das peças, mantendo constante os valores do momento fletor aplicado e comprimentos das vigas e assim a área das seções transversais bem como os momentos de inércia também não permaneceram constantes. Tal diferença, encontrada no comparativo entre os modelos de viga, ocorre devido a variação dos valores da seção transversal de cada viga, no exemplo apresentado o modelo de viga 1 é o modelo que apresenta os maiores valores de seção transversal e assim, de área e inércia, já o modelo de viga 8 apresenta os menores valores de seção transversal.

4.2 Método da Resistência Direta (MRD)

A ABNT NBR 14762:2010 [1] apresenta o método da Resistência Direta usada nesta investigação. A Tabela 5 apresenta os valores do módulo de resistência elástico da seção bruta (W), resistência ao escoamento do aço (f_y) e o momento de escoamento do aço apresentado como produto entre W e f_y .

Tabela 5 Módulo de resistência elástico e Escoamento do aço

Modelos	W (cm^3)	F_y (kN/cm^2)	WF_y (kNcm)
1	13,53	25	338,21
2	11,90	25	297,55
3	10,90	25	272,43
4	10,12	25	253,08
5	9,79	25	244,77
6	9,04	25	226,02
7	8,59	25	214,67
8	8,05	25	201,25

Para presente investigação foi utilizado o aço MR-250 (A36), com uma tensão de escoamento do aço foi de 250 MPa, valor previsto na ABNT NBR 14762:2010 [1]. A partir dos valores apresentados na Tab. 5 foi possível obter os valores de índices de esbeltez. A Tabela 6 apresenta os valores de esbeltez obtidos.

A partir da Tab. 6 observa-se que a esbeltez dos modelos de vigas é diferente para os mesmos valores de comprimento, isso se deve à variação de seção transversal existente entre os modelos de viga, variando assim o módulo resistente elástico da seção bruta.

Depois do cálculo da esbeltez, foi possível o cálculo dos valores de carga de flambagem crítica para cada um dos comprimentos dos modelos de viga, e assim foi possível a determinação da curva de normativa de flambagem do MRD. As Tabelas 7 e 8 apresentam os valores encontrados de flambagem crítica.

Tabela 6 Índices de Esbeltez via MRD

L (cm)	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6	Modelo 7	Modelo 8
	λ	λ	λ	λ	λ	λ	λ	λ
10	0,508	0,477	0,464	0,484	0,492	0,524	0,531	0,542
11,96	0,511	0,494	0,525	0,557	0,565	0,605	0,613	0,623
14,304	0,526	0,555	0,604	0,643	0,652	0,693	0,701	0,709
17,109	0,597	0,638	0,696	0,737	0,745	0,782	0,787	0,792
20,463	0,687	0,734	0,794	0,829	0,836	0,858	0,860	0,860
24,474	0,791	0,835	0,886	0,906	0,909	0,909	0,905	0,900
29,272	0,897	0,928	0,955	0,952	0,949	0,921	0,910	0,902
35,01	0,992	0,996	0,986	0,955	0,947	0,892	0,876	0,866
41,874	1,055	1,021	0,972	0,916	0,903	0,867	0,867	0,867
50,082	1,071	0,998	0,916	0,914	0,916	0,913	0,908	0,903
59,9	1,036	0,939	0,961	0,955	0,951	0,919	0,908	0,899
71,643	1,002	1,002	0,987	0,952	0,943	0,904	0,900	0,897
85,687	1,060	1,021	0,967	0,948	0,946	0,921	0,912	0,904
102,48	1,069	0,991	0,985	0,957	0,950	0,915	0,909	0,904
122,57	1,049	1,020	0,976	0,956	0,952	0,917	0,905	0,899
146,6	1,072	1,006	0,986	0,950	0,948	0,920	0,909	0,901
175,34	1,063	1,019	0,985	0,954	0,946	0,919	0,908	0,900
209,71	1,066	1,020	0,983	0,953	0,947	0,916	0,905	0,899
250,82	1,069	1,018	0,982	0,951	0,947	0,947	0,958	0,953
300	1,068	1,016	0,980	1,012	1,024	1,110	1,121	1,113

Tabela 7 Cargas de flambagem dos modelos de vigas 1 ao 4

L (cm)	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
	P. Crit. (kNcm)	P. Crit. (kNcm)	P. Crit. (kNcm)	P. Crit. (kNcm)
10	338,2	297,6	272,4	253,1
11,96	338,2	297,6	272,4	253,1
14,304	338,2	297,6	272,4	253,1
17,109	338,2	297,6	267,6	240,9
20,463	334,5	283,8	248,0	224,3
24,474	308,7	262,4	231,2	211,5
29,272	284,5	244,5	219,5	204,4
35,01	265,3	232,8	214,6	204,0
41,874	253,7	228,6	216,9	210,0
50,082	250,9	232,5	225,9	210,3
59,9	257,2	242,7	218,5	204,0
71,643	263,4	231,8	214,5	204,4
85,687	252,8	228,7	217,7	205,1
102,48	251,3	233,5	214,9	203,7
122,57	254,8	228,7	216,2	203,8
146,6	250,8	231,1	214,6	204,6
175,34	252,3	228,9	214,8	204,2
209,71	251,8	228,9	215,0	204,3
250,82	251,2	229,1	215,2	204,5
300	251,4	229,4	215,5	195,7

Tabela 8 Cargas de flambagem dos modelos de vigas 5 ao 8

L (cm)	Modelo 5	Modelo 6	Modelo 7	Modelo 8
	P. Crit. (kNcm)	P. Crit. (kNcm)	P. Crit. (kNcm)	P. Crit. (kNcm)
10	244,8	226,0	214,7	201,2
11,96	244,8	226,0	214,7	201,2
14,304	244,8	222,6	210,2	195,7
17,109	231,5	207,8	196,5	183,5
20,463	215,8	195,8	185,8	174,1
24,474	204,1	188,5	179,6	168,9
29,272	198,1	186,8	178,8	168,7
35,01	198,4	190,9	183,5	173,4
41,874	205,0	194,6	184,7	173,2
50,082	203,0	188,0	179,2	168,6
59,9	197,8	187,0	179,1	169,0
71,643	199,0	189,2	180,2	169,4
85,687	198,6	186,7	178,6	168,4
102,48	198,0	187,6	178,9	168,4
122,57	197,7	187,4	179,6	169,1
146,6	198,3	187,0	179,0	168,8
175,34	198,6	187,1	179,1	168,9
209,71	198,5	187,5	179,5	169,0
250,82	198,4	183,2	172,6	162,4
300	187,6	163,3	153,9	145,1

A partir das tabelas 7 e 8 observa-se um comportamento semelhante dos valores obtidos pelo programa GBTul onde, os valores das cargas de flambagem diminuem com o aumento do comprimento da viga a ser analisada. Como já explicado anteriormente, com o aumento da esbeltez dos modelos de vigas os valores de cargas de flambagem crítica diminuem, mostrando que a viga perde resistência à flambagem com o aumento do seu comprimento e com a redução de sua área transversal. A Figura 4.2 apresenta os valores em gráfico e a partir destes observa-se que todas as vigas possuem um comportamento semelhante, partindo de valores altos de carga de flambagem para comprimentos curtos, chegando a valores baixos de carga de flambagem para comprimentos maiores.

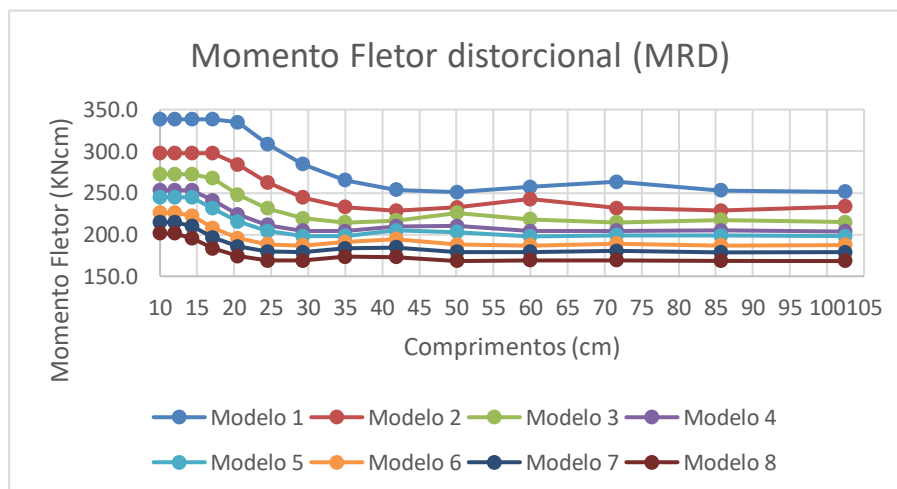


Figura 4.2 Cargas de flambagem dos modelos de vigas

4.3 GBTull versus Curva normativa do MRD

Através dos valores de carga de flambagem apresentados nos capítulos anteriores foi possível realizar um comparativo entre os dois métodos e avaliar se existe uma superestimação dos valores normativos.

As figuras 4.3.1 a 4.3.8 apresentam as curvas de flambagem para cada um dos modelos de vigas estudados neste trabalho.

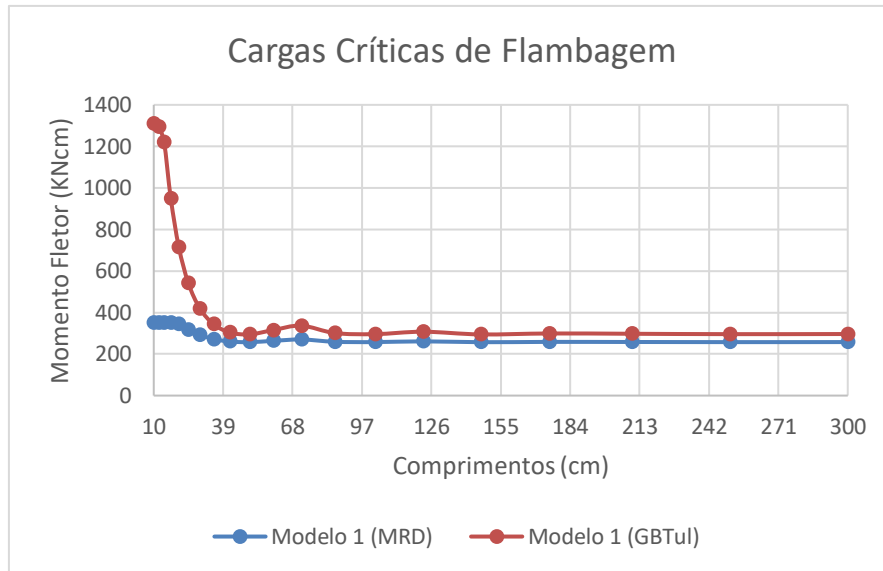


Figura 4.3.1 Resultados numéricos e estimativas via curva codificada do MRD (modelo 1)

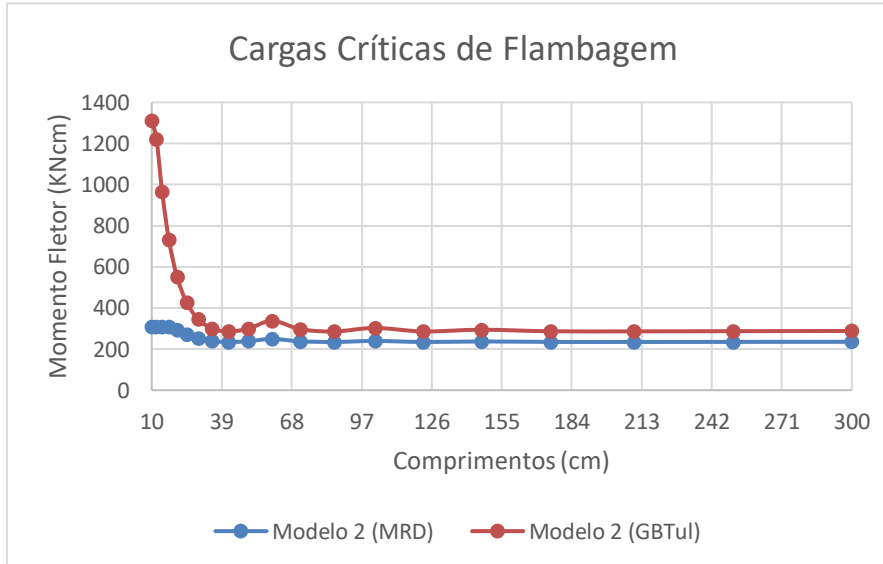


Figura 4.3.2 Resultados numéricos e estimativas via curva codificada do MRD (modelo 2)

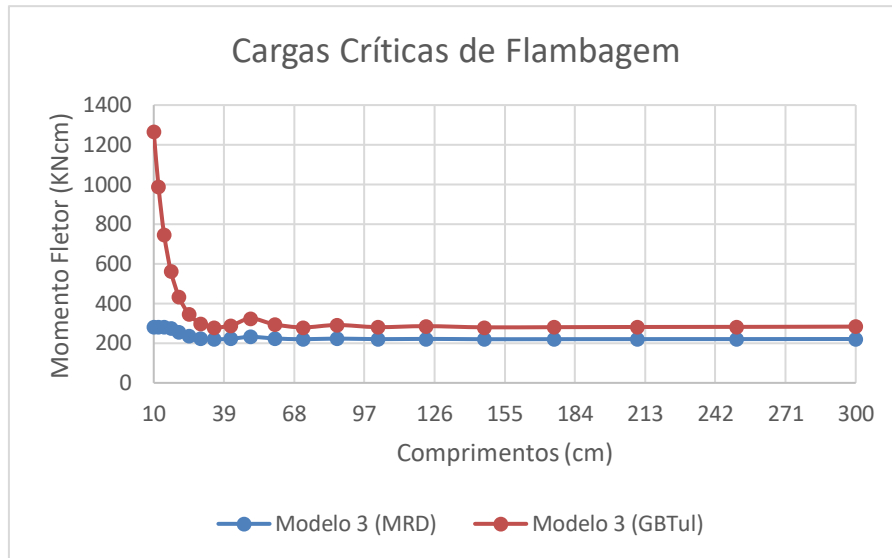


Figura 4.3.3 Resultados numéricos e estimativas via curva codificada do MRD (modelo 3)

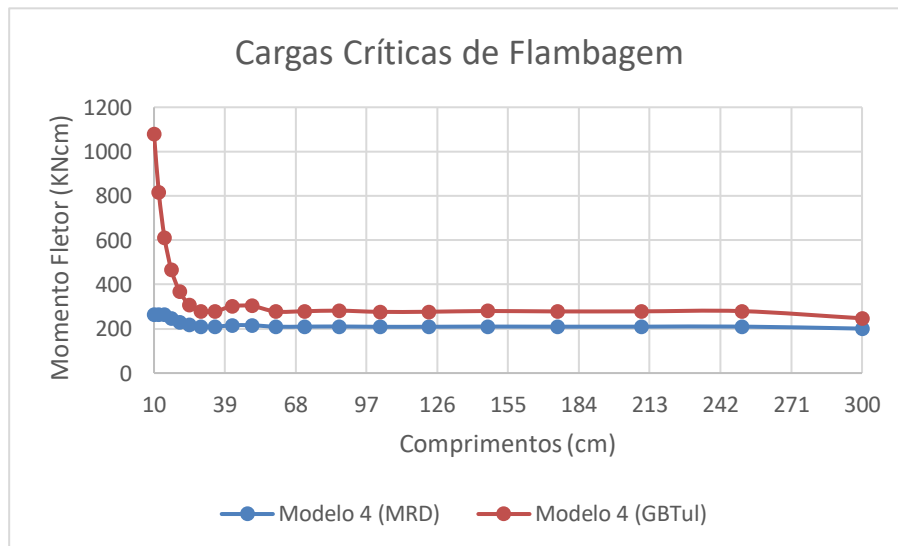


Figura 4.3.4 Resultados numéricos e estimativas via curva codificada do MRD (modelo 4)

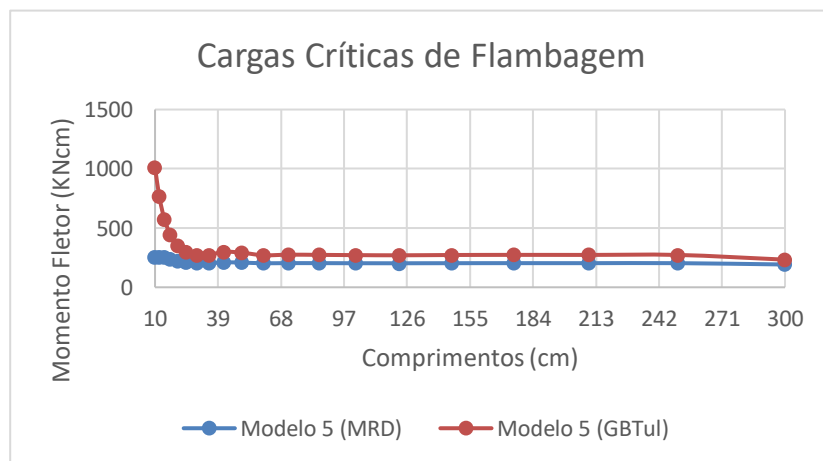


Figura 4.3.5 Resultados numéricos e estimativas via curva codificada do MRD (modelo 5)

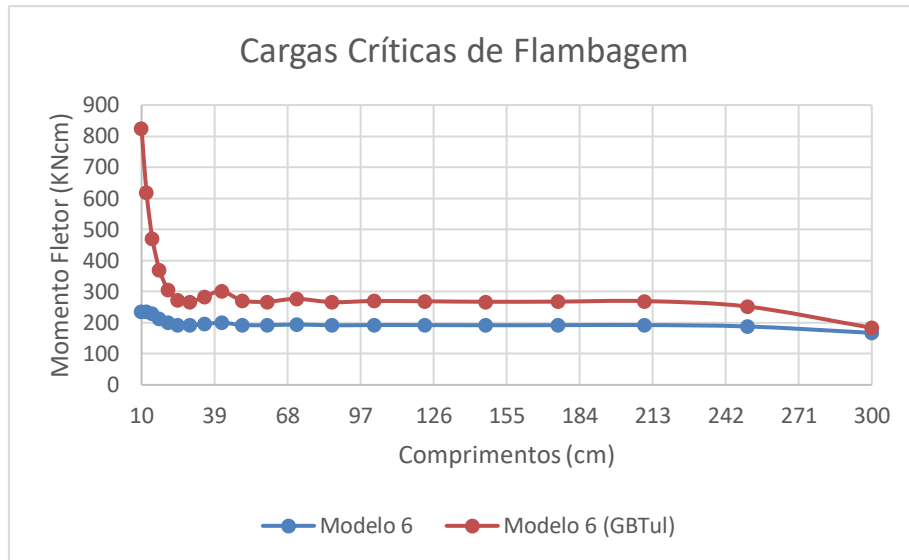


Figura 4.3.6 Resultados numéricos e estimativas via curva codificada do MRD (modelo 6)

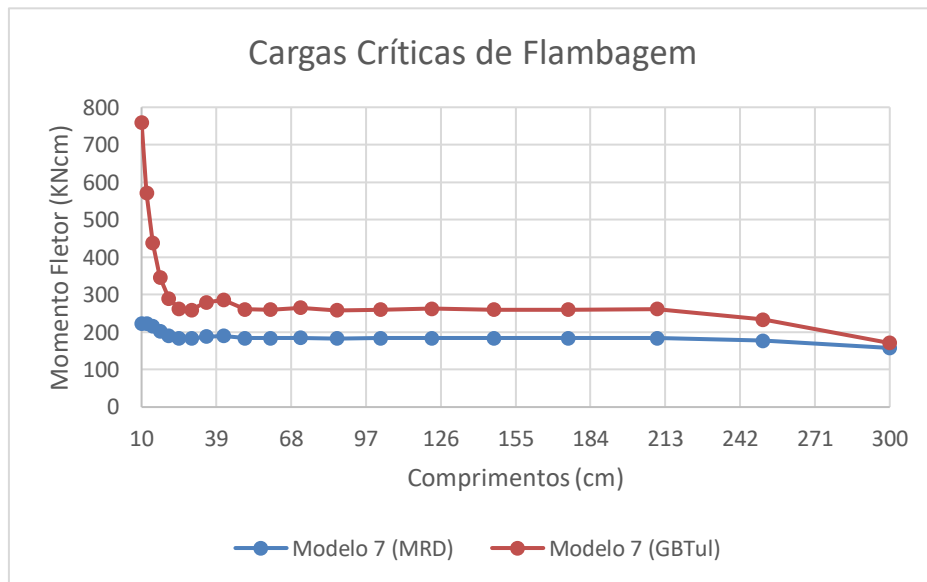


Figura 4.3.7 Resultados numéricos e estimativas via curva codificada do MRD (modelo 7)

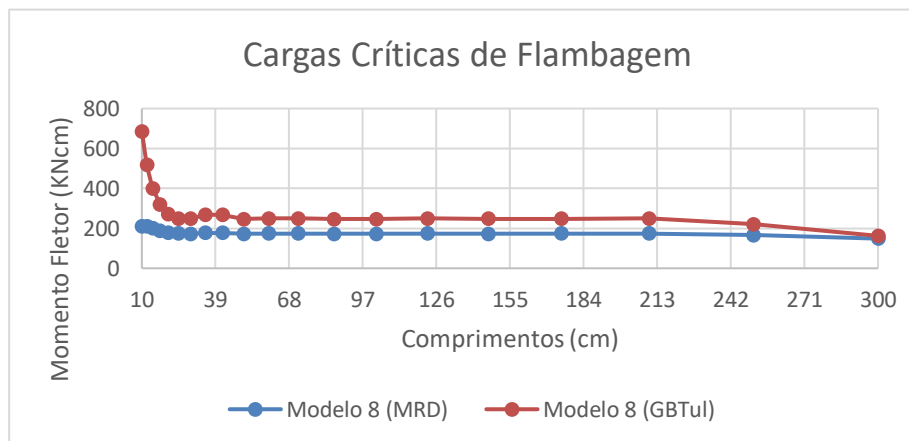


Figura 4.3.8 Resultados numéricos e estimativas via curva codificada do MRD (modelo 8)

Para esta investigação observa-se nos gráficos 4.3.1 a 4.3.8 comportamentos bem semelhantes onde os valores apresentados pelo programa GBTul indicam cargas críticas de flambagem superiores aos valores encontrados via MRD.

Os gráficos apresentados mostram que tal diferença é mais elevada para comprimentos menores, onde os modelos analisam a peça com uma esbelteza pequena, e à medida que os comprimentos das vigas aumentam os valores de carga crítica de flambagem diminuem, para ambos os métodos, e tendem a se aproximar. Contudo, mesmo com essa aproximação a curva do MRD apresenta valores menores de carga crítica que a viga pode suportar.

As Tabelas 9 e 10 apresentam os valores da diferença, em porcentagem, entre os dois métodos apresentados neste trabalho (MRD e GBTul).

Tabela 9 Diferença percentual da carga crítica de flambagem (vigas 1 a 4)

L (cm)	Modelo 1 (%)	Modelo 2 (%)	Modelo 3 (%)	Modelo 4 (%)
10	73,13	76,38	77,59	75,61
11,96	72,84	74,67	71,35	67,73
14,304	71,20	67,92	62,02	56,97
17,109	62,97	57,67	50,97	46,85
20,463	51,89	47,13	41,02	37,45
24,474	41,34	36,82	31,69	29,61
29,272	30,49	27,32	24,60	24,94
35,01	20,85	20,43	21,40	24,61
41,874	14,39	17,86	22,91	28,61
50,082	12,79	20,26	28,56	28,81
59,9	16,38	26,26	23,95	24,64
71,643	19,81	19,84	21,33	24,90
85,687	13,90	17,90	23,43	25,36
102,48	12,98	20,89	21,59	24,40
122,57	15,05	17,94	22,45	24,48
146,6	12,72	19,40	21,40	25,08
175,34	13,56	18,07	21,54	24,74
209,71	13,30	18,02	21,71	24,81
250,82	12,95	18,16	21,81	24,98
300	13,07	18,37	22,03	18,80

A Tabela 4.3.1 apresenta os 4 primeiros modelos de vigas analisados por ambos os métodos. Observa-se que para comprimentos curtos a diferença, entre os dois modelos estudados, é na casa dos 75% aproximadamente e à medida que se aumenta o comprimento da viga tal diferença diminui chegando à casa dos 20%.

Observa-se ainda que no modelo 1 do comprimento de viga 41,874 cm até o comprimento 300 cm as porcentagens foram um pouco distintas dos outros modelos de viga, se comparando os mesmos comprimentos. O modelo de viga 1 apresenta a maior área e inércia dentre todos os modelos analisados, mostrando que para peças com seções transversais maiores, para comprimentos intermediários e grandes, as diferenças entre o método do MRD e GBTul são reduzidas, contudo, ainda permanece na casa dos 13%.

Tabela 10 Diferença percentual da carga crítica de flambagem (vigas 5 a 8)

L (cm)	Modelo 5 (%)	Modelo 6 (%)	Modelo 7 (%)	Modelo 8 (%)
10	74,86	71,47	70,62	69,45
11,96	66,75	61,98	60,96	59,59
14,304	55,78	51,31	50,55	49,67
17,109	45,99	42,29	41,73	41,22
20,463	36,79	34,46	34,30	34,26
24,474	29,32	29,32	29,75	30,18
29,272	25,20	28,09	29,17	30,00
35,01	25,44	31,04	32,64	33,71
41,874	29,89	33,63	33,53	33,56
50,082	28,58	28,93	29,44	29,93
59,9	24,98	28,25	29,40	30,27
71,643	25,80	29,84	30,18	30,55
85,687	25,54	28,03	29,01	29,80
102,48	25,16	28,67	29,26	29,80
122,57	24,89	28,51	29,74	30,31
146,6	25,34	28,22	29,29	30,12
175,34	25,52	28,31	29,37	30,19
209,71	25,47	28,60	29,71	30,27
250,82	25,42	25,38	24,30	24,77
300	17,54	8,83	7,70	8,48

A Tabela 10 apresenta os 4 últimos modelos de vigas analisados por ambos os métodos, e assim como na Tab. 9 que para comprimentos curtos as análises mostram uma diferença alta na casa dos 72% e para comprimentos intermediários tal diferença diminui chegando na casa dos 20 %.

Observa-se na Tab. 10 que para o comprimento de 300 cm, os modelos de viga 6,7 e 8 apresentaram uma diferença entre os dois métodos menor que 10% um valor baixo se comparado à diferença apresentada pela viga 5. Estas 3 últimas seções transversais possuem os menores valores de área e momento de inércia e para uma viga esbelta, de 3 metros de comprimento, a diferença de carga crítica de flambagem analisada, ao se comparar os dois métodos, será pequena como mostrado anteriormente. Portanto, para seções transversais menores os valores de flambagem crítica são pequenos, para ambos os métodos, e por isso tais diferenças tendem a ser menores, mostrando que, em ambos os métodos, se torna inviável a confecção desses 3 modelos de vigas para comprimentos superiores à 3 metros.

A Figura 4.3.9 mostra graficamente todas as diferenças percentuais entre os métodos da curva normativa do MRD e do programa GBTul, tais valores mostram o quão maior é o valor de carga crítica de flambagem via GBTul em relação ao método do MRD. Isso mostra que o método normativo subestima o valor da carga de flambagem, se mostrando um método mais conservador.

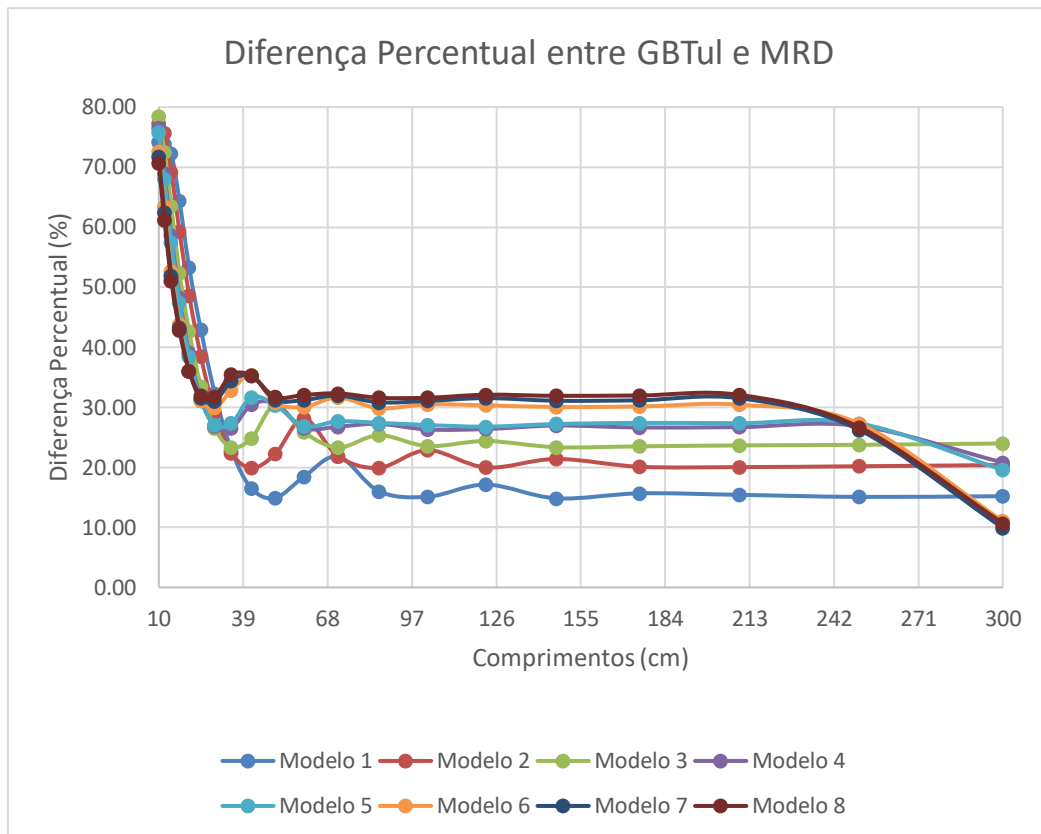


Figura 4.3.9 Diferença percentual da carga crítica de flambagem

4.4 Flambagem Local e Distorcional

A Tab. 11 apresenta valores calculados de flambagem local e distorcional obtidas a partir das curvas de flambagem via GBTul e MRD enquanto a Tab.12 apresenta a diferença percentual entre os dois métodos para cada um dos tipos de flambagem.

Tabela 11 Valores estimados de flambagem local e distorcional

Vigas Modelo	Flambagem Distor. (kNcm)	
	MRD	GBTul
1	252,98	301,47
2	231,33	294,93
3	216,89	288,63
4	204,49	278,42
5	199,93	279,07
6	188,07	271,87
7	179,49	261,91
8	168,99	247,84

Tabela 12 Diferença percentual entre os dois métodos

Vigas Modelo	Distorcional %
1	16,1
2	21,6
3	24,9
4	26,6
5	28,4
6	30,8
7	31,5
8	31,8

A partir das Tab. 11 observa-se que, para ambos os métodos, os valores de flambagem distorcional diminuem de acordo com o modelo de viga, sendo valor maior para o modelo de viga 1 e menor para o modelo de viga 8, isso acontece por conta da diferença de área e momento de inércia existente entre as vigas

A Tabela 12 apresenta a diferença existente entre os dois métodos adotados neste trabalho para flambagem distorcional. Tais porcentagens apresentam quão maiores são as cargas de flambagem distorcional pelo método GTul sobre o MRD presente na ABNT NBR 14762:2010 [1]. Observa-se que o método normativo subestima os valores de flambagem distorcional, se mostrando um método conservador.

A Figura 4.4 apresenta graficamente os valores da diferença entre as duas metodologias usadas na presente investigação.

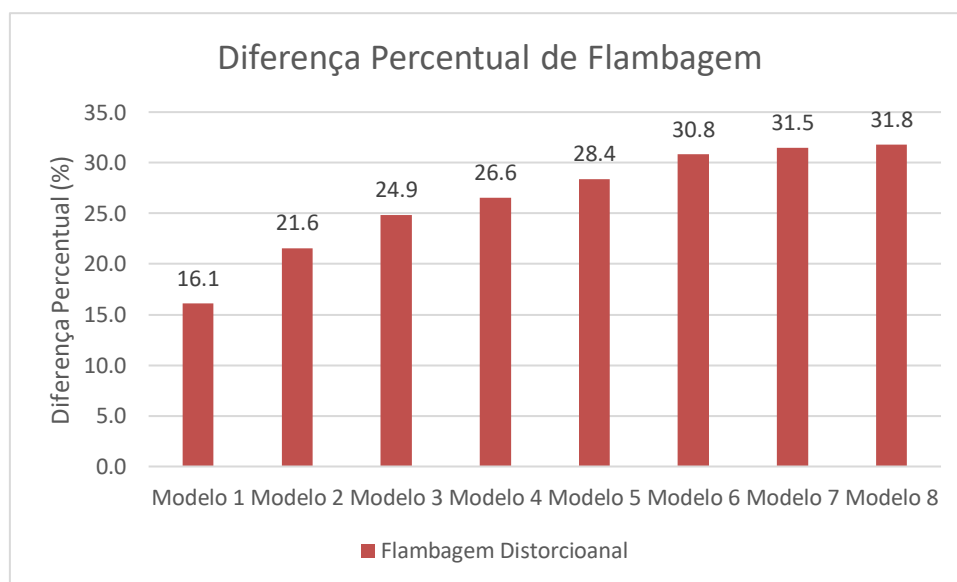


Figura 4.4 Diferença Percentual dos valores encontrados pelo Método GT e MRD

A Figura 4.4 mostra que, a diferença percentual referente à flambagem distorcional aumenta do modelo 1 para o modelo 8, modelo 1 possui as maiores dimensões de seção transversal dentre todas as vigas. A partir da Fig. 4.4 infere-se que naturalmente a curva normativa do MRD apresentou boa precisão para o caso de peças metálicas que possuem áreas e inércias maiores.

Conclusões

A presente pesquisa relatou uma investigação numérica a respeito do comportamento de flambagem via MRD e programa computacional GBTul para seções tipo rack simplesmente apoiadas submetidas à flexão simples.

A partir dos resultados obtidos pelos dois métodos, pode-se concluir que, tanto pelo MRD como pelo GBTul, a variação carga crítica de flambagem em relação aos diversos comprimentos se comportou de forma semelhante, apresentando altos valores para comprimentos curtos e diminuindo ao longo do aumento do comprimento da viga. Isso mostra que o comprimento da viga influencia no valor de carga crítica de flambagem que a mesma resiste.

Como em todas as vigas a única variável foi a seção transversal conclui-se que, com uma seção transversal de dimensões maiores os valores de área e momento de inércia também aumentam, ocasionando na viga uma maior resistência aos fenômenos da flambagem.

Através dos resultados apresentados neste trabalho, observou-se que ao usar o programa GBTul, os valores de cargas de flambagem obtidos foram maiores que os valores calculados via MRD. Portanto, conclui-se que, para a situação verificada neste trabalho, a atual curva distorcional codificada do MRD subestima a resistência à flambagem de vigas simplesmente apoiadas de perfil formado à frio quando submetidas a flexão uniforme.

Os valores de flambagem distorcional obtidos nesta investigação variaram de acordo com a seção transversal de cada um dos modelos de viga estudados. Foi constatado que, para vigas de perfil formado à frio com área e inércia maiores, o método normativo apresentou valores um pouco mais próximos aos valores encontrados pelo método computacional GBTul, o modelo de viga 1 apresentou apenas 16,1% de diferença para a flambagem distorcional, já para o modelo de viga 8 a diferença foi de 31,8%. Em ambos os casos, tais valores foram altos, mostrando uma subestimação dos valores de flambagem pelo método normativo MRD. Através dos resultados obtidos conclui-se que para peças que possuem baixos valores de área e inércia o método MRD presente na ABNT NBR 14762:2010 [1] se mostra um método conservador.

Referências Bibliográficas

- [1] ABNT, NBR 14762:2010. **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ. 2010.
- [2] BATISTA, E. M. Effective section method: A general direct method for the design of steel cold-formed members under local–global buckling interaction, **Thin-Walled Structures**, v.48, p. 345-356, 2010.
- [3] SCHAFER, B. W. Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design. **Journal of Constructional Steel Research**, v.68 (7-8), p. 766-778, 2008.
- [4] AISI, S100-16. **North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members**, American Iron and Steel Institute, Washington, DC. 2016.
- [5] SANTOS, W. S. **Interação Flambagem Global** : Flambagem local em pilares metálicos de seção I duplamente simétricos sob compressão uniforme. Vitória, p. 20, 2002.
- [6] FARIA, V. O. **Análise de Estabilidade de Perfis Formados a Frio com Perfurações**. Ouro Preto, p. 4, 2016.
- [7] MELO, J. M. S. **Análise da flambagem elástica e da resistência de telhas autoportantes de aço formadas a frio**. Rio de Janeiro, p. 27, 2017.
- [8] DEPOLLI, I. C. **Dimensionamento à falha distorcional via método da resistência direta de vigas de aço em perfil formado a frio sob flexão não uniforme**. Rio de Janeiro, p. 1-12, 2018.
- [9] YU, C.; SCHAFER, B.W. **Distortional Buckling of Cold-formed Steel Members in Bending**. In: The American Iron and Steel Institute (AISI), Baltimore, Maryland, 2005.
- [10] SCHARDT, R. Generalized beam theory – an adequate method for coupled stability problems. **Thin-walled structures**, v. 19 (2-4), p.161-180, 1994.

- [11] SILVESTRE, N. ; CAMOTIM, D. Distortional buckling formulae for cold-formed steel C and Z-section members Part I : derivation. **Thin-Walled Structures**, v. 42, p. 1567-1597, nov. 2004.
- [12] BEBIANO, R. ; PINA, P ; SILVESTRE, N. ; CAMOTIM, D. **GBTUL 1.0 β – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members**: User Manual, DECivil/IST, Technical University of Lisbon. Disponível em : http://www.civil.ist.utl.pt/gbt/?page_id=6. Acesso em : 1 mai. 2019.