

Tema: Estruturas de aço e mistas de aço e concreto

**ANÁLISE NUMÉRICA DE PERFIS DE AÇO FORMADOS A FRIO DO TIPO CARTOLA SOB A INTERAÇÃO
DISTORCIONAL-GLOBAL E SUBMETIDO A FLEXÃO NÃO-UNIFORME**

Guilherme Henrique dos Santos Ramos¹
Carla de Amorim Lana Dib²
Gregório Sandro Vieira³

Resumo

Esta pesquisa teve como objetivo de realizar um estudo numérico em vigas com seção transversal do tipo cartola submetidas à flexão uniforme e não-uniforme, sob a interação distorcional-global em seus eixos de maior e menor inércia. No programa computacional GBTUL, que utiliza a teoria generalizada de vigas, foi possível identificar as geometrias que apresentassem exclusivamente a interação DG, onde o somatório das participações modais distorcionais e globais eram maiores que 90% e o momento crítico local fosse maior que 1,5 vezes o distorcional e global de forma isolada. Portanto, foram selecionadas 10 geometrias, uma condição de apoio, três hipóteses de carregamentos de momentos e 2 eixos. No ABAQUS, que utiliza o método dos elementos finitos, foram desenvolvidos modelos de casca para fazer análises de flambagem. Nas análises, obtiveram-se valores adequados, tendo diferença máxima na ordem de 4% entre os resultados obtidos pelos dois programas e comportamentos conforme esperado. Além disso, as hipóteses de carregamentos, influenciam diretamente nos valores dos momentos críticos, crescendo na sequência $\psi = 1 \rightarrow 0 \rightarrow -1$ e eixo de menor inércia \rightarrow eixo de maior inércia.

Palavras-chave: Vigas de aço formadas a frio; Análise numérica; Interação distorcional-global; Flexão não-uniforme.

**NUMERICAL ANALYSIS OF HAT-TYPE COLD FORMED STEEL PROFILES UNDER DISTORTION-
GLOBAL INTERACTION AND SUBJECTED TO NON-UNIFORM BENDING**

Abstract

The objective of this research was to carry out a numerical study on beams with a top hat cross-section subjected to uniform and non-uniform bending, under global-distortion interaction in their axes of greater and lesser inertia. In the GBTUL computational program, which uses the generalized theory of beams, it was possible to identify the geometries that presented exclusively the DG interaction, where the sum of the distortional and global modal participations were greater than 90% and the local critical moment was greater than 1.5 times the distortional and global in isolation. Therefore, 10 geometries, a support condition, three load moment hypotheses and 2 axes were selected. In ABAQUS, which uses the finite element method, shell models were developed to perform buckling analyses. In the analyses, adequate values were obtained, with a maximum difference in the order of 4% between the results obtained by the two programs and behaviors as expected. In addition, the loading assumptions directly influence the values of the critical moments, increasing in the sequence $\psi = 1 \rightarrow 0 \rightarrow -1$ and axis of smaller inertia \rightarrow axis of greater inertia.



Keywords: Cold-formed steel beams; Numerical analysis; Distortion-global interaction; Non-uniform bending.

¹ Mestrando em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

² Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

³ Prof. Doutor em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

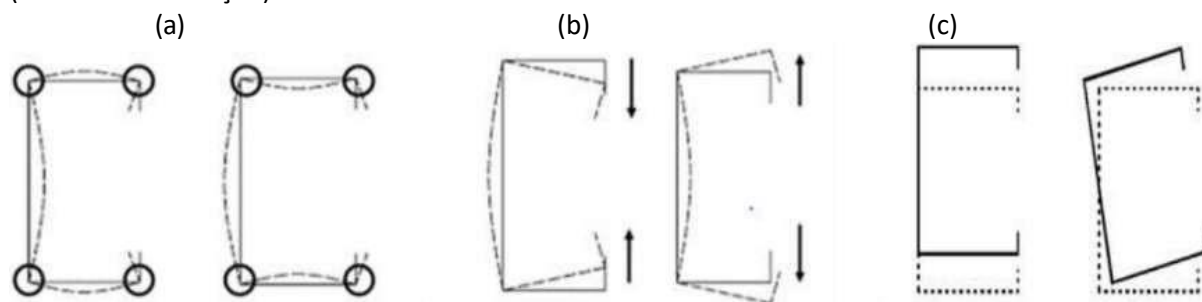
1.1 Apresentação do trabalho

A construção civil teve grandes evoluções nas últimas décadas, gerando impactos positivos no desenvolvimento de tecnologias, materiais mais versáteis, leves e com elevada eficiência estrutural. Desta forma, a utilização dos perfis de aço formados a frio tem ganhado grande destaque em diversas áreas da construção, devido à possibilidade de criar variadas geometrias e serem utilizados em estruturas de edificações, galpões, lajes, mezaninos, formas para concreto, coberturas e entre várias outras. Estes elementos são obtidos por dobramentos em prensa dobradeira/viradeiras, que utilizam tiras cortadas de chapas/bobinas, tendo espessuras de 0,4 mm a 8 mm ou por conformação contínua em conjunto de matrizes rotativas.

Devido a esses elementos possuírem alta relação entre sua largura e espessura, faz com que estejam suscetíveis aos fenômenos de flambagem local (L), distorcional (D), global (G) e suas interações (LD, LG, DG e LDG). Sendo assim, é importante saber quais são os modos atuantes no elemento e sua carga crítica. Estes valores podem ser determinados através do uso de programas computacionais ou procedimentos normativos contidos na norma brasileira ABNT NBR 14762:2010 [1] e em normas internacionais AISI S100-16 [2] e AS/NZS 4600:2018 [3]. Os procedimentos computacionais se baseiam em métodos numéricos como o Método dos Elementos Finitos (MEF), Método das Faixas Finitas (MFF) criado por Cheung [4] e a Teoria Generalizada de Vigas (GBT) desenvolvida por Schardt [5]. Já em relação aos procedimentos normativos, é previsto o Método da Resistência Direta (MRD) que foi originado das abordagens de Hancock [6], Schafer [7], Schafer e Peköz [8], o Método da Largura Efetiva (MLE) inicialmente proposto por Von Karman [9] e Método da Seção Efetiva (MSE) desenvolvido por Batista [10].

A Teoria Generalizada de Vigas (GBT) foi criada pelo Professor Richard Schardt [5]. A GBT é um método que permite realizar análises de flambagens dos perfis formados a frio, no qual é possível em uma combinação linear, decompor seus modos de deformações ao longo do comprimento da peça, conforme apresentado na Figura 1. Através do método GBT, criou-se o programa computacional GBTUL BEBIANO, *et al.* [11].

Figura 1 - Formas deformadas de seção fictícia U_e por flambagem (a) local, (b) distorcional, (c) global (flexão e flexo-torção).



Fonte: Lima, 2018.

Já o Método dos Elementos Finitos (MEF) trabalha com a geometria subdividida em pequenas partes que são chamados de elementos finitos. A possibilidade de dividir em pequenos elementos, faz com que o método resolva problemas de grande complexidade, podendo ter grandes variações nos carregamentos e alterações em suas condições de apoio (restrições). Os elementos finitos são conectados por nós e o conjunto deles denomina-se malha, podendo ser de forma quadrilateral, triangular e em outros formatos. Deste modo, os resultados estão ligados diretamente as condições estabelecidas, visto que, os PFF possuem um comportamento não-linear devido ao seu processo de conformação que gera tensões residuais, imperfeições geométricas, deformações iniciais, comportamento elastoplástico e o tamanho da malha, que gera influência na precisão dos resultados.

1.2 Objetivo

Esta pesquisa tem como objetivo de realizar a análise da interação entre os modos de flambagem distorcional-global em vigas de perfis de aço formados a frio do tipo cartola, submetidas a flexão não-uniforme em seus eixos de maior e menor inércia. Como objetivos específicos, serão feitas análises do comportamento das vigas em suas etapas de flambagem elástica pelo método da GBT, no qual será utilizado o programa computacional GBTUL, e análises de pós-flambagem pelo Método os Elementos Finitos, visto que será utilizado o ABAQUS versão 2020.

1.3 Revisão da literatura

Shuang, Kim e Feng [12] realizou estudos numéricos e experimentais sobre o comportamento de flambagem em perfis U enrijecidos (U_e), levando em conta a interação distorcional-global em vigas de aço inoxidável. Eles concluíram que os modelos em elementos finitos, mantiveram concordância com os valores de suas resistências e deformações de pós-flambagem em relação aos analisados em outros testes. Outro fator importante é que o Eurocode3 é bastante conservador quando se trata da interação

distorcional-global. Em seções com alta esbelteza, pressupõe resultados razoavelmente precisos. Já a AS/NZS 4673 e SEI/ASCE-8, tem previsões próximas dos valores reais e é apenas conservador.

Martins, *et al.* [13] realizaram estudos numéricos baseados na Teoria Generalizada de vigas (GBT), tendo como foco a análise de vigas com seção do tipo U_e , voltados ao comportamento elástico na pós-flambagem geométrica não linear. Os resultados das duas vigas que foram submetidas aos comportamentos de pós flambagem puramente distorcional ($M_{crD} < M_{crL} < M_{crG}$) e imperfeições iniciais distorcionais, têm movimentos na borda superior para fora, diferem na amplitude e nos seus caminhos de equilíbrio. Independentemente do tipo de interação DG e imperfeição geométrica inicial, a pós-flambagem sempre irá ter envolvimento de deformações globais (flexo-torção) com maior relevância do que as distorcionais.

Martins, Camotim e Dinis [14] desenvolveram estudos numéricos em vigas simplesmente apoiadas sob flexão uniforme e submetidos a interação distorcional-global em perfis do tipo U_e e Z enrijecido (Z_e) de aço formados a frio. Eles apresentaram que para o perfil U_e , as imperfeições iniciais geram influência na pós-flambagem apenas para os apoios com empenamento livre e impedido. Já para o Z_e , as

imperfeições geram influência em todas as condições. A curva de resistência global codificada fornece estimativas seguras tendo colapso em modos globais, com exceções apenas em seções que o momento de ruptura depende da imperfeição geométrica inicial. Outro fator foi que as dimensões da seção transversal causam influência significativa na precisão. Fez-se a verificação de que o MRD prevê de forma adequada para as vigas que falham em modo global, DG e distorcional. As vigas Ze com empenamento livre, tem melhores previsões com a curva do MRD desde que a relação global/distorcional seja ≤ 1.0 .

Os estudos de Kolakowski, *et al.* [15] envolveram análises de flambagens não lineares de vigas do tipo Ue submetidas a flexão pura. As peças selecionadas foram de seções curtas e medias de aço e laminados. Nesta pesquisa, utilizou-se um método semi-analítico (SAM) e posteriormente, desenvolveu-se um modelo através do método dos elementos finitos (MEF) para comparar com os resultados obtidos pelo SAM. Os resultados informaram que a flambagem globalsecundária em peças com comprimentos curtos e intermediários tem influências consideráveis. Teveboa proximidade dos valores encontrados em ambos os métodos ao se tratar do modo de flambagem global primário. Outro ponto importante foi que em vigas curtas, o SAM não pode determinar a capacidade de carga, diferentemente das vigas médias, sendo que este método estima de forma adequada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

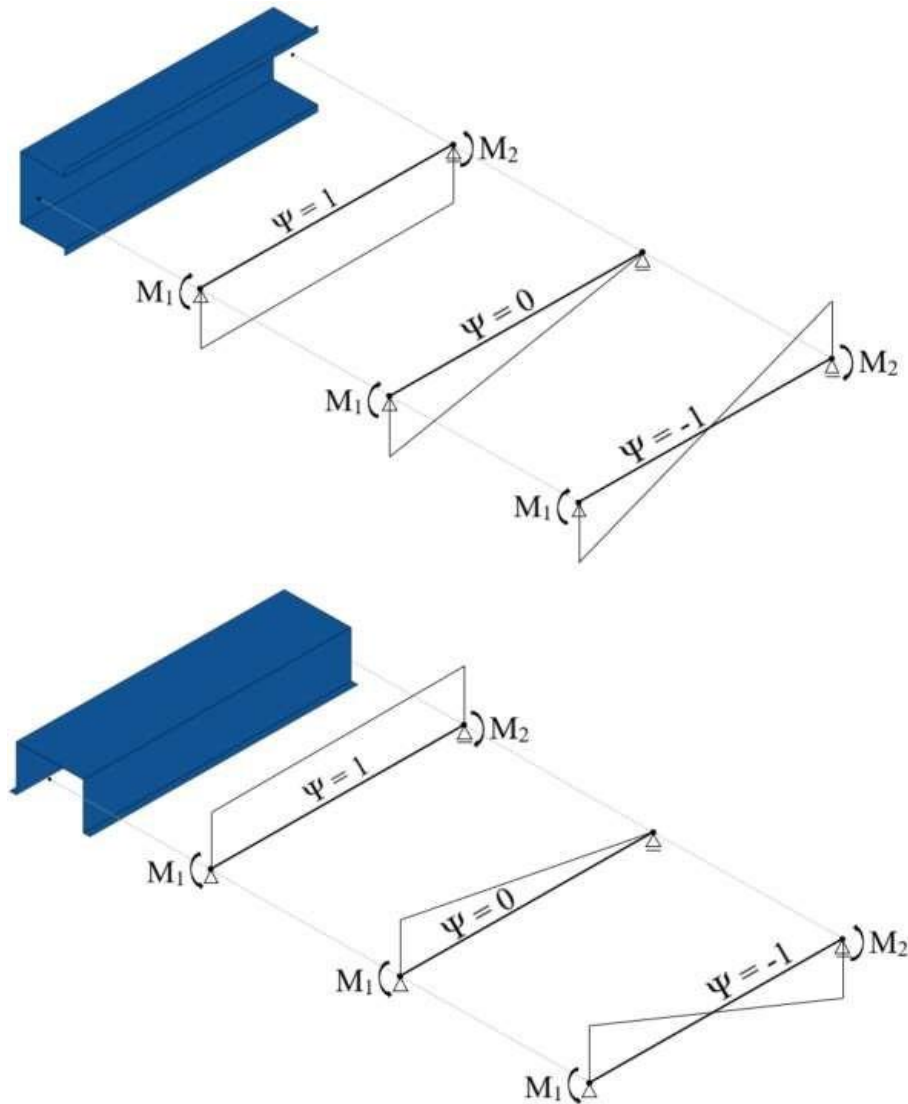
2.1 Teoria Generalizada de Vigas (GBT)

Esta pesquisa trata de análises numéricas em vigas de perfis formados a frio (PFF), sendo assim, definiu-se a utilização da Teoria Generalizada de Vigas (GBT) e o programa computacional o GBTUL (BEBIANO *et al.*, 2010). Desta forma, foram realizadas análises de estabilidade elástica pelo método da “tentativa e erro”, onde faz teste de variadas geometrias até encontrar as que apresentassem comportamento predominantemente da flambagem distorcional-global. O módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν) foram de 210 GPa e 0,3 respectivamente.

A seletiva inicial foi baseada nos estudos feitos por Depolli, *et al.* [16] e em catálogos técnicos de Perfis formados a frio da ArcelorMittal. Para os perfis cartolas, o GBTUL define por padrão a quantidade total de 6 nós naturais. Em relação aos nós intermediários, foram definidos 9 de forma manual. Com esta configuração, é possível obter 17 modos de flambagem. Sendo assim, foi definido os limites da relação distorcional-global de $0,8 \leq R_{GD} \leq 1,2$, visto que $R_{GD} = M_{crG}/M_{crD}$ (momento crítico global- distorcional) e também a somatória das participações modais (PGD), visto que deveriam ser maiores do que 90%. Outro fator importante é a não ocorrência da interação LDG, no qual foi determinado $R_{LD} > 1,5$ e $R_{LG} > 1,5$, onde $R_{LD} = M_{crL}/M_{crD}$ e $R_{LG} = M_{crL}/M_{crG}$.

Foi analisado uma condição de apoio, conforme estudado por Martins, *et al.* [13,14], Depolli, *et al.* [16], sendo denominada SCA tendo flexão livre em seus eixos de maior e menor inércia, empenamento livre e torção impedida. As vigas foram submetidas aos carregamentos de flexão nos eixos de maior (V_M) e menor inércia (V_m), aplicando momentos nas extremidades (M_1 e M_2). Foram adotados três gradientes de carregamentos, sendo eles $\Psi = 1$, $\Psi = 0$ e $\Psi = -1$, uma vez que $\Psi = M_2/M_1$ sendo M_1 constante. A adoção do primeiro gradiente, refere-se a flexão uniforme para fins de comparativo e os demais referem-se a flexão não-uniforme. Na Figura 2 É ilustrado as hipóteses de carregamentos.

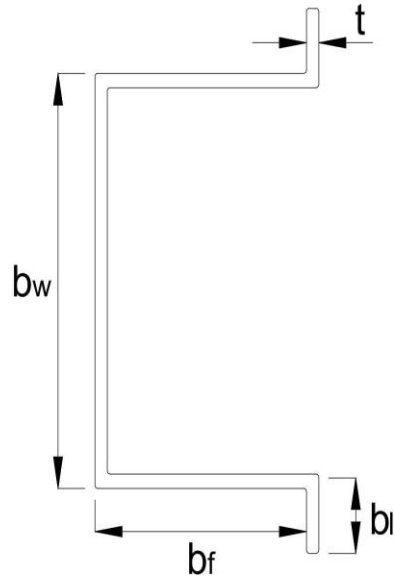
Figura 2 - Gradientes de momentos (ψ) e seus respectivos diagramas.



Fonte: Adaptado de Depolli, *et al.* (2018).

Sua seção transversal é composta por alma (b_w), mesa (b_f), enrijecedor (b) e espessura (t), conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Componentes da seção transversal do perfil cartola.



Fonte: Autor (2023).

As características geométricas das 10 vigas que atenderam aos critérios adotados e foram selecionadas, são apresentadas na Tabela 1 com suas respectivas áreas.

Tabela 1 - Características geométricas das vigas selecionadas.

VIGA	b_w (mm)	b_f (mm)	b_i (mm)	t (mm)	b_w/b_f	b_f/b_i	Área (cm ²)
V1	70	55	10	1,80	1,3	5,5	3,60
V2	70	60	10	2,25	1,2	6,0	4,73
V3	75	55	10	1,80	1,4	5,5	3,69
V4	75	60	10	2,25	1,3	6,0	4,84
V5	90	60	10	2,00	1,5	6,0	4,60
V6	90	70	10	2,25	1,3	7,0	5,63
V7	90	75	10	2,65	1,2	7,5	6,89
V8	100	60	10	2,00	1,7	6,0	4,80
V9	100	70	10	2,65	1,4	7,0	6,89
V10	100	75	10	3,00	1,3	7,5	8,10

Fonte: Autor (2023).

Nas Tabela 2 a Tabela 4, são apresentados os dados referentes aos comprimentos selecionados em que ocorrem a interação-distorcional global, seus respectivos momentos críticos para cada modo de flambagem, o fator R_{GD} , as participações modais e a relação $M_{crL}/M_{cr.Max}$, onde $M_{cr.Max}$ é o maior valor entre o momento crítico global e distorcional.

Tabela 2 - Comprimentos críticos, M_{crDG} e suas relações e participação modal - $\Psi = 1$.

VIGA	L_{DG} (cm)	M_{crG} (kN.cm)	M_{crD} (kN.cm)	R_{GD}	M_{crL} (kN.cm)	$\frac{M_{crL}}{M_{cr.Max}}$	P_G (%)	P_D (%)	P_L (%)
V_{M1}	145	444,07	439,60	1,01	1.130,88	2,55	77,58	21,97	0,45
V_{m1}	95	226.25	235.44	0,96	1.502,04	6,38	51,42	48,17	0,41
V_{M2}	155	635,39	653,21	0,97	1.997,01	3,06	81,23	18,36	0,41
V_{m2}	90	376.83	384.59	0,98	2.974,67	7,73	48,43	51,11	0,46
V_{M3}	140	512,91	465,10	1,10	1.196,23	2,33	74,66	24,82	0,52
V_{m3}	100	236.58	232.26	1,02	1.483,65	6,27	52,04	47,55	0,41
V_{M4}	155	684,64	693,96	0,99	2.144,03	3,09	80,99	18,60	0,41
V_{m4}	95	392.48	379.50	1,03	2.951,65	7,52	49,31	50,23	0,46
V_{M5}	170	619,37	630,78	0,98	1.886,55	2,99	82,43	17,20	0,37
V_{m5}	125	296.92	293.51	1,01	2.013,29	6,78	58,73	40,88	0,39
V_{M6}	205	725,51	705,99	1,03	2.316,68	3,19	83,95	15,68	0,37
V_{m6}	140	361.84	368.67	0,98	2.857,20	7,75	60,07	39,54	0,39
V_{M7}	215	959,89	958,81	1,00	3.498,30	3,64	85,24	14,43	0,33
V_{m7}	135	528.48	531.63	0,99	4.711,12	8,86	57,80	41,80	0,40
V_{M8}	170	702,86	695,27	1,01	2.091,49	2,98	82,28	17,38	0,34
V_{m8}	145	277.64	284.90	0,97	2.061,74	7,24	66,27	33,41	0,32
V_{M9}	190	1.143,99	1.128,17	1,01	4.088,70	3,57	84,23	15,43	0,34
V_{m9}	140	543.47	530.11	1,03	4.677,35	8,61	61,62	38,00	0,38
V_{M10}	200	1.426,78	1.400,72	1,02	5.506,25	3,86	84,69	14,97	0,34

V _{m10}	140	711,55	701,42	1,01	6.821,20	9,59	60,93	38,71	0,36
------------------	-----	--------	--------	------	----------	------	-------	-------	------

Fonte: Autor (2023).

Tabela 3 - Comprimentos críticos, M_{crDG} e suas relações e participação modal - $\Psi = 0$.

VIGA	L_{DG} (cm)	M_{crG} (kN.cm)	M_{crD} (kN.cm)	R_{GD}	M_{crL} (kN.cm)	$\frac{M_{crL}}{M_{cr.Max}}$	P_G (%)	P_D (%)	P_L (%)
V _{M1}	185	538,06	521,36	1,03	1.512,60	2,81	70,04	28,75	1,21
V _{m1}	115	301,94	301,26	1,00	1.667,95	5,52	58,34	40,88	0,78
V _{M2}	200	770,65	778,34	0,99	2.696,66	3,46	78,66	20,54	0,8
V _{m2}	110	497,61	489,64	1,02	3.216,18	6,46	55,66	43,48	0,86
V _{M3}	195	529,86	552,07	0,96	1.697,49	3,07	84,51	14,93	0,56
V _{m3}	125	298,35	295,32	1,01	1.704,56	5,71	61,80	37,50	0,70
V _{M4}	200	824,27	827,24	1,00	2.881,66	3,48	77,55	21,55	0,90
V _{m4}	120	489,77	480,07	1,02	3.239,50	6,61	59,53	39,71	0,76
V _{M5}	220	727,36	751,34	0,97	2.612,32	3,48	86,65	12,76	0,59
V _{m5}	160	361,39	352,83	1,02	2.512,19	6,95	70,09	29,34	0,57
V _{M6}	280	790,68	843,01	0,94	3.532,91	4,19	91,36	8,35	0,29
V _{m6}	180	440,58	447,59	0,98	3.533,84	7,90	72,16	27,31	0,53
V _{M7}	295	1.057,74	1.145,45	0,92	5.347,99	4,67	92,43	7,34	0,23
V _{m7}	175	639,25	643,30	0,99	5.549,01	8,63	70,44	29,00	0,56
V _{M8}	220	818,23	828,75	0,99	2.851,92	3,44	82,18	16,86	0,96
V _{m8}	180	357,10	346,66	1,03	2.690,53	7,53	74,62	24,90	0,48
V _{M9}	260	1.240,01	1.341,65	0,92	5.930,13	4,42	92,43	7,22	0,35
V _{m9}	185	637,61	638,46	1,00	5.876,33	9,20	75,48	24,05	0,47
V _{M10}	280	1.511,73	1.674,37	0,90	8.187,43	4,89	93,40	6,35	0,25
V _{m10}	185	841,05	841,76	1,00	8.272,98	9,83	74,71	24,81	0,48

Fonte: Autor (2023).

Tabela 4 - Comprimentos críticos, M_{crDG} e suas relações e participação modal - $\Psi = -1$.

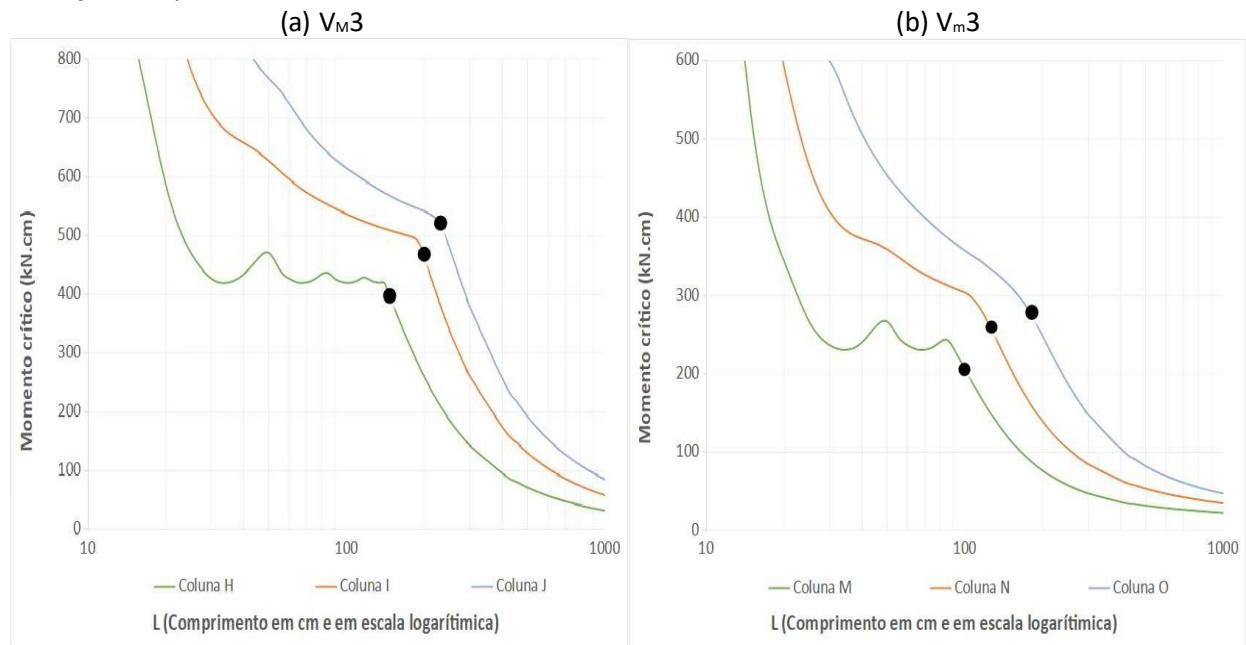
VIGA	L_{DG} (cm)	M_{crG} (kN.cm)	M_{crD} (kN.cm)	R_{GD}	M_{crL} (kN.cm)	$\frac{M_{crL}}{M_{cr.Max}}$	P_G (%)	P_D (%)	P_L (%)
V_{M1}	220	597,90	578,53	1,03	1.976,07	3,30	58,53	39,96	1,51
V_{m1}	170	320,35	322,80	0,99	731,92	2,27	66,56	29,97	3,47
V_{M2}	240	859,65	867,82	0,99	3.575,05	4,12	64,86	33,92	1,22
V_{m2}	165	518,20	523,00	0,99	1.537,67	2,94	65,05	34,09	0,86
V_{M3}	225	617,54	614,15	1,01	2.157,87	3,49	60,81	37,66	1,53
V_{m3}	180	330,92	317,75	1,04	668,90	2,02	67,24	31,97	0,79
V_{M4}	240	913,71	921,81	0,99	3.807,38	4,13	64,17	34,58	1,25
V_{m4}	180	510,58	513,28	0,99	1.435,71	2,80	68,55	30,69	0,76
V_{M5}	265	787,35	838,17	0,94	3.512,02	4,19	74,75	0,2375	1,50
V_{m5}	225	418,14	382,55	1,09	843,57	2,02	70,85	28,40	0,75
V_{M6}	340	860,30	932,78	0,92	4.973,70	5,33	80,88	18,46	0,66
V_{m6}	260	489,47	487,03	1,01	1.625,69	3,32	74,86	24,51	0,63
V_{M7}	365	1.135,27	1.246,69	0,91	7.739,68	6,21	84,29	15,28	0,43
V_{m7}	260	681,98	699,21	0,98	2.859,37	4,09	75,42	23,97	0,61
V_{M8}	270	851,22	923,82	0,92	3.877,24	4,20	80,81	17,22	1,97
V_{m8}	265	383,67	377,89	1,02	792,28	2,06	78,96	20,53	0,51
V_{M9}	315	1.351,73	1.481,90	0,91	8.114,25	5,48	83,39	15,68	0,93
V_{m9}	270	699,96	698,84	1,00	2.201,50	3,15	78,14	21,31	0,55
V_{M10}	340	1.662,18	1.822,72	0,91	11.321,04	6,21	84,84	14,52	0,64
V_{m10}	270	925,67	921,43	1,00	3.437,00	3,71	76,98	22,45	0,57

Fonte: Autor (2023).

Na Figura 4 é ilustrado a curva de assinatura com os seus respectivos momentos críticos de flambagem na fase elástica versus a variação do comprimento (em escala logarítmica), a condição de apoio, os

gradientes adotados e os eixos de maior e menor inércia.

Figura 4 - Curva de assinatura ($M_{cr} \times L$) com diferentes valores de gradientes (Ψ) para seção VM3 na condição de apoio SCA.



Fonte: Autor (2023).

As curvas das vigas submetidas à flexão não-uniforme, apresentaram cargas críticas maiores que as submetidas à flexão uniforme, conforme reportado por Yu e Schafer [17], Depolli, *et al.* [16] e Lima [18]. Esta relação também se manteve para o perfil cartola, pois, para o mesmo comprimento, as cargas críticas, aumentaram seguindo a sequência $\Psi = +1 \rightarrow 0 \rightarrow -1$.

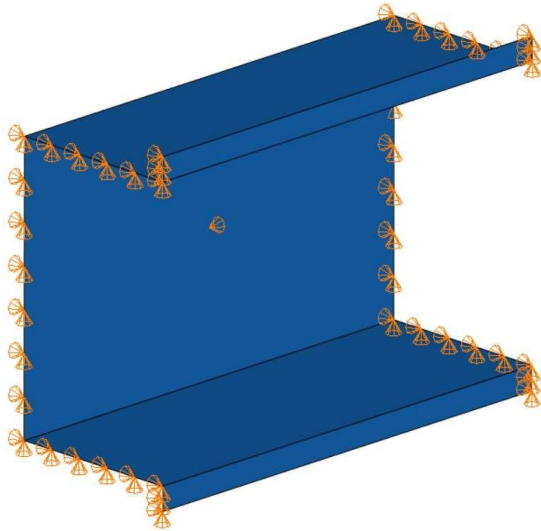
2.2 Método dos Elementos Finitos (MEF)

Os modelos numéricos que foram desenvolvidos seguindo o método dos elementos finitos, mediante a utilização do programa computacional ABAQUS (2020). Em primeiro lugar, definiu-se a geometria das peças, o comportamento como elástico linear, valores do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, conforme já informados na etapa de seleção de vigas. O elemento adotado foi o modelo S4, que trata de um elemento de casca linear com 4 lados e 4 nós. A malha seguiu os estudos feitos por Depolli, *et al.* [16], onde foi adotado a de 5 x 5 mm.

O programa ABAQUS possui nomenclaturas diferentes do GBTUL, porém, para reproduzir a condição de apoio SCA (flexão livre nos seus eixos de maior e menor inércia, empenamento livre e torção impedida), teve de ser aplicado as restrições ao deslocamento nas extremidades da seção transversal nos eixos x (U1), y (U2) e no ponto central da alma do perfil. Além disto, restringiu também o deslocamento no eixo

z (U3), conforme ilustrado na Figura 5.

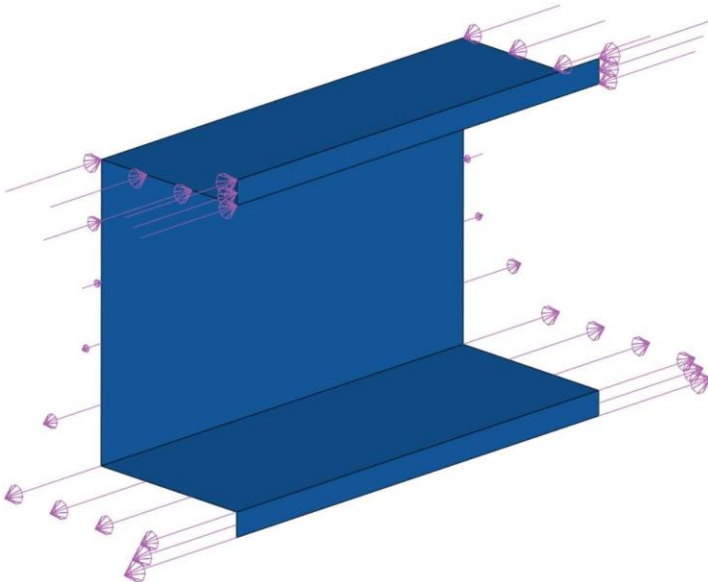
Figura 5 - Condição de apoio SCA.



Fonte: Autor (2023).

Em relação ao carregamento, foram feitas aplicações de forças concentradas para que produzissem um carregamento estaticamente equivalente à 1 kN.cm, tendo atuação em ambas as extremidades do elemento, conforme ilustrado na Figura 6. O carregamento aplicado é referente ao eixo de maior inércia.

Figura 6 - Força produzida por equivalência de momento em carga concentrada ($\Psi = 1$).



Fonte: Autor (2023).

O modelo de Martins, *et al.* [13] e Depolli, *et al.* [16], foi utilizado e validado com Kankanamge [19], visto que foram feitos testes experimentais e validações numéricas. Depolli, *et al.* [16] usou este modelo no desenvolvimento de outras análises em perfis cartola. Em comparativo do modelo numérico com os resultados do teste experimental, teve variação de 2,71% e deformação de acordo com o experimental, chegando a conclusão de que o modelo simula de forma adequada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a conclusão das análises de flambagem elástica pelo GBTUL, onde foram apresentados os dados e posteriormente feito o desenvolvimento dos modelos utilizando o ABAQUS e seguindo o procedimento de perturbação linear, geralmente usado para estruturas de casca, foi possível obter os momentos críticos e seus devidos modos de flambagem. Desta forma, na Tabela 5 são apresentadas as relações entre os valores obtidos pelo GBTUL e ABAQUS.

Tabela 5 - Relação M_{crDG} e M_{Abq} .

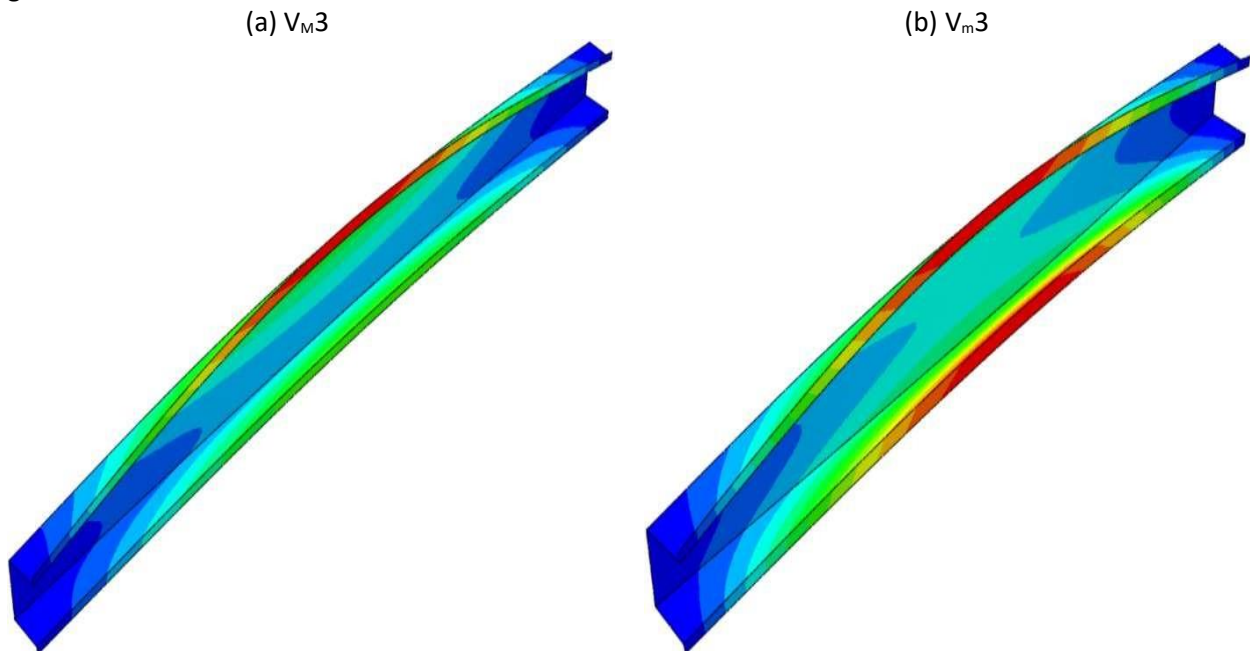
VIGA	$\psi = 1$			$\psi = 0$			$\psi = -1$		
	M_{crDG} (kN.cm)	M_{Abq} (kN.cm)	$\frac{M_{crDG}}{M_{Abq}}$	M_{crDG} (kN.cm)	M_{Abq} (kN.cm)	$\frac{M_{crDG}}{M_{Abq}}$	M_{crDG} (kN.cm)	M_{Abq} (kN.cm)	$\frac{M_{crDG}}{M_{Abq}}$
VM1	366,06	363,53	1,01	455,00	447,81	1,02	485,56	471,28	1,03
Vm1	196,42	195,15	1,01	258,30	256,44	1,01	266,36	263,68	1,01
VM2	536,10	531,78	1,01	674,77	661,65	1,02	722,27	694,02	1,04
Vm2	325,09	322,13	1,01	423,18	418,87	1,01	431,88	426,15	1,01
VM3	419,37	416,29	1,01	478,00	472,99	1,01	525,51	509,45	1,03
Vm3	206,24	204,94	1,01	260,90	259,13	1,01	276,04	273,12	1,01
VM4	585,05	580,26	1,01	731,98	716,82	1,02	785,86	753,40	4,04
Vm4	340,41	337,42	1,01	426,75	422,68	1,01	435,94	430,27	1,01
VM5	553,54	549,40	1,01	680,93	672,25	1,01	735,51	711,11	1,03
Vm5	269,58	267,92	1,01	332,34	330,22	1,01	364,93	359,90	1,01
VM6	646,68	642,13	1,01	747,25	737,44	1,01	809,34	775,15	1,04
Vm6	332,99	330,88	1,01	410,92	408,26	1,01	443,20	438,17	1,01
VM7	860,71	853,85	1,01	1.001,95	985,64	1,02	1.073,45	1.028,90	1,04

Vm7	484,64	480,75	1,01	594,70	589,72	1,01	622,52	614,60	1,01
VM8	637,34	632,31	1,01	773,88	757,77	1,02	816,03	796,04	1,03
Vm8	259,33	257,90	1,01	334,63	332,65	1,01	352,59	348,70	1,01
VM9	1.036,66	1.027,60	1,01	1.185,14	1.173,10	1,01	1.293,95	1.247,60	1,04
Vm9	503,83	499,84	1,01	602,07	597,17	1,01	646,61	637,74	1,01
VM10	1.292,18	1.280,00	1,01	1.447,90	1.432,20	1,01	1.591,21	1.525,70	1,04
Vm10	660,46	654,41	1,01	794,08	786,43	1,01	854,31	840,84	1,02

Fonte: Autor (2023).

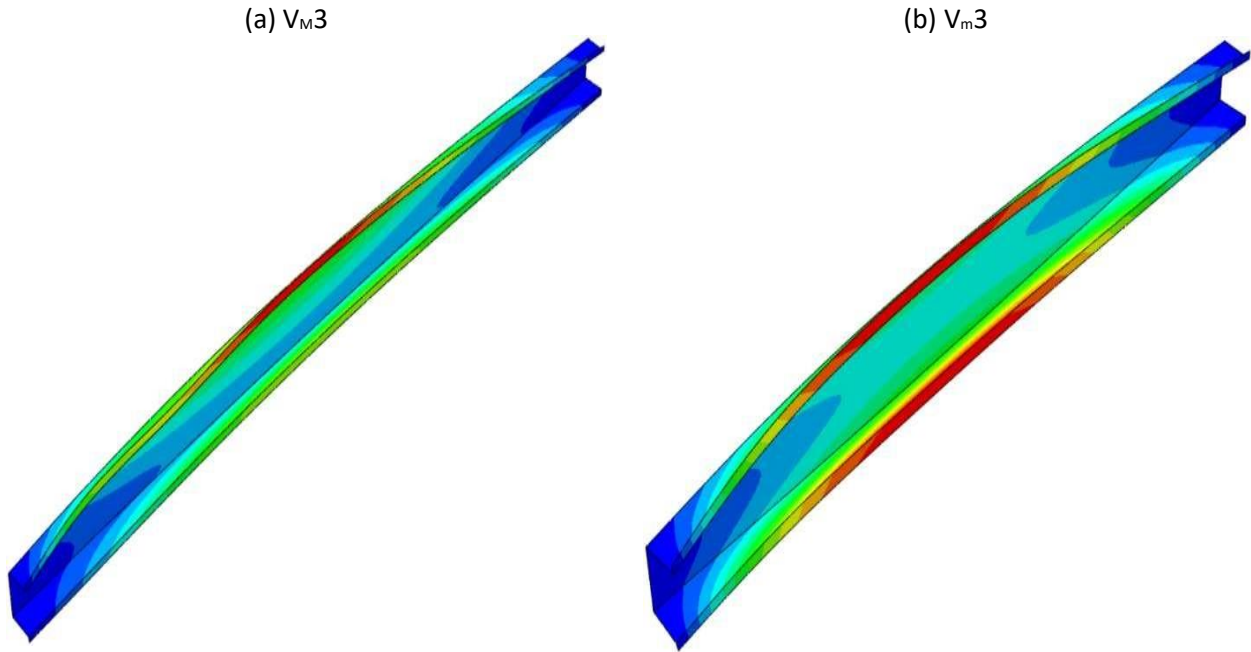
Nas Figuras 6, 7 e 8, são apresentadas as deformações da viga V3, para cada um de seus eixos de maior e menor inércia, gradientes de carregamento onde é possível observar a predominância de deformações globais, envolvendo a flexão e flexo-torção e também distorcionais, onde ocorre a variação dos nós de origem, alterando o formato original da seção transversal, visto que as mesas do elemento se deslocam e ocorre o empenamento.

Figura 6 - Situação da deformação da viga V3 do modo de flambagem distorcional-global para o gradiente $\Psi = 1$.



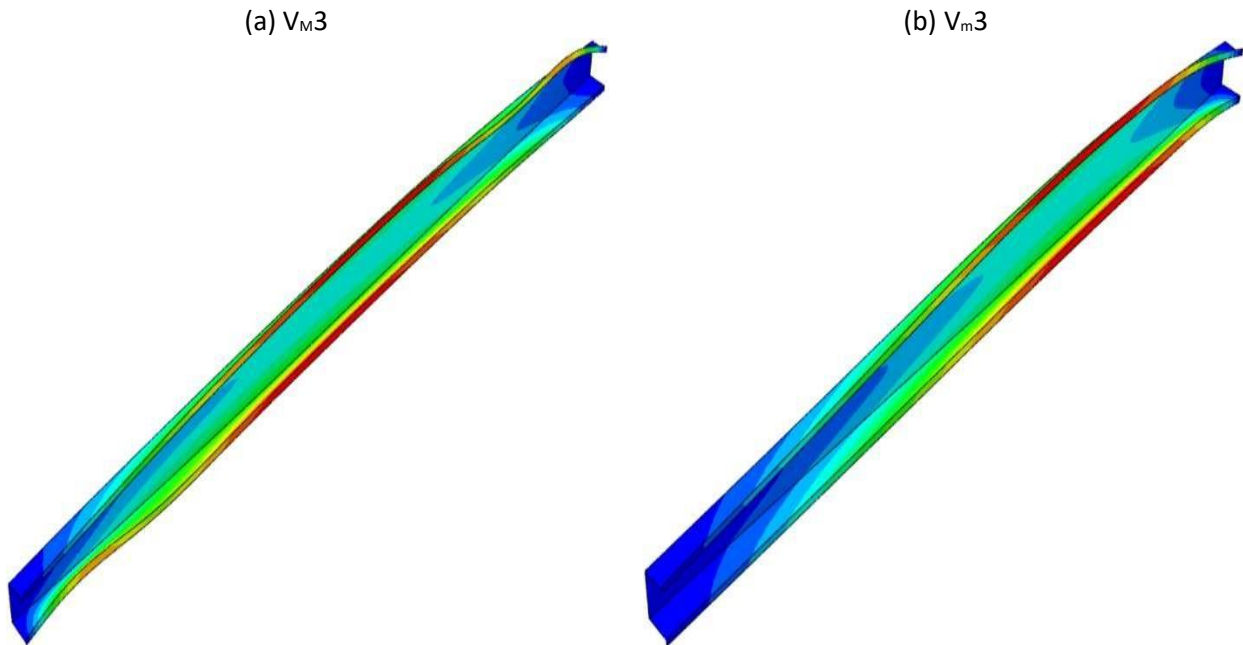
Fonte: Autor (2023).

Figura 7 - Situação da deformação da viga V3 do modo de flambagem distorcional-global para o gradiente $\Psi = 0$.



Fonte: Autor (2023).

Figura 8 - Situação da deformação da viga V3 do modo de flambagem distorcional-global para o gradiente $\Psi = 0$.



Fonte: Autor (2023).

4 CONCLUSÃO

Este estudo abordou uma investigação numérica sobre o comportamento estrutural do perfil formado a frio com seção do tipo cartola submetido a flexão não-uniforme sob a interação distorcional-global. Foram analisados 10 geometrias em seus eixos de maior e menor inércia, uma condição de apoio e 3 gradientes de momentos. Com auxílio do GBTUL, foram identificadas as geometrias que ocorriam exclusivamente a interação distorcional-global. Em sequência, foi desenvolvido o modelo numérico de cascas em elementos finitos, no qual utilizou-se o ABAQUS para fazer as análises de flambagem elástica e validar as geometrias adotadas inicialmente.

Observar-se que ao comparar o GBTUL, que utilizada a Teoria Generalizada de Vigas, e o Método dos elementos finitos, obteve-se valores com diferenças máximas de $M_{crDG}/M_{Abq} = 1,04$, ou seja, na ordem de 4%. Portanto, os resultados indicaram que os modelos numéricos obtiveram comportamentos conforme o esperado, demonstrando que foi feita uma modelagem adequada a condição de apoio e aos esforços aplicados. Além disto, foi verificado que as vigas submetidas à flexão não-uniforme, apresentaram cargas críticas maiores que as submetidas à flexão uniforme, seguindo a sequência $\Psi = +1 \rightarrow 0 \rightarrow -1$ e eixo de menor inércia \rightarrow eixo de maior inércia.

REFERÊNCIAS

- 1 Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio, Rio de Janeiro: ABNT, 2010.
- 2 American Iron and Steel, AISI S100-16: North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, Washington, DC: AISI, 2016.
- 3 Australian / New Zealand Standards. AS/NZS 4600. Cold-formed steel structures. Sydney. 2018.
- 4 CHEUNG, Y. Finite Strip Method in Structural Analysis, New York, USA, Pergamon Press. 1976; v. 1: 244.
- 5 SCHARDT, R. Generalized beam theory-an adequate method for coupled stability problems. Thin-Walled Structures. 1994; v. 19, n. 2: 161-180.
- 6 HANCOCK, G. Design of Cold-Formed Steel Structures (To Australian Standard AS 1538-1988). Australian Institute of Steel Construction, North Sydney. 1994; v. 3: 240.
- 7 SCHAFFER, B. Review: The direct strength method of cold-formed steel member design. Journal of Constructional Steel Research. 2008; v. 68: 766-778.

- 8 SCHAFER, B. W.; PEKÖZ, T. Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions. [S.l.]: [s.n.]. 1998; p. 69-76.
- 9 VON KÁRMAN, T., SECHLER, E.E. e DONNELL, L.H. The strength of thin plates in compression. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers (ASME). 1932; v. 54: 53-57.
- 10 BATISTA, E. Effective section method: A general direct method for the design of steel cold-formed members under local-global buckling interaction. Thin-Walled Structures. 2010; v. 48, n. 4-5: 345-356.
- 11 BEBIANO, R.; et al. GBTUL 1.0b - Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members. User manual. Lisbon: Technical University of Lisbon, 2010.
- 12 NIU, S.; RASMUSSEN, K. J. R.; FAN, F. Distortional-global interaction buckling of stainless steel C-beams: Part I — Experimental investigation. Journal of Constructional Steel Research. 2014^a; v. 96: 127–139,.
- 13 MARTINS, A. et al. GBT-based assessment of the mechanics of distortional-global interaction in thin-walled lipped channel beams. Thin-Walled Structures. 2018; v. 124: 32-47.
- 14 CAMOTIM, D.; DINIS, P. B. Distortional-global interaction in lipped channel and zed-section beams: Strength, relevance and DSM design. Thin-Walled Structures. 2018; v. 129: 289-308.
- 15 KOLAKOWSKI, Z.; et al. Global-distortional buckling mode influence on post-buckling behaviour of lip-channel beams. International Journal of Mechanical Sciences. 2020; v. 184: 105723.
- 16 DEPOLLI, I.; et al. Distortional failure and DSM design of cold-formed steel lipped channel beams under non-uniform bending. Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council, Baltimore, Maryland. 2018; April: 10-13.
- 17 YU, C.; SCHAFER, B. Distortional buckling tests on cold-formed steel beams. Journal of Structural Engineering. 2006; v. 132, n. 4: 515-528.
- 18 LIMA, L. Resistência de perfis “Z” formados a frio sob flexão não-uniforme e colapso distorcional. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
- 19 KANKANAMGE, D. Structural behaviour and design of cold-formed steel beams at elevated temperatures. PhD thesis. Queensland University of Technology, Brisbane, Australia. 2010.