

ANÁLISE NUMÉRICA DA INSERÇÃO DE ENRIJECEDORES DE ALMA EM TERÇAS DE AÇO FORMADO A FRIO

Isabella Gondim Alves (1), Gregório Sandro Vieira (2)

(1) Graduanda, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil

(2) Professor Doutor, Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil

RESUMO

Os perfis de aço formados a frio constituem uma solução estrutural eficiente e versátil na engenharia civil, destacando-se pela elevada relação resistência/peso, precisão dimensional e ampla aplicabilidade em sistemas construtivos modernos. Este artigo aborda a análise do comportamento estrutural de perfis de aço formados a frio, com ênfase na influência da inserção de enrijecedores de alma e da variação da esbeltez no desempenho estrutural desses elementos. A pesquisa foi desenvolvida por meio de modelagem numérica utilizando o Método dos Elementos Finitos, com o auxílio do programa Abaqus, permitindo a avaliação do momento crítico e dos modos de instabilidade associados aos perfis estudados. Os resultados indicam que a utilização de enrijecedores pode contribuir significativamente para o aumento da capacidade resistente dos perfis, especialmente em situações onde predomina a flambagem local. Entretanto, verificou-se que, em determinados casos, a inserção desses elementos não resulta em ganhos estruturais, sobretudo quando o comportamento é governado por instabilidades globais. Dessa forma, o estudo evidencia a importância da análise criteriosa dos parâmetros geométricos e mecânicos no dimensionamento de perfis de aço formados a frio, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais eficientes, seguras e economicamente viáveis na engenharia estrutural.

Palavras-chave: perfis de aço formados a frio; enrijecedores de alma; flambagem; instabilidade estrutural; método dos elementos finitos; Abaqus; momento crítico.

ABSTRACT

Cold-formed steel profiles constitute an efficient and versatile structural solution in civil engineering, standing out for their high strength-to-weight ratio, dimensional precision, and

wide applicability in modern construction systems. This study addresses the analysis of the structural behavior of cold-formed steel profiles, with emphasis on the influence of web stiffeners and slenderness variation on the structural performance of these elements. The research was developed through numerical modeling using the Finite Element Method, with the aid of Abaqus software, enabling the evaluation of the critical moment and the instability modes associated with the analyzed profiles. The results indicate that the use of stiffeners can significantly contribute to increasing the load-bearing capacity of the profiles, especially in situations where local buckling predominates. However, it was observed that, in certain cases, the insertion of these elements does not result in structural gains, particularly when the behavior is governed by global instabilities. Thus, the study highlights the importance of a careful analysis of geometric and mechanical parameters in the design of cold-formed steel profiles, contributing to the development of more efficient, safe, and economically viable solutions in structural engineering.

Keywords: cold-formed steel profiles; web stiffeners; buckling; structural instability; finite element method; Abaqus; critical moment.

1. INTRODUÇÃO

O emprego do aço como material estrutural ocupa posição de destaque na engenharia civil, em razão de suas propriedades mecânicas favoráveis, resistência elevada, ductilidade, homogeneidade e possibilidade de industrialização. Dentro desse contexto, os perfis de aço formados a frio assumem relevância crescente, especialmente em sistemas construtivos modernos que demandam soluções leves, eficientes e economicamente competitivas. Esses perfis têm sido amplamente utilizados em edificações industriais, comerciais e residenciais, além de estruturas auxiliares, coberturas, mezaninos, sistemas de vedação e componentes de infraestrutura, consolidando-se como alternativa técnica aos perfis laminados a quente e a outros materiais tradicionais.

Os perfis de aço formados a frio são elementos produzidos a partir de chapas ou bobinas de aço de pequena espessura, conformadas em temperatura ambiente por meio de processos mecânicos, como dobramento ou perfilamento contínuo. Diferentemente dos perfis laminados a quente, cuja forma final é obtida a partir da laminação do aço em altas temperaturas, os perfis formados a frio adquirem sua geometria sem alteração térmica significativa do material, o que confere maior precisão dimensional, melhor acabamento superficial e ampla diversidade de

seções transversais, possibilitando a obtenção de geometrias otimizadas para resistir aos esforços solicitantes com menor consumo de material.

O processo de conformação a frio influencia diretamente o comportamento mecânico do aço, promovendo o aumento da resistência ao escoamento devido ao encruamento decorrente das deformações plásticas impostas durante a fabricação. Tal característica permite que os perfis formados a frio apresentem elevada eficiência estrutural, mesmo quando fabricados com chapas de espessuras reduzidas. Entretanto, essa esbeltez acentuada torna esses elementos mais suscetíveis a fenômenos de instabilidade, exigindo abordagens específicas de dimensionamento e análise estrutural, bem como a observância rigorosa das normas técnicas aplicáveis. (ABNT, 2010; YU; LABOUBE, 2010).

A versatilidade geométrica dos perfis de aço formados a frio é uma de suas principais vantagens, as seções transversais podem assumir diferentes configurações, tais como perfis do tipo U, C, Z, cartola, sigma, além de seções compostas e enrijecidas. A introdução dos enrijecedores ao longo da seção contribui para o aumento da rigidez e da capacidade resistente, reduzindo os efeitos da instabilidade local e possibilitando vãos maiores ou menores taxas de consumo de material (ABNT, 2010; YU; LABOUBE, 2010). Essa flexibilidade de projeto torna os perfis formados a frio particularmente adequados para sistemas construtivos industrializados e modulares.

No âmbito da construção civil, a aplicação dos perfis de aço formados a frio tem se intensificado, sobretudo em sistemas de construção a seco, como o *Light Steel Framing* (LSF), em que os perfis são utilizados como elementos estruturais principais de paredes, pisos e coberturas, substituindo sistemas convencionais em concreto ou alvenaria estrutural. As vantagens associadas incluem redução do peso próprio da estrutura, rapidez de execução, menor geração de resíduos, facilidade de transporte e montagem, além de maior controle de qualidade devido ao elevado grau de industrialização (Santiago, 2012).

Além das edificações, os perfis formados a frio são amplamente empregados em estruturas metálicas leves, tais como galpões, telhados, pórticos, mezaninos, estantes industriais, sistemas de fechamento e suportes para equipamentos. Em coberturas, por exemplo, esses perfis são utilizados como terças, proporcionando soluções econômicas e eficientes para o suporte de telhas metálicas ou termoacústicas.

Do ponto de vista normativo, o projeto de estruturas constituídas por perfis de aço formados a frio requer o atendimento a prescrições específicas, uma vez que seu

comportamento estrutural difere significativamente daquele apresentado por perfis laminados a quente. No Brasil, o dimensionamento desses elementos é regido principalmente pela ABNT NBR 14762, que estabelece critérios de cálculo considerando os estados limites últimos e de serviço, bem como os efeitos de instabilidade e as particularidades associadas às seções delgadas. O correto entendimento dessas diretrizes normativas é fundamental para garantir segurança, desempenho e economia das estruturas projetadas.

A relevância do estudo dos perfis de aço formados a frio também está associada às demandas atuais por sustentabilidade e racionalização de recursos, em que a possibilidade de reduzir o consumo de material sem comprometer a segurança estrutural, aliada à reciclabilidade do aço e à diminuição de resíduos no canteiro de obras, contribui para práticas construtivas mais sustentáveis. Ademais, a industrialização do processo produtivo favorece a padronização, a repetibilidade e a redução de custos, aspectos cada vez mais valorizados no setor da construção.

Diante desse cenário, o estudo aprofundado dos perfis de aço formados a frio mostra-se essencial para a formação do engenheiro e para o desenvolvimento de soluções estruturais eficientes e seguras. A compreensão de seus processos de fabricação, propriedades mecânicas, comportamento estrutural e campos de aplicação permite uma utilização mais consciente e otimizada desses elementos. Assim, este trabalho propõe-se a analisar os principais aspectos relacionados aos perfis de aço formados a frio, contribuindo para a difusão do conhecimento técnico e para o aprimoramento das práticas de projeto e dimensionamento no contexto da engenharia estrutural.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo em relação ao comportamento dos perfis de aço formados a frio, caracterizados pelas paredes esbeltas iniciou-se na primeira metade do século XX, no final da década de 1930 e início da década de 1940 e, demonstra o interesse dos estudiosos em entender como esse tipo de perfil reage sob determinados esforços mecânicos.

Ademais, além de estudar os perfis com placas planas, a partir da década de 1990 consolidou-se o estudo a partir da implementação de enrijecedores na alma e/ou mesa dos perfis para entender a influência em relação à flambagem local das placas de aço e à flambagem distorcional.

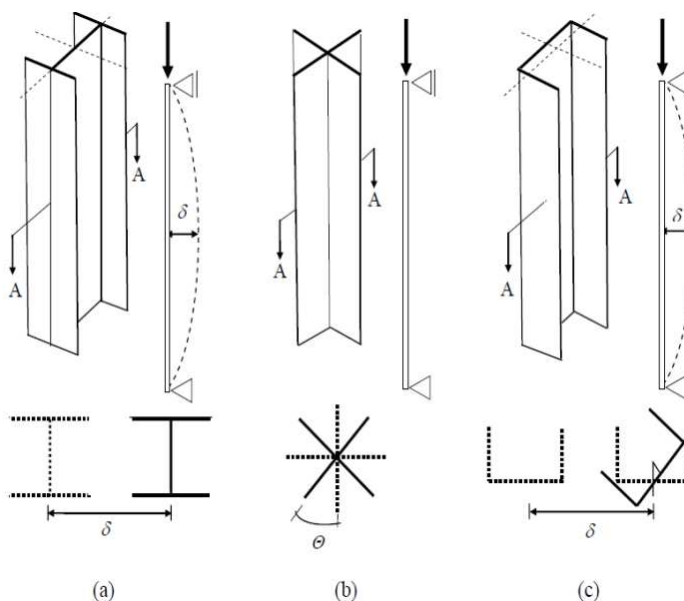
Os perfis de barras de paredes esbeltas são amplamente utilizados como elementos de estruturas de vigas, sendo muito sensíveis aos fenômenos de instabilidade (Alves, 2008), que podem ser classificadas como global, local e distorcional.

1.1 Modos de Instabilidade Global, Local e Distorcional

A análise e o dimensionamento de perfis de aço formados a frio exigem a consideração dos diferentes fenômenos de instabilidade que podem ocorrer na barra como um todo, já que as barras de aço formadas a frio são geralmente muito esbeltas, sujeitas a diferentes modos de instabilidade e podem, por vezes, levar a um estado de colapso (Soares, 2021).

A instabilidade global é caracterizada pela deformação do eixo longitudinal de uma barra, onde sua seção transversal sofre deslocamentos do corpo em relação ao seu plano, que podem ser de rotação e/ou translação (Dôres, 2014), como pode ser observado na Figura 1 os exemplos mais comuns de instabilidade global.

Figura 1 - Modos de Flambagem Global: (a) Flexão; (b) Torção; (c) Flexo-Torção



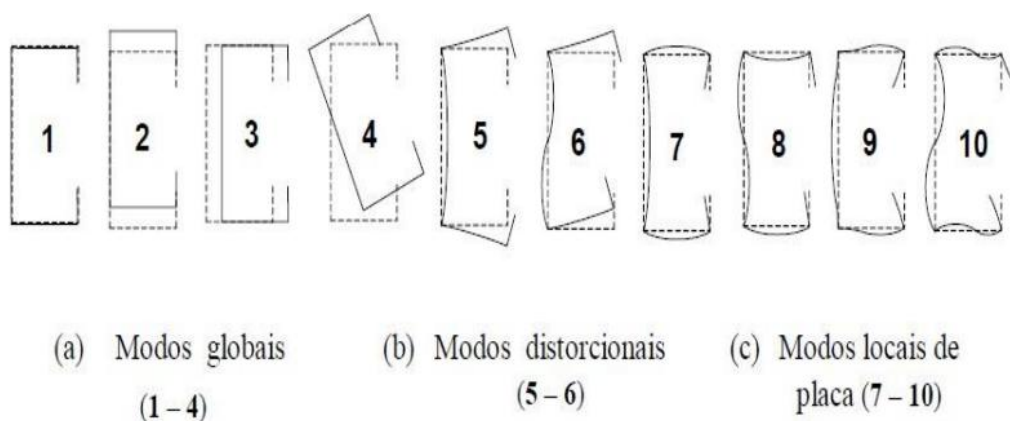
Fonte: Dôres (2014).

Outro modo de instabilidade associado ao tipo de perfil estudado neste presente trabalho é instabilidade local, caracterizada pela deformação das paredes da seção de uma barra em seu plano, mantendo o eixo longitudinal do perfil na configuração indeformada. A instabilidade

local pode ser classificada em duas categorias, associadas aos modos distorcionais (flexão das paredes com deslocamentos significativos de uma ou mais bordas longitudinais internas) e aos modos de placa local (flexão das paredes sem deslocamento das bordas longitudinais internas).

Ademais, esses perfis condicionados aos fenômenos de instabilidade apresentam modos locais ou modos globais de flambagem. Em que, nos modos locais o plano da seção transversal da barra sofre deformações geométricas, com o eixo longitudinal deformável, já os modos globais produzem deformações na geometria do eixo longitudinal, permanecendo invariante na seção transversal da barra. Os modos de instabilidade podem ser observados na Figura 2.

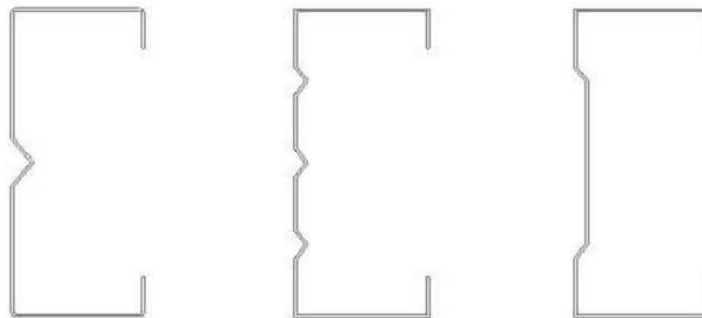
Figura 2 - Modos de Deformação



Fonte: Dôres (2014).

Segundo Souza (2005), a inserção de enrijecedores intermediários de alma e/ou mesa em perfis de aço formados a frio de seções do tipo U enrijecido, como os montantes utilizados no sistema *Light Steel Frame*, garantem ganho considerável de rigidez quando submetidos a compressão axial se comparados aos perfis sem os enrijecedores. Desta forma, concluiu-se por meio de ensaios numéricos, que a presença de um enrijecedor intermediário que permanece estático na direção transversal ao carregamento, em conjunto com os subelementos da alma, diminui os comprimentos de onda associados ao modo de instabilidade e, como resultado, a tensão crítica de flambagem local torna-se maior do que aquela observada em uma seção idêntica que não possui esse enrijecedor intermediário (Souza, 2005). A Figura 3 ilustra como podem ser inseridos os enrijecedores de alma em perfis do tipo U enrijecido.

Figura 3 - Perfis do Tipo U Enrijecido com enrijecedores intermediários de alma



Fonte: Souza (2005).

Além disso, Soares (2021) por meio do programa GBTUL, desenvolvido na Universidade de Lisboa baseado na Teoria Generalizada de Vigas (*Generalized Beam Theory* – GBT, em inglês), calculou o valor da carga crítica de um perfil e identificou as instabilidades relacionadas. Com os estudos, concluiu que nos casos de “barras curtas” e “barras intermediárias” a adição das nervuras tanto na alma quanto nas mesas apresentou maior resistência à carga de compressão e à instabilidade estrutural. Desta forma, demonstra a relação de efetividade das nervuras aliada ao comprimento dos perfis e aponta até onde a inserção dos enrijecedores se mostra eficiente para o aumento de resistência sob situação de carregamento.

Mazzeti (2018), por meio de análises teóricas e experimentais de um conjunto de terças com alma enrijecida ZAE (terças metálicas estruturais de alta resistência, fabricadas com aço zincado, com alma enrijecida longitudinalmente e utilizadas principalmente em coberturas e fechamentos metálicos) adotou o uso de enrijecedores de borda e enrijecedores longitudinais intermediários, que são inseridos na alma do perfil, melhoram o desempenho em relação à instabilidade local causada por momento fletor e/ou força cortante. Para seções com alma enrijecida sujeitas apenas ao momento fletor, a análise de estabilidade elástica via faixas finitas indicou que as tensões críticas do modo local superaram as tensões críticas associadas ao modo distorcional. Como consequência, o modo distorcional passou a ser crítico para as seções analisadas, o que não ocorre no caso de alma plana. Além disso, comparando os casos de alma enrijecida com os equivalentes de alma plana, foi constatado que o efeito dos enrijecedores intermediários não se mostrou significativo em termos de instabilidade distorcional e global.

3. MÉTODO DA PESQUISA

O presente trabalho analisou numericamente o comportamento de perfis de aço formados a frio com seção U enrijecido a serem utilizados como terças. As modelagens computacionais foram realizadas com o auxílio do programa Abaqus que se baseia no Método dos Elementos Finitos (MEF) para o cálculo numérico. As vigas estudadas foram consideradas biapoiadas submetidas à flexão simples e, o carregamento foi aplicado nos centros de massa das duas bordas do perfil em relação ao eixo de menor inércia, o que direciona a flambagem à alma do perfil, que é elemento comprimido neste caso e objeto de estudo principal deste estudo.

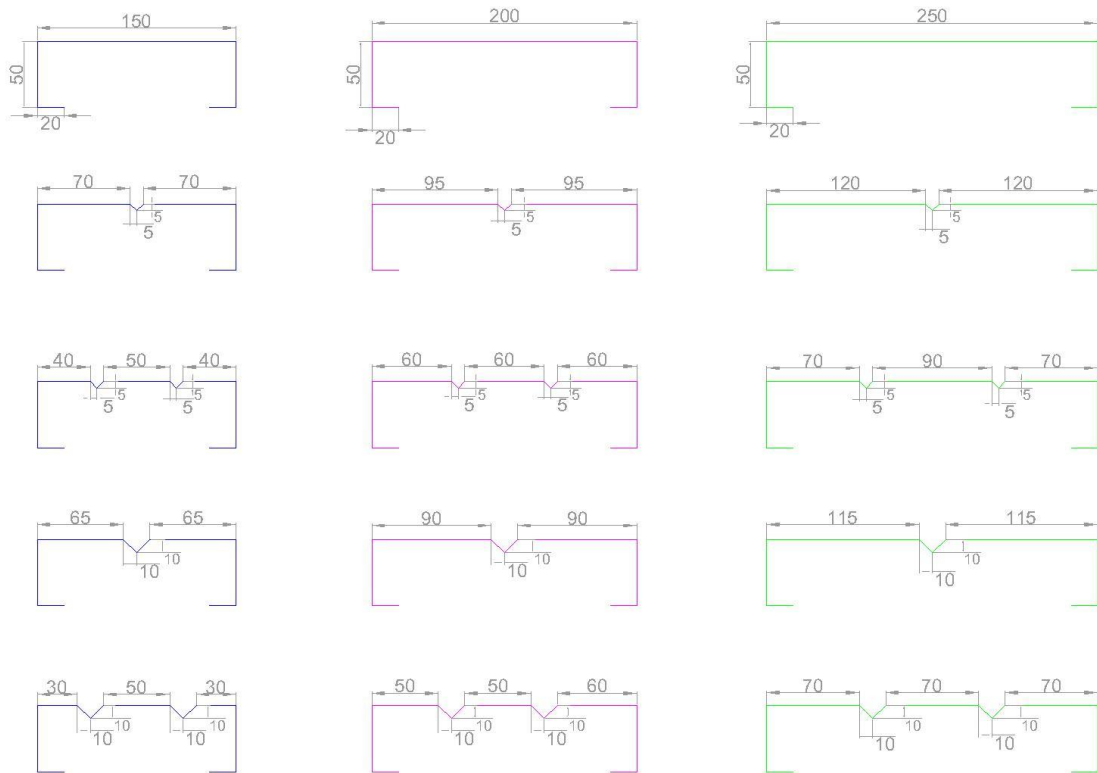
Os perfis estudados foram considerados como sendo feitos do aço MR-250, que apresenta módulo de elasticidade de 200 GPa, coeficiente de *Poisson* 0.3 e módulo de elasticidade transversal 77 GPa.

Desta forma, com o objetivo de avaliar a influência da inserção de enrijecedores de alma e a influência da esbeltez no Momento Crítico (momento em que o perfil se torna instável) aumentou-se a esbeltez da alma, de modo que a instabilidade seja direcionada para a mesma (membro que sofre a compressão e, consequentemente, se torna sujeito à flambagem local), conforme é possível observar na Figura 4.

Além disso, para a modelagem dos perfis no Abaqus foram realizadas as seguintes considerações:

- Módulo de Elasticidade longitudinal: 200 GPa;
- Coeficiente de *Poisson*: 0,3;
- Perfil constituído de elemento do tipo *Shell* - S4R;
- Placa rígida nas bordas do perfil do tipo *Shell* – S8R com Módulo de Elasticidade 2.000 GPa;
- Carregamento: Momento Fletor aplicado nos centros de gravidade das duas bordas e no eixo de menor inércia do perfil;
- Condições de contorno: biapoiado com o apoio 1 restringindo U2, U3 e UR3 e o apoio 2 restringindo U3 e UR3;
- Refinamento da malha: 0.01 metros.

Figura 4 - Dimensões dos perfis a serem estudados



Dimensões em mm

Fonte: Autor (2026).

Assim como é possível analisar pela Figura 4, além de variar o comprimento da alma, também serão avaliadas a inserção de enrijecedores de 1 ou 2 de 10% e 20 % da altura das mesas, respectivamente 5 e 10 mm.

Por fim, também serão analisadas diferentes situações de esbeltez do perfil, variando a espessura (e) do perfil conforme valores tradicionais no mercado, conforme pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Variações a serem estudadas

150x50x20	2	0	200x50x20	2	0	250x50x20	2	0
		1a			1a			1a
		1b			1b			1b
		2a			2a			2a
		2b			2b			2b
	2,25	0		2,25	0		2,25	0
		1a			1a			1a
		1b			1b			1b
		2a			2a			2a
		2b			2b			2b
	2,65	0		2,65	0		2,65	0
		1a			1a			1a
		1b			1b			1b
		2a			2a			2a
		2b			2b			2b
	3	0		3	0		3	0
		1a			1a			1a
		1b			1b			1b
		2a			2a			2a
		2b			2b			2b
	3,35	0		3,35	0		3,35	0
		1a			1a			1a
		1b			1b			1b
		2a			2a			2a
		2b			2b			2b
	3,75	0		3,75	0		3,75	0
		1a			1a			1a
		1b			1b			1b
		2a			2a			2a
		2b			2b			2b
	4,25	0		4,25	0		4,25	0
		1a			1a			1a
		1b			1b			1b
		2a			2a			2a
		2b			2b			2b
	4,75	0		4,75	0		4,75	0
		1a			1a			1a
		1b			1b			1b
		2a			2a			2a
		2b			2b			2b
	6,3	0		6,3	0		6,3	0
		1a			1a			1a
		1b			1b			1b
		2a			2a			2a
		2b			2b			2b

(0) - sem enrijecedor

(1a) - 1 enrijecedor com $h'=0,1h$

(1b) - 2 enrijecedores com $h'=0,1h$

(2a) - 1 enrijecedor com $h'=0,2h$

(2b) - 2 enrijecedores com $h'=0,2h$

Sendo:

h' - altura do enrijecedor em mm

h - comprimento das mesas em mm

Fonte: Autor (2026).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os perfis pré-definidos conforme demonstrado no item anterior, realizou-se as modelagens de todos os perfis no Abaqus e, desta forma, foram obtidos os resultados de momento crítico (M_{cr}) para cada um, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados obtidos de M_{cr} por meio do Abaqus

e (mm)	Tipo	Perfil 150x50x20	Perfil 200x50x20	Perfil 250x50x20
		$M_{cr,abq}$ (kN*cm)	$M_{cr,abq}$ (kN*cm)	$M_{cr,abq}$ (kN*cm)
2	0	268,14	196,12	154,83
	1a	419,59	288,66	217,16
	1b	437,99	307,02	224,33
	2a	605,06	560,29	399,22
	2b	605,31	564,56	415,2
2,25	0	380,9	278,44	219,55
	1a	557,38	385,58	291,07
	1b	579,62	407,5	299,67
	2a	700,35	721,13	515,41
	2b	700,44	726,13	534,69
2,65	0	619,7	452,61	356,18
	1a	833,98	581,41	441,16
	1b	845,41	608,69	451,86
	2a	858,01	1028,3	738,59
	2b	858,13	1035,3	764,52
3	0	895,45	653,56	513,43
	1a	983,76	799,12	608,65
	1b	987,99	830,7	620,94
	2a	1003,2	1315,6	974,64
	2b	1003,7	1317,4	1006,4
3,35	0	1132,3	905,5	710,21
	1a	1133,8	1065,2	813,81
	1b	1138,7	1100,4	827,67
	2a	1156,7	1508,7	1251,5
	2b	1157,7	1510,6	1289,6
3,75	0	1315	1262,7	988,68
	1a	1316,6	1435	1099,6
	1b	1322,1	1473,6	1114,8
	2a	1343,7	1739,4	1622,3
	2b	1345,6	1741,6	1667,7
4,25	0	1562,7	1824,2	1425,8
	1a	1564,2	2006,7	1542,2
	1b	1570,4	2011,3	1557,9
	2a	1597	2045,7	2173,8
	2b	1600,3	2048,6	2227
4,75	0	1834,3	2390,7	1972,4
	1a	1835,3	2331,1	2090,1
	1b	1841,8	2333,4	2104,8
	2a	1874,3	2374,7	2717
	2b	1879,4	2378,4	2723,3
6,3	0	1834,3	3606,4	3919,9
	1a	2848,3	3498,7	3915,3
	1b	2852,2	3497,1	3912,4
	2a	2910,4	3566,5	3986,2
	2b	2921,5	3572,4	3994,4

(0) - sem enrijecedor

(1a) - 1 enrijecedor com $h'=0,1h$ (1b) - 2 enrijecedores com $h'=0,1h$ (2a) - 1 enrijecedor com $h'=0,2h$ (2b) - 2 enrijecedores com $h'=0,2h$

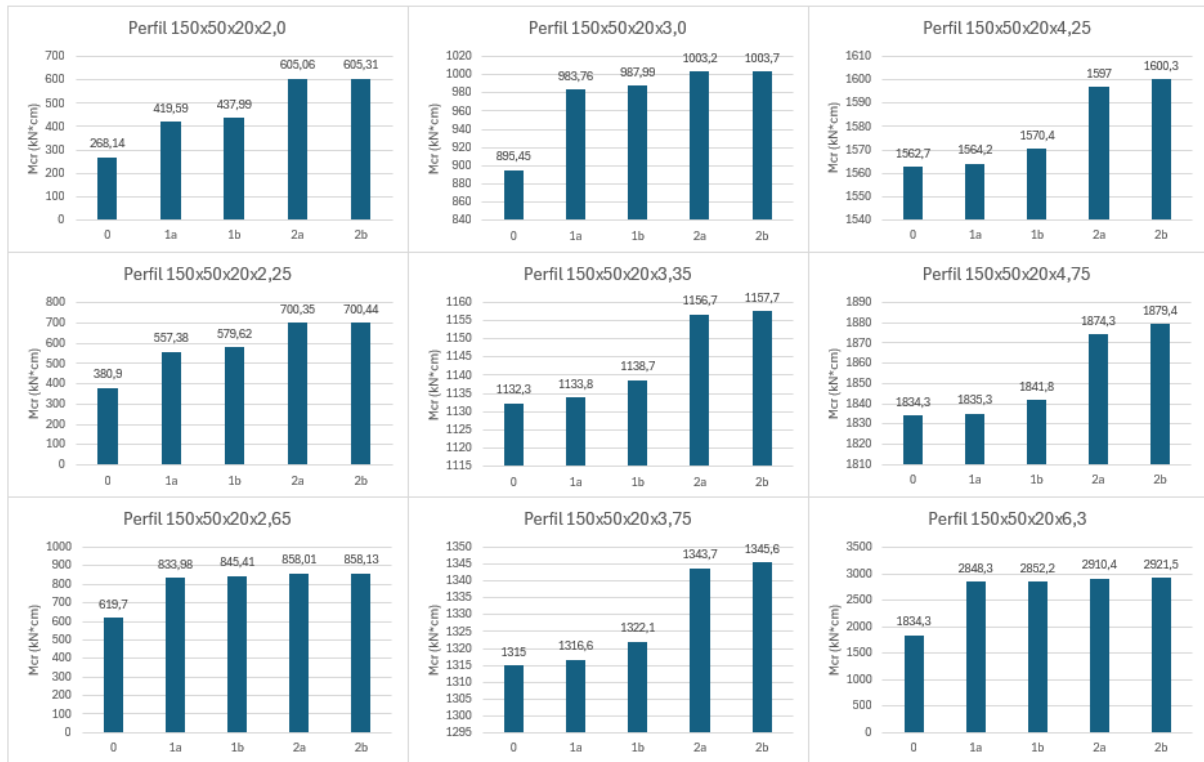
Sendo:

 h' - altura do enrijecedor em mm h - comprimento das mesas em mm

Fonte: Autor (2026).

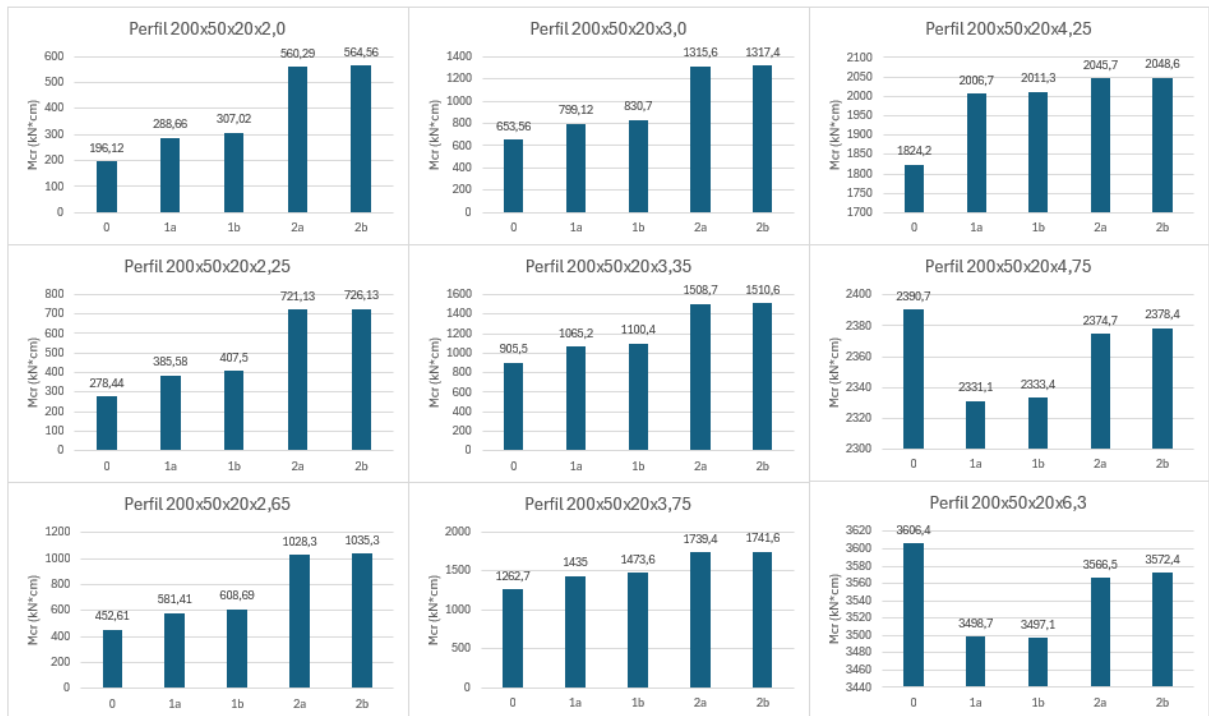
Desta forma, para uma análise mais detalhada do impacto da inserção de enrijecedores, elaborou-se os seguintes gráficos que comparam os momentos críticos obtidos sem e com os enrijecedores de alma.

Figura 5 - Resultados dos perfis com alma de 150 mm



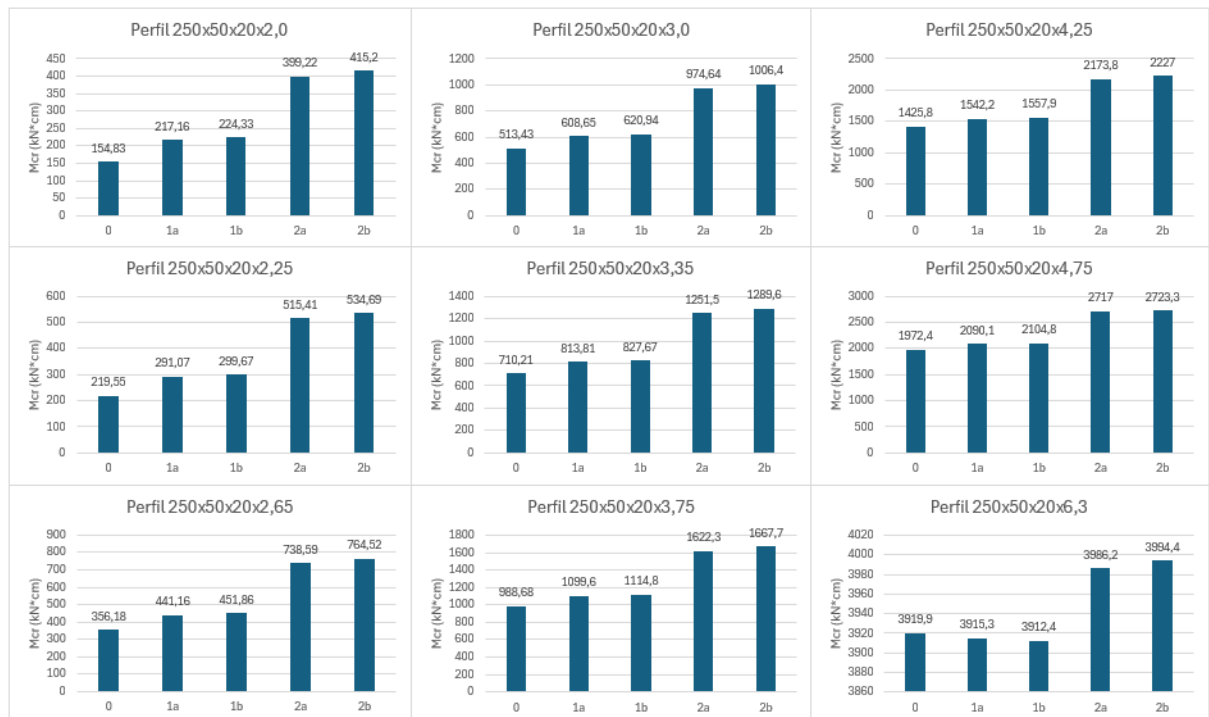
Fonte: Autor (2026).

Figura 6- Resultados dos perfis com alma de 200 mm



Fonte: Autor (2026).

Figura 7 - Resultados dos perfis com alma de 250 mm

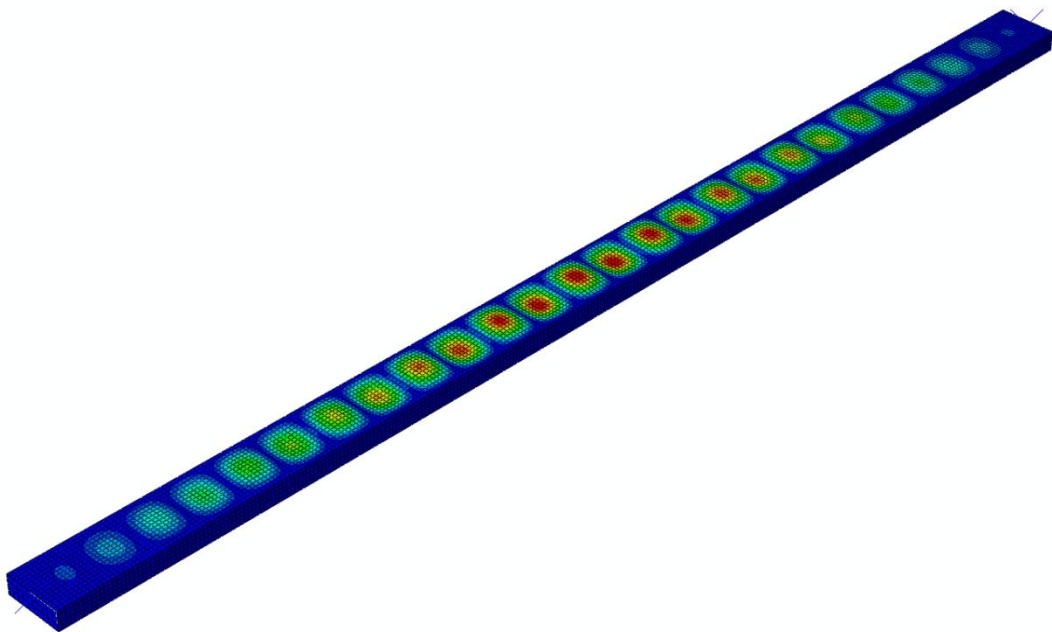


Fonte: Autor (2026).

Pela análise dos gráficos, é possível verificar que, de modo geral, a inserção de enrijecedores é benéfica, porém, é possível ver também que em alguns casos (perfis 150x50x20x3,35, 200x50x20x4,75 e 200x50x20x6,3) a inserção de enrijecedores mostrou-se negativa para o comportamento global do perfil se comparado com o mesmo sem o enrijecedor, particularidade analisada de forma separada.

Desta forma, inicialmente analisou-se como ocorreram os modos de flambagem dos perfis modelados para enfim entender a contribuição real dos enrijecedores.

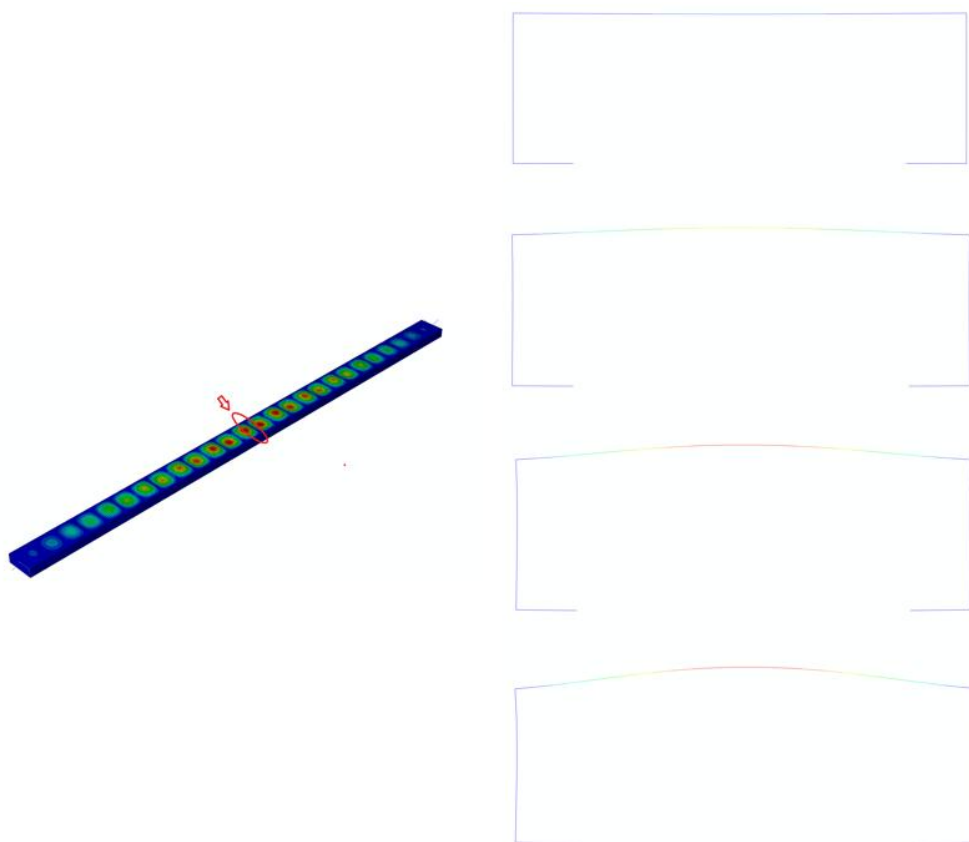
Figura 8 - Deformada do Perfil 150x50x20x2,0 sem enrijecedor



Fonte: Autor (2026).

Pela deformada extraída do Abaqus é possível verificar que o perfil está sujeito a flambagem local, porém, para verificar se há também a flambagem distorcional verificou-se de forma detalhada o comportamento da seção transversal do perfil ao longo da peça conforme pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Seção transversal deformada do perfil 150x50x20x2,0

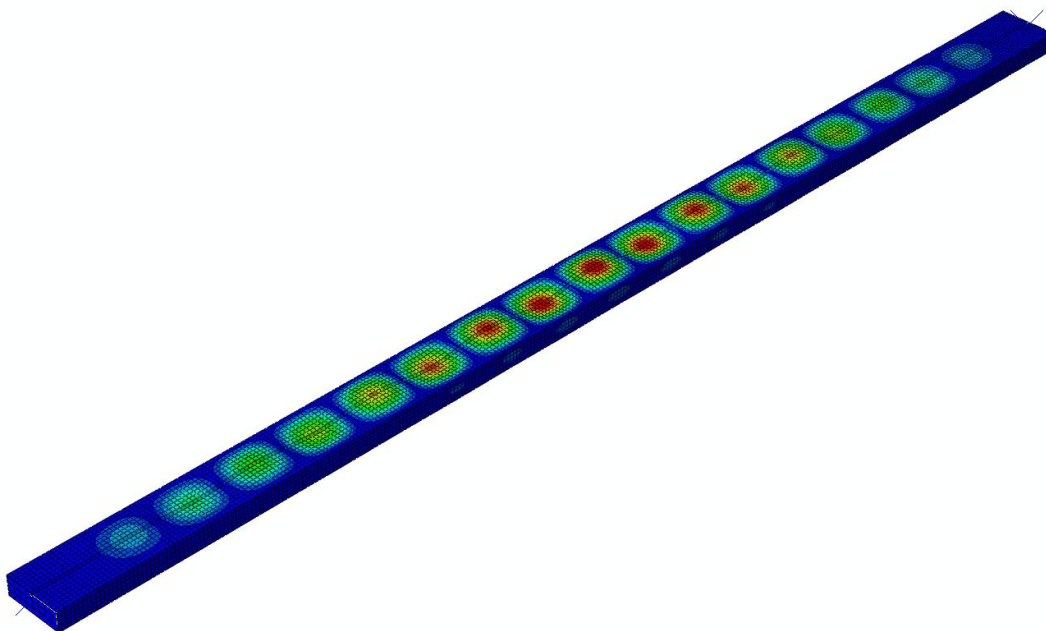


Fonte: Autor (2026).

Conforme é possível verificar pela Figura 9, no perfil está ocorrendo apenas a flambagem local, isso porque percebem-se as deformações da alma e das mesas, em proporções diferentes, de modo que as arestas do perfil se mantêm na posição.

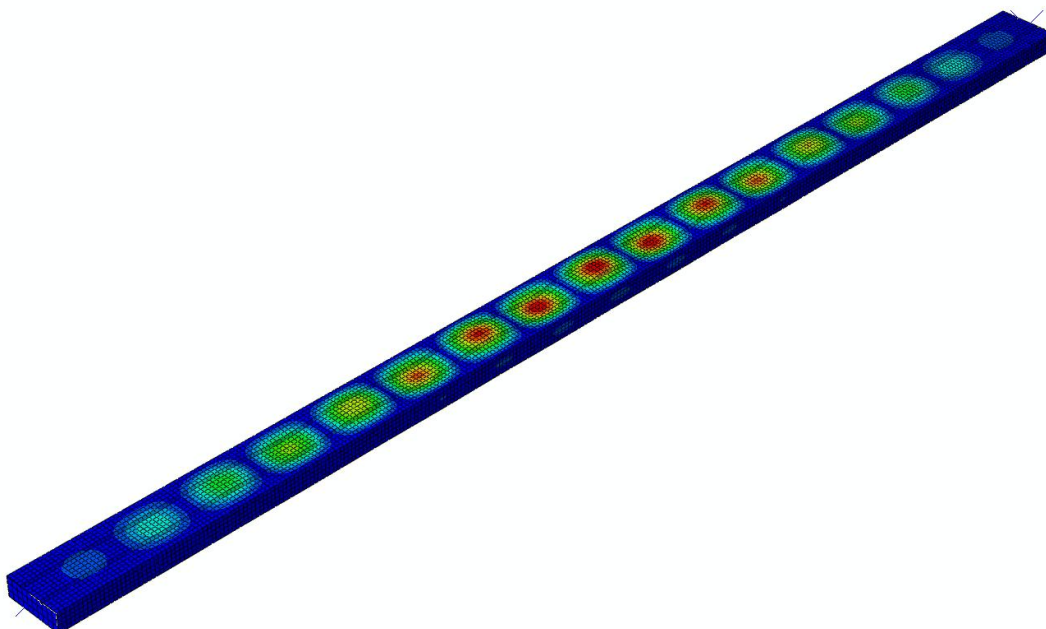
Neste mesmo perfil, porém, com os enrijecedores de 10% da altura, mantem-se esse comportamento (flambagem local) e o aumento do momento crítico associado, como é possível verificar nas Figuras 10 e 11.

Figura 10 - Deformada do perfil 150x50x20x2,0 com 1 enrijecedor de 10% da altura



Fonte: Autor (2026).

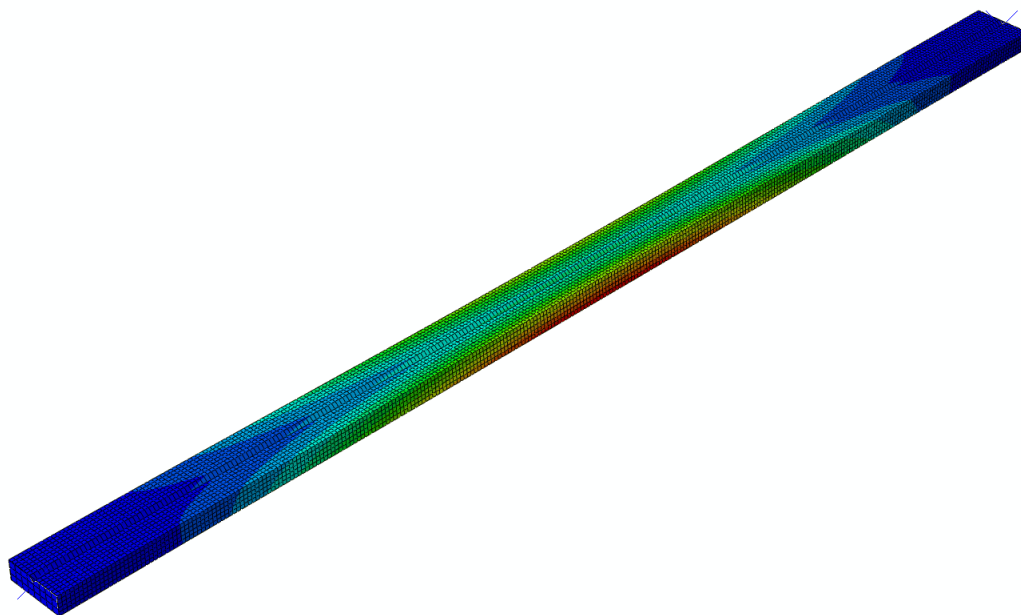
Figura 11 - Deformada do perfil 150x50x20x2,0 com 2 enrijecedores de 10% da altura



Fonte: Autor (2026).

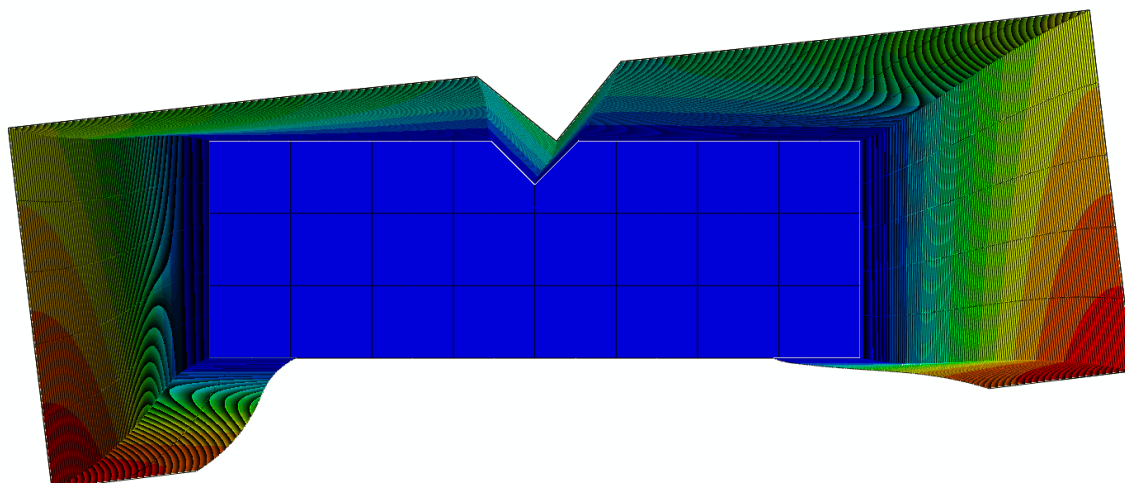
Porém, ao analisar as deformadas com a inserção dos enrijecedores maiores, verificou-se que os modos de flambagem mudaram, com as máximas tensões direcionadas as mesas, como é possível visualizar nas Figuras 12, 13, 14 e 15.

Figura 12 - Deformada do perfil 150x50x20x2,0 com 1 enrijecedor de 20% da altura



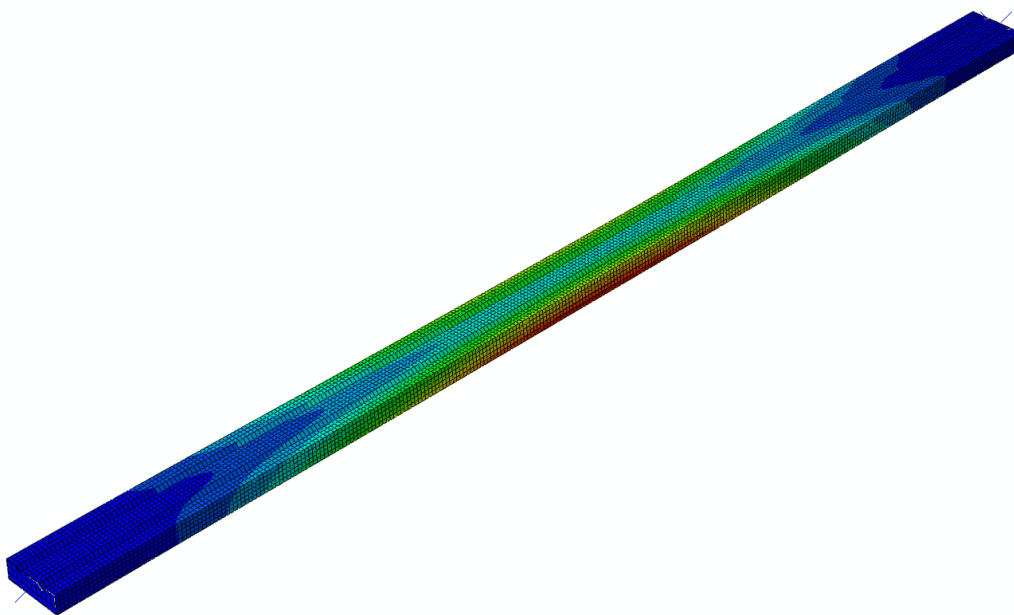
Fonte: Autor (2026).

Figura 13 - Corte da seção transversal deformada do perfil 150x50x20x2,0 com 1 enrijecedor de 20% da altura



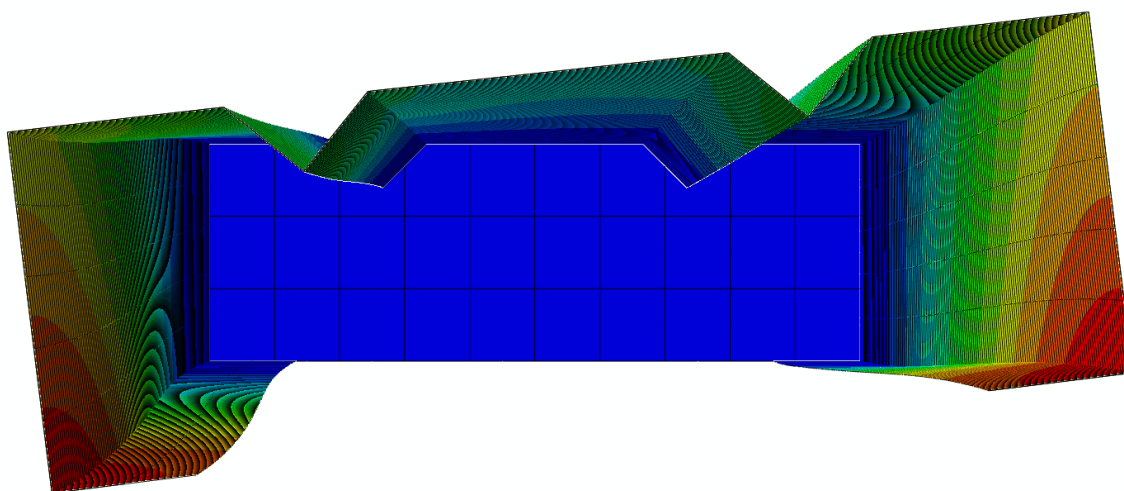
Fonte: Autor (2026).

Figura 14 - Deformada do perfil 150x50x20x2,0 com 2 enrijecedores de 20% da altura



Fonte: Autor (2026).

Figura 15 - Corte da seção transversal deformada do perfil 150x50x20x2,0 com 2 enrijecedores de 20% da altura

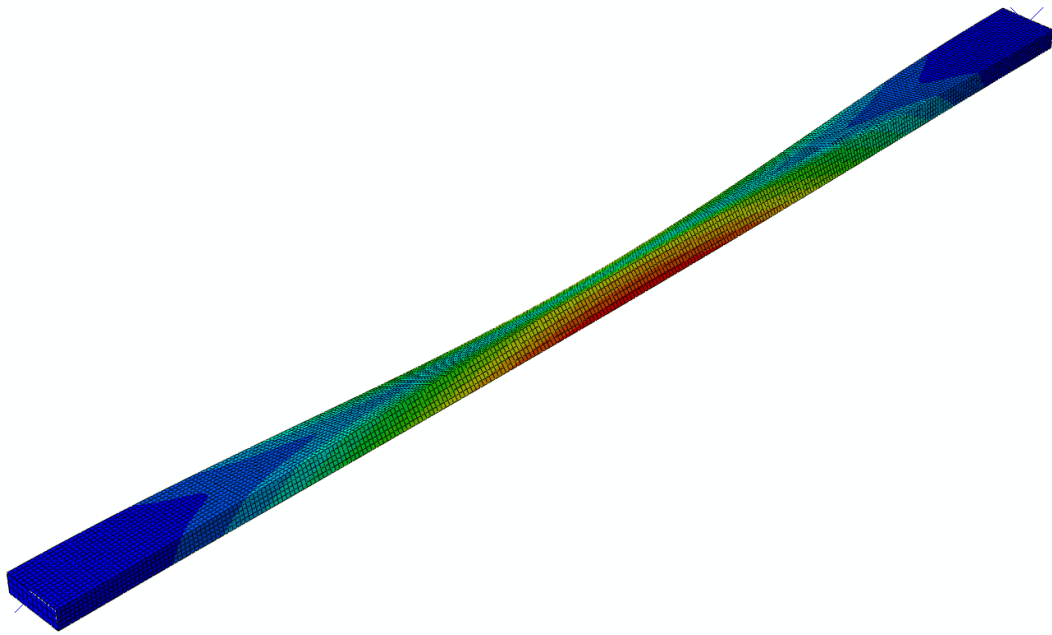


Fonte: Autor (2026).

Diferente dos modelos analisados anteriormente, nota-se que a flambagem passou a ser majoritariamente global com as maiores tensões na mesa. Por meio do corte da seção transversal no meio do vão, que podem ser observados nas Figura 13 e 15, fica evidente que a torção passou a ser predominante e, conseqüentemente, a responsável pela instabilidade do perfil, passando a flambagem a ser caracterizada majoritariamente como global, marcada principalmente pela torção.

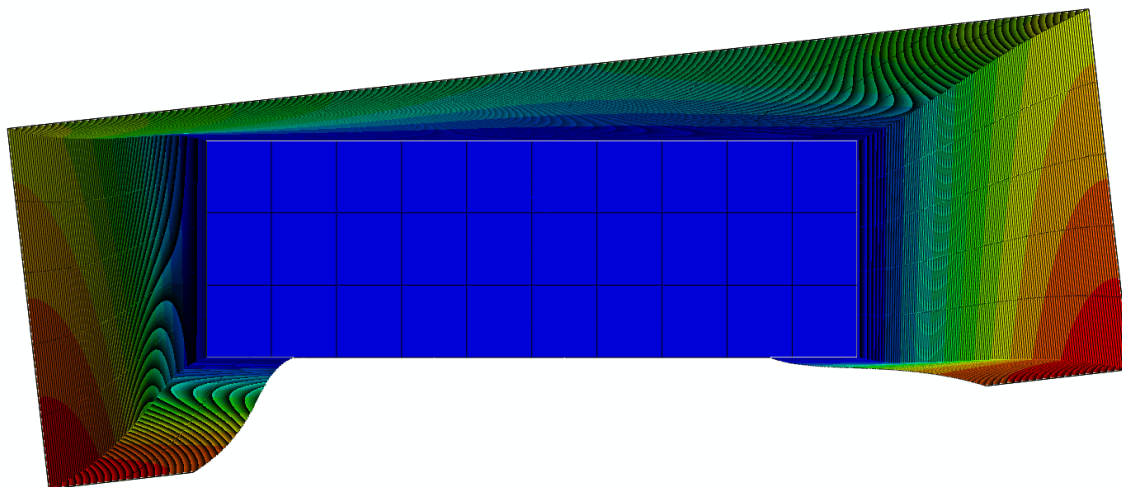
Além da inserção dos enrijecedores, outro fator que influenciou no modo de flambagem foi a mudança da espessura do perfil, de modo que os perfis com maiores espessuras também mudaram o modo de flambagem, como exemplo o perfil 150x50x20 sem enrijecedor que passou a apresentar a torção com espessuras a partir de 3,35mm, como é possível verificar nas Figuras 17 e 18.

Figura 16 - Deformada com escala aumentada do perfil 150x50x20x3,35 sem enrijecedor



Fonte: Autor (2026).

Figura 17 - Corte da seção transversal deformada do perfil 150x50x20x3,35mm

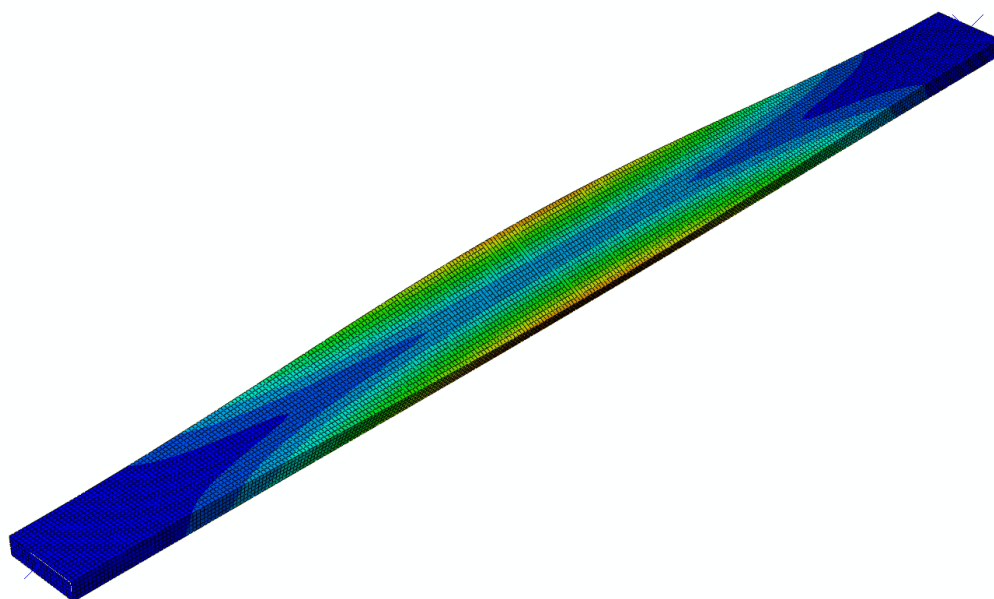


Fonte: Autor (2026).

Apesar da grande maioria dos perfis testados apresentarem maiores momentos críticos com a inserção de enrijecedores, isso não ocorreu nos perfis com alma de 200 (com espessuras de 4,75 mm e 6,3 mm) e 250 mm (com espessura de 6,3 mm).

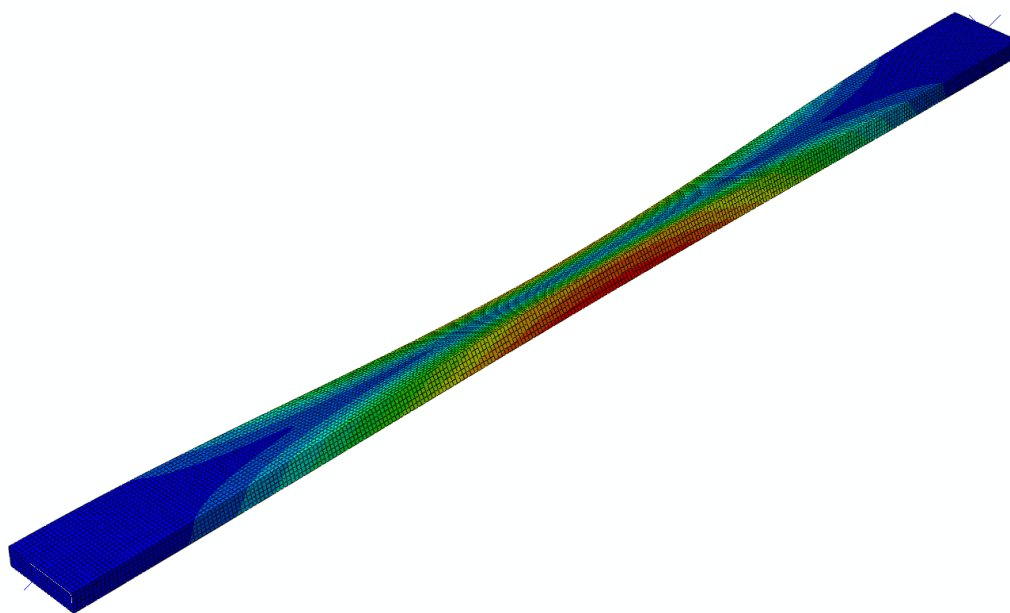
Desta forma, ao analisar as deformadas desses perfis em que o momento crítico diminuiu com a inserção dos enrijecedores, foi possível verificar que o perfil sem enrijecedor já apresentava flambagem global com as tensões direcionadas às mesas, logo, a inserção de enrijecedores de alma se demonstrou ineficiente, já que as peças mais tensionadas e que estavam causando a instabilidade do perfil eram as mesas e não a alma. Nas Figuras 18, 19 e 20 é possível verificar esse comportamento no perfil sem a adição dos enrijecedores.

Figura 18 - Deformada com escala aumentada do perfil 200x50x20x4,75 sem enrijecedor



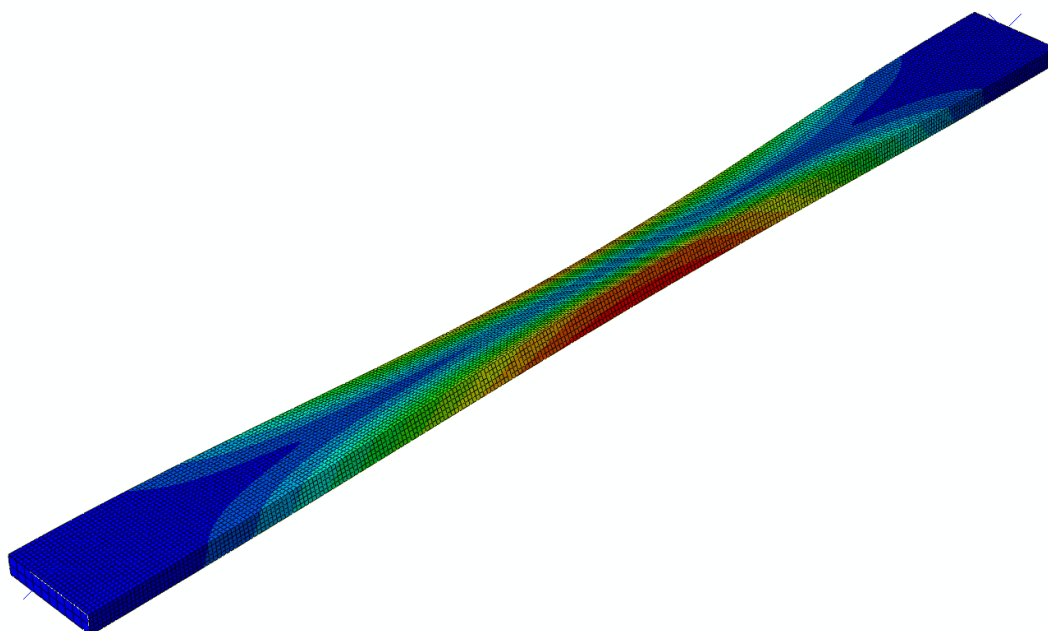
Fonte: Autor (2026).

Figura 19 - Deformada com escala aumentada do perfil 200x50x20x6,3 sem enrijecedor



Fonte: Autor (2026).

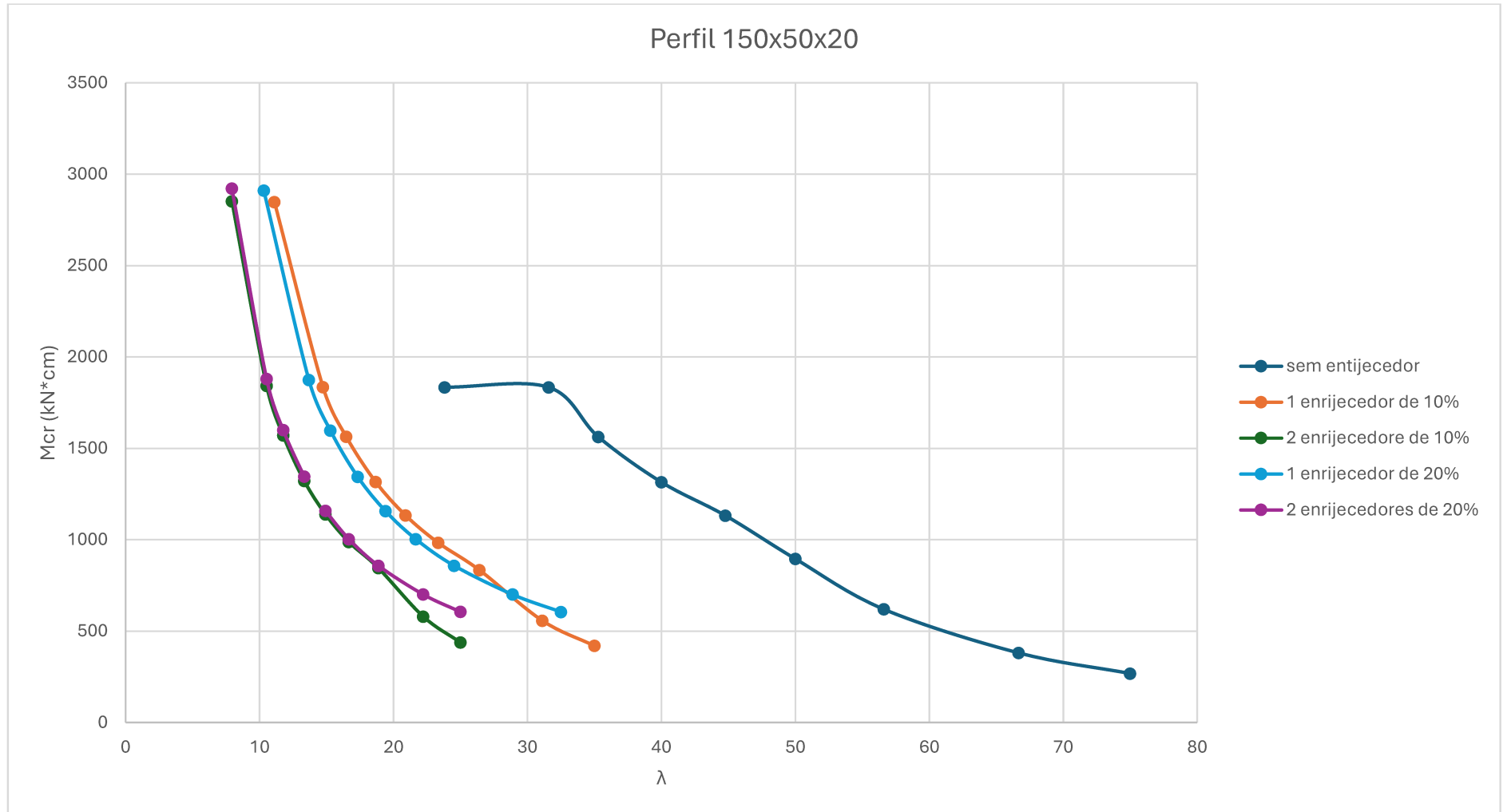
Figura 20- Deformada com escala aumentada do perfil 250x50x20x6,3 sem enrijecedor



Fonte: Autor (2026).

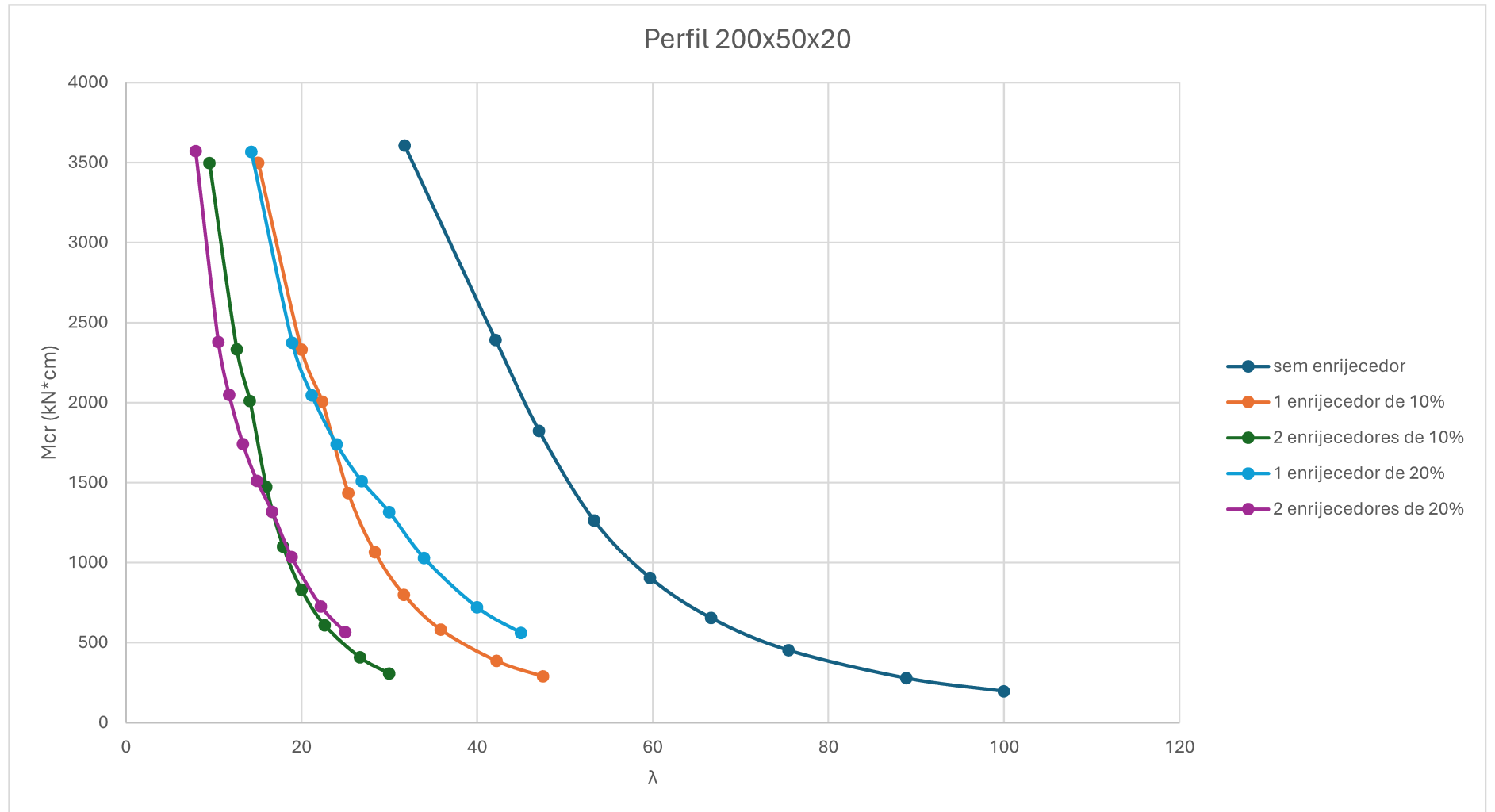
Além da análise da inserção de enrijecedores e do aumento da espessura dos perfis, também se analisou a influência da esbeltez da mesa no valor do momento crítico do perfil, conforme os gráficos, representados nas Figuras 21, 22 e 23.

Figura 21 -Relação da Esbeltez com o Momento crítico nos perfis de alma com 150 mm



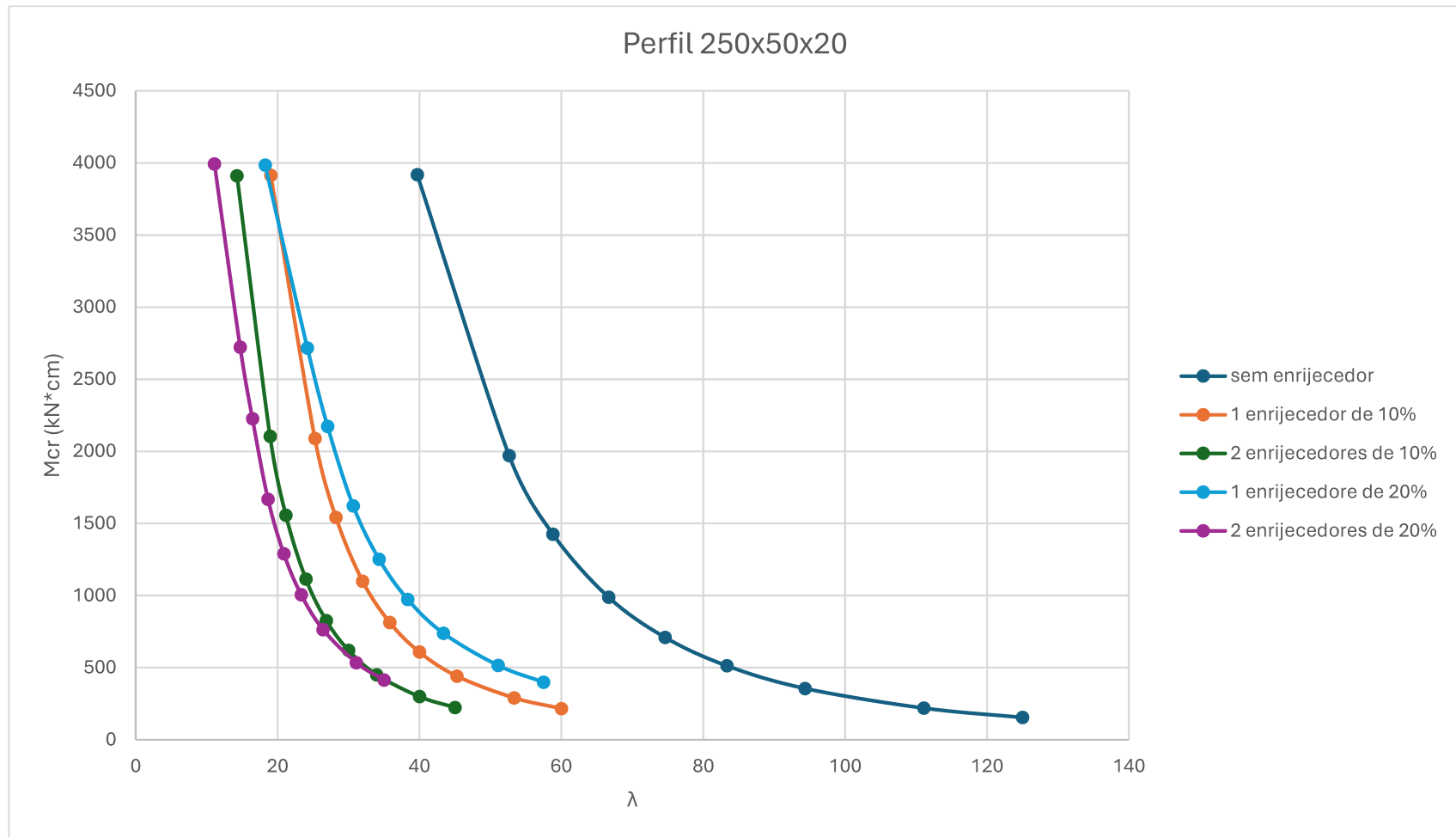
Fonte: Autor (2026).

Figura 22 - Relação da Esbeltez com o Momento crítico nos perfis de alma com 200 mm



Fonte: Autor (2026).

Figura 23 -Relação da Esbeltez com o Momento crítico nos perfis de alma com 250 mm



Fonte: Autor (2026).

Com a análise dos gráficos é possível verificar que quanto maior a esbeltez da alma, menor será o momento crítico associado. Além disso, nota-se também que a inserção dos enrijecedores, além de diminuir a esbeltez da alma do perfil influenciam no aumento considerável do momento crítico associado.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados no capítulo anterior, conclui-se que a inserção de enrijecedores de alma em terça de aço formado a frio foi positiva, com exceção dos modelos em que a flambagem não estava sendo causada na alma, o que tornou a inserção dos enrijecedores ineficiente.

Além disso, outra importante conclusão foi que o aumento da espessura do perfil (alteração direta na esbeltez do perfil como um todo, e da alma) resultou em mudanças nos modos de flambagem, o que fez com que perfis que estavam apresentando flambagens locais passassem a apresentar flambagens globais, marcadas principalmente por torção.

Outro fator analisado com os resultados foi que a inserção de enrijecedores foi responsável por aumentar de forma drástica o momento crítico associado a uma determinada esbeltez da peça.

Referências Bibliográficas

ALVES, Vancleir Ribeiro. *Análise de perfis enrijecidos em hastes de paredes delgadas de aço formados a frio*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2008

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14762:2010 – *Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio*. Rio de Janeiro, 2010.

DÔRES, Andréa Gonçalves Rodrigues das. *Análise de elementos estruturais com seção transversal de parede fina aberta ramificada utilizando a Teoria Generalizada de Vigas (Generalized Beam Theory – GBT)*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2014.

SANTIAGO, Alexandre Kokke; FREITAS, Arlene Maria Sarmanho; CASTRO, Leonardo Freitas. *Light Steel Framing: arquitetura*. Rio de Janeiro: IBS/CBCA, 2012.

SILVA, Juliana Maria Mazzeti. *Terças de aço em perfis formados a frio com alma enrijecida: ênfase na força cortante e na interação momento fletor–força cortante*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

SOARES, José Pedro Leal; MENDES, Luiz Carlos. *Análise do comportamento estrutural de perfis Ue de aço formados a frio com a aplicabilidade de nervuras*. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 7, n. 2, p. 19553–19573, 2021.

SOUZA, Djaniró Álvaro de. *Análise numérica de colunas com seções enrijecidas e não enrijecidas em perfis de aço formado a frio*. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.

SOARES, Jose Pedro Leal; MENDES, Luiz Carlos. *Analysis of the structural behavior and strength of cold-formed steel Z90 profiles with the use of ribs*. In: *A look at development*. [S.l.]: [s.n.], [2021]. cap. 12.

YU, Wei-Wen; LABOUBE, Roger A. *Cold-Formed Steel Design*. 4. ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2010.