

Análise numérica via MEF e dimensionamento pelo Método da Resistência Direta de estacas-prancha metálicas de parede fina sob colapso local

Victor Justen da Silveira Machado¹; Alexandre Landesmann²

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo numérico-computacional, via método dos elementos finitos (MEF), para análises de estabilidade e resistência última de estacas-prancha (EP), constituídas por perfis metálicos formados a frio (PFF), sob modo de falha local, considerando carregamentos típicos atuantes em elementos estruturais de fundações, além de avaliar a aplicabilidade do Método da Resistência Direta (MRD) na estimativa de resistência última. Inicialmente, realiza-se uma análise linear de estabilidade via GBT (*Generalized Beam Theory*), sendo em seguida abordada a caracterização mecânica dos modos de flambagem ora citados. A seguir, um modelo elaborado em elementos finitos no software ANSYS é empregado para análises não-lineares física e geométrica das estacas que se encontram sob modo de flambagem local, visando avaliar o comportamento estrutural na pós-flambagem elástica e elasto-plástica. Finalmente, os resultados numéricos desta pesquisa são comparados com as previsões obtidas através da utilização do MRD, que consta na ABNT NBR 14762:2010 (Anexo C).

Palavras-chave: Flambagem Local. Estacas-Prancha. Método da Resistência Direta. Análise numérica ANSYS.

¹M.Sc., Victor Justen da Silveira Machado, victorjusten@gmail.com

²D.Sc., alandes@coc.ufrj.br, autor correspondente. Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). CEP 21945-970, Cx.Postal 68506, Rio de Janeiro/RJ, Brasil.

1. Introdução

A tecnologia de construção utilizando estacas-prancha possui mais de 100 anos, sendo aprimorada com novas soluções de engenharia, objetivando atender as mais diversificadas demandas. Uma consequência deste fato é um desenvolvimento constante de novos produtos comercializados, geralmente constituídos por chapas finas e de elevada esbeltez, desenvolvendo assim, fenômenos de instabilidade que variam, dentre outros fatores, com a sua forma, comprimento e condições de apoio, podendo apresentar conseqüentemente, diversos modos de flambagem.

Atualmente, o Método da Resistência Direta (MRD) possui grande importância no contexto do dimensionamento de estruturas de aço em PFF. Ele fornece expressões que possibilitam estimar a resistência última de diversas seções sob os modos de flambagem local, distorcional, global e interações entre estes, gerando estimativas precisas e seguras, baseadas no comportamento da seção transversal à flambagem e na tensão de escoamento do aço utilizado. A simplicidade e a eficiência decorrentes do uso das formulações do MRD são as principais vantagens deste método, levando – conseqüentemente – a uma elevada utilização do mesmo, inclusive como parte de normas de dimensionamento de estruturas de aço. Entretanto, a norma que rege o dimensionamento de estacas-prancha, *Eurocode 3 – part 5* (EN 1993-5:2007), não levam em consideração a aplicação do MRD na previsão da resistência última.

Sendo assim, o desenvolvimento de novos produtos aliado a escassez de resultados na literatura sobre comportamento de flambagem e pós-flambagem (elástica e elasto-plástica), além da verificação da aplicabilidade do MRD no dimensionamento de EP, serviram de motivação para a presente pesquisa.

2. Seleção dos Perfis

As seções transversais, dimensões e comprimentos adotados para as análises foram sugeridos pela indústria, como possíveis soluções para o mercado de estacas-prancha, sendo suas propriedades geométricas relacionadas na Tabela 2.1, onde (i) t é a espessura da chapa, (ii) A é a área da seção transversal do perfil, (iii) x_g é a distância do centroide na direção x e (iv) y_g é a distância do centroide na direção y . As análises levaram em consideração diferentes valores de espessura, objetivando analisar sua influência nos resultados.

Tabela 2.1. Propriedades geométricas das seções transversais selecionadas para análise

SEÇÃO	t (mm)	A (cm ²)	x_g (cm)	y_g (cm)
1	3,00	27,13	117,50	9,26
	4,75	42,95	117,50	9,26
	6,30	57,01	117,50	9,26
2	3,00	25,17	53,30	10,36
	4,75	39,85	53,30	10,36
	6,30	52,86	53,30	10,36
3	3,00	13,00	141,84	2,61
	4,75	20,61	141,84	2,61
	6,30	27,31	141,84	2,61

As dimensões das seções estudadas são mostradas na Figura 2.1.

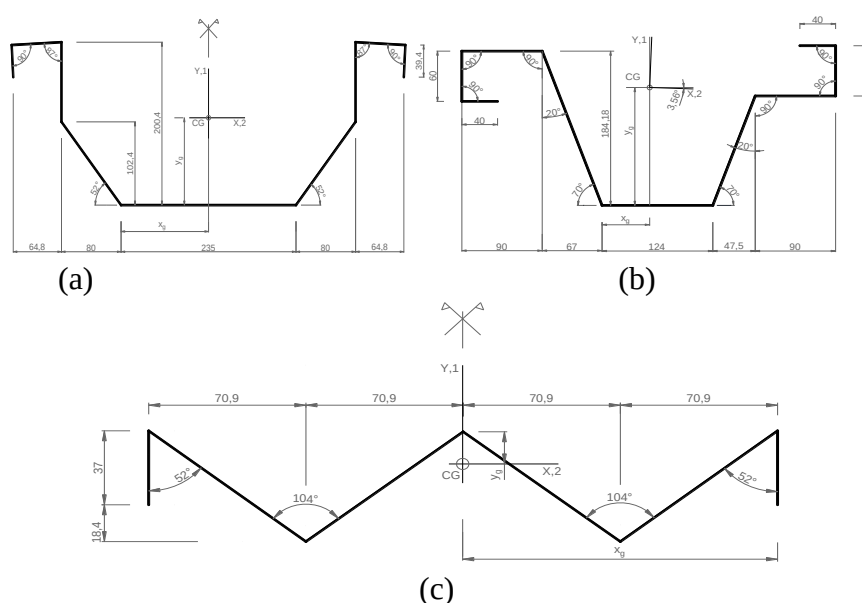


Figura 2.1. Seções transversais das estacas-prancha selecionadas. (a) Seção 1, (b) Seção 2 e (c) Seção 3. Dimensões em milímetros (mm) e ângulos em graus (°).

Analisando a Figura 2.1, observa-se que as seções 1 e 3 são simétricas em relação ao eixo Y, já a seção 2 é anti-simétrica. Os interlocks encontram-se localizados nos extremos de cada seção, sendo encaixados para dar origem à parede de estacas-prancha conforme ilustra a Figura 2.2.

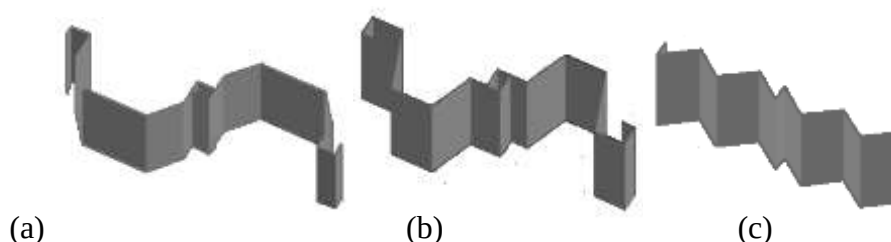


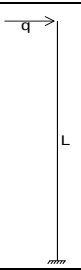
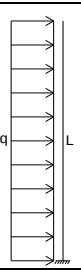
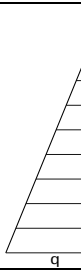
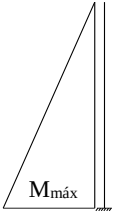
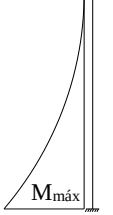
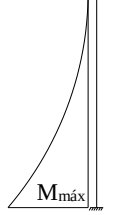
Figura 2.2. Parede de estacas-prancha - encaixe dos interlocks na (a) Seção 1, (b) Seção 2 e (c) Seção 3.

Tendo em vista a ampla utilização dos perfis de estacas-prancha para a construção de estacionamentos subterrâneos e subsolos de edifícios, as análises foram feitas levando em consideração o valor de 3,0m para o comprimento das estacas estudadas (valor aproximado do pé-direito usual de uma edificação).

2.1 Seleção dos casos de carregamento

Com o objetivo de simular as pressões laterais atuantes nas paredes das estacas-prancha e analisar a influência destas nas análises de flambagem e pós-flambagem, melhor detalhadas nos itens 3 e 4, adotam-se três casos distintos de carregamento, ilustrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Casos de carregamento adotados para análises das estacas.

CASOS DE CARREGAMENTO	k_1	k_2	k_3
			
	L = 300cm	L = 300cm	L = 300cm
ASPECTO DO DIAGRAMA DE MOMENTO FLETOR	$M_{(x)} = q \cdot z$ 	$M_{(x)} = \frac{q \cdot z^2}{2}$ 	$M_{(x)} = \frac{q \cdot z^3}{6L}$ 
	Polinômio do 1º Grau	Polinômio do 2º Grau	Polinômio do 3º Grau

Analisando a Tabela 2.2, percebe-se que as estacas-prancha são elementos estruturais de fundações sujeitos, preponderantemente, a solicitações de momentos fletores e que a escolha dos 3 casos de carregamentos mencionados, se deu mediante a influência do aspecto do diagrama de momento fletor.

Observa-se que do caso de carregamento k_1 ao caso de carregamento k_3 , o polinômio representativo do diagrama de momento fletor cresce 1 grau respectivamente. Para facilitar a

comparação dos resultados referentes aos diferentes tipos de carregamento, adota-se valores de carga “q” que geram tensões normais de compressão com o valor de 1kN/cm² no extremo engastado da estaca, independente do tipo de carregamento analisado, conforme Equação 2.1.

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{I} y = 1kN/cm^2 \quad (2.1)$$

2.2 Análise de flambagem via GBTul

Com o objetivo de esclarecer os resultados da análise de flambagem realizada utilizando o código GBTul, de acordo com a Teoria Generalizada de Vigas - Generalized Beam Theory (BEBIANO et al. 2010ab), apresentados a seguir, discute-se o significado das palavras flambagem local, distorcional e global. Sabe-se que no plano da seção transversal, a flambagem local envolve flexões de placas, sem apresentar deslocamentos transversais das arestas de interseção das placas adjacentes que formam a seção. Diferente do que ocorre na flambagem distorcional, que possui como característica, estes deslocamentos de arestas de interseção (HANCOCK, 2003). Já a flambagem global, é um modo de flambagem onde o elemento estrutural se deforma sem apresentar deformações em sua seção transversal (SCHAFER & ÁDÁNY, 2005).

Pode-se dizer que as estacas-prancha apresentam modo de flambagem "puro" quando os modos de deformação distorcional, local ou global possuem uma contribuição dominante em relação aos demais modos. De acordo com tais definições e aproveitando a linguagem modal do código GBTul (BEBIANO et al. 2010ab), a Figura 3.3(a),(b),(c) apresentam, respectivamente, os modos de deformação global, distorcional e local para as seções transversais analisadas utilizando o código GBTul (BEBIANO et al. 2010ab).

Para a realização da análise de flambagem com o código GBTul, considerou-se E=210 GPa (módulo de Young), $\nu=0.3$ (coeficiente de Poisson), condições de apoio de extremidades engastada (deslocamentos, rotações globais/locais e empenamento restringidos) e livre com comprimento de estaca-prancha L=300cm.

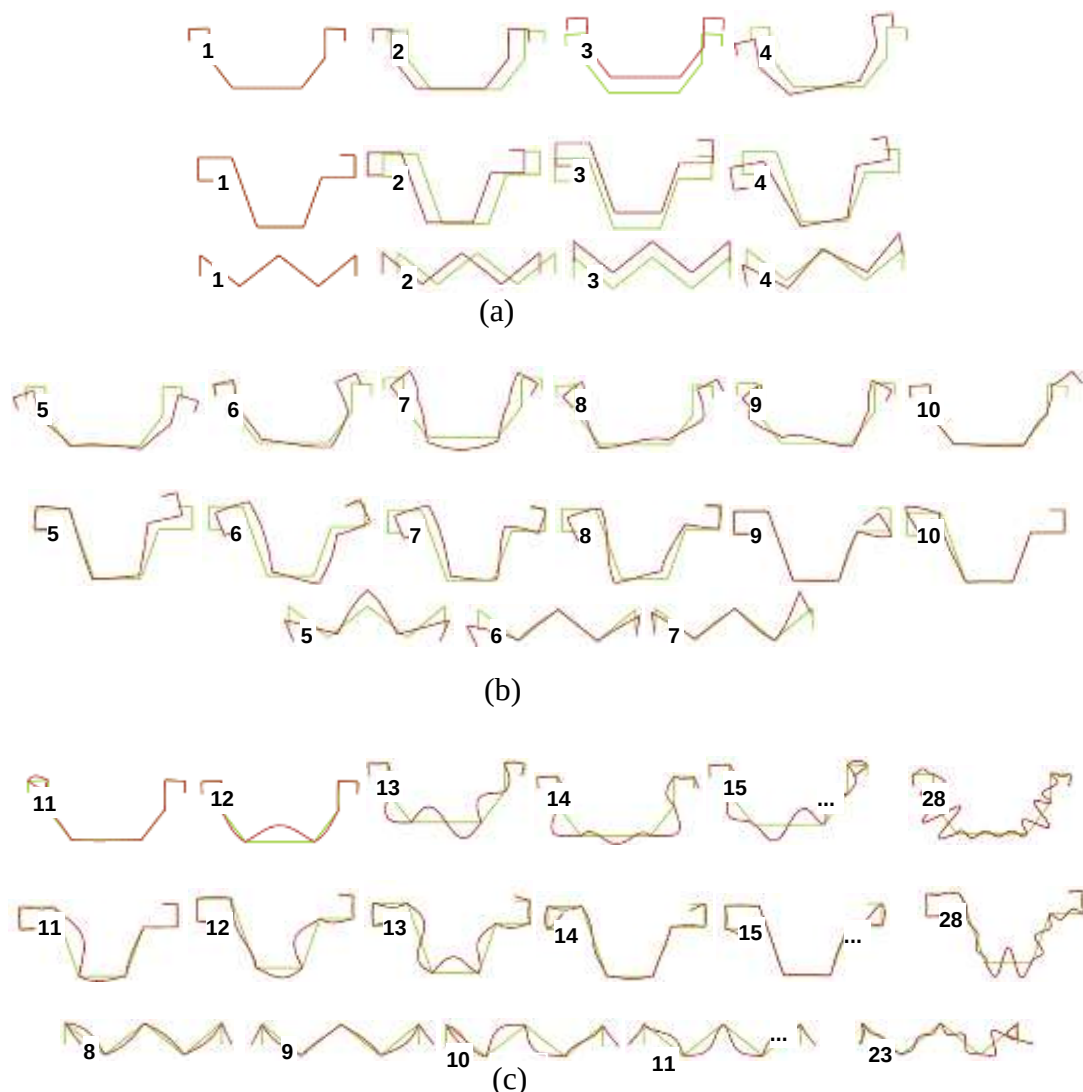


Figura 2.3. Modos de deformação das seções transversais selecionadas para análise de flambagem, obtidos utilizando o código GBTul. (a) global, (b) distorcional e (c) local.

Os resultados das análises para as seções 1 à seção 3 estão apresentados, respectivamente, nas Tabelas 2.3 à 2.5, onde são fornecidos (i) os tipos de carregamentos utilizados (K), (ii) as espessuras (t), (iii) os momentos críticos correspondentes à flambagem local ($M_{cr,L}$) para o comprimento analisado $L = 300\text{cm}$, (iv) as relações entre os momentos críticos de flambagem global, local e distorcional e (v) a participação modal correspondente aos principais modos de deformação ($p_{(\text{número do modo de deformação})}$).

Tabela 2.3. Análise de flambagem da Seção 1 obtida utilizando o código GBTul.

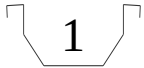
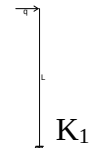
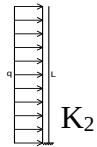
SEÇÃO	K	t (mm)	$M_{cr.L}$ (kN.cm)	$\frac{M_{cr.D}}{M_{cr.L}} \frac{M_{cr.G}}{M_{cr.L}}$		(P ₁₁)	(P ₁₃)	(P ₇)	(P ₅)	(P _{outros})
						(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
		3	3641,9	31,9	82,2	83,2	4,1	3,8	4,6	4,3
		4,75	14659,4	20,6	32,4	76,9	3,8	5,5	7,7	6,1
		6,3	34182,1	15,2	18,5	71,7	3,5	6,6	10,3	7,9
		3	3850,9	37,8	176,9	81,7	4,2	4,4	4,7	5,0
		4,75	15292,7	23,3	70,7	75,4	3,8	6,6	6,9	7,3
		6,3	35702,0	17,2	40,2	70,2	-	7,8	9,0	12,9

Tabela 2.4. Análise de flambagem da Seção 2 obtida utilizando o código GBTul.

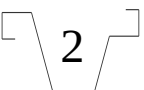
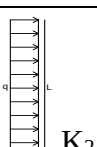
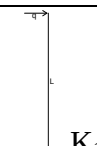
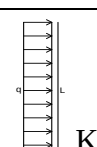
SEÇÃO	K	t (mm)	$M_{cr.L}$ (kN.cm)	$\frac{M_{cr.D}}{M_{cr.L}} \frac{M_{cr.G}}{M_{cr.L}}$		(P ₁₁)	(P ₁₂)	(P ₁₃)	(P ₅₊₆₊₈)	(P _{outros})
						(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
		3	7397,2	5,3	16,3	32,5	24,4	17,7	3,5	21,9
		4,75	29362,2	4,2	6,5	30,3	22,8	16,5	7,5	22,9
		6,3	68523,4	3,3	3,7	26,2	19,7	14,3	14,7	25,2
		3	7786,9	9,5	33,3	32,1	24,2	17,1	3,9	22,6
		4,75	30925,8	5,6	13,3	30,0	22,6	15,9	7,9	23,4
		6,3	72111,5	4,0	7,6	27,4	20,8	14,7	12,6	24,6

Tabela 2.5. Análise de flambagem da Seção 3 obtida utilizando o código GBTul.

SEÇÃO	K	t (mm)	$M_{cr.L}$ (kN.cm)	$\frac{M_{cr.D}}{M_{cr.L}} \frac{M_{cr.G}}{M_{cr.L}}$		(P ₃)	(P ₆)	(P ₅)	(P _{outros})
						(%)	(%)	(%)	(%)
		3	13062,1	1,8	0,1	84,5	9,0	6,4	0,1
		4,75	51986,2	1,7	0,1	89,7	5,9	4,3	0,1
		6,3	121689,1	1,7	0,1	92,2	4,5	3,2	0,1
		3	14139,8	1,8	0,4	80,2	11,6	8,1	0,1
		4,75	56272,3	1,7	0,2	85,7	8,3	5,9	0,1
		6,3	131734,2	1,7	0,2	88,4	6,7	4,8	0,1

Sobre os resultados apresentados nas Tabelas 2.3 à 2.5, as seguintes observações podem ser apontadas:

- (i) Nota-se que os modos críticos de flambagem são resultantes de uma combinação de modos de deformação;
- (ii) Analisando a participação dos modos de deformação para as seções transversais 1 e 2 , pode-se dizer que os modos locais foram preponderantes em relação aos outros modos de deformação. Já para a seção 3, o modo de deformação global foi o dominante. Observa-se o comportamento de modo de flambagem puro (modos de flambagem que apresentam uma contribuição dominante de modos de deformação). Este fato também pode ser evidenciado nas relações entre os momentos críticos de flambagem local, distorcional e global;
- (iii) Para a seção 1, observa-se que a participação do modo de deformação principal – modo que apresenta maior contribuição percentual na análise, para os casos de carregamentos utilizados, comparados entre as mesmas espessuras adotadas, obteve uma diferença percentual média de aproximadamente 2% e em relação à valores de $M_{cr.L}$, a diferença percentual é da ordem de 5% ;
- (iv) Para a seção 2, tanto a participação modal principal como os valores de $M_{cr.L}$, obtiveram diferenças percentuais da ordem de 5% entre os carregamentos utilizados, comparados segundo as mesmas espessuras utilizadas nas análises;
- (v) Para a seção 3, em relação a participação modal principal, percebe-se a diferença percentual entre os carregamentos utilizados na ordem de 5%. Já para os valores de M_{cr} , os resultados apresentaram uma diferença percentual de aproximadamente 8%. Ao aumentar a espessura, e consequentemente a rigidez das estacas, observa-se um aumento da participação dos modos de deformação global e uma redução da participação dos modos de deformação distorcional;
- (vi) Para as seções 1 e 2, observa-se que a redução da espessura aumenta a participação dos modos de deformação local.

3. Modelo Numérico

As análises de pós-flambagem das EP foram obtidas segundo modelos de análise não-linear física e geométrica via método dos elementos finitos, com emprego de elementos de casca, no programa ANSYS (SAS, 2009). As estacas foram discretizadas em elementos Shell181 (conforme nomenclatura do ANSYS: elementos de casca de parede fina com inclusão de deformação de

cisalhamento transversal, integração completa, com quatro nós e seis graus de liberdade por nó), utilizando uma malha de 5mm x 5mm. De acordo com LANDESMANN & CAMOTIM (2013) estas características de malha fornecem resultados precisos considerando um razoável esforço computacional. As análises de pós-flambagem elástica foram realizadas por meio de uma técnica de solução incremental-iterativa que combina o método de Newton-Raphson com uma estratégia de controle de comprimento de arco (arc-length). Todas as estacas exibem (i) comprimento $L=300\text{cm}$, (ii) imperfeições iniciais com pequenas amplitudes – 10% da espessura (GARIFULLIN & NACKENHORST, 2015) e (iii) modelo do material, perfeitamente elástico e elástico-plástico, caracterizado por $E = 210\text{ GPa}$, $\nu = 0,3$ e diferentes valores para as tensões de escoamento do aço (f_y). A maioria das tensões de escoamento consideradas neste trabalho são demasiadamente elevadas e irreais, contudo, a razão para se considerar estes valores de f_y está relacionada com a possibilidade de cobrir uma vasta gama de esbeltezas. Nestas análises não são levadas em consideração os efeitos das tensões residuais.

Em relação às condições de contorno empregadas nos modelos em elementos finitos, nota-se que todas as estacas-prancha foram analisadas levando em consideração uma extremidade livre e a outra engastada (deslocamentos, rotações e empenamento restringidos), conforme ilustra a Figura 3.1.(a). Em relação à junção de estacas-prancha, FANG & BREWER (1969) constataram que a consideração das estacas trabalhando juntas como uma única peça é plausível, e somente possível, através da mobilização do conjunto como um todo pelos interlocks. A perda de transmissão de esforços cortante nas interligações entre as estacas-prancha não foi levada em consideração nos modelos elaborados em elementos finitos. A translação das estacas na direção X foi restringida, como pode ser observado na Figura 3.1.(b), com o intuito de simular a continuidade da parede de EP não modelada, formada pela junção de inúmeras estacas adjacentes. Os interlocks foram modelados considerando a compatibilização em dois pontos da malha em elementos finitos, pertencentes às respectivas seções transversais adjacentes, como pode ser observado na Figura 3.1.(c).

(a)

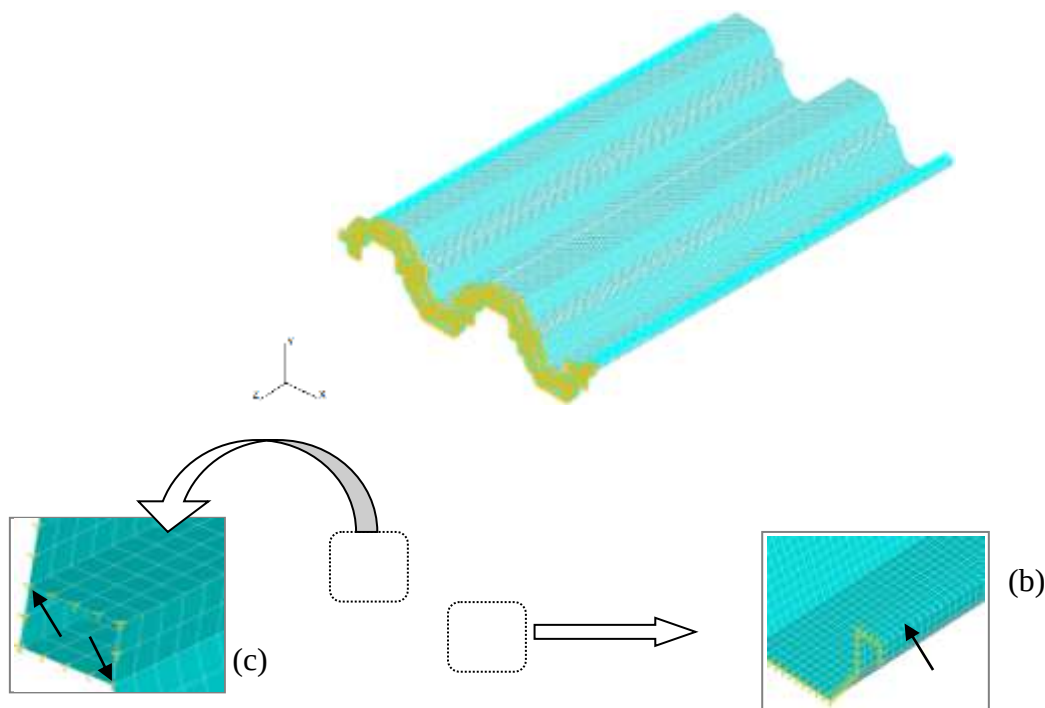


Figura 3.1. Modelo em elementos finitos (a) seção 1 agrupada; (b) condições de contorno adotadas: base engastada e em destaque, deslocamentos transversais na direção X restringidos e (c) modelagem do interlock, com destaque para pontos de compatibilização das malhas em elementos finitos das seções transversais adjacentes.

A incorporação das imperfeições geométricas iniciais no modo crítico de flambagem foi realizada por meio do seguinte procedimento (e.g., LANDESMANN & CAMOTIM, 2013): (i) determinação da forma do modo crítico de flambagem, através de uma análise linear de flambagem via método dos elementos finitos utilizando o programa ANSYS (SAS, 2009), adotando exatamente a mesma discretização/malha empregada para realizar a subsequente análise de pós-flambagem e (ii) Uso do resultado da análise linear de flambagem, redimensionando a deformada final para levar os deslocamentos transversais máximos ao valor de $0,1 \cdot t$ – notar que desta forma o resultado da análise linear de flambagem é utilizado como dado de entrada para a análise linear e não-linear de pós-flambagem.

4. Análises de Pós-flambagem e Dimensionamento

Neste item são demonstrados os resultados obtidos pela análise numérica do comportamento de pós-flambagem elástica e elasto-plástica apresentados pelas estacas-prancha. Os efeitos da variação do tipo de carregamento na estimativa da resistência última,

calculada a partir das formulações do Método da Resistência Direta (MRD) apresentadas na ABNT NBR 14762:2010 (Anexo C), serão discutidos no item 4.3.

4.1 Comportamento de pós-flambagem elástica

O objetivo é avaliar o comportamento das estacas-prancha em regime elástico e como este comportamento é influenciado pela variação da espessura e dos carregamentos aplicados. Os gráficos apresentados nas Figuras 4.1 à 4.3 ilustram o comportamento de pós-flambagem elástica das estacas, onde tem-se a tensão aplicada (σ/σ_{cr}) e o deslocamento ($|\delta|/t$), ambos normalizados. Sendo (i) $|\delta|$, o máximo deslocamento transversal que ocorre ao longo da estaca, (ii) t , a espessura da seção, (iii) σ , a tensão normal de compressão e (iv) σ_{cr} , a tensão crítica de bifurcação local mínima. Na Figura 4.1 é feita uma comparação da trajetória de pós-flambagem elástica, variando os carregamentos utilizados (K_1 , K_2 e K_3) para as mesmas espessuras (t). Na Figura 4.2, para o mesmo carregamento utilizado, a comparação é feita variando-se a espessura das seções e, por último, na Figura 4.3, analisam-se as trajetórias de pós-flambagem elástica das seções 1 e 2, comparando-as segundo os mesmos carregamentos e espessuras utilizadas nas análises.

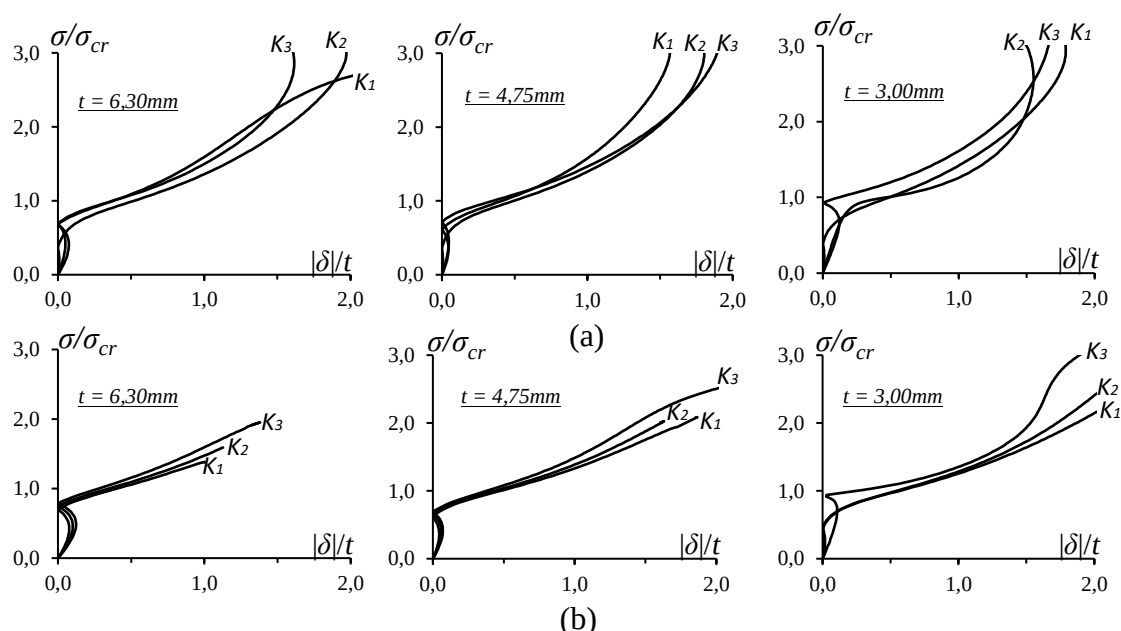


Figura 4.1. Trajetória de pós-flambagem elástica normalizada (σ/σ_{cr}) vs. $|\delta|/t$, contabilizando diversos carregamentos e espessuras para a (a) seção 1 e (b) seção 2.

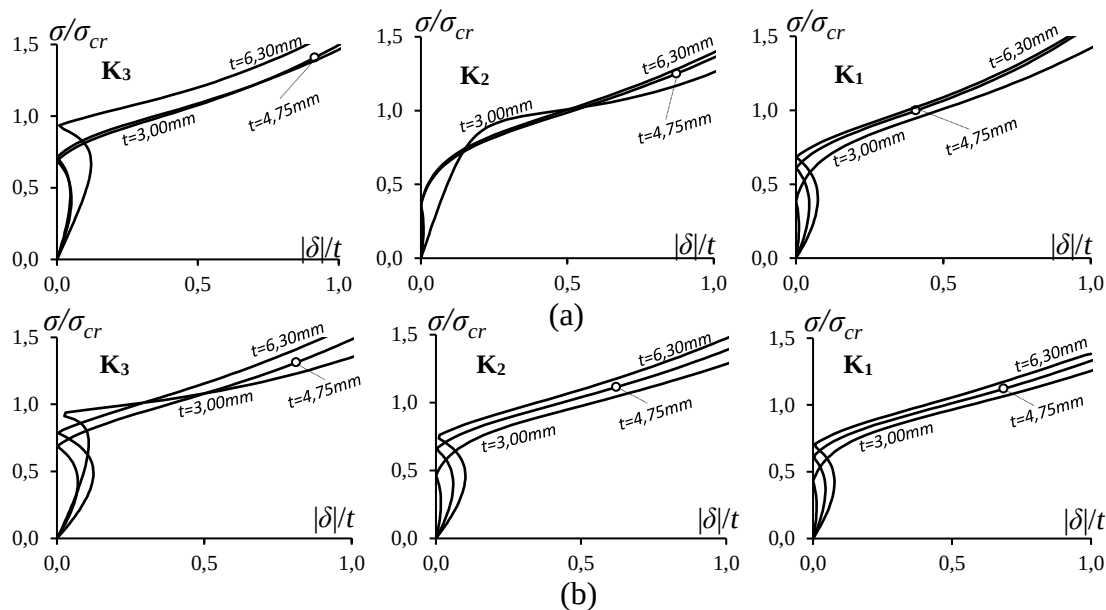


Figura 4.2. Trajetória de pós-flambagem elástica normalizada (σ/σ_{cr}) vs. $|\delta|/t$, contabilizando diversas espessuras e carregamentos para a (a) seção 1 e (b) seção 2.

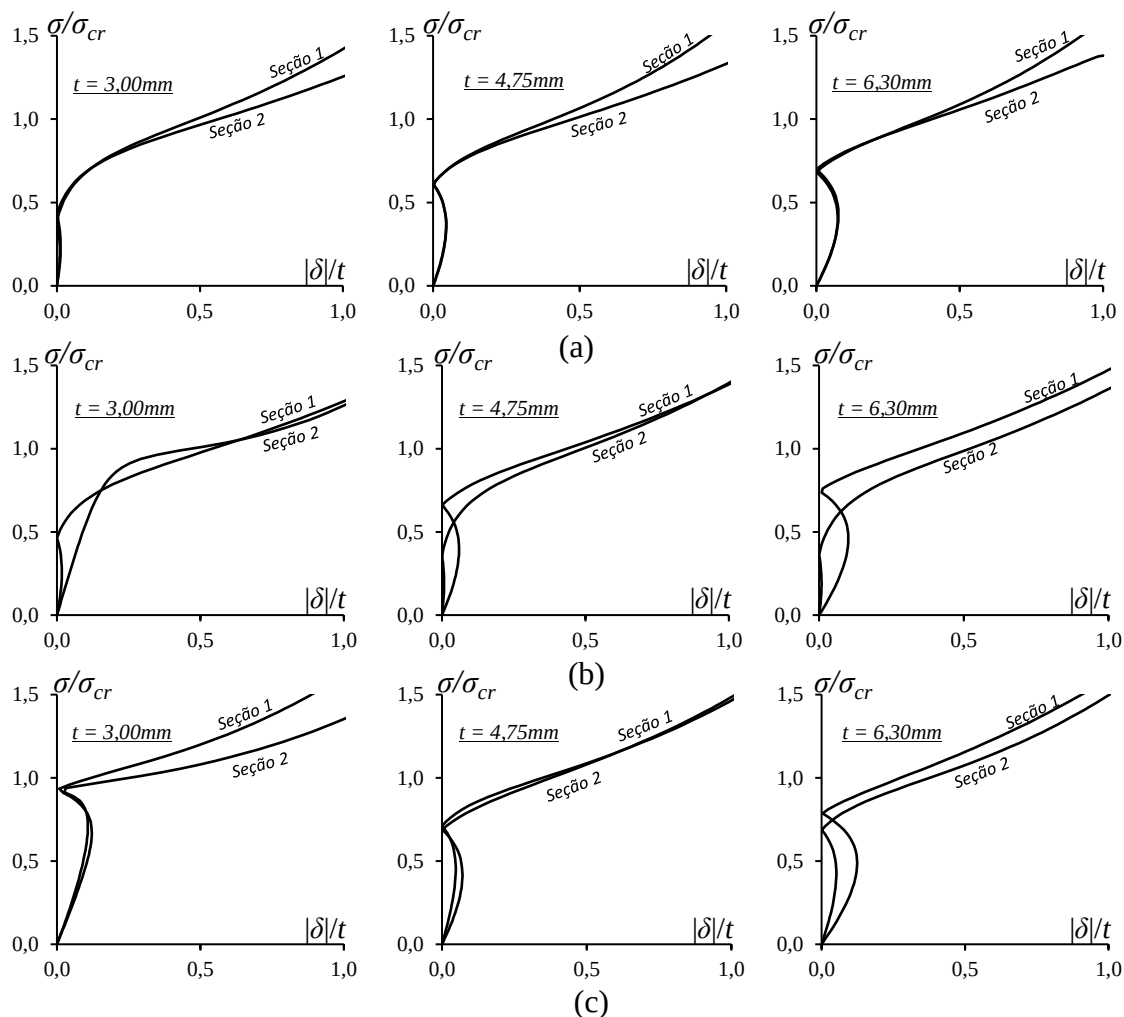


Figura 4.3. Trajetória de pós-flambagem elástica normalizada (σ/σ_{cr}) vs. $|\delta|/t$, comparação entre seção 1 e seção 2 contabilizando mesmas espessuras e carregamentos (a) K_1 , (b) K_2 e (c) K_3 .

A análise das trajetórias de pós-flambagem elástica, apresentadas nas Figuras 4.1 à 4.3, conduzem às seguintes conclusões:

- (i) Para os diferentes tipos de carregamentos e espessuras adotados, as estacas-prancha apresentam trajetórias de pós-flambagem estável, i.e., $\sigma/\sigma_{cr} \geq 1$;
- (ii) Destaca-se que a reserva de resistência elástica cresce a medida que a espessura, e consequentemente a rigidez é aumentada, independente do carregamento adotado para análise;
- (iii) O comportamento das trajetórias de pós-flambagem elástica difere entre os diferentes tipos de carregamentos utilizados;
- (iv) Observa-se que, independente do tipo de carregamento e espessuras utilizadas na comparação, a seção 1 mostra-se com uma reserva de resistência elástica maior que a seção 2;
- (v) Apesar de seu alcance limitado, este estudo faz com que seja possível observar que tanto as dimensões da seção transversal e a espessura t adotada, independente do tipo de carregamento utilizado, influenciam consideravelmente nas características de rigidez e resistência de pós-flambagem elástica local das estacas-prancha.

4.2 Comportamento de pós-flambagem elasto-plástica

O objetivo é avaliar o comportamento na pós-flambagem das estacas-prancha sujeitas aos carregamentos K_1 , K_2 e K_3 e como este comportamento é influenciado pela variação de suas espessuras (t). A fim de acrescentar conhecimento sobre o comportamento elasto-plástico das estacas estudadas neste trabalho que apresentam modo crítico de flambagem local como modo dominante, é apresentado um estudo paramétrico envolvendo a seção transversal 1, exibindo: (i) $t = 6.30\text{mm}$, $t = 4.75\text{mm}$ e $t = 3.00\text{mm}$, (ii) $L = 300\text{ cm}$ para todas as estacas e (iii) valores de esbeltez variando entre 0.10 e 1.73. Posteriormente, estes resultados serão utilizados para comparação com o dimensionamento através da utilização do Método da Resistência Direta (MRD).

A Figura 4.4 ilustra as trajetórias de equilíbrio elasto-plástico com a evolução das configurações das deformadas e tensões de von Mises para as estacas-prancha de seção transversal 1, considerando $\lambda=1,73$.

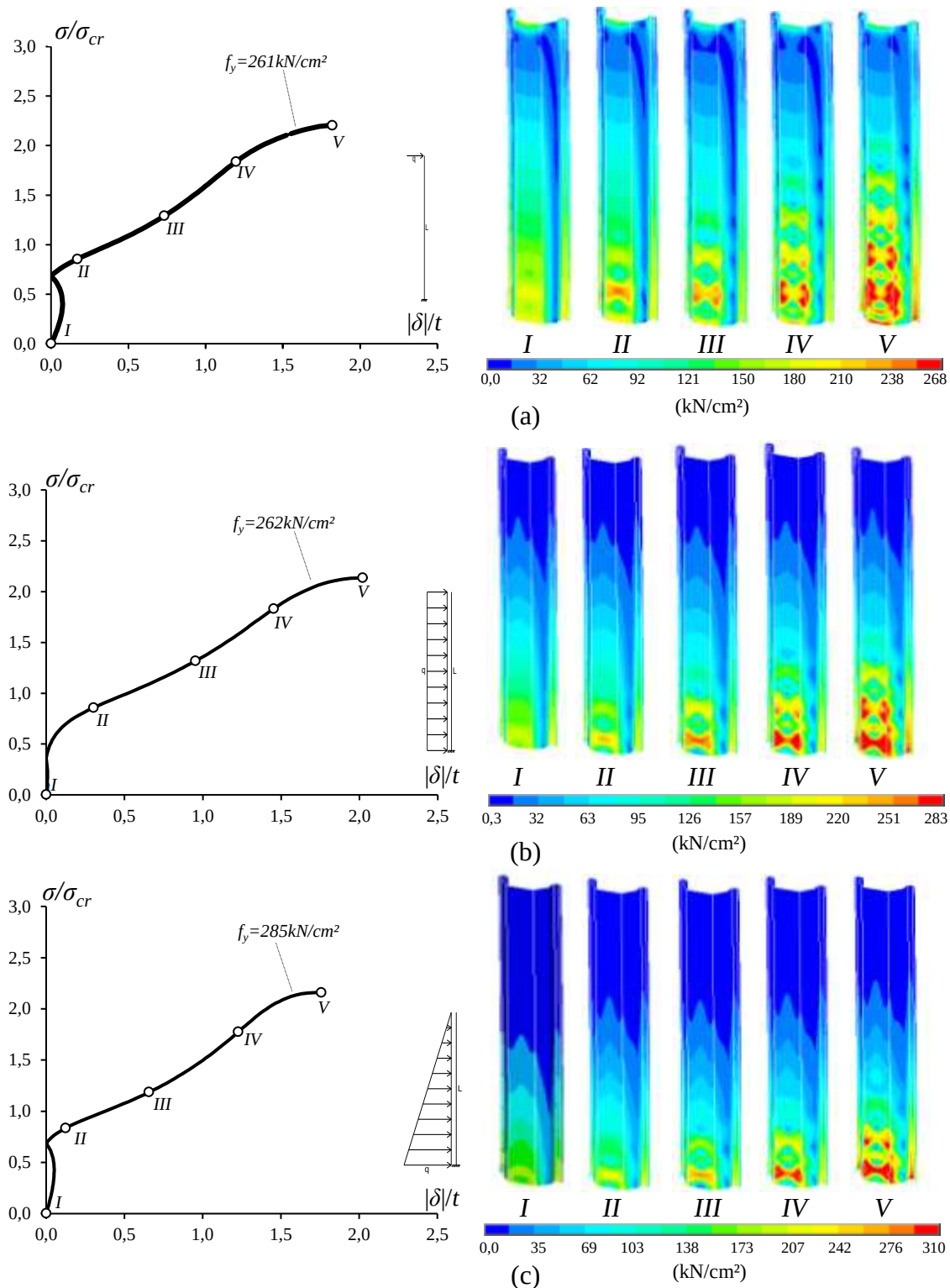


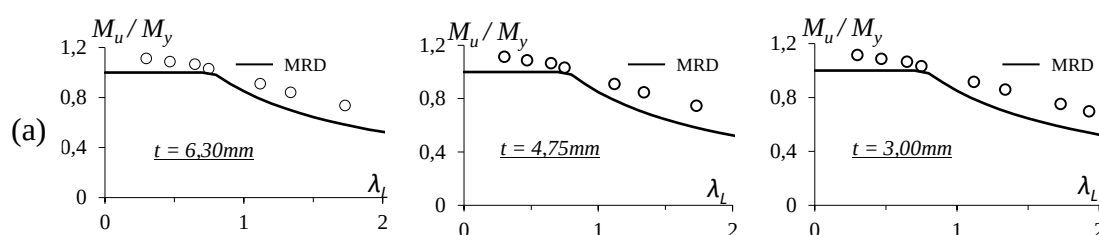
Figura 4.4. Trajetória de equilíbrio elasto-plástica, configurações das deformadas (incluindo o mecanismo de colapso) e tensão de von Mises para as estacas-prancha de Seção 1 com $\lambda = 1,73$, considerando os carregamentos (a) K_1 , (b) K_2 e (c) K_3 .

- (i) A evolução das tensões ao longo do comprimento longitudinal das estacas-prancha, para os diferentes carregamentos utilizados, se mostraram diferentes: para o carregamento K_1 , começam com tensões que solicitam praticamente toda a estrutura, já em comparação com os carregamentos K_2 e K_3 , nota-se na parte superior da estaca (oposta ao apoio) a existência de trechos não solicitados. Porém, ambos os carregamentos analisados apresentaram o aumento da concentração de tensões na região do apoio, à medida que a análise foi evoluindo;
- (ii) Nota-se o acúmulo de tensões nas regiões que apresentam maior amplitude de deslocamento devido à evolução do modo de flambagem local;
- (iii) Observa-se que as estacas desenvolvem inicialmente o modo de flambagem local em regime elástico e, a seguir, evoluem para a formação de um mecanismo caracterizado pelo desenvolvimento da plasticidade nas paredes da seção de curvatura máxima, determinando assim o colapso estrutural.

Os efeitos da variação do tipo de carregamento na estimativa da resistência última, calculada a partir das formulações do Método da Resistência Direta (MRD), serão discutidos na seção seguinte, dedicada exclusivamente à análise das resistências últimas e à aplicabilidade do MRD no dimensionamento de estacas-prancha.

4.3 Dimensionamento via MRD

Esta seção tem por finalidade verificar, utilizando as equações para elementos estruturais sob flexão e flambagem local, apresentadas na ABNT NBR 14762:2010 (Anexo C), a adequação do Método da Resistência Direta (MRD) para o dimensionamento de estacas-prancha. As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam curvas de dimensionamento propostas pelo MRD e os pontos de carga última normalizadas (M_u/M_y), obtidos através da análise numérica para as estacas-prancha em estudo, variando-se os carregamentos adotados.



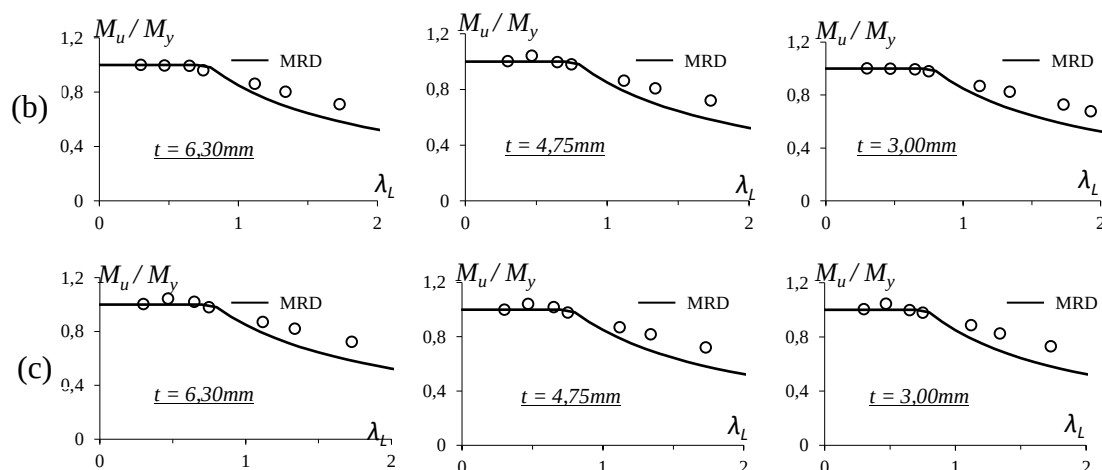


Figura 4.5. Comparação dos resultados utilizando o MRD na estimativa da resistência última para a seção 1, considerando diversas espessuras e carregamentos (a) K_1 , (b) K_2 e (c) K_3 .

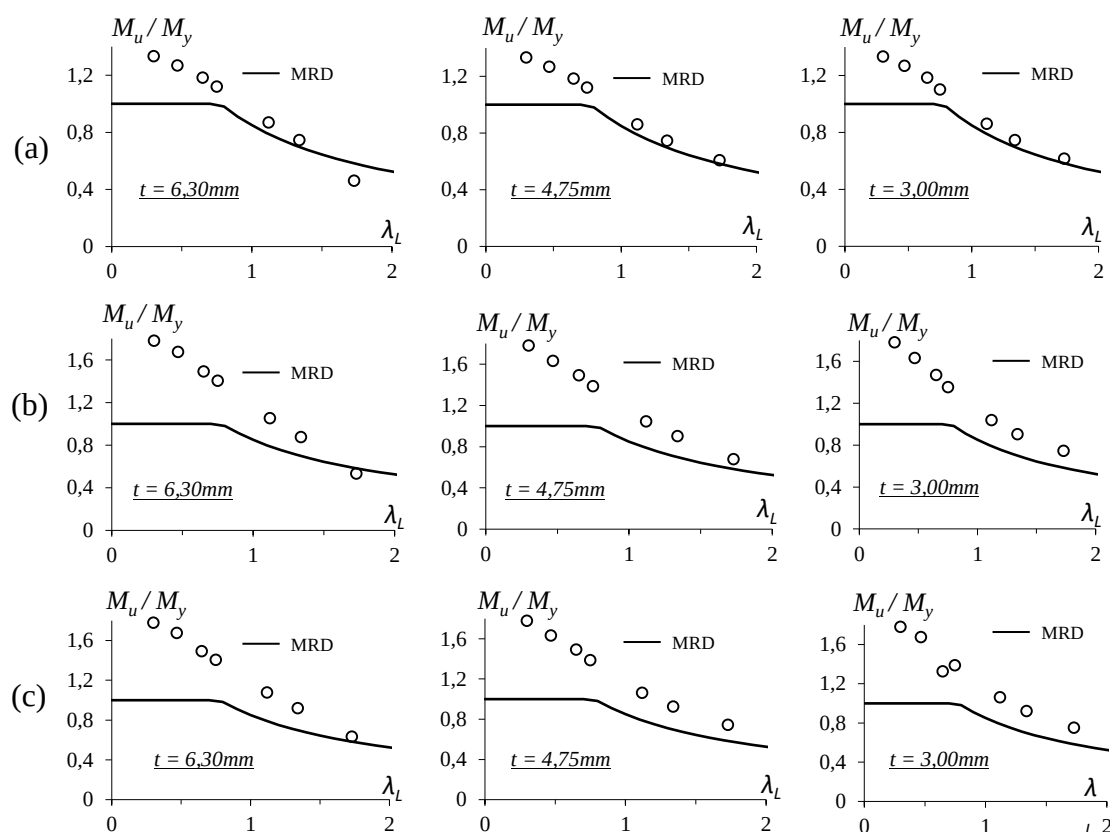


Figura 4.6. Comparação dos resultados utilizando o MRD na estimativa da resistência última para a seção 2, considerando diversas espessuras e carregamentos (a) K_1 , (b) K_2 e (c) K_3 .

Nas Figuras 4.7 e 4.8 são apresentados os resultados da relação entre o momento último obtido da análise numérica (M_u) e o momento último estimado pela curva de dimensionamento (M_n), obtida através da aplicação do MRD na previsão da resistência última das estacas-prancha em análise.

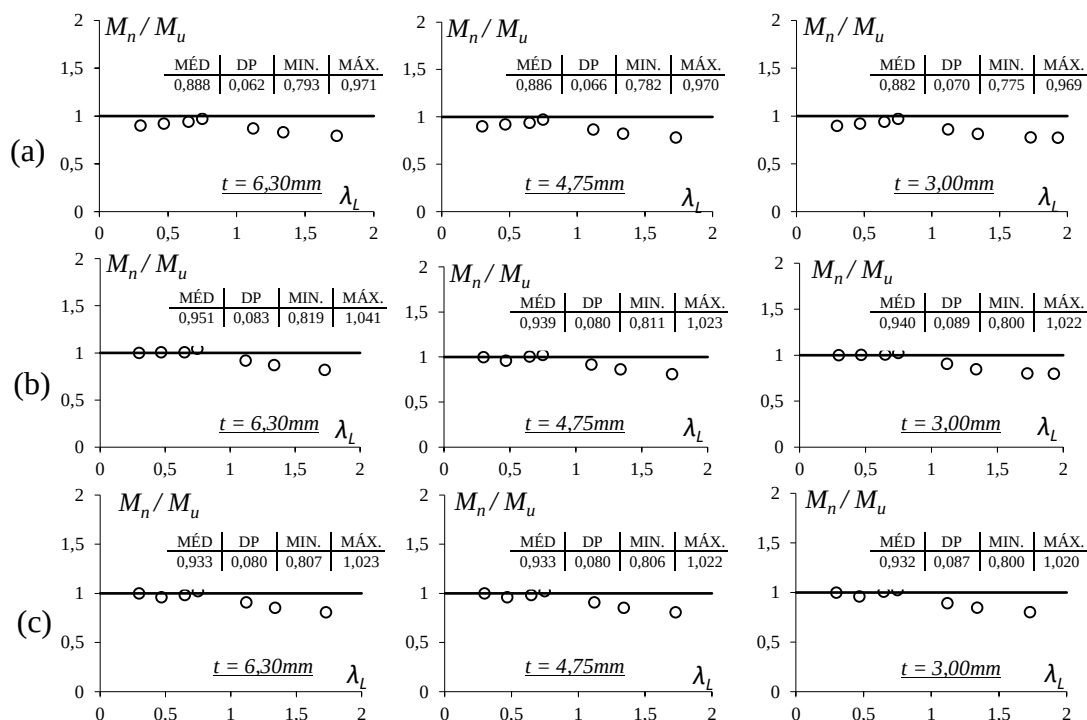


Figura 4.7. Relação M_n/M_u x esbeltez para seção 1, considerando diversas espessuras e carregamentos (a) K₁, (b) K₂ e (c) K₃.

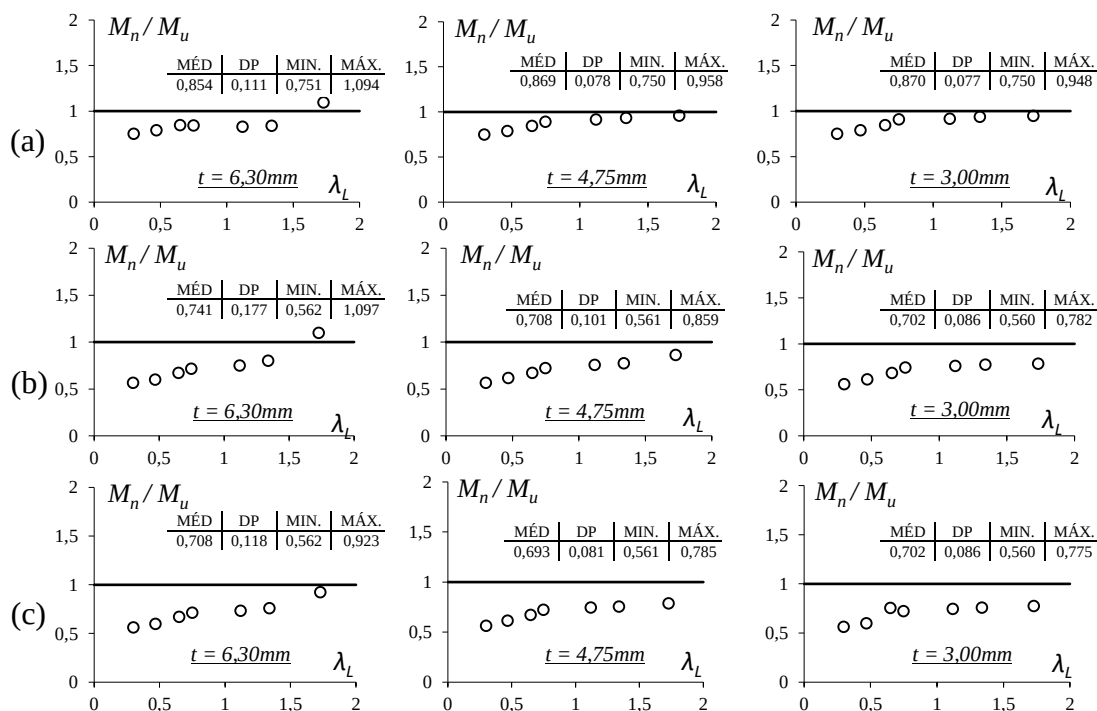


Figura 4.8. Relação M_n/M_u x esbeltez para seção 2, considerando diversas espessuras e carregamentos (a) K₁, (b) K₂ e (c) K₃.

A observação dos resultados apresentados nas Figuras 4.5 à 4.8 permitem apresentar os seguintes comentários:

- (i) As Figuras 4.7 e 4.8 ilustram a segurança da estimativa de resistência última obtida via curva MRD – notar que os pontos localizados abaixo da reta $M_n/M_u =$

1,0 representam estimativas a favor da segurança e os pontos localizados acima da reta representam estimativa contra a segurança. Fato semelhante pode ser observado nas Figuras 4.5 e 4.6, onde os pontos situados acima da curva obtida via MRD indicam estimativas a favor da segurança;

- (ii) Analisando a seção 1, é perceptível que a resistência última das EP são superestimadas pela curva do MRD para estacas que apresentam esbeltezes com valores de $\lambda_L \geq 1,0$. Já para estacas com esbeltez $\lambda_L < 1,0$, a estimativa obtida via MRD é razoavelmente boa;
- (iii) Já para a seção 2, percebe-se que a estimativa da resistência última obtida via MRD é, na maioria dos casos, conservadora;
- (iv) Analisando os parâmetros estatísticos apresentados nas Figuras 4.7 e 4.8, observa-se uma redução dos valores de máximo (MÁX.) e mínimo (MÍN.) com a diminuição da espessura das seções analisadas. Percebe-se que os valores da média (MÉD) e do desvio padrão (DP) são próximos para os carregamentos K_2 e K_3 , já comparando estes com o carregamento K_1 , observa-se uma pequena discrepância.

5. Conclusão

Estacas-prancha são elementos estruturais que possuem geralmente grande comprimento e na maioria dos casos, são constituídas por seções transversais de paredes finas, consequentemente tornando-as deformáveis e susceptíveis ao fenômeno de instabilidade. A escassez de resultados na literatura sobre comportamento de flambagem e pós-flambagem (elástica e elasto-plástica) desta tipologia estrutural, serviu de motivação para a pesquisa, objetivando analisar sua estabilidade seccional e resistência última. Neste âmbito, este estudo teve por objetivo central aprofundar os conhecimentos sobre estabilidade e o comportamento na flambagem e pós-flambagem local de EP constituídas por perfis metálicos formados a frio, considerando carregamentos típicos atuantes em elementos estruturais de fundações, além de verificar a aplicabilidade do Método da Resistência Direta (MRD) no seu dimensionamento. Analisando os resultados, observou-se que todas as EP apresentaram trajetórias de pós-flambagem estáveis. Destaca-se que a reserva de resistência elástica cresce a medida que a espessura, e consequentemente a rigidez é aumentada e que independente do tipo de

carregamento e espessuras utilizadas na comparação, a seção 1 mostra-se com uma reserva de resistência elástica maior que a seção 2. Notou-se o acúmulo de tensões nas regiões que apresentam maior amplitude de deslocamento devido à evolução do modo de flambagem local, gerando a ruptura próxima ao apoio engastado, onde ocorreu a plastificação das EP. Para a seção 1, a curva do MRD para previsão da resistência local última de colunas leva a resultados satisfatórios para $\lambda_L < 1,0$ e mostra-se conservadora para $\lambda_L \geq 1,0$, corroborando com SCHAFER (2005), onde conclui-se que sua utilização torna-se superestimada se aplicada à elementos estruturais muito esbeltos. Já para a seção 2, assimétrica, observa-se que a estimativa da resistência última obtida via MRD é, na maioria dos casos, conservadora. Este fato pode ser explicado pois segundo SCHAFER (2005), o limitado número/geometria das seções pré-qualificadas utilizadas para obtenção das curvas do MRD podem afetar a eficiência do método.

6. Referências

ABNT, 2010. *Norma Brasileira para Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio* (NBR 14762:2010), Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.

ANSYS, 2009. Reference Manual, Swanson Analysis Systems (SAS), version 12.0.1

BEBIANO R., PINA P., SILVESTRE N., CAMOTIM D., 2010a. “*GBTUL 1.0 β – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members*”, DECivil/IST, Technical University of Lisbon. (<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>)

BEBIANO R., PINA P., SILVESTRE N., CAMOTIM D., 2010b. “*Manual user.GBTUL 1.0 β – Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members*”, DECivil/IST, Technical University of Lisbon. (<http://www.civil.ist.utl.pt/gbt>)

EN 1993-5, 2007 EUROCODE 3 – PART 5, “*Piling*”. Brussels, Belgium: CEN

FANG, H.Y., BREWER, C.E., 1969. “*Field Study of Shear Transfer in Steel Sheet Pile Bulkhead*”. Fritz Laboratory Reports. Paper 366. Lehigh University

GARIFULLIN, M., NACKENHORST, U., 2015. “*Computational Analysis of Cold-Formed Steel Columns with Initial Imperfections*”. Elsevier, 117, pp. 1073-1079.

HANCOCK, G.J., 2003. “*Cold-formed steel structures*”. Journal of Constructional Steel Research, v.59, pp.473-487.

LANDESMANN, A., CAMOTIM, D., 2013. “*On the Direct Strength Method (DSM) design of cold-formed steel columns against distortional failure*”, Thin-walled Structures, v.67, pp. 168-187.

SCHAFER B.W., 2005. "*Direct Strength Method (DSM) Design Guide, American Iron and Steel Institute (AISI)*". Design Guide CF06–1, Washington DC.

SCHAFER, B.W., ÁDÁNY, S., 2005. "*Understanding and classifying local, distortional and global buckling in open thin-walled members*". Tech. Session and Mtg., Structural Stability Research Council. Montreal, Canada.

NUMERICAL ANALYSIS USING FEM AND DESIGN BY DIRECT STRENGTH METHOD OF COLD FORMED STEEL SHEET PILES UNDER LOCAL COLLAPSE

Abstract

This work presents a numerical computational study using FEM for stability analysis and ultimate strength of cold formed steel sheet piles under local collapse, considering typical loads acting on structural elements of foundations, besides evaluating the performance of the current Design Strength Method (DSM) provisions to estimate the ultimate strength. Initially, a linear stability analysis was performed via GBT (Generalized Beam Theory), followed by the mechanical characterization of the buckling modes mentioned above. Next, an ANSYS shell finite element model is employed to perform geometrical and material non-linear analysis of the piles affected by the local buckling mode, aiming to evaluate the structural behavior in elastic-elastic and elastic-plastic post-buckling. Finally, the numerical results obtained in this dissertation are compared with the predictions obtained through the Direct Strength Method (DSM), which is included in ABNT NBR 14762: 2010 (Annex C).

Keywords: Local Buckling. Sheet-piles. Direct Strength Method. Numerical Analysis ANSYS.