

**CONSTRU  
METAL**  
2023

**2 1 s e t**  
8 h - 21 h  
allianz parque  
são paulo - sp

# CONTRIBUIÇÕES TECNOCIENTÍFICAS

REALIZAÇÃO



ORGANIZAÇÃO/PROMOÇÃO

**Francal Feiras** DESDE 1969

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

Créditos:

Guilherme Henrique dos Santos Ramos

Carla de Amorim Lana Dib

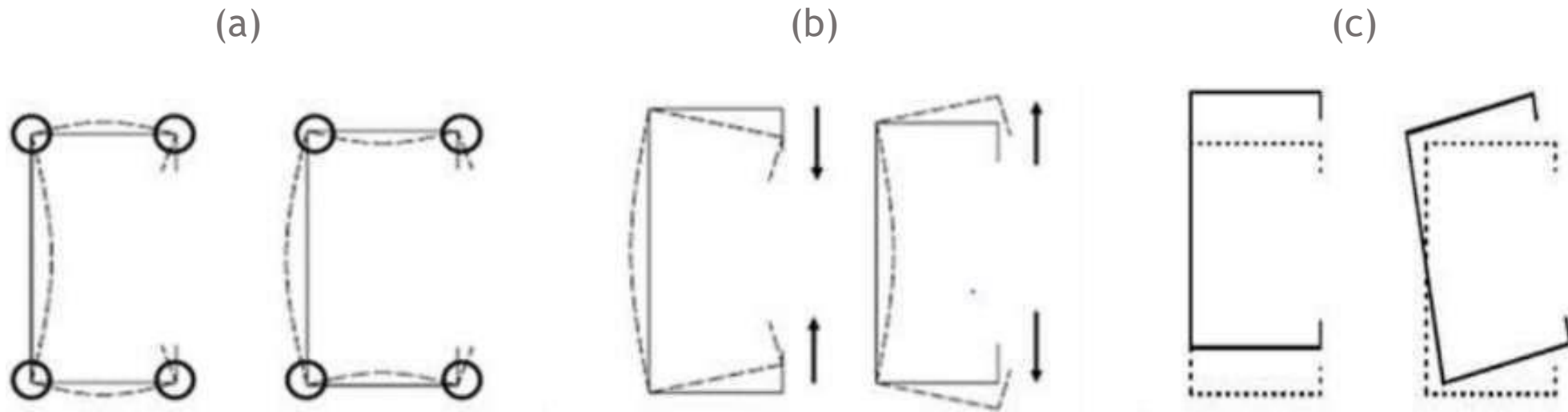
Gregório Sandro Vieira

Universidade Federal de Uberlândia

# INTRDUÇÃO

- Perfis desenvolvidos a partir da dobragem de chapas finas.
- Alta relação resistência/peso.
- Flambagem local, distorcional, global e suas interações.
- ABNT NBR 14762:2010, AISI S100-16 e AS/NZS 4600:2018. (MRD, MLE e MSE).
- PROCEDIMENTOS NORMATIVOS (MEF, MFF e GBT).

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



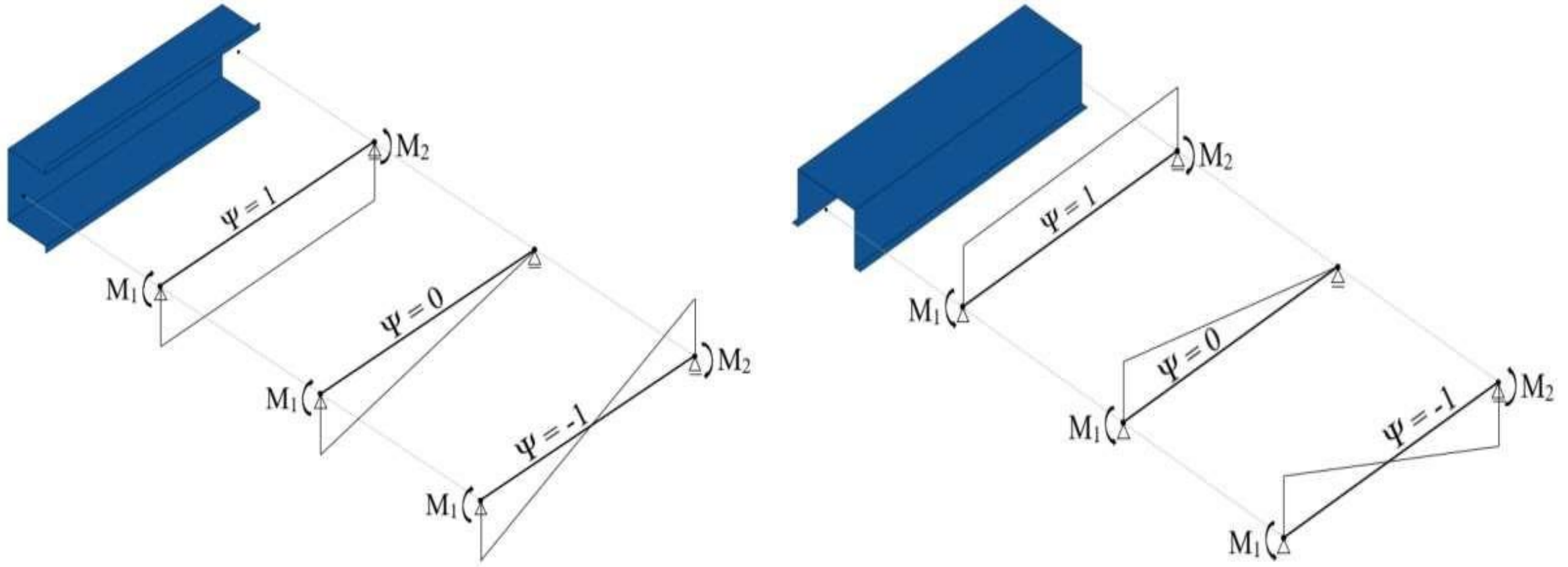
Fonte: Autor (2023).

# DESENVOLVIMENTO

- Método da GBT.
- Método da “tentativa e erro” para identificar as geometrias com o comportamento da flambagem distorcional-global.
- Módulo de elasticidade (210 GPa) e coeficiente de Poisson (0,3).
- A seletiva inicial foi baseada nos estudos feitos por Depolli, et al. [16] e em catálogos técnicos de Perfis formados a frio da ArcelorMittal.
- GBTUL - 6 nós naturais e 9 nós intermediários (totalizando 17 modos de flambagem).

- Limites da relação distorcional-global de  $0,8 \leq RGD \leq 1,2$ , visto que  $RGD = M_{crG} / M_{crD}$  (momento crítico global- distorcional) e participação modal (PGD) acima de 90%.
- Para não ocorrer a interação LDG, foi definido  $RLD > 1,5$  e  $RLG > 1,5$ , onde  $RLD = M_{crL} / M_{crD}$  e  $RLG = M_{crL} / M_{crG}$ .
- Condição de apoio SCA conforme também estudado e definido por Martins, et al. [13,14], Depolli, et al. [16].
- Três gradientes de carregamentos ( $\Psi = 1$ ,  $\Psi = 0$  e  $\Psi = -1$ ), uma vez que  $\Psi = M_2 / M_1$ , sendo  $M_1$  constante.

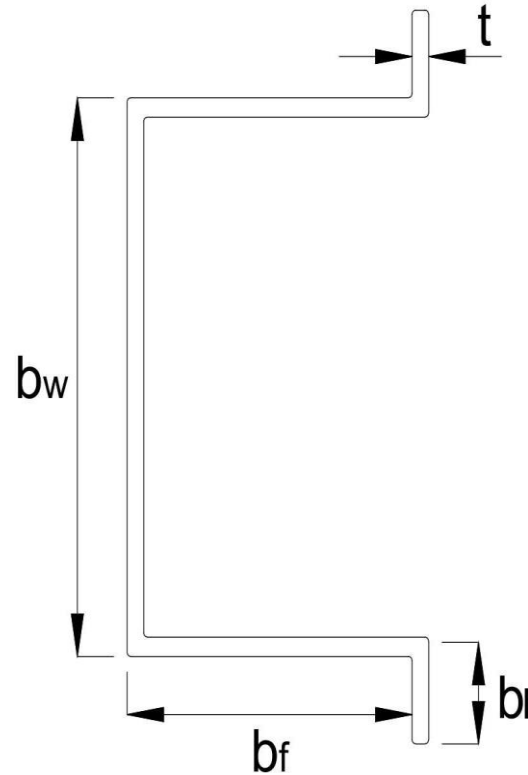
Figura 2 - Gradientes de momentos ( $\Psi$ ) e seus respectivos diagramas.



Fonte: Autor (2023).

- Seção transversal composta por alma ( $b_w$ ), mesa ( $b_f$ ), enrijecedor ( $b_l$ ) e espessura ( $t$ )

Figura 3 - Componentes da seção transversal do perfil cartola.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 1 - Características geométricas das vigas selecionadas.

VIGA	$b_w$ (mm)	$b_f$ (mm)	$b_l$ (mm)	$t$ (mm)	$b_w/b_f$	$b_f/b_l$	Área (cm <sup>2</sup> )
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).

Tabela 2 - 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)	$\frac{M_{crL}}{M_{cr.Max}}$	$P_G$ (%)	$P_D$ (%)	(%)	VIGA	$L_{DG}$ (cm)	$M_{crG}$ (kN.cm)	$M_{crD}$ (kN.cm)	$R_{GD}$	$M_{crL}$ (kN.cm)	$\frac{M_{crL}}{M_{cr.Max}}$	$P_G$ (%)	$P_D$ (%)	(%)
$V_{M1}$	145	444,07	439,60	1,01	1.130,88	2,55	77,58	21,97	0,45	$V_{m6}$	205	725,51	705,99	1,03	2.316,68	3,19	83,95	15,68	0,37
$V_{m1}$	95	226,25	235,44	0,96	1.502,04	6,38	51,42	48,17	0,41	$V_{m6}$	140	361,84	368,67	0,98	2.857,20	7,75	60,07	39,54	0,39
$V_{M2}$	155	635,39	653,21	0,97	1.997,01	3,06	81,23	18,36	0,41	$V_{M7}$	215	959,89	958,81	1,00	3.498,30	3,64	85,24	14,43	0,33
$V_{m2}$	90	376,83	384,59	0,98	2.974,67	7,73	48,43	51,11	0,46	$V_{m7}$	135	528,48	531,63	0,99	4.711,12	8,86	57,80	41,80	0,40
$V_{M3}$	140	512,91	465,10	1,10	1.196,23	2,33	74,66	24,82	0,52	$V_{M8}$	170	702,86	695,27	1,01	2.091,49	2,98	82,28	17,38	0,34
$V_{m3}$	100	236,58	232,26	1,02	1.483,65	6,27	52,04	47,55	0,41	$V_{m8}$	145	277,64	284,90	0,97	2.061,74	7,24	66,27	33,41	0,32
$V_{M4}$	155	684,64	693,96	0,99	2.144,03	3,09	80,99	18,60	0,41	$V_{M9}$	190	1.143,99	1.128,17	1,01	4.088,70	3,57	84,23	15,43	0,34
$V_{m4}$	95	392,48	379,50	1,03	2.951,65	7,52	49,31	50,23	0,46	$V_{m9}$	140	543,47	530,11	1,03	4.677,35	8,61	61,62	38,00	0,38
$V_{M5}$	170	619,37	630,78	0,98	1.886,55	2,99	82,43	17,20	0,37	$V_{M10}$	200	1.426,78	1.400,72	1,02	5.506,25	3,86	84,69	14,97	0,34
$V_{m5}$	125	296,92	293,51	1,01	2.013,29	6,78	58,73	40,88	0,39	$V_{m10}$	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)	$\frac{M_{crL}}{M_{cr.Max}}$	$P_G$ (%)	$P_D$ (%)	$P_L$ (%)	VIGA	$L_{DG}$ (cm)	$M_{crG}$ (kN.cm)	$M_{crD}$ (kN.cm)	$R_{GD}$	$M_{crL}$ (kN.cm)	$\frac{M_{crL}}{M_{cr.Max}}$	$P_G$ (%)	$P_D$ (%)	(%)
$V_{m1}$	185	538,06	521,36	1,03	1.512,60	2,81	70,04	28,75	1,21	$V_{m6}$	280	790,68	843,01	0,94	3.532,91	4,19	91,36	8,35	0,29
$V_{m1}$	115	301,94	301,26	1,00	1.667,95	5,52	58,34	40,88	0,78	$V_{m6}$	180	440,58	447,59	0,98	3.533,84	7,90	72,16	27,31	0,53
$V_{m2}$	200	770,65	778,34	0,99	2.696,66	3,46	78,66	20,54	0,8	$V_{m7}$	295	1.057,74	1.145,45	0,92	5.347,99	4,67	92,43	7,34	0,23
$V_{m2}$	110	497,61	489,64	1,02	3.216,18	6,46	55,66	43,48	0,86	$V_{m7}$	175	639,25	643,30	0,99	5.549,01	8,63	70,44	29,00	0,56
$V_{m3}$	195	529,86	552,07	0,96	1.697,49	3,07	84,51	14,93	0,56	$V_{m8}$	220	818,23	828,75	0,99	2.851,92	3,44	82,18	16,86	0,96
$V_{m3}$	125	298,35	295,32	1,01	1.704,56	5,71	61,80	37,50	0,70	$V_{m8}$	180	357,10	346,66	1,03	2.690,53	7,53	74,62	24,90	0,48
$V_{m4}$	200	824,27	827,24	1,00	2.881,66	3,48	77,55	21,55	0,90	$V_{m9}$	260	1.240,01	1.341,65	0,92	5.930,13	4,42	92,43	7,22	0,35
$V_{m4}$	120	489,77	480,07	1,02	3.239,50	6,61	59,53	39,71	0,76	$V_{m9}$	185	637,61	638,46	1,00	5.876,33	9,20	75,48	24,05	0,47
$V_{m5}$	220	727,36	751,34	0,97	2.612,32	3,48	86,65	12,76	0,59	$V_{m10}$	280	1.511,73	1.674,37	0,90	8.187,43	4,89	93,40	6,35	0,25
$V_{m5}$	160	361,39	352,83	1,02	2.512,19	6,95	70,09	29,34	0,57	$V_{m10}$	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 -  $\Psi = -1$ .

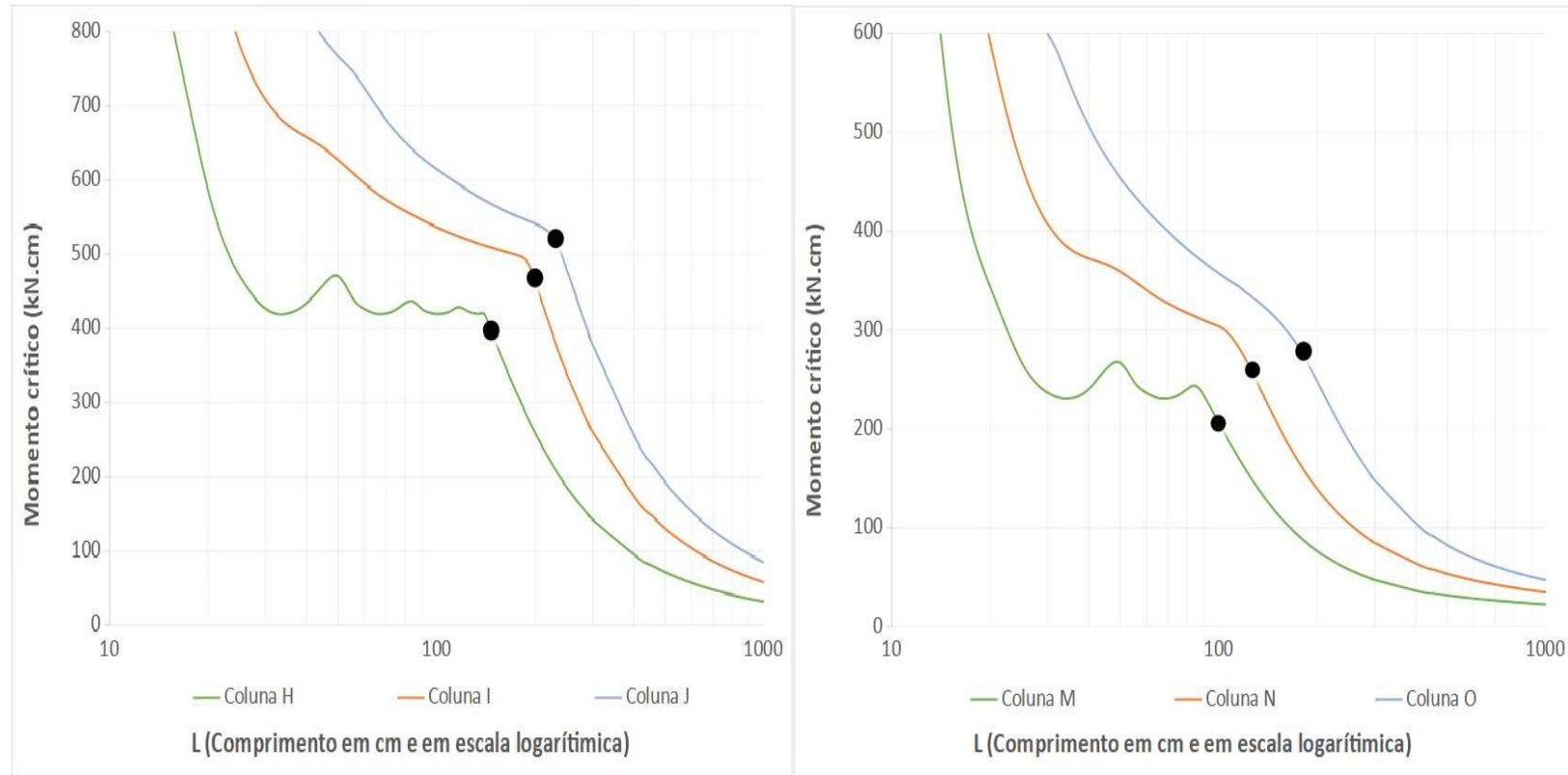
VIGA	$L_{DG}$ (cm)	$M_{crG}$ (kN.cm)	$M_{crD}$ (kN.cm)	$R_{GD}$	$M_{crL}$ (kN.cm)	$\frac{M_{crL}}{M_{cr.Max}}$	$P_G$ (%)	$P_D$ (%)	$P_L$ (%)	VIGA	$L_{DG}$ (cm)	$M_{crG}$ (kN.cm)	$M_{crD}$ (kN.cm)	$R_{GD}$	$M_{crL}$ (kN.cm)	$\frac{M_{crL}}{M_{cr.Max}}$	$P_G$ (%)	$P_D$ (%)	(%)
$V_{M1}$	220	597,90	578,53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

Fonte: Autor (2023).

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

(a) VM3

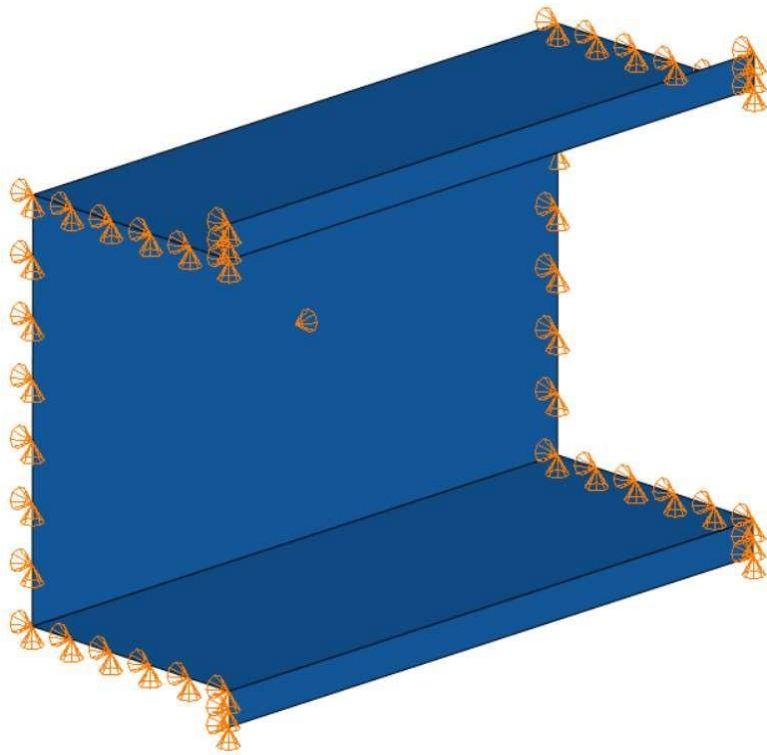
(b) Vm3



Fonte: Autor (2023).

- Foram aplicadas cargas concentradas equivalente à 1 kN.cm

Figura 5 - Condição de apoio SCA.



Fonte: Autor (2023).

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

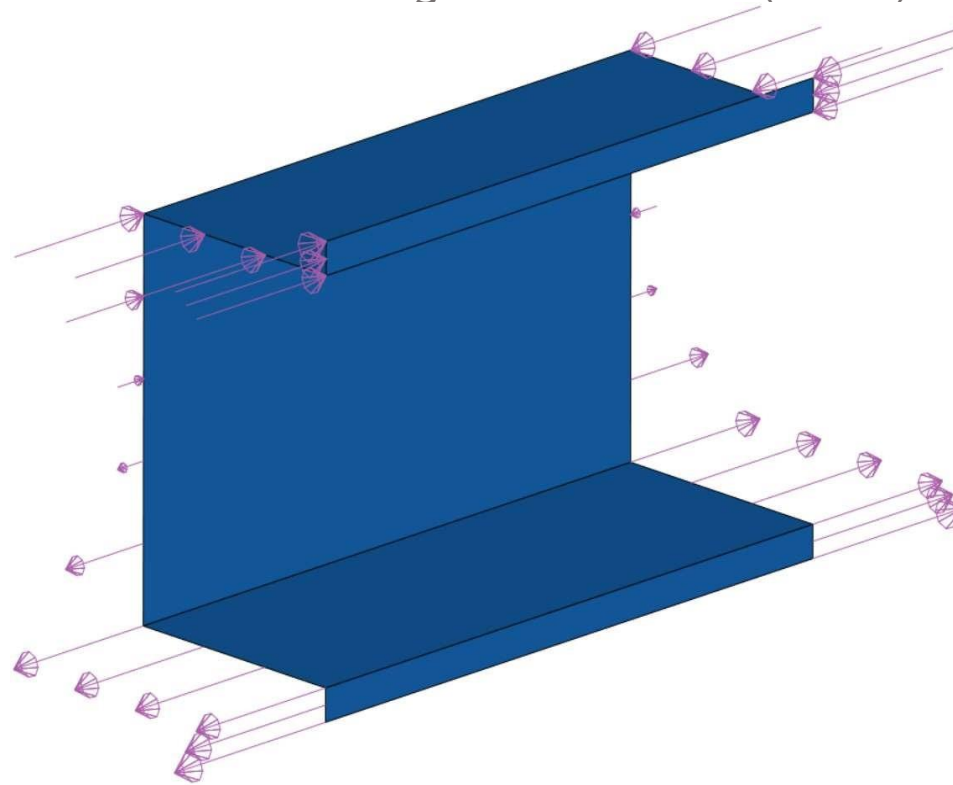


Tabela 5 - Relação  $M_{crDG}$  e  $M_{Abq}$ .

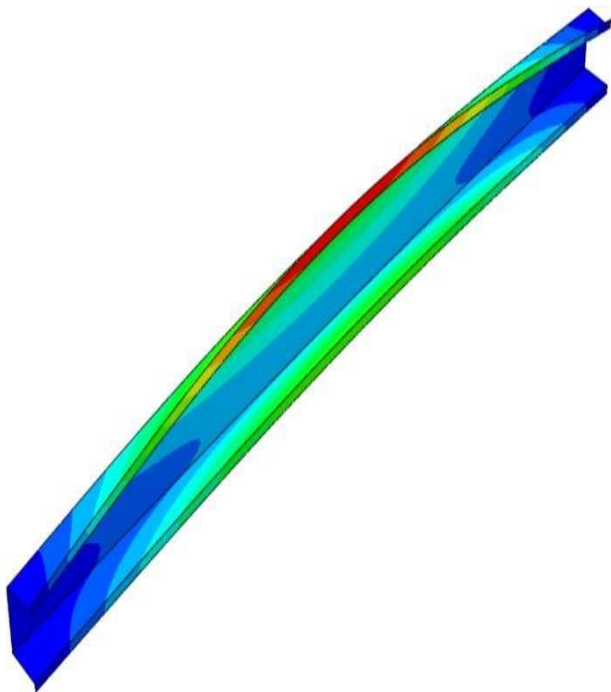
VIGA	$\psi = 1$			$\psi = 0$			$\psi = -1$		
	$M_{crDG}$ (kN.cm)	$M_{Abq}$ (kN.cm)	$\frac{M_{crDG}}{M_{Abq}}$	$M_{crDG}$ (kN.cm)	$M_{Abq}$ (kN.cm)	$\frac{M_{crDG}}{M_{Abq}}$	$M_{crDG}$ (kN.cm)	$M_{Abq}$ (kN.cm)	$\frac{M_{crDG}}{M_{Abq}}$
VM1	366,06	363,53	1,01	455,00	447,81	1,02	485,56	471,28	1,03
Vm1	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

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)	$\frac{M_{crDG}}{M_{Abq}}$
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

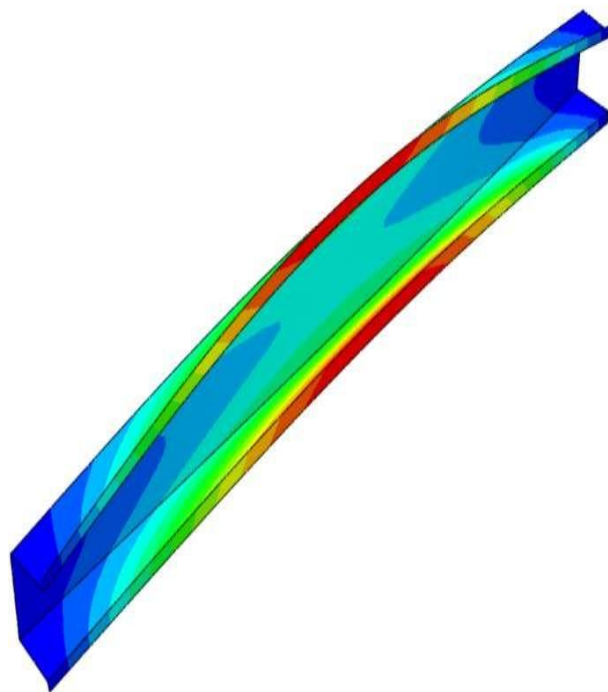
Fonte: Autor (2023).

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

(a) VM3



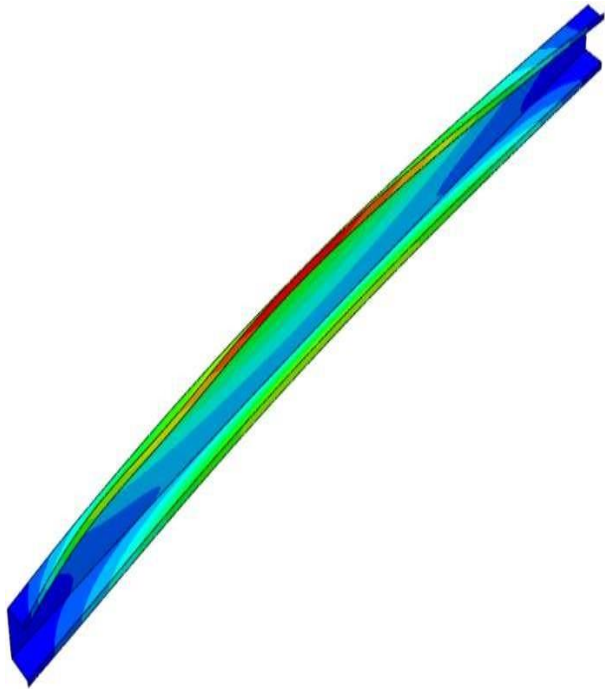
(b) Vm3



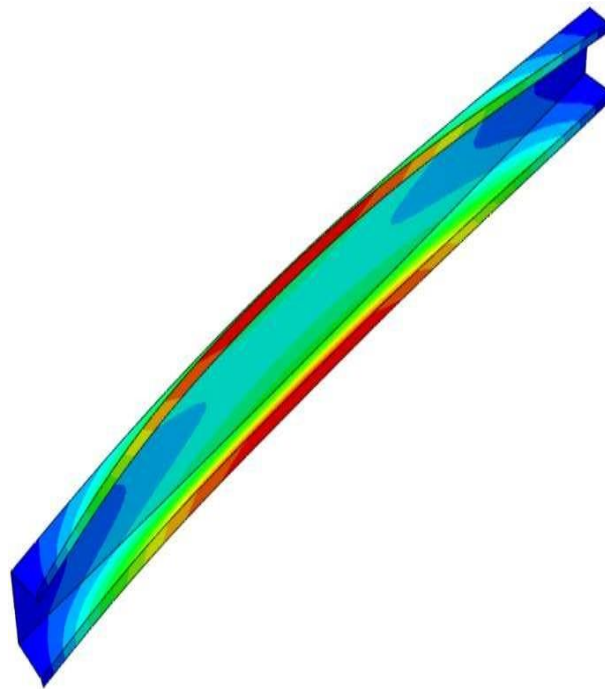
Fonte: Autor (2023).

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

(a) VM3



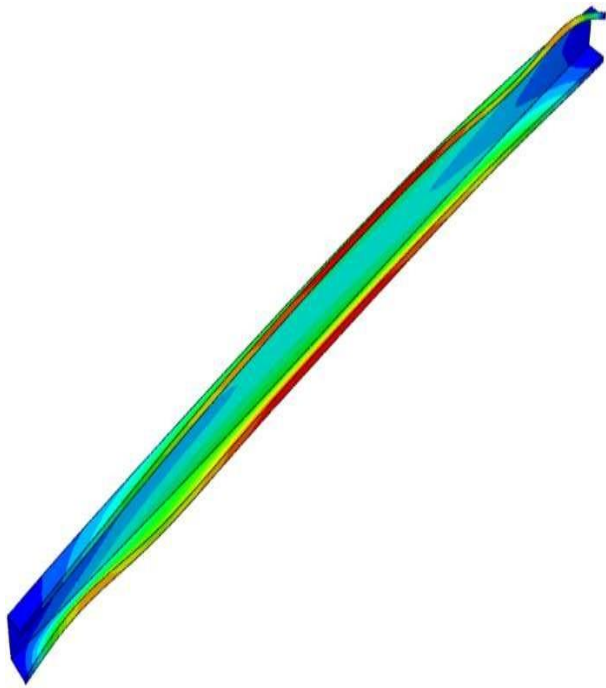
(b) Vm3



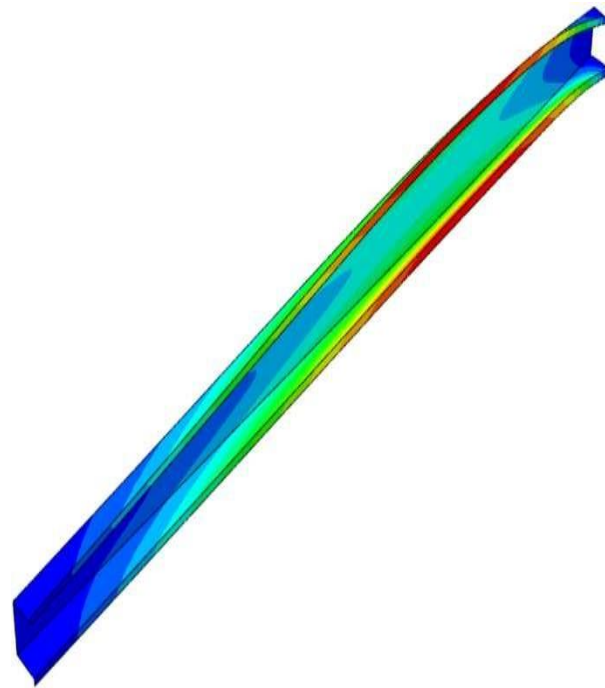
Fonte: Autor (2023).

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

(a) VM3



(b) Vm3



Fonte: Autor (2023).

# CONCLUSÃO

- Valores com diferenças máximas  $M_{crDG}/M_{Abq} = 1,04$  sendo na ordem de 4%.
- Comportamentos conforme o esperado, demonstrando que foi feito uma modelagem adequada a condição de apoio e aos esforços aplicados
- $\Psi = +1 \rightarrow 0 \rightarrow -1$ .
- 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 KÁRMÁN, 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. 2014a; 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.

# CONSTRU METAL 2023

**2 1 s e t**

8 h - 21 h

allianz parque

são paulo - sp



@congressoconstrumetal  
congressoconstrumetal.com.br

REALIZAÇÃO



ORGANIZAÇÃO/PROMOCIÓN

**Franca! Feiras** DESDE 1969