

## Comportamento e influência das imperfeições geométricas iniciais para perfis de aço tipo rack com e sem furos sob compressão

Rodrigo Escolante Pereira<sup>1</sup>, Inácio Benvegno Morsch<sup>1</sup>, Enio Mesacasa Júnior<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Osvaldo Aranha, 99. Porto Alegre - RS. CEP 90035-190, rodrigoescolante@gmail.com, morsch@ufrgs.br, eniom@ufrgs.br.

### Behavior and influence of geometric imperfections on perforated and non-perforated steel rack columns under compression

#### Resumo

Este trabalho apresenta a influência de diferentes padrões de imperfeições geométricas iniciais em perfis de aço formados a frio tipo rack, com e sem furos, sob compressão centrada. O comportamento dos perfis é analisado através de modelos de elementos finitos de casca, e análises geometricamente não lineares, com material em regime elástico e também com diferentes resistências de escoamento, para avaliar o efeito da plasticidade. Um total de 74 combinações de imperfeições para cada tipo de perfil (com e sem furos) e três comprimentos distintos, permitiu avaliar a influência dos furos sobre os diversos resultados típicos, mais e menos estáveis de comportamento, além de cenários de interação modal, especialmente do tipo distorcional x local. Por fim, mostra-se que os furos podem tornar o perfil mais susceptível a fenômenos de interação modal, além das trajetórias de equilíbrio típicas obtidas nos casos mais e menos críticos.

**Palavras-chave:** Estabilidade, compressão, imperfeições geométricas, perfis rack, perfurados.

#### Abstract

This paper addresses the influence of the initial geometrical imperfection configurations in CFS columns with rack cross-section, perforated and non-perforated, under compression. The columns' post-buckling behavior is analyzed through shell finite element models with an elastic material and, also, with different yield stress limits to evaluate the influence of the material plasticity. The analyses of 74 imperfection combinations for each cross-section, and each three different column lengths, have been carried out. The results allow characterizing the influence of web-perforations in rack columns stability and its typical critical and non-critical behaviors. Also, distortional x local modal interaction cases are exhibited and commented throughout. The results suggest that perforated columns are more susceptible to modal interaction phenomena. Finally, one presents and discusses the main typical critical and non-critical equilibrium paths.

**Keywords:** Stability, compression, geometrical imperfections, rack cross section, perforated.

\* autor correspondente

## 1 Introdução

A crescente adoção de sistemas estruturais tipo porta-paletes em edificações logísticas com o crescimento do comércio eletrônico da última década, atrelada à busca constante por economia, tem conduzido a soluções estruturais como galpões autoportantes e outros tipos de estruturas porta-paletes cujos perfis tipo rack são levados a condições muito próximas de sua capacidade resistente. Junte-se a isso a dificuldade que se tem na determinação do comportamento teórico de perfis com perfurações, e a carência de métodos de dimensionamento genéricos e independentes de ensaios experimentais (ABNT NBR 15524-2:2007, e/ou EN15512:2020), o que muitas pesquisas têm buscado com a aplicação do Método da Resistência Direta (e.g.: Moen e Schafer (2008), Casafont *et al.* (2013), Martins *et al.* (2015.a), Neiva *et al.* (2018) e Pinto *et al.* (2021)), já em uso na ABNT NBR14762:2010.

No contexto do comportamento não linear desses perfis em condições de interação entre modos de instabilidade, trabalhos como o de Moen e Schafer (2008), Bonada *et al.* (2012), Pastor *et al.* (2014), Dinis e Camotim (2015), Martins *et al.* (2015.b), e Lazzari e Batista (2020), procuram avaliar e quantificar os fenômenos mais influentes, tanto para perfis U enrijecidos quanto perfis tipo rack. Apesar disso, a avaliação dos fenômenos de interação modal e comportamento sob a influência de perfurações constantes (característica de perfis rack para estruturas porta-paletes) ainda merece estudos, especialmente para subsidiar novos métodos de previsão da capacidade resistente. Além disso, sabe-se que as imperfeições geométricas iniciais desempenham um papel fundamental sobre o comportamento pós crítico desses perfis (e.g.: Dinis e Camotim, 2015), e trabalhos como o de Bonada *et al.* (2012) e de Martins *et al.* (2015.a) demonstram claramente a complexidade dessa influência.

Assim, sabendo que as interações modais em perfis tipo rack podem conduzir a relevantes impactos sobre a capacidade resistente (Dinis e Camotim (2015), Martins *et al.* (2015.a), e Lazzari e Batista (2020)), e tendo em conta a necessidade de se avaliar o efeito de tais interações juntamente com o efeito das perfurações constantes ao longo do eixo de perfis tipo rack, este trabalho propõe o estudo do comportamento desses perfis com e sem furos, com auxílio do método dos elementos finitos. Para tal, foram realizadas análises geometricamente não lineares com e sem plasticidade do material, e diferentes combinações de imperfeições geométricas iniciais, totalizando 74 análises por tipo de perfil, para três comprimentos representando regiões distintas de esbeltez (com susceptibilidades diferentes para interações

modais), perfazendo um total de 444 análises. Ao final, são apresentadas as considerações a respeito do impacto das perfurações e o comportamento verificado para cada tipo perfil, além da influência de cada tipo de imperfeição geométrica sobre o comportamento verificado.

## 2 Modelo numérico

Para a realização deste estudo foi adotada uma seção transversal semelhante à utilizada em outros trabalhos, como o de Faria (2016) e Neiva *et al.* (2018). As dimensões da seção transversal, no entanto, são sensivelmente diferentes das utilizadas por esses autores, buscando refletir algumas seções comerciais típicas de interesse. Além disso, foram utilizados cantos retos e aberturas retangulares localizadas somente na alma, com a finalidade de se manter um perfil simples o bastante tanto para a modelagem quanto para a interpretação dos resultados (Fig. 1).

Com relação aos parâmetros da seção, foi considerada a relação entre as dimensões longitudinal e transversal dos furos ( $L_h/d_h$ ) igual a 5, sendo o valor  $d_h$  aproximadamente 10% da dimensão da alma ( $b_w = 81$  mm). Além disso, os espaçamentos entre as bordas dos furos e a borda longitudinal da alma foram adotados, respectivamente, como 33 mm ( $L_h$ ) e 16 mm ( $\approx L_h/2$ ), definição essa também utilizada em Neiva *et al.* (2018), e configura, para o perfil aqui apresentado, uma relação entre área líquida ( $A_{net}$ ) e área bruta ( $A_g$ ) de aproximadamente 0,94.

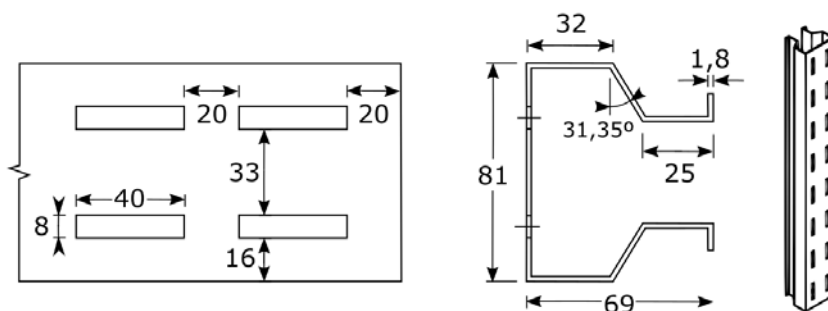


Figura 1 - Dimensões da seção transversal (em milímetros) consideradas no estudo

As análises foram realizadas através do programa de elementos finitos Ansys® Mechanical 2021 R2, para as quais foram utilizados elementos finitos de casca tipo SHELL181 (Ansys®, 2021) com integração reduzida (para mais detalhes sobre os testes de modelo numérico, consultar Pereira, 2022). A malha de elementos (definidos por 4 nós cada) foi aplicada com dimensões de aproximadamente 5 mm de lado, seguindo a metodologia aplicada (e validada com análises experimentais de referência) por Pastor *et al.* (2014), o que representa uma malha ligeiramente mais refinada que a utilizada por Neiva *et al.* (2018).

Para as condições de contorno foram utilizadas chapas de extremidade com espessura de 31,75 mm, malha livre, e mesmo tipo de elemento finito do perfil para garantir o acoplamento de todos os 6 graus de liberdade (3 translações e 3 rotações) entre os nós do perfil e da chapa. Sobre a espessura adotada, vale comentar ainda que as chapas não são de especial interesse nas análises, desde que sejam capazes de promover a adequada distribuição das forças para os elementos do perfil.

Como se pode observar na Fig. 2, em cada chapa de extremidade um nó foi posicionado no centroide da seção transversal do perfil. No caso do perfil com furos, o centroide é determinado conforme a norma AISI S100-16 (2020) para perfis com furos distribuídos simetricamente. Então, sobre esse nó são aplicadas as forças de compressão (ou apoio na direção longitudinal (UY), no caso da extremidade inferior) e as restrições de translação no plano da chapa (UX e UZ) e torção em torno do eixo longitudinal do perfil (RY).

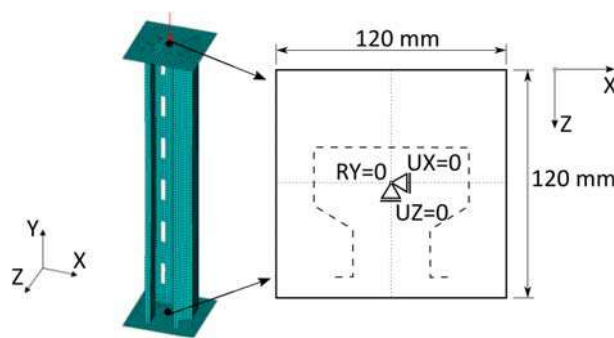


Figura 2 - Modelo numérico com as condições de contorno e carregamento aplicados

Além disso, foi utilizado um material isotrópico linear com módulo de elasticidade (E) de 205 GPa e coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) de 0,3 (ABNT NBR 15542-2:2007) para as análises em regime elástico, e um material com comportamento elasto-plástico perfeito (apenas no perfil), no caso das análises com plasticidade.

## 2.1 Análise de estabilidade elástica

A Fig. 3 apresenta as curvas formadas pelos resultados de carga crítica de estabilidade elástica ( $P_{crit}$ ) para ambos os perfis, com furos e sem furos, obtidos numa faixa de comprimentos de 50 até 1840 mm, que é uma faixa de comprimentos tipicamente utilizados na prática, e que permite observar os três principais modos críticos de flambagem (local, distorcional e global).

É importante destacar que os resultados foram obtidos com o modelo de elementos finitos descrito anteriormente, para que seja possível analisar de igual forma os dois casos de perfis (dadas as limitações de outros métodos, como o Método das Faixas

Finitas – MFF ou a Teoria Generalizada de Vigas – GBT, para análises de estabilidade de perfis com furos). Entretanto, no caso do perfil sem furos é possível utilizar a GBT com a ajuda do programa GBTUL 2.06 (Bebiano *et al.*, 2018), que permite, por meio de solução numérica baseada em elementos finitos de barra da GBT, a consideração de condições de apoio variadas. Assim, é possível realizar a simulação de condições de vínculo semelhantes às utilizadas no modelo de elementos finitos de casca (apoio simples, com rotação e empenamento restringidos), o que se faz com restrições baseadas no caráter modal do método, ou seja, apenas os modos de flexão (modos 2 e 3) têm suas derivadas livres (rotações), caracterizando os apoios simples, enquanto os demais modos (de torção, distorcionais e locais) têm seus valores e respectivas derivadas restringidos.

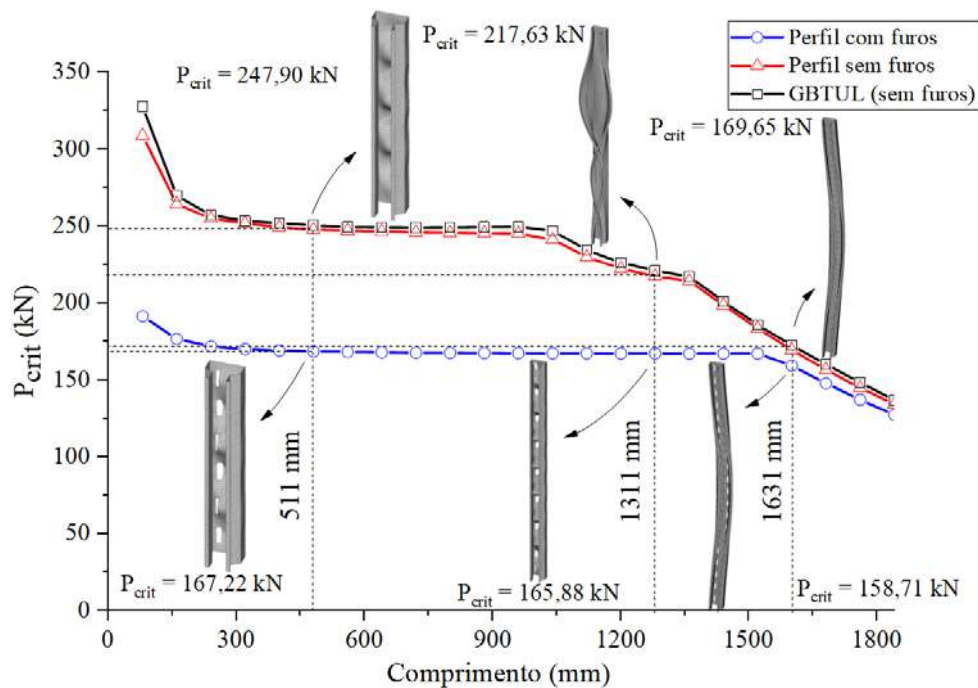


Figura 3 - Carga crítica elástica X comprimento do perfil

Verifica-se que, no caso do perfil sem furos, há uma diferença relativa não superior a 1,6% entre resultados obtidos com a GBT e com o modelo de elementos finitos de casca. Já para a seção com furos, nota-se uma forte influência nos valores de carga crítica associados aos modos locais, com reduções de aproximadamente 32% em relação à carga crítica do perfil sem furos. Nota-se ainda que, embora se tenha uma redução em área da seção de apenas cerca de 6%, os furos situados na região da alma tornam esse elemento mais suscetível à instabilidade local, o que afeta significativamente o resultado para esse tipo de modo. Esse fato faz com que os modos locais na seção com furos tenham valores de carga crítica menores que os de modos distorcionais para a seção sem furos (comprimentos entre cerca de

1000 mm e 1360 mm). Em ambos os casos, os comprimentos mais longos, (acima de 1360 mm (sem furos) e 1500 mm (com furos), o modo crítico passa a ser global de flexo-torção).

## 2.2 Imperfeições geométricas iniciais e comprimentos analisados

Para a investigação do comportamento elástico não linear dos perfis apresentados, e consequente avaliação do comportamento envolvido, é necessário o uso de imperfeições geométricas iniciais a serem introduzidas com base, majoritariamente, nos modos críticos de instabilidade obtidos, sozinhos e/ou combinados entre si (Camotim e Dinis, 2011).

Nesse contexto, trabalhos como o de Bonada *et al.* (2012) e Camotim *et al.* (2018) justificam a necessidade de uma análise cuidadosa das interações modais que podem ocorrer sob influência das imperfeições geométricas. Para os perfis tipo rack, Bonada *et al.* (2012) destacam ainda o fato de que o uso de apenas um modo crítico pode não conduzir a resultados satisfatórios, podendo superestimar a capacidade resistente do perfil em mais de 15%, especialmente em faixas de comprimentos de modo crítico distorcional.

Assim, foi analisada a sensibilidade às imperfeições geométricas iniciais do tipo local, distorcional, e global, combinadas entre si com diferentes amplitudes para cada modo. A Fig. 4 ilustra esquematicamente 26 possibilidades de combinações (obviamente a opção com amplitude nula para os três tipos de imperfeição, simultaneamente, é ignorada), que envolvem a combinação de um modo de instabilidade local (L), um distorcional (D), e um global de flexão<sup>1</sup> em torno do eixo de menor inércia (G) com três possibilidades para cada um, isto é, um valor máximo positivo, um nulo, e um máximo negativo (todos os valores baseados nos deslocamentos característicos do modo em questão). Além dessas imperfeições indicadas, foram analisadas mais uma amplitude intermediária positiva e uma intermediária negativa para as imperfeições locais e distorcionais, totalizando 5 valores de imperfeições locais, 5 distorcionais, e 3 globais, em um total de 74 análises para cada comprimento de barra.

---

<sup>1</sup>A opção por introduzir um modo global de flexão ao invés de um modo de flexo-torção se deve em função das restrições ao empenamento e à torção empregadas em ambas as extremidades do modelo enquanto as rotações em torno dos eixos principais de inércia permanecem livres. Tais condições contribuem para valores de carga crítica mais próximos entre os respectivos modos (embora o modo de flexo-torção ainda assim seja crítico para a seção transversal utilizada neste trabalho). Além disso, é importante destacar a possibilidade de que a introdução de imperfeições de flexão ocorra através de operações de transporte e montagem, logo, ainda é de interesse prático o estudo desse tipo de imperfeição geométrica. Não obstante, é evidente que as combinações de imperfeições geométricas iniciais envolvendo o modo de flexo-torção podem conduzir a resultados diferentes, inclusive mais críticos. Mais sobre imperfeições de flexo-torção é comentado nas conclusões deste trabalho.

Além disso, foram analisados três comprimentos para cada perfil. O comprimento de 511 mm se situa em região de modo crítico essencialmente local. O segundo comprimento, de 1311 mm, foi escolhido por se encontrar em região de modo crítico distorcional (para o perfil sem furos, já que o perfil com furos não apresenta modo distorcional crítico) e com valor de carga crítica suficientemente próximo da carga crítica correspondente ao modo global de flexo-torção. E o terceiro comprimento de 1631 mm, situa-se em região de domínio de modo crítico global de flexo-torção tanto para o perfil com furos quanto para o perfil sem furos. No caso da barra sem furos, a relação entre a carga crítica associada ao modo distorcional e a carga crítica relacionada ao modo local ( $P_{crit,dist}/P_{crit,loc}$ ) é de 1,54, 0,90 e 0,85, para os comprimentos 511 mm, 1311 mm e 1631 mm, respectivamente (potencial região de interação local x distorcional primária ou secundária, conforme Dinis e Camotim, 2015) enquanto no caso do perfil com furos essa relação é de 2,13, 1,07, e 1,01, respectivamente (potencial região de interação local x distorcional primária). Tomando como referência os perfis sem furos, os comprimentos acima mencionados representam valores de esbeltez máxima de aproximadamente 21, 55, e 68 respectivamente.

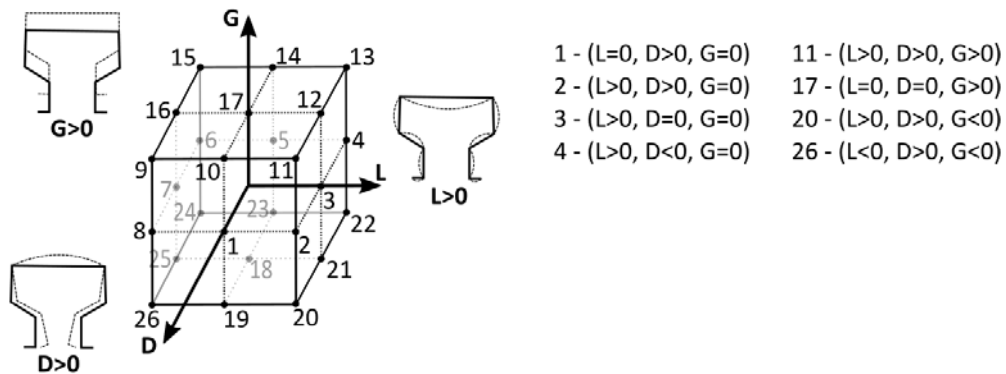


Figura 4 - Representação esquemática das combinações utilizadas entre os diferentes tipos de imperfeição geométrica inicial, e exemplos de interpretação

Para a configuração geométrica das imperfeições, tem-se que para os modos locais, em geral, a semelhança na configuração deformada e também na carga crítica possibilitou a escolha do modo associado à menor carga crítica (Fig. 5(a)). Vale comentar que no caso do perfil com furos, é possível a ocorrência de um modo local restrito ao trecho da alma situado entre os dois furos, conforme relatado por Neiva *et al.* (2018), mas que não se mostrou crítico para o perfil deste trabalho. Para o modo distorcional (Fig. 5(b)), que também não apresentou diferenças significativas nos valores de carga crítica para os primeiros autovalores obtidos, optou-se por um modo com configuração deformada mais simétrica ao longo do eixo longitudinal e com deslocamentos maiores próximos da seção intermediária ( $L/2$ ).

Já para a obtenção do modo de imperfeição global de flexão, foi utilizada uma análise elástica linear simples com momento concentrado nas extremidades, de forma a se obter o modo característico de interesse, com amplitude máxima normalizada a um valor unitário (Fig. 5(c)). Quanto à amplitude das imperfeições geométricas, foram utilizadas como referências, valores citados nos trabalhos de Schafer e Peköz (1998) e de Pastor *et al.* (2014), além das recomendações do Anexo C do Eurocode 3, Parte 1-5 (CEN, 2006). Tais valores são indicados na Tabela 1, para cada modo correspondente.

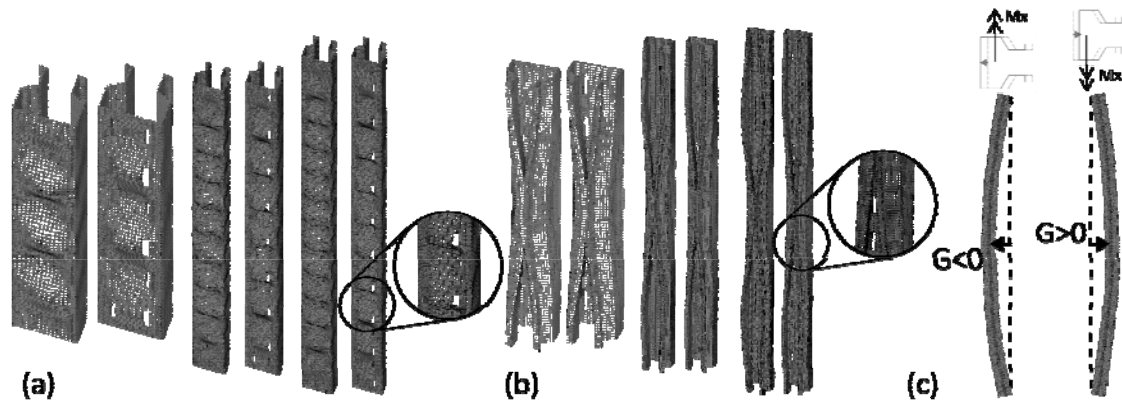


Figura 5 - Modos de instabilidades (a) locais, (b) distorcionais e (c) global de flexão

Tabela 1 - Amplitudes de imperfeição geométrica inicial utilizados

Modo	Amplitude	Referência
Local	$\pm 0,14t = \pm 0,252 \text{ mm}$	Schafer e Peköz (1998)
	$\pm b_w/200 = \pm 0,405 \text{ mm}$	Eurocode 3, Parte 1-5
Distorcional	$\pm 0,64t = \pm 1,15 \text{ mm}$	Schafer e Peköz (1998)
	$\pm d/50 = \pm 1,38 \text{ mm}$	Eurocode 3, Parte 1-5
Global	$\pm L/500$	Pastor <i>et al.</i> (2014)

Onde,  $b_w$  é a largura da alma (81 mm),  $d$  a altura total do perfil (69 mm),  $t$  é a espessura (1,8 mm), e  $L$  é o comprimento do perfil.

### 3 Análise não linear elástica

As análises considerando a não linearidade geométrica e com material em regime elástico linear foram realizadas para ambos os casos de perfis sólidos (sem furos) e com furos descritos anteriormente, lembrando que os principais parâmetros do modelo numérico foram baseados nos trabalhos de Souza (2013), Neiva *et al.* (2018), e Pastor *et al.* (2014), os quais apresentam validações com base em análises experimentais.

Para avaliar o comportamento dos perfis são considerados os deslocamentos de alguns pontos da seção transversal ilustrados na Figs. 6 (c) a 11 (c). Os deslocamentos na direção Z do nó 1, no centro da alma, ajudam a caracterizar instabilidades locais (naturalmente, não puros). Já os



deslocamentos na direção Z do nó 2, e na direção X do nó 3, ajudam a avaliar a ocorrência dos modos global de flexão em torno do eixo de menor inércia e distorcional, respectivamente.

### 3.1 Barra de comprimento 511 mm

As Figuras 6(a)-(b) ilustram as trajetórias de equilíbrio para o perfil sem furos, com comprimento de 511 mm. Nelas foram relacionados os deslocamentos na direção Z do nó 2 e na direção X do nó 3, respectivamente. O carregamento foi normalizado em função da carga crítica de flambagem elástica do perfil, e os valores máximos das curvas ( $P/P_{crit} > 1$ ) evidenciam a reserva pós-crítica associada tipicamente a modos locais de placa, esperados para o comprimento em questão.

A menor capacidade resistente obtida está associada à combinação de multiplicadores de imperfeições ( $L=0$ ;  $D=1,38$ ;  $G=-0,96$ ), ou seja, multiplicador do modo local nulo (embora a influência das imperfeições locais nesse comprimento seja mínima), distorcional positivo (relacionado com as mesas se fechando – Fig. 5(b)), e global negativo (relacionado à maior compressão na região dos enrijecedores da seção – Fig. 5(c)). Note-se aqui que a influência do modo distorcional sobre a posição do centroide efetivo da seção é a mesma do modo global, ou seja, ambos deslocam o centroide efetivo na direção da alma, provocando maior compressão na região dos enrijecedores.

Por outro lado, a trajetória de maior resistência foi obtida para uma combinação ( $L=0,405$ ;  $D=1,38$ ;  $G=0,96$ ), novamente com amplitude máxima do modo distorcional com a tendência de fechamento da seção, contudo, com a máxima amplitude de flexão no sentido oposto, de modo a minimizar os efeitos um do outro.

O que ocorre entre esses dois extremos, e que se nota no gráfico da Fig. 6(a), é a distribuição das influências dessas imperfeições, havendo uma transição associada à direção da flexão, que nas trajetórias menos estáveis tende a provocar compressão na região dos enrijecedores, e nas mais estáveis tende a provocar maior compressão na região da alma. Uma das trajetórias associadas à região de transição entre essas duas situações foi destacada com a combinação ( $L=0,252$ ;  $D=1,38$ ;  $G=0$ ).

Além disso, é interessante referir que as imperfeições locais influenciam as trajetórias de equilíbrio de forma reduzida, de modo que as variações dessas imperfeições criaram apenas certos “agrupamentos” de curvas, com pequenas variações entre elas.

O efeito das imperfeições distorcional e global, se capaz de produzir maior compressão na região da alma ou dos enrijecedores, é preponderante para definir uma trajetória de maior ou de menor capacidade resistente, respectivamente.

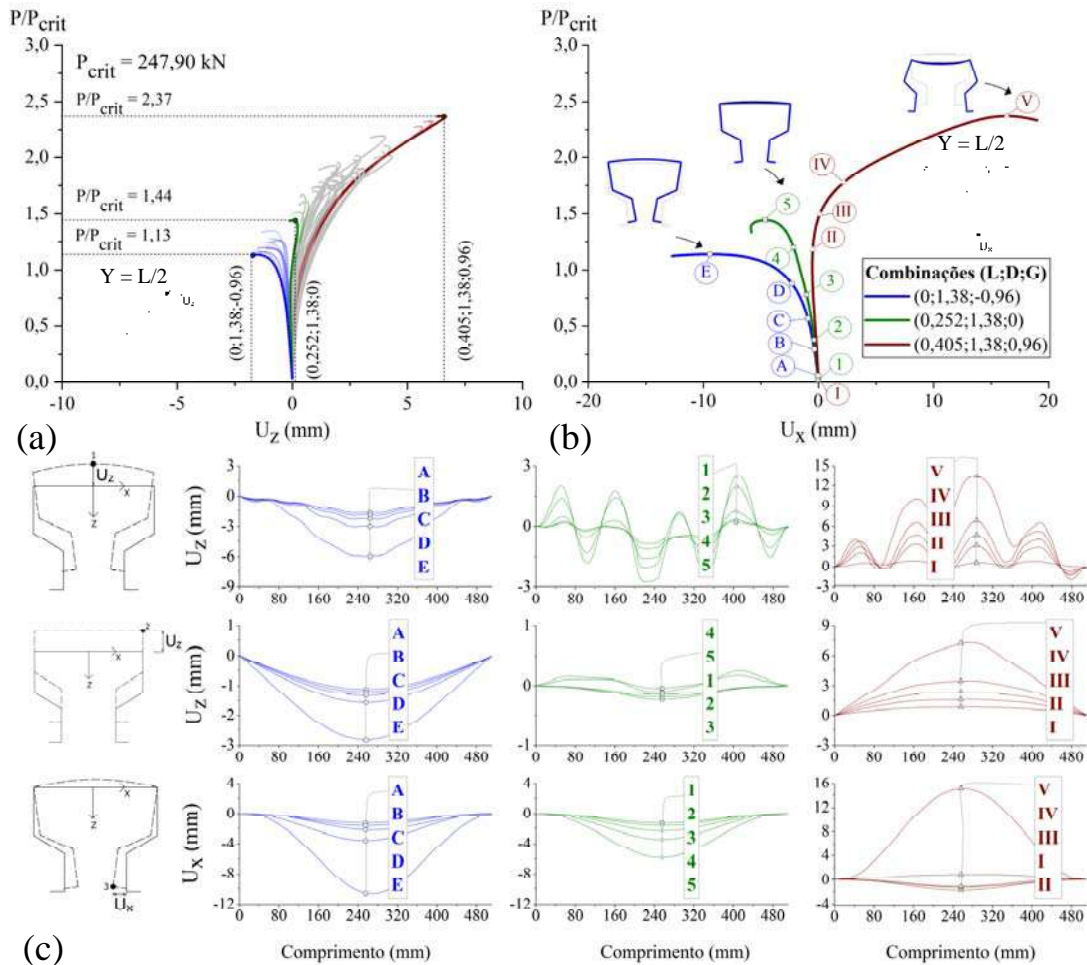


Figura 6 – (a) Trajetórias de equilíbrio obtidas para perfis de comprimento 511 mm sem furos, e (c) deslocamentos típicos ao longo do comprimento para pontos de referência da seção 1, 2 e 3, das (b) trajetórias destacadas.

Para auxiliar na interpretação dos resultados, a Fig. 6(c) ilustra os deslocamentos ao longo do eixo da barra para os pontos 1, 2 e 3, associados com cinco pontos ao longo da trajetória de equilíbrio para três combinações de imperfeições (a de menor e a de maior resistência, e uma intermediária). Essas configurações de deslocamentos permitem as seguintes observações: (i) No caso da trajetória de menor resistência, existe apenas uma tendência de aumento nos deslocamentos típicos de todos os modos; (ii) Na trajetória intermediária, nota-se o surgimento de deslocamentos típicos locais mais pronunciados, juntamente com o modo distorcional de fechamento (evidenciando certa interação local x distorcional), ocasionando no modo global de flexão a mudança de uma única semi-onda para três semi-ondas ao longo da trajetória, além da inversão do sinal

desses deslocamentos em alguns pontos, e; (iii) Na trajetória de equilíbrio de maior resistência, é possível verificar os deslocamentos típicos de flexão produzindo maior compressão na região da alma (sem inversão de tendência), e os deslocamentos típicos de modo distorcional com inversão da tendência, inicialmente de fechamento, e em seguida de abertura da seção (condição de maior resistência).

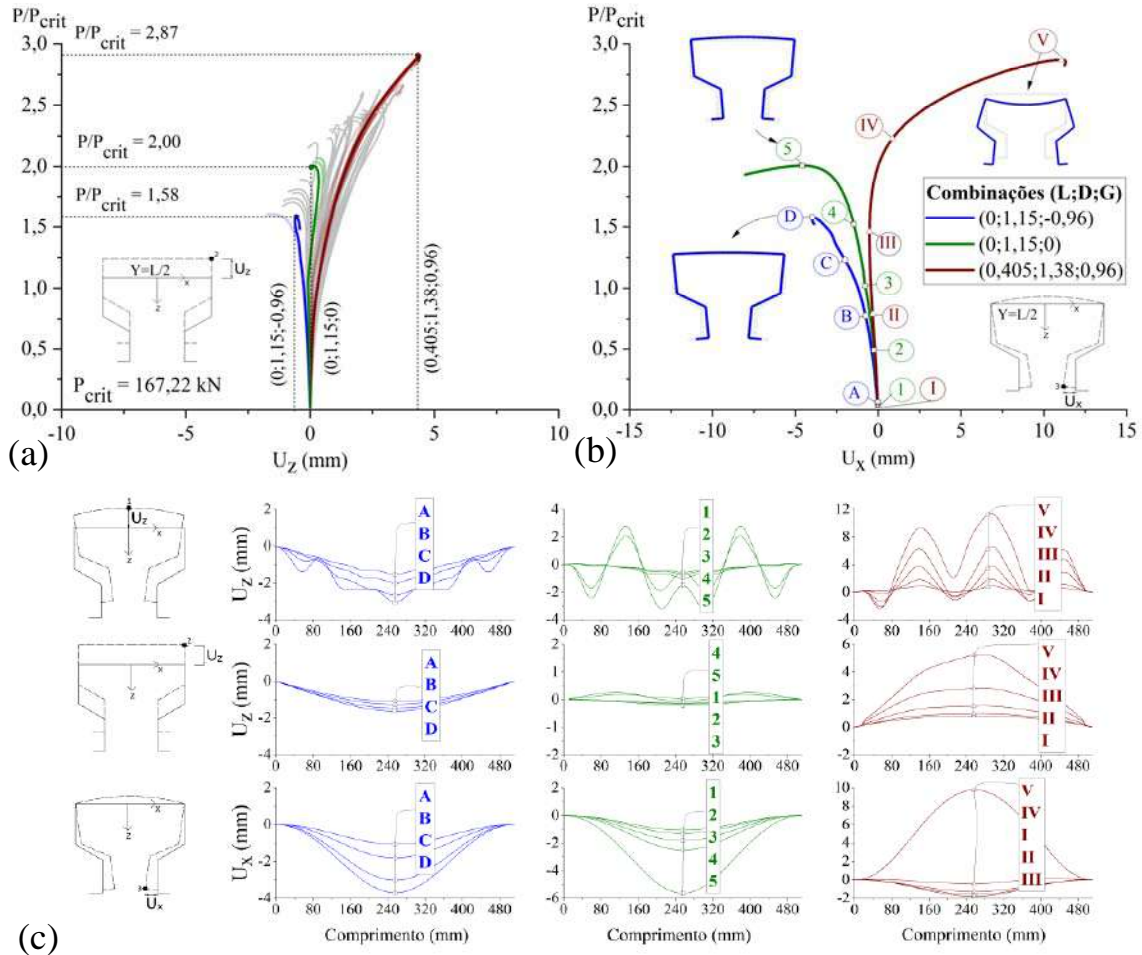


Figura 7 – (a) Trajetórias de equilíbrio obtidas para perfis de comprimento 511 mm com furos, e (c) deslocamentos típicos ao longo do comprimento para pontos de referência da seção 1, 2 e 3, das (b) trajetórias destacadas.

As Figs. 7 (a)-(c) apresentam (a) as trajetórias de equilíbrio do perfil de comprimento 511 mm, com furos, baseadas nos deslocamentos do ponto 2 (típicos de flexão), (b) as trajetórias destacadas (intermediária, e de menor e de maior resistência) baseadas nos deslocamentos do ponto 3 (deslocamento típico distorcional), e (c) os três deslocamentos típicos (pontos da seção 1, 2 e 3) para cinco pontos das trajetórias de equilíbrio destacadas. Com base nesses resultados é possível destacar que: (i) Os maiores valores de  $P/P_{crit}$  obtidos para os perfis com furos em relação aqueles dos perfis sem furos demonstram que há um efeito maior dos furos sobre os resultados de carga crítica de estabilidade elástica (no caso

mais crítico,  $P_{crit,com\ furos}/P_{crit,sem\ furos} \approx 0,67$ ) do que sobre a capacidade resistente elástica dos perfis em si (no caso mais crítico,  $P_{ue,com\ furos}/P_{ue,sem\ furos} \approx 0,94$ ); (ii) a combinação relativa à menor capacidade para o perfil com furos ( $L=0$ ;  $D=1,15$ ;  $G=-0,96$ ) é muito semelhante à combinação relacionada à menor capacidade do perfil sem furos ( $L=0$ ;  $D=1,38$ ;  $G=-0,96$ ), e o mesmo acontece para a combinação de maior resistência de ambos os tipos de perfis. Há uma pequena variação na amplitude das imperfeições distorcionais no caso de menor resistência ( $D=1,38$  para  $D=1,15$ ), porém, é uma diferença pequena em termos da trajetória de equilíbrio, e admite-se que os efeitos gerais são semelhantes entre o perfil com furos e sem furos.

Vale notar, ainda, o surgimento de deslocamentos típicos de modo local em condições de carregamento mais elevado, tanto na condição mais crítica de imperfeições, quanto na combinação intermediária de imperfeições, evidenciando uma maior susceptibilidade do perfil com furos à interação distorcional x local, quando comparado ao perfil sem furos.

### **3.2 Barra de comprimento 1311 mm**

No caso dos perfis de comprimento intermediário analisado (1311 mm), as Figs. 8 (a)-(c) e Figs. 9 (a)-(c) apresentam os resultados dos perfis sem furos e com furos, respectivamente, nos mesmos padrões exibidos anteriormente.

A análise conjunta dos resultados associados às barras de comprimento 1311 mm, com e sem furos, permite as seguintes observações: (i) Os casos de trajetórias com menor capacidade resistente elástica ilustram picos significativamente menores que 1 ( $P/P_{crit} = 0,63$  e  $P/P_{crit}=0,73$ ), enquanto os casos mais estáveis ainda resultam maiores. Com relação aos casos mais críticos,  $P_{ue,com\ furos}/P_{ue,sem\ furos} \approx 0,88$ , enquanto  $P_{crit,com\ furos}/P_{crit,sem\ furos} \approx 0,76$ , ou seja, a influência dos furos ainda é maior para a carga crítica de estabilidade elástica que na capacidade resistente elástica em si, mas com uma diferença significativamente menor do que no caso de menor comprimento; (ii) em ambos os tipos de perfil, a combinação de menor resistência é a ( $L=0$ ;  $D=1,38$ ;  $G=-2,56$ ). Tal como no menor comprimento, essa combinação provoca maiores tensões de compressão na região dos enrijecedores, e tendência de fechamento das mesas entre si (Figs. 5(b)-(c)); (iii) A imperfeição global de flexão ( $L/500$ ) passa a ser mais significativa em relação às dimensões da seção transversal, de modo que o sinal, positivo ou negativo, determina o sentido mais ou menos estável desses deslocamentos para a barra no regime não linear; (iv) A condição de equilíbrio de maior resistência para a barra sem furos é (Fig. 8 (c))

semelhante à que ocorre no caso de barra com 511 mm, porém, no caso da barra com furos, o efeito que a imperfeição global positiva provoca ( $G > 0$  – Fig. 5(c)) se soma com o efeito da presença dos furos (que também provocam o deslocamento do centro de massa efetivo na direção dos enrijecedores), conduzindo a uma configuração menos estável que no caso de imperfeição global nula, ou seja, trata-se da condição em que apenas o efeito das imperfeições do modo distorcional negativas (abertura da seção – Fig. 5(b)) produzem um efeito positivo para a capacidade resistente (Fig 9(c)), e;

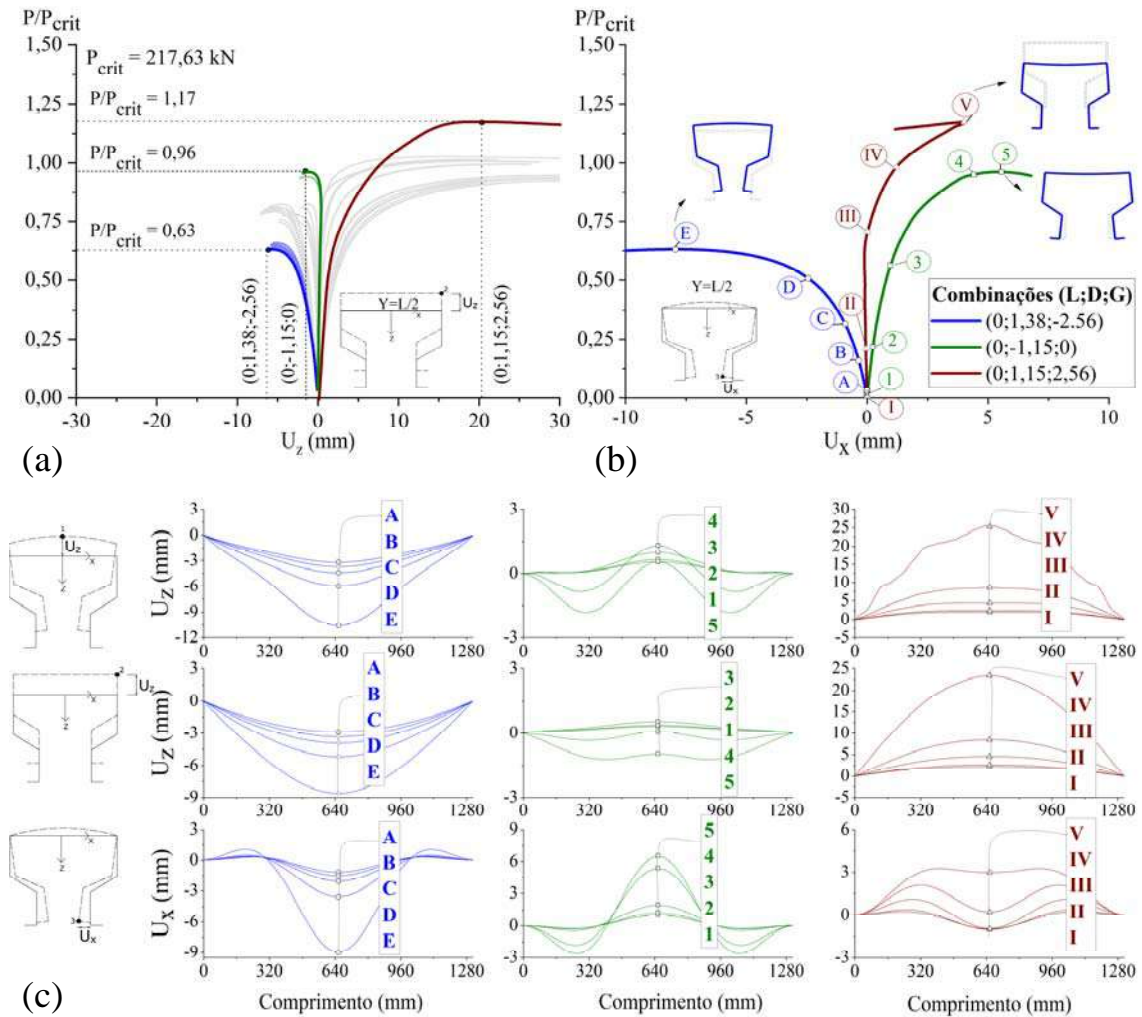


Figura 8 – (a) Trajetórias de equilíbrio obtidas para perfis de comprimento 1311 mm sem furos, e (c) deslocamentos típicos ao longo do comprimento para pontos de referência da seção 1, 2 e 3, das (b) trajetórias destacadas.

(v) No caso do perfil sem furos, apenas se percebe deslocamentos típicos de modo local na combinação de maior resistência (também com imperfeições oriundas do modo local nulas – Fig. 8(c)), enquanto no caso com furos, apesar das imperfeições iniciais locais também serem nulas, nota-se o surgimento de deslocamentos típicos locais para todos os casos (Fig. 9(c)), reforçando a maior interação distorcional x local no caso de perfil com furos.

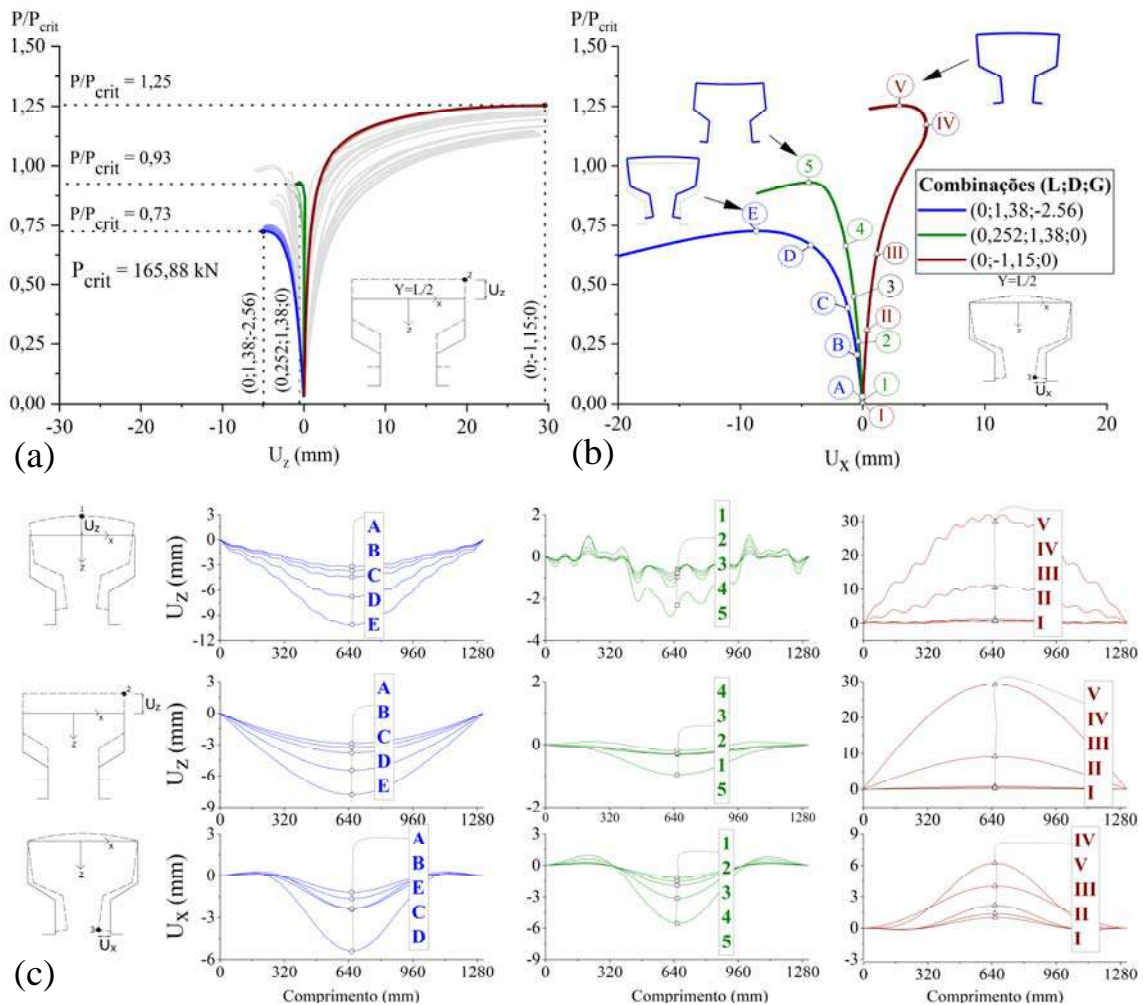


Figura 9 – (a) Trajetórias de equilíbrio obtidas para perfis de comprimento 1311 mm com furos, e (c) deslocamentos típicos ao longo do comprimento para pontos de referência da seção 1, 2 e 3, das (b) trajetórias destacadas.

### 3.3 Barra de comprimento 1631 mm

Por fim, para a barra de maior comprimento analisada, que se encontra em região de carga crítica global de flexo-torção, são ilustradas as Figs. 10 (a)-(c), sobre a barra sem furos, e Figs. 11 (a) – (c), sobre a barra com furos, de forma semelhante aos comprimentos comentados anteriormente.

A análise de ambos os resultados, das barras sem furos e com furos, conduz à seguinte análise:

(i) Tanto nos casos menos estáveis, quanto para os mais estáveis, os resultados de  $P/P_{crit}$  máximos obtidos nas trajetórias analisadas resultam próximos de 1 ou menos. Com relação ao caso mais crítico,  $P_{ue,com\ furos}/P_{ue,sem\ furos} \approx 0,91$ , enquanto  $P_{crit,com\ furos}/P_{crit,sem\ furos} \approx 0,93$ , ou seja, nota-se uma semelhança muito maior da influência dos furos na análise de estabilidade elástica comparada com o resultado de capacidade resistente elástica; (ii) Mais uma vez, a

combinação de imperfeições que conduz ao caso mais crítico trata do efeito sobreposto da flexão negativa (maior compressão na região dos enrijecedores – Fig. 5(c)) e do modo distorcional positivo (fechamento da seção – Fig. 5(b)), ou seja, a combinação (L=0; D=1,38; G=-3,2), e; (iii) De modo semelhante ao que ocorre no comprimento 1311 mm da barra sem furos, o efeito da imperfeição de flexão máxima positiva combinada com o modo distorcional também positivo (lembrando que seus efeitos se opõem em relação ao deslocamento que provocam no centro de massa efetivo), leva a barra à condição de maior resistência, e deslocamentos típicos de maior compressão na região da alma (Fig. 10(c));

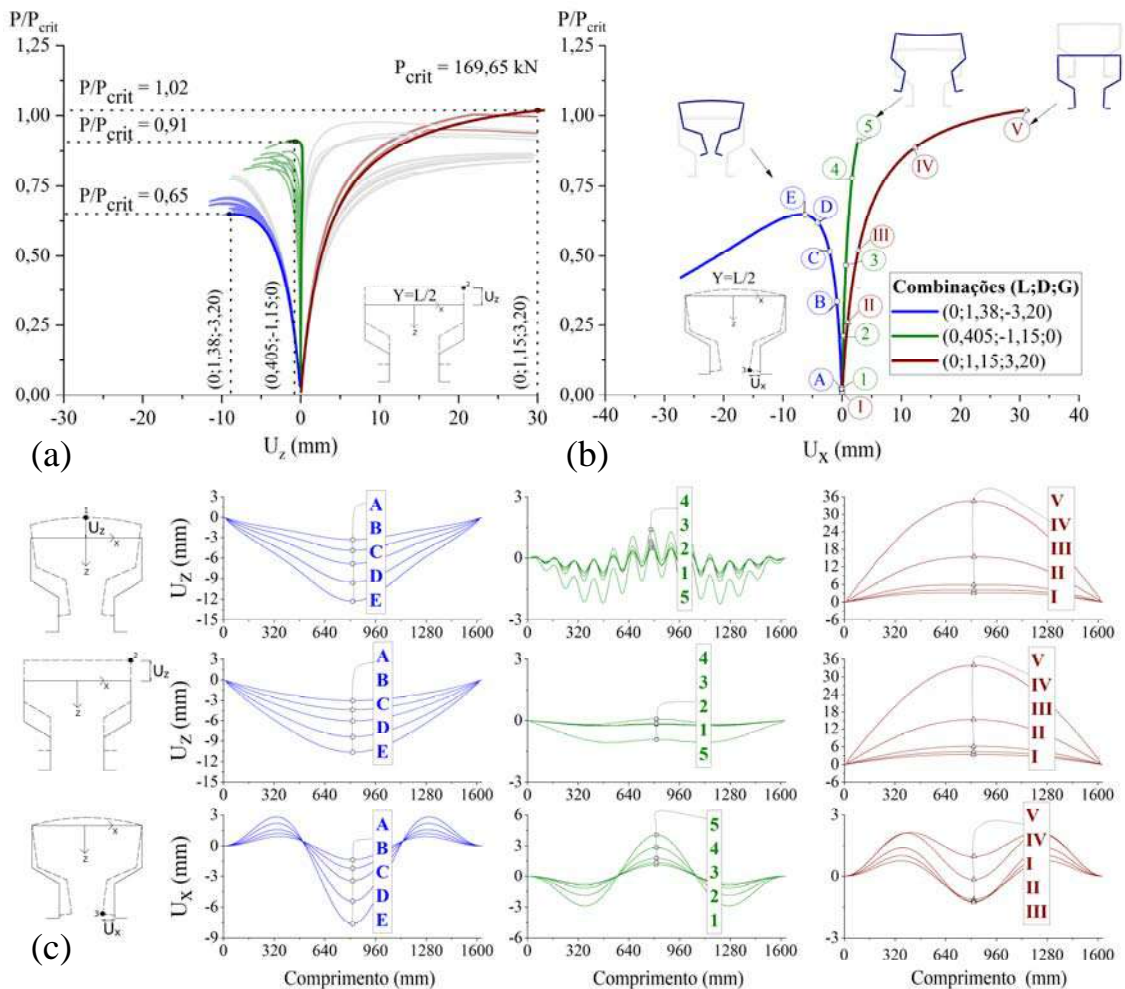


Figura 10 – (a) Trajetórias de equilíbrio obtidas para perfis de comprimento 1631 mm sem furos, e (c) deslocamentos típicos ao longo do comprimento para pontos de referência da seção 1, 2 e 3, das (b) trajetórias destacadas.

(iv) Já no caso da barra com furos, o efeito imperfeição global ( $L/500 \approx 3,2$  mm) se soma ao efeito causado pelos furos na alma, deslocando o centro de massa efetivo na direção dos enrijecedores, e conduzindo à trajetória de menor resistência. Por outro lado, quando atua apenas a imperfeição distorcional de abertura da seção, verificam-se deslocamentos associados

a maiores tensões de compressão na região da alma (condição de maior resistência – Fig. 11(c)), e deslocamentos típicos de modos global e local quando em carregamentos mais elevados, evidenciando mais interações modais; (v) De modo geral, nota-se ainda o surgimento de deslocamentos típicos de modo local para o perfil com furos em todas as combinações, mas de forma muito menos perceptível na combinação mais crítica de imperfeições.

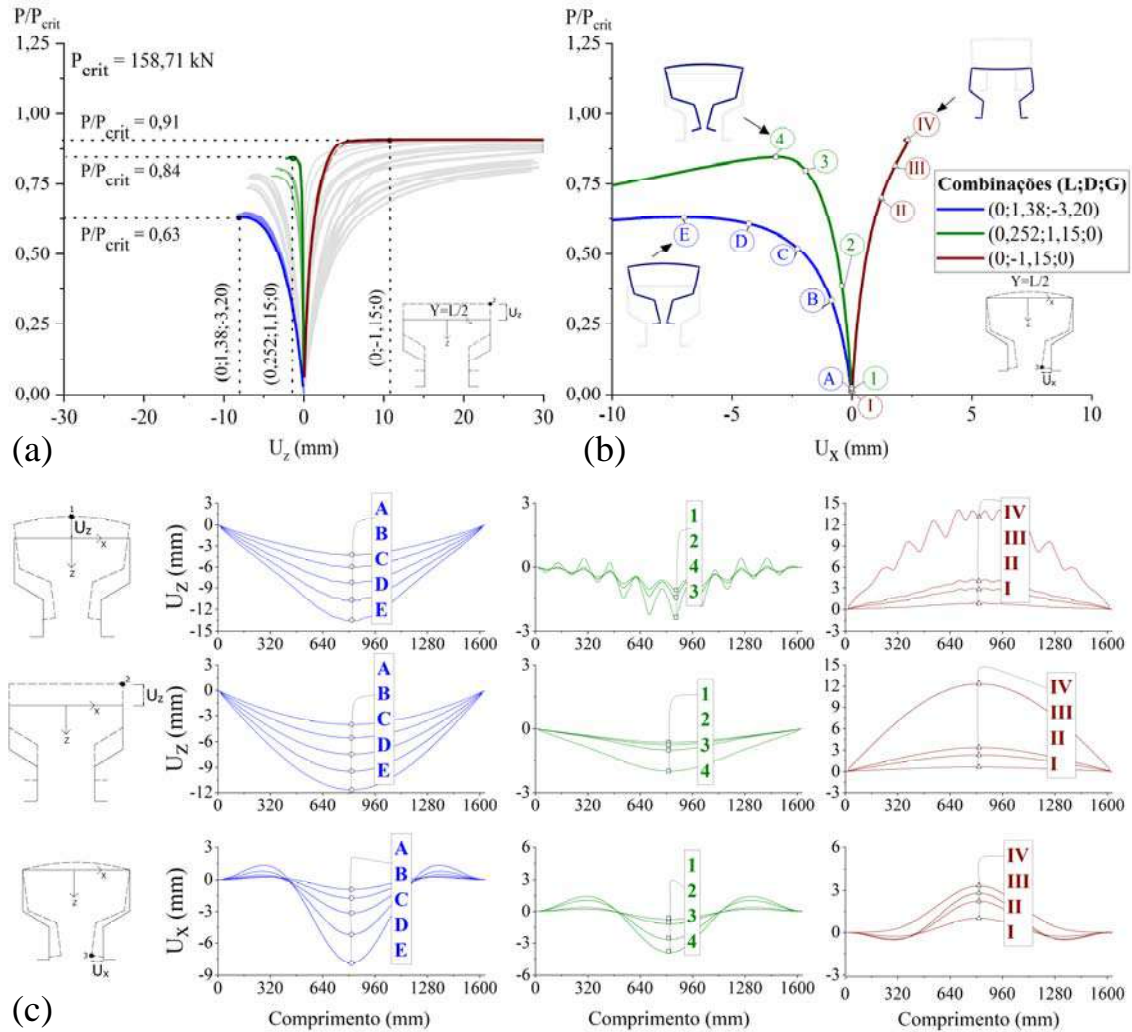


Figura 11 – (a) Trajetórias de equilíbrio obtidas para perfis de comprimento 1631 mm com furos, e (c) deslocamentos típicos ao longo do comprimento para pontos de referência da seção 1, 2 e 3, das (b) trajetórias destacadas.

#### 4 Análise não linear com plasticidade

A não-linearidade do material foi considerada para as combinações correspondentes aos limites superior e inferior de cada comprimento de barra analisado (combinações de imperfeições indicadas nas Figuras 6 a 11), empregando-se um modelo constitutivo elástico-perfeitamente plástico para o aço. As tensões de escoamento ( $f_y$ ) de 600 e



345 MPa foram selecionadas como referências, resultando nas relações  $f_y/\sigma_{cr}$  descritas na Tabela 2 (área líquida da seção transversal para o cálculo de  $\sigma_{cr}$  no caso com furos).

Nas Figs. 12 (a)-(c) são exibidas, para cada comprimento, as trajetórias de equilíbrio em função do deslocamento típico do ponto 2 da seção, com base nos diferentes materiais analisados e as configurações de imperfeições geométricas iniciais relativas ao comportamento de menor e de maior resistência obtidas na análise elástica.

Tabela 2 – Relações  $f_y/\sigma_{cr}$  das barras analisadas

L (mm)	511		1311		1631	
	Sem furos	Com furos	Sem furos	Com furos	Sem furos	Com furos
$f_y = 600$ MPa	1,10	1,54	1,26	1,55	1,62	1,62
$f_y = 345$ MPa	0,64	0,88	0,72	0,89	0,93	0,93

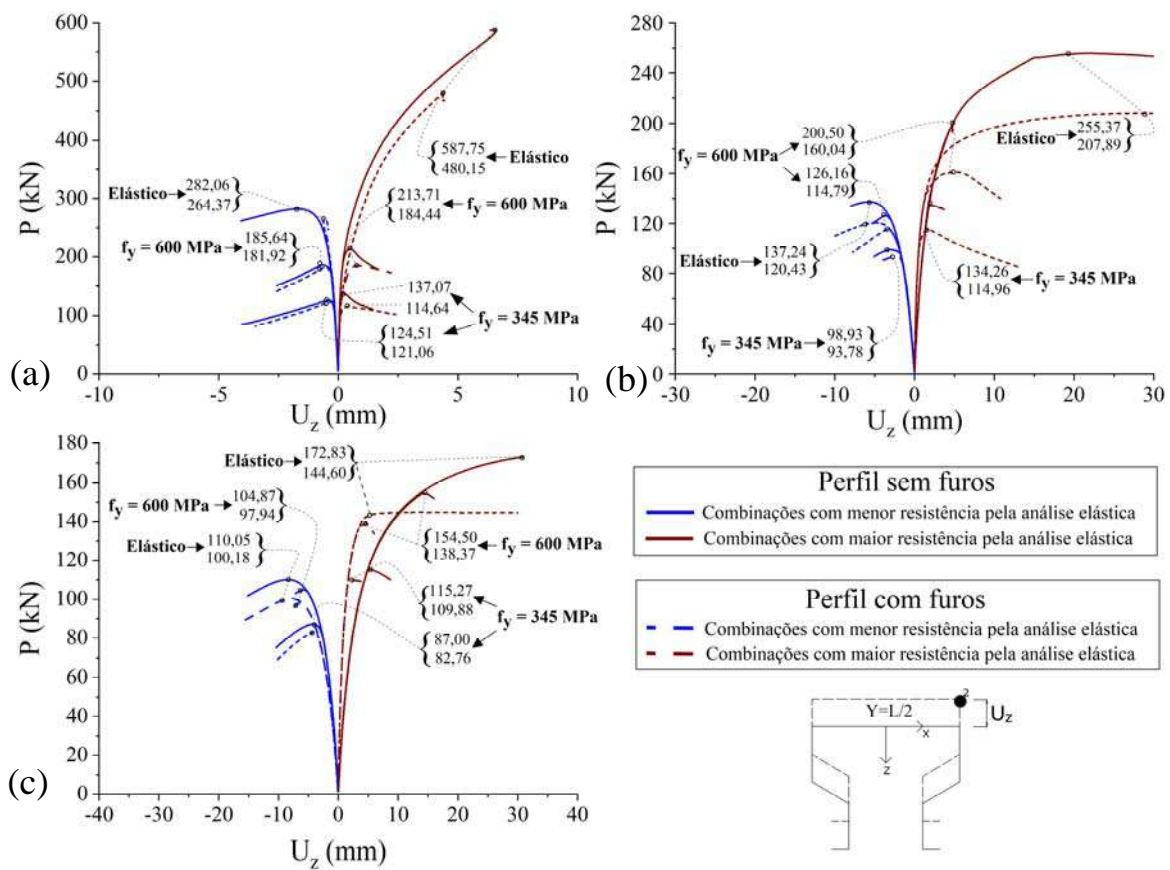


Figura 12 –Trajetórias de equilíbrio com plasticidade para perfis com comprimento

(a) 511 mm, (b) 1311 mm, e (c) 1631 mm

Com relação aos resultados envolvendo a não linearidade do material, verifica-se que: (i) Todos os casos analisados apresentaram algum tipo de falha em regime elasto-plástico; (ii) Considerando a plasticidade, há uma diferença particularmente pequena nos valores de força limite para a barra mais curta, tanto entre as barras com e sem furos (cerca de 5% ou menos nos casos da combinação mais crítica), quanto entre combinações mais ou menos estáveis de

imperfeições geométricas iniciais (cerca de 5% ou menos nos casos de perfis com furos, e cerca de 15% ou menos nos casos de perfis sem furos), indicando que em relações baixas de  $f_y/\sigma_{cr}$ , o limite de resistência do material é preponderante sobre outros efeitos, e influencia mais a seção com furos do que sem furos, já que esta é, naturalmente, afetada por tensões maiores decorrentes da área efetiva menor; (iii) Para a barra com comprimento intermediário (1311 mm), há uma variação mais significativa entre os resultados afetados pelas diferentes combinações de imperfeições geométricas iniciais (resultado de maior e de menor resistência), com diferenças de valores, no caso da menor relação  $f_y/\sigma_{cr}$ , superiores a 20% para o perfil com furos, e superiores a 25% para o perfil sem furos (essa diferença aumenta com  $f_y/\sigma_{cr}$ ); (iv) Ainda no caso da barra com comprimento intermediário, e considerando a condição mais crítica de imperfeições geométricas, a diferença nos resultados entre as barras com furos e sem furos é inversamente proporcional a  $f_y/\sigma_{cr}$ , variando cerca de 5%, com  $f_y=345$  MPa, até cerca de 12% correspondentes ao caso puramente elástico; e, (v) No caso da barra de comprimento 1631 mm, as diferenças relativas entre os perfis com e sem furos se mantêm semelhantes ao caso do comprimento 1311 mm, especialmente se considerado o caso de imperfeições mais crítico, para o qual ocorrem as menores variações em geral.

## 5 Considerações finais

Este trabalho apresentou a análise do comportamento de perfis tipo rack com e sem furos na região da alma, sob diferentes condições de imperfeições geométricas iniciais típicas de modo local, distorcional, e global de flexão em torno do eixo de menor inércia. Nesse contexto, foi possível identificar alguns aspectos que merecem destaque: (i) Verificou-se a interação distorcional x local para perfis rack com furos, confirmando o que é sugerido por Moen e Schafer (2008) e comentado por Martins *et al.* (2015.a); (ii) O fenômeno de interação distorcional x local é, naturalmente, mais evidente em comprimentos cujas relações de carga crítica local e distorcional estão próximas (interação primária –  $0,9 \leq P_{cr,distor}/P_{cr,loc} \leq 1,1$ , conforme sugere Martins *et al.* (2015.b)); (iii) Nas condições menos estáveis de imperfeições geométricas iniciais, a interação modal é mais evidente no caso de perfil com furos do que sem furos, inclusive sendo possível de ser verificada em todas as faixas de comprimentos analisados; (iv) A condição de fechamento entre as mesas do perfil (distorcional positivo – Fig. 5(b)) conduz à condição mais crítica, reafirmando Dinis e Camotim (2015), porém, deve-se estar atento à grande influência de imperfeições de

flexão que provoquem maiores compressões da região da alma, pois podem superar a influência das imperfeições distorcionais e conduzir o perfil a uma condição de capacidade significativamente maior; (v) Na condição mais crítica de imperfeições, há uma menor variação dos resultados de capacidade resistente, tanto na influência das eventuais interações modais em regime elástico, quanto no impacto do limite de escoamento do material; e, (vi) Naturalmente, os limites de escoamento do material afetam mais aos perfis com furos, em função da menor área efetiva, porém, atenção deve ser dada à perda de rigidez local no elemento perfurado da seção, que pode aumentar a susceptibilidade a fenômenos e interação modal, especialmente em condições de elevadas relações  $f_y/\sigma_{cr}$ .

Por fim, é importante mencionar que os efeitos de interação modal em perfis perfurados devem ser mais bem investigados no contexto de procedimentos de previsão da capacidade resistente de perfis rack para estruturas tipo porta-paletes, já que a influência dos furos nesse contexto não é linear em relação à esbeltez da barra. Além disso, o efeito de outros tipos de interação modal, como a interação distorcional x global, precisa também ser mais bem investigada para esses perfis, especialmente envolvendo a sensibilidade a imperfeições globais de flexo-torção (não considerada nesse trabalho), conforme já apresentado por Lazzari *et al.* (2020) para perfis tipo U enrijecido.

## 6 Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

## 7 Referências bibliográficas

ABNT. NBR 14762: Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT. NBR 15524-2: Sistemas de armazenagem parte 2 - diretrizes para o uso de estruturas tipo porta-paletes seletivos. Rio de Janeiro, 2007.

AISI S100:2016. North-American specification for the design of cold-formed steel structural members. Washington, DC: American Iron and Steel Institute and Canadian Standards Association. 2020.

ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 2021 R2, User's Guide & Theory Guide, ANSYS, Inc., Canonsburg, PA, 2021.

BEBIANO, R., CAMOTIM, D.; GONÇALVES, R. GBTul 2.0 – A Second-Generation Code for the GBT Based Buckling and Vibration Analysis of Thin-Walled Members. *Thin-Walled Structures*, vol. 124, 2018.

BONADA, J., CASAFONT, M., ROURE, F., PASTOR M.M. Selection of the initial geometrical imperfection in nonlinear FE analysis of cold-formed steel rack columns. *Thin-Walled Structures*, v. 51, p. 99–111, 2012.

- CAMOTIM, D., DINIS, P.B., MARTINS, A., YOUNG, B. Review: Interactive behaviour, failure and DSM design of cold-formed steel members prone to distortional buckling. *Thin-Walled Structures*, v. 128, p. 12–42, 2018.
- CASAFONT, M.; PASTOR M. M.; ROURE F.; BONADA J.; PEKÖZ, T. Design of Steel Storage Rack Columns via the Direct Strength Method. *Journal of Structural Engineering*, vol. 139, no 5, 2013.
- CEN. EN 1993-1-5:2006 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-5: Plated structural elements. Brussels, 2006.
- CEN. EN 15512:2020 Steel Static Storage Systems - Adjustable pallet rack systems - Principles for structural design. Brussels, 2020
- DINIS, P. B.; CAMOTIM, D. Post-buckling behaviour and strength of cold-formed steel lipped channel columns experiencing distortional/global interaction. *Computers & Structures*, v. 89, n. 3-4, 2011.
- DINIS P.B, CAMOTIM D. Cold-formed steel columns undergoing local–distortional coupling: behaviour and direct strength prediction against interactive failure. *Comput Struct* v. 147, 2015.
- FARIA, V. O. Análise de estabilidade de perfis formados a frio com perfurações. Dissertação de Mestrado, PROPEC - UFOP, 2016.
- LAZZARI, J. A. DE, BATISTA, E. DE M. Distortional-global buckling interaction relevance in cold-formed steel lipped channel columns. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 17(9), 2020.
- MARTINS, A., CAMOTIM, D., DINIS, P.B., YOUNG, B. Local–Distortional interaction in cold-formed steel columns: mechanics, testing, numerical simulation and design, *Structures* 4, 2015.a.
- MARTINS A., DINIS P.B., CAMOTIM D., PROVIDÊNCIA P. On the relevance of local-distortional interaction effects in the behaviour and design of cold-formed steel columns. *Comput Struct*, 160, 2015.b.
- MOEN C.D., SCHAFFER B.W. Experiments on cold-formed steel columns with holes. *Thin-Walled Struct* 2008; 46(10):1164–82, 2008.
- NEIVA, L. H. A.; SARMANHO, A. M. C.; FARIA, V. O.; SOUZA, F. T.; STARLINO, J. A. B. Numerical and experimental analysis of perforated rack members under compression. *Thin-Walled Structures*. 130, p. 176-193, 2018.
- PASTOR, M. M.; CASAFONT M.; BONADA J.; ROURE F. Imperfection Amplitudes for Nonlinear Analysis of Open Thin-Walled Steel Cross-Sections Used in Rack Column Uprights. *Thin-Walled Structures*, vol. 76, p. 28–41, 2014.
- PEREIRA, R.E. Efeito das imperfeições geométricas iniciais na capacidade resistente de perfis racks submetidos à compressão. Dissertação de Mestrado, PPGEC - UFRGS, 2022.
- PINTO, R.A.R., SARMANHO, A.M.C., SOUZA, F.T. Análise numérica da influência das dimensões e posição das perfurações na resistência à instabilidade distorcional de perfis formados a frio do tipo rack comprimidos. *Revista da Estrutura de Aço – REA*, v.10, N.3, p.333-350, 2021.
- SCHAFFER B. W., PEKÖZ T. Computational modeling of cold-formed steel characterising geometric imperfections and residual stresses. *J Constr Steel Res.*, 47(3):193–210, 1998.