

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA

FACULDADE DE ENGENHARIA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE PERFIS DE AÇO
FORMADOS A FRIO COM ENRIJECEDORES NA ALMA APLICADOS COMO
TERÇAS**

AMARILDO PEREIRA SUTANA FILHO

JUIZ DE FORA

2026

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE PERFIS DE AÇO
FORMADOS A FRIO COM ENRIJECEDORES NA ALMA APLICADOS COMO
TERÇAS**

AMARILDO PEREIRA SUTANA FILHO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Juiz de Fora, como
requisito parcial à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Estruturas Metálicas

Orientador: Prof. Wanderson Fernando Maia

Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia da UFJF

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE PERFIS DE AÇO
FORMADOS A FRIO COM ENRIJECEDORES NA ALMA APLICADOS COMO
TERÇAS**

AMARILDO PEREIRA SUTANA FILHO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com a Resolução Nº 01/2018 do Colegiado do Curso de Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em:

Por:

Prof. Wanderson Fernando Maia, D. Sc. (Orientador)

Departamento de Estruturas/Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Rodolfo de Azevedo Palhares, D. Sc. (Examinador 01)

Departamento de Estruturas/Universidade Federal de Juiz de Fora

Engenheira Samara Landim Ferreira (Examinadora 02)

Mestranda PEC/UFJF

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, aos meus pais, Amarildo e Raquel, que acreditaram em mim desde o primeiro dia e fizeram de tudo para que eu pudesse chegar até aqui. Pai, obrigado por me ensinar a ser um homem de caráter e responsável. Mãe, obrigado por todo o amor, carinho, por sempre me ouvir e me dar conselhos. Vocês sempre foram meu maior exemplo e meu porto seguro. Tudo o que conquistei até aqui também é fruto dos ensinamentos e do apoio de vocês. Esta conquista é tão minha quanto de vocês.

À minha namorada, Renata, que esteve ao meu lado durante toda essa caminhada, me apoiando em todas as minhas decisões e acreditando em mim. Obrigado por toda a paciência, carinho, compreensão e por tornar os dias difíceis muito mais leves. Cada palavra de incentivo e cada momento ao seu lado foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Tenho certeza de que todo o nosso esforço será recompensado no futuro, e fico muito feliz por poder compartilhar essa conquista com você.

Às minhas irmãs, Isabela e Maria Clara, por toda a amizade e companheirismo. Obrigado por estarem sempre ao meu lado e torcendo por mim. Assim como vocês sempre estiveram presentes quando precisei, saibam que sempre poderão contar comigo para o que precisarem.

A toda a minha família, deixo também o meu sincero agradecimento. Cada gesto de carinho, cada conselho, cada palavra de incentivo e cada demonstração de apoio tiveram grande importância durante essa trajetória.

Ao meu orientador, professor Wanderson, expresso minha mais sincera gratidão pela paciência, disponibilidade e dedicação durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Muito obrigado por despertar em mim um grande interesse pela área de estruturas metálicas, tanto por meio das excelentes aulas quanto pelos ensinamentos compartilhados ao longo de toda a graduação. Sua orientação foi fundamental para o meu crescimento e levarei comigo todos os conhecimentos adquiridos. Serei sempre grato por tudo o que fez por mim.

Por fim, agradeço à ENGETEC e à COFERMON, empresas que tiveram papel fundamental na minha formação profissional. Foi por meio das oportunidades, dos desafios e dos ensinamentos que pude me aproximar ainda mais da área de estruturas metálicas. Levarei comigo tudo o que aprendi durante esse período e serei eternamente grato pela confiança e pelas oportunidades que me foram concedidas.

RESUMO

Os perfis de aço formados a frio são amplamente utilizados em sistemas de cobertura devido à elevada relação resistência/peso e à facilidade de fabricação. Entretanto, em razão da pequena espessura de suas chapas, esses elementos tornam-se mais suscetíveis aos fenômenos de instabilidade, tornando indispensável a adequada verificação de sua capacidade resistente e de seu desempenho em serviço. Neste trabalho foi realizada a análise estrutural de terças em aço de uma cobertura real, com ênfase na influência dos enrijecedores intermediários da alma sobre o comportamento dos perfis. Inicialmente, foram determinadas as combinações de carregamento para o Estado Limite de Serviço e Estado Limite Último, sendo obtidos os deslocamentos verticais e os momentos fletores solicitantes por meio do programa FTOOL. Em seguida, realizou-se o dimensionamento dos perfis pelo Método da Resistência Direta, conforme a ABNT NBR 14762:2010, utilizando o programa CUFSM para obtenção das tensões críticas elásticas e determinação dos momentos resistentes associados às flambagens global, local e distorcional. Posteriormente, foi desenvolvida uma análise comparativa entre diferentes geometrias de perfis formados a frio, considerando critérios de desempenho estrutural e consumo de aço. Os resultados demonstraram que os enrijecedores intermediários aumentam significativamente a resistência à flambagem local, permitindo a utilização de seções mais esbeltas e leves. Verificou-se ainda que perfis com possibilidade de transpasse sobre os apoios apresentam maior eficiência estrutural, possibilitando a adoção de perfis de menor massa linear. Entre as seções analisadas, o perfil ZAE 280 apresentou o menor consumo total de aço para as condições do estudo, embora a diferença em relação aos perfis Z_{90} e U enrijecido tenha sido reduzida em função do aumento do comprimento decorrente do transpasse. Conclui-se que a escolha da seção mais adequada deve considerar simultaneamente aspectos de resistência, estabilidade, desempenho em serviço, facilidade construtiva e viabilidade econômica.

Palavras-chave: perfis formados a frio; terças em aço; Método da Resistência Direta; instabilidade.

ABSTRACT

Cold-formed steel sections are widely used in roofing systems due to their high strength-to-weight ratio and ease of manufacturing. However, because of their thin-walled elements, these members are more susceptible to instability phenomena, making the proper verification of their load-carrying capacity and service performance essential. This study presents the structural analysis of steel purlins from an actual roof structure, emphasizing the influence of intermediate web stiffeners on the structural behavior of the sections. Initially, the load combinations for the Serviceability Limit State (SLS) and Ultimate Limit State (ULS) were established, and the vertical displacements and bending moments were obtained using the FTOOL software. Subsequently, the sections were designed using the Direct Strength Method (DSM), according to ABNT NBR 14762:2010, with the aid of the CUFSM software to determine the elastic critical stresses and the resistant moments associated with global, local, and distortional buckling modes. A comparative analysis was then carried out among different cold-formed steel sections, considering both structural performance and steel consumption. The results showed that intermediate web stiffeners significantly increase the resistance to local buckling, allowing the use of thinner and lighter sections. It was also observed that sections with lapped connections over the supports provide greater structural efficiency, enabling the adoption of members with lower linear weight. Among the analyzed sections, the ZAE 280 section presented the lowest total steel consumption under the conditions evaluated, although the difference compared with the Z₉₀ and stiffened U sections was relatively small due to the additional length required by the lap connections. It is concluded that the selection of the most appropriate section should consider not only strength and stability but also serviceability performance, constructability, and economic feasibility.

Keywords: cold-formed steel sections; steel purlins; Direct Strength Method; instability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Terça apoiada sobre tesouras em alma cheia	14
Figura 2 – Tipos de perfis formados a frio	18
Figura 3 – Terça de perfil formado a frio em seção Z enrijecido (ZAE)	19
Figura 4 – Instabilidade local	21
Figura 5 – Instabilidade por distorção	22
Figura 6 – Flambagem por flexão.....	23
Figura 7 – Flambagem por torção.....	24
Figura 8 – Flambagem por flexo-torção	25
Figura 9 – Indicação das dimensões, distâncias e eixos da seção	29
Figura 10 – Perfis formados a frio com enrijecedores.....	32
Figura 11 – Seção ZAE 245 e suas respectivas dimensões em milímetros	34
Figura 12 – Vãos das terças em aço do projeto escolhido.....	35
Figura 13 – Dimensões das terças e transpasses do projeto escolhido.....	35
Figura 14 – Disposição dos travamentos laterais das terças.....	36
Figura 15 – Carregamento devido à ELS1	44
Figura 16 – Deslocamentos verticais máximos devidos à ELS1, em milímetros.....	44
Figura 17 – Carregamento devido à ELS2	45
Figura 18 – Deslocamentos verticais máximos devidos à ELS2, em milímetros.....	46
Figura 19 – Carregamento devido à ELU1.....	47
Figura 20 – Momentos fletores máximos devidos à ELU1, em kN.m	47
Figura 21 - Carregamento devido à ELU2	48
Figura 22 – Momentos fletores máximos devidos à ELU2, em kN.m	48
Figura 23 – Propriedades da seção ZAE 245 em milímetros	49
Figura 24 – Propriedades da seção 2ZAE 245	50
Figura 25 – Tensões críticas local (1) e distorcional (2) para a seção ZAE 245	56
Figura 26 – Tensão crítica distorcional da seção 2ZAE 245	57

Figura 27 – Perfil Z ₄₅ mais eficiente	62
Figura 28 – Perfil Z ₉₀ mais eficiente	62
Figura 29 – Perfil Ue mais eficiente.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Carregamentos distribuídos para cada tipo de ação.....	36
Tabela 2 – Valores dos fatores de combinação ψ_0 e de redução ψ_1 e ψ_2 para as ações variáveis	39
Tabela 3 – Deslocamentos máximos para perfis formados a frio.....	40
Tabela 4 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações.....	41
Tabela 5 – Valores das flechas obtidas e flechas limites devidos à ELS1	45
Tabela 6 – Valores das flechas obtidas e flechas limites devidos à ELS2	46
Tabela 7 – Análise comparativa entre perfis escolhidos	63
Tabela 8 – Análise comparativa do peso total dos perfis escolhidos	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Propriedades da seção ZAE 245	49
Quadro 2 – Propriedades da seção 2ZAE 245	51
Quadro 3 – Cálculo das forças críticas elásticas para a seção ZAE 245	52
Quadro 4 – Cálculo do fator de modificação C_b e do momento crítico elástico para a seção ZAE 245	52
Quadro 5 – Cálculo do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global (λ_0) para a seção ZAE 245	53
Quadro 6 – Cálculo do momento resistente referente à flambagem lateral com torção para a seção ZAE 245	53
Quadro 7 – Cálculo das forças críticas elásticas para a seção 2ZAE 245	54
Quadro 8 – Cálculo do momento crítico elástico M_e , do índice de esbeltez reduzido λ_0 e do momento resistente M_{Re} para a seção 2ZAE	54
Quadro 9 – Cálculo do momento crítico elástico local (M_{l_i}) para a seção ZAE 245	56
Quadro 10 – Cálculo do índice de esbeltez reduzido local (λ_l) para a seção ZAE 245	56
Quadro 11 – Cálculo do momento crítico elástico distorcional (M_{dist}) para a seção ZAE 245	58
Quadro 12 – Cálculo do índice de esbeltez reduzido distorcional (λ_{dis}) para a seção ZAE 245	58
Quadro 13 – Cálculo do momento resistente distorcional M_{Rdist} para a seção ZAE 245	58
Quadro 14 – Cálculo do momento resistente distorcional M_{Rdist} para a seção 2ZAE 245	59
Quadro 15 – Cálculo do momento resistente de cálculo para a seção ZAE 245	60
Quadro 16 – Cálculo do momento resistente de cálculo para a seção 2ZAE 245	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa	14
1.2 Objetivo	15
1.2.1 Objetivos específicos.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Perfis de aço formados a frio	17
2.2 Terças em aço.....	18
2.3 Modos de instabilidade.....	20
2.3.1 Instabilidade local.....	20
2.3.2 Instabilidade distorcional.....	21
2.3.3 Instabilidade global	23
2.4 Procedimento da ABNT NBR 14762:2010	25
2.4.1 Método da Resistência Direta.....	26
2.5 Enrijecedores de alma	31
3 METODOLOGIA.....	33
3.1 Informações de projeto	34
3.2 Análise Estrutural	37
3.2.1 Estado Limite de Serviço (ELS).....	38
3.2.2 Estado Limite Último (ELU).....	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1 Estado Limite de Serviço (ELS)	44
4.2 Estado Limite Último (ELU)	46
4.2.1 Carregamentos	46
4.2.2 Propriedades geométricas dos perfis	48
4.2.3 Flambagem lateral com torção (M_{Re})	51
4.2.4 Flambagem local (M_{Rl}).....	55
4.2.5 Flambagem distorcional (M_{Rdist}).....	58
4.2.6 Momento resistente de cálculo	59
4.3 Análise Comparativa.....	60

4.4 Limitações do estudo	64
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	66
6 REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

A utilização do aço na construção civil tem se intensificado nas últimas décadas, acompanhando a evolução tecnológica do setor e a busca por soluções estruturais mais eficientes e industrializadas. Em 2023, foram produzidas 1,07 milhões de toneladas de aço, sendo 61,6% desse volume destinado às estruturas de pontes e viadutos, estruturas para coberturas, obras comerciais, residenciais e industriais. Esse aumento se deve a algumas vantagens como eficiência, sustentabilidade, economia e rapidez de fabricação (CBCA, 2024 apud Ferreira, 2025).

Paralelamente, o emprego do aço está associado a ganhos significativos em produtividade e sustentabilidade, uma vez que possibilita a racionalização de materiais, a redução de desperdícios e a agilidade na montagem em campo. Essas características tornam o sistema construtivo em aço uma alternativa competitiva frente a métodos tradicionais, especialmente em obras que demandam rapidez de execução e elevado controle técnico. Nesse cenário, o aço consolida-se como um dos principais materiais estruturais da construção civil contemporânea, atendendo às crescentes exigências de desempenho, economia e inovação no setor.

Dentre as diversas aplicações do aço nas estruturas, destacam-se as terças, amplamente utilizadas em sistemas de cobertura. De forma mais específica, as terças são responsáveis por receber as cargas provenientes das telhas — como peso próprio, sobrecargas e ações de vento — e transmiti-las aos elementos principais da estrutura, como tesouras, vigas ou pórticos. Assim, além de servirem de apoio direto para a fixação das telhas, desempenham papel essencial na distribuição das ações ao longo da estrutura, influenciando diretamente o comportamento global e o desempenho do sistema de cobertura.

Nesse contexto, destacam-se os perfis de aço formados a frio como uma das principais soluções empregadas na execução de terças. Esses perfis são obtidos a partir da conformação de chapas finas de aço, resultando em elementos leves e com elevada eficiência estrutural. De acordo com a ABNT NBR 14762:2010, que trata do dimensionamento de estruturas constituídas por perfis formados a frio, esses elementos são amplamente utilizados em sistemas estruturais leves, especialmente em componentes secundários como terças e longarinas. Além disso, conforme apontado por Yu e LaBoube (2010), a versatilidade geométrica desses perfis permite a otimização da seção transversal, contribuindo para o aumento da rigidez e da capacidade resistente, o que justifica sua ampla aplicação em coberturas em aço de edificações industriais e comerciais. A Figura 1 mostra uma aplicação de terças de cobertura.

Figura 1 – Terça apoiada sobre tesouras em alma cheia



Fonte: Jacob (2025)

1.1 Justificativa

O emprego de perfis de aço formados a frio em sistemas de cobertura tem crescido significativamente devido à elevada relação resistência/peso, facilidade de fabricação e rapidez de montagem. Entretanto, em razão da pequena espessura de suas chapas, esses perfis apresentam comportamento estrutural fortemente influenciado pelos fenômenos de instabilidade, tornando seu dimensionamento mais complexo quando comparado a outras soluções estruturais.

Nesse contexto, torna-se importante investigar alternativas capazes de aumentar a eficiência estrutural desses perfis sem elevar significativamente o consumo de aço. Entre essas alternativas destaca-se a utilização de enrijecedores intermediários na alma, que podem modificar o comportamento resistente da seção e proporcionar maior aproveitamento do material.

Além disso, a escolha da geometria da seção transversal exerce influência direta na capacidade resistente, no consumo de aço e na viabilidade econômica da estrutura. Estudos recentes evidenciam que a otimização geométrica de perfis formados a frio representa uma importante linha de pesquisa. Segundo Almatrafi (2021), o desenvolvimento de geometrias mais eficientes para terças constitui uma estratégia capaz de reduzir o consumo de material sem comprometer a segurança estrutural, sendo os modos de flambagem local, distorcional e global os principais fatores que governam esse processo de otimização.

Assim, este trabalho justifica-se pela necessidade de avaliar a influência dos enrijecedores intermediários na alma e comparar diferentes geometrias de perfis formados a frio aplicados como terças, buscando identificar alternativas que conciliem desempenho estrutural e redução do consumo de material.

1.2 Objetivo

Diante do cenário apresentado, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre diferentes seções de perfis de aço formados a frio, aplicados como terças em sistemas de cobertura. Como estudo de caso, foi utilizado um projeto real da cobertura de um supermercado, constituído por estrutura principal em aço, fechamento com telhas termoacústicas, colunas metálicas e vigas mistas de aço e concreto. A análise considerou parâmetros como vão das terças, espaçamento entre elementos, distância entre linhas de corrente e combinações de carregamento, buscando representar condições reais de projeto.

Como ferramenta de apoio, foi utilizado o programa CUFSM, amplamente empregado na análise de estabilidade elástica de perfis de paredes finas por meio do Método das Faixas Finitas. A partir dessa abordagem, buscou-se avaliar o comportamento estrutural dos perfis frente aos diferentes modos de instabilidade, com o objetivo central de identificar a solução mais eficiente para a situação em estudo.

1.2.1 Objetivos específicos

Para atender ao objetivo geral proposto, inicialmente foi realizado o levantamento das características geométricas e das condições de carregamento de um projeto real de cobertura metálica. Em seguida, foram determinadas as solicitações atuantes nas terças por meio das verificações nos Estados Limite de Serviço (ELS) e Último (ELU), estabelecendo as condições necessárias para o dimensionamento dos perfis.

Posteriormente, foram avaliadas diferentes seções de perfis de aço formados a frio por meio do Método da Resistência Direta, com o auxílio do software CUFSM, considerando os modos de instabilidade global, local e distorcional. A partir dessas análises, verificou-se a capacidade resistente de cada seção em relação aos esforços solicitantes obtidos.

Por fim, foi realizada uma análise comparativa entre os perfis selecionados, considerando aspectos estruturais e construtivos, como o comportamento frente às instabilidades, a influência do transpasse entre as terças e o consumo total de aço empregado.

Com base nesses critérios, buscou-se identificar a solução estrutural mais eficiente para a aplicação estudada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Perfis de aço formados a frio

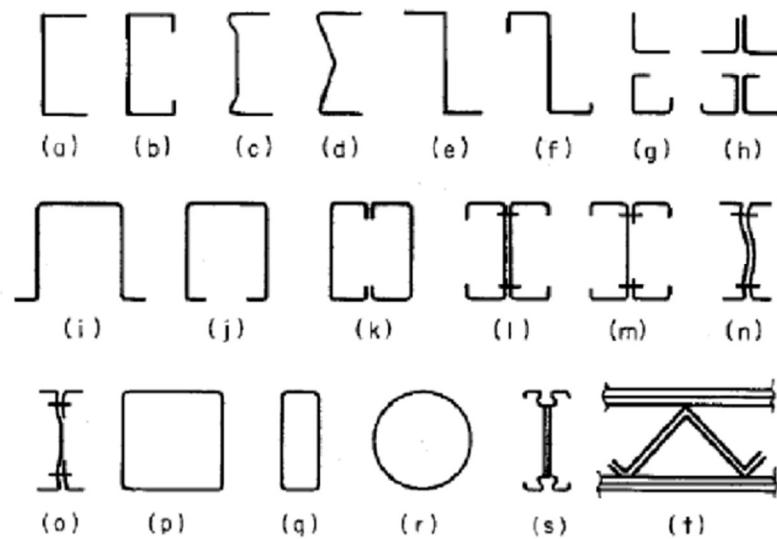
Os perfis de aço formados a frio são produzidos a partir da conformação de chapas ou tiras de aço à temperatura ambiente, processo que permite a obtenção de diferentes geometrias com elevada eficiência estrutural (Hancock; Murray; Ellifritt, 2001). Esse processo permite a produção de elementos com elevada precisão dimensional e repetibilidade, além de possibilitar a fabricação em larga escala com maior controle de qualidade. Diferentemente dos perfis laminados a quente, os perfis formados a frio apresentam espessuras reduzidas, o que influencia diretamente seu comportamento estrutural, especialmente no que se refere à instabilidade.

Do ponto de vista geométrico, esses perfis caracterizam-se por apresentarem seções de paredes delgadas, com elevada relação largura/espessura, o que resulta em elementos com alto índice de esbeltez local. Essa característica os torna estruturalmente eficientes, porém mais suscetíveis a diferentes modos de instabilidade, classificados em global, local e distorcional (Moliterno et al., 2015). Ainda, em determinadas situações, quando perfis isolados não atendem à demanda estrutural, se torna uma alternativa utilizar seções compostas a fim de obter maior capacidade resistente e eficiência estrutural (Carvalho et al., 2020).

A maleabilidade das chapas finas de aço permite a fabricação de grande variedade de seções transversais, desde a mais simples cantoneira (seção em forma de L), eficiente para trabalhar à tração, até os perfis formados a frio duplos, em seção unicelular, também conhecidos como seção-caixão, que devido à boa rigidez à torção (eliminando travamentos), menor área exposta (reduzindo a área de pintura) e menor área de estagnação de líquidos ou detritos (reduzindo a probabilidade de corrosão) oferecem boas soluções econômicas (CBCA, 2014).

Entre as principais vantagens dos perfis formados a frio, destacam-se a elevada relação resistência/peso, a facilidade de transporte e montagem, a redução de desperdícios e a possibilidade de industrialização do processo construtivo. No entanto, esses perfis também apresentam limitações, principalmente relacionadas à elevada esbeltez de suas chapas, que os torna mais sensíveis a modos de instabilidade, como flambagem local, distorcional e global. Dessa forma, seu dimensionamento requer critérios específicos e maior rigor na análise estrutural, conforme estabelecido em normas como a ABNT NBR 14762 (2010). A Figura 2 mostra diferentes tipos de perfis formados a frio.

Figura 2 – Tipos de perfis formados a frio



Fonte: Yu (2000)

2.2 Terças em aço

As terças são elementos estruturais secundários utilizados em sistemas de cobertura, cuja principal função é servir de apoio para as telhas e promover a transferência das cargas atuantes para os elementos estruturais principais, como vigas, pórticos ou tesouras. Essas cargas incluem o peso próprio da cobertura, ações de vento, sobrecargas de manutenção, entre outras. Dessa forma, esses elementos desempenham papel fundamental no comportamento global da cobertura, influenciando diretamente sua estabilidade, rigidez e desempenho estrutural.

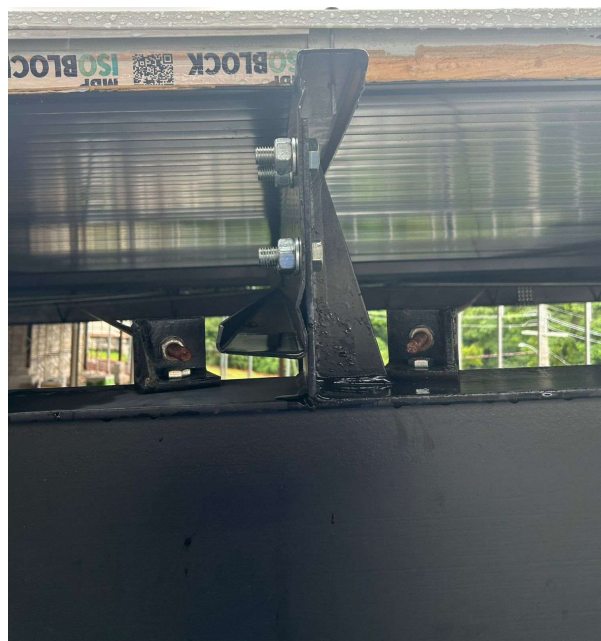
As terças podem ser executadas em diferentes materiais, como madeira, concreto ou aço, sendo a escolha dependente de fatores como vão, carregamento, custo e sistema construtivo adotado. No entanto, nas construções industriais e comerciais, observa-se uma predominância do uso de terças metálicas, principalmente aquelas constituídas por perfis de aço formados a frio, como os perfis do tipo Z, U e U enrijecido (Ue), devido à sua leveza, facilidade de montagem e compatibilidade com sistemas estruturais em aço.

Nesse contexto, observa-se um crescente desenvolvimento de estudos voltados à otimização das seções utilizadas como terças, buscando soluções que conciliem menor peso, redução de custos e adequado desempenho estrutural. Guimarães et al. (2021) demonstraram que a otimização geométrica de perfis formados a frio pode proporcionar reduções no consumo de aço sem comprometer a capacidade resistente, evidenciando o potencial dessas técnicas para o desenvolvimento de seções estruturalmente mais eficientes.

Além da otimização geométrica, diversos pesquisadores têm investigado alternativas para aumentar a capacidade resistente das terças por meio da utilização de enrijecedores. Pham e Vu (2021) verificaram que a introdução de enrijecedores longitudinais pode elevar significativamente a resistência de perfis formados a frio, embora sua eficiência dependa das dimensões da seção transversal e da espessura das chapas. De forma semelhante, Silva e Malite (2020), por meio de análises experimentais e numéricas em terças com enrijecedores longitudinais na alma, constataram que esses elementos proporcionam aumento da resistência à flexão e ao cisalhamento, além de apresentarem boa concordância entre os resultados experimentais e as previsões obtidas pelo Método da Resistência Direta.

Dessa forma, a escolha do perfil mais eficiente torna-se uma etapa fundamental do projeto, considerando não apenas sua resistência, mas também seu comportamento frente aos diferentes modos de instabilidade. Inserido nesse cenário, destaca-se o uso de enrijecedores, especialmente na alma dos perfis, como uma alternativa para aumentar a rigidez e melhorar o desempenho estrutural, sendo objeto de diversas pesquisas voltadas à sua eficiência e aplicabilidade. A Figura 3 mostra uma terça em seção Z enrijecida (ZAE).

Figura 3 – Terça de perfil formado a frio em seção Z enrijecido (ZAE)



Fonte: Autor (2026)

2.3 Modos de instabilidade

Por serem constituídas de perfis com seções abertas e de pequena espessura, as barras, que possuem baixa rigidez à torção, podem ter problemas de instabilidade, deformações excessivas ou atingir os limites da resistência do aço devido a esforços de torção. Essa susceptibilidade à torção ocorre até mesmo em carregamentos aplicados no centro geométrico da seção transversal de vigas e de pilares, podendo tornar-se crítico caso a estrutura não seja projetada adequadamente (CBCA, 2014).

Diante desse comportamento, torna-se fundamental o entendimento dos diferentes modos de instabilidade que podem afetar os perfis de aço, especialmente aqueles formados a frio. A identificação adequada desses modos permite avaliar com maior precisão o desempenho estrutural dos elementos, bem como adotar soluções de projeto que minimizem seus efeitos, como a escolha adequada da seção transversal, a inserção de enrijecedores e o correto posicionamento de vínculos e travamentos.

2.3.1 Instabilidade local

A instabilidade local é um dos principais modos de falha associados aos perfis de aço formados a frio, sendo diretamente relacionada à elevada esbeltez dos elementos que compõem a seção transversal, como mesas e alma. Segundo Yu e LaBoube (2010), a flambagem local consiste na instabilidade individual dos elementos planos da seção transversal, podendo reduzir significativamente a resistência do perfil antes do escoamento do aço.

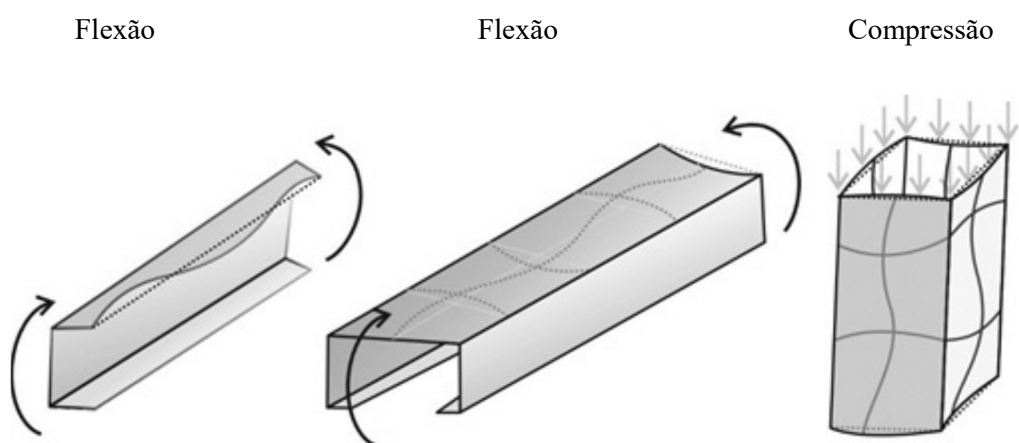
Diferentemente da instabilidade global, que envolve o comportamento do elemento estrutural como um todo, a instabilidade local ocorre quando partes da seção sofrem perda de estabilidade devido às tensões de compressão atuantes, manifestando-se por deformações localizadas, geralmente na forma de ondulações nas chapas. Em muitos casos, esse fenômeno pode ocorrer antes mesmo que o material atinja a tensão de escoamento, reduzindo a capacidade resistente efetiva do perfil e comprometendo seu desempenho estrutural.

Esse modo de instabilidade está fortemente associado à relação largura/espessura dos elementos da seção, de modo que chapas mais esbeltas apresentam maior suscetibilidade à flambagem local. Em perfis formados a frio, esse aspecto torna-se particularmente relevante devido à pequena espessura das chapas empregadas, fazendo com que o comportamento da seção seja frequentemente governado pela estabilidade local de seus componentes. Nesse contexto, a flambagem local pode ocorrer tanto na mesa comprimida quanto na alma, dependendo da geometria da seção, das condições de carregamento e da distribuição de tensões.

Em elementos submetidos à flexão, por exemplo, é comum que a flambagem da mesa comprimida seja um dos modos críticos, enquanto em outras situações também podem ocorrer instabilidades localizadas na alma.

De forma geral, a instabilidade local pode ser analisada a partir dos modos de flambagem associados aos elementos da seção, destacando-se a flambagem local da mesa e a flambagem local da alma. A flambagem da mesa ocorre quando o elemento comprimido perde estabilidade e apresenta deformações fora do seu plano, enquanto a flambagem da alma está relacionada à instabilidade da região central da seção, podendo comprometer a rigidez e a distribuição de tensões no perfil. A identificação desses modos é fundamental para o dimensionamento de perfis formados a frio, sendo também um dos principais motivadores para o desenvolvimento de soluções como enrijecedores, empregados com o objetivo de aumentar a rigidez dos elementos e retardar a ocorrência desse fenômeno. A Figura 4 mostra a instabilidade local para barras submetidas a flexão e compressão.

Figura 4 – Instabilidade local



Fonte: Silva (2014)

2.3.2 Instabilidade distorcional

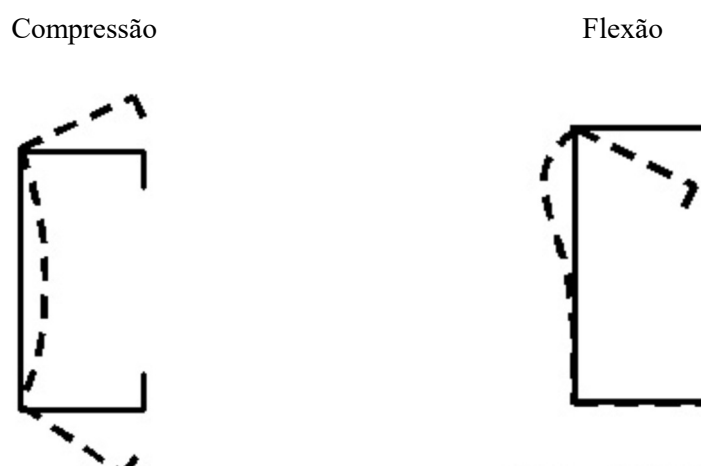
Schafer (2008) destaca que a flambagem distorcional caracteriza-se pela rotação do conjunto formado pela mesa e pelo enrijecedor de borda, acompanhada por deformações da alma, constituindo um modo de instabilidade intermediário entre a flambagem local e a flambagem global. Enquanto na flambagem local ocorre a deformação dos elementos que compõem a seção, e na instabilidade global há o envolvimento do elemento estrutural como um todo, a flambagem distorcional caracteriza-se pela deformação da seção transversal com

alteração de sua geometria original, envolvendo a interação entre seus componentes, como mesa, alma e enrijecedores.

Esse modo de instabilidade está geralmente associado à rotação da mesa comprimida, acompanhada pelo deslocamento dos enrijecedores e pela deformação parcial da alma, promovendo uma mudança na configuração da seção transversal. Diferentemente da flambagem local, em que ocorre predominantemente a ondulação de chapas individuais, na flambagem distorcional há um comportamento conjunto dos elementos da seção, tornando sua análise mais complexa. Esse fenômeno é particularmente relevante em seções enrijecidas, nas quais a presença de dobras e elementos de reforço, embora contribua para o aumento da rigidez, também pode influenciar o surgimento desse modo de instabilidade.

A suscetibilidade à flambagem distorcional está relacionada a fatores como geometria da seção, rigidez dos enrijecedores, condições de contorno e distribuição das tensões atuantes. Em perfis formados a frio submetidos à flexão, esse modo pode tornar-se crítico e, em determinadas situações, governar a capacidade resistente do elemento. Por esse motivo, sua identificação e avaliação tornaram-se fundamentais no estudo do comportamento estrutural desses perfis, sendo frequentemente analisadas por métodos específicos, como o Método das Faixas Finitas, amplamente utilizado em ferramentas computacionais como o CUFSM. Nesse contexto, o estudo da flambagem distorcional possui especial relevância em pesquisas voltadas à otimização geométrica e ao uso de enrijecedores, como é o caso do presente trabalho. A Figura 5 mostra alguns tipos de instabilidade por distorção através da flexão e compressão.

Figura 5 – Instabilidade por distorção



Fonte: Silva (2014)

2.3.3 Instabilidade global

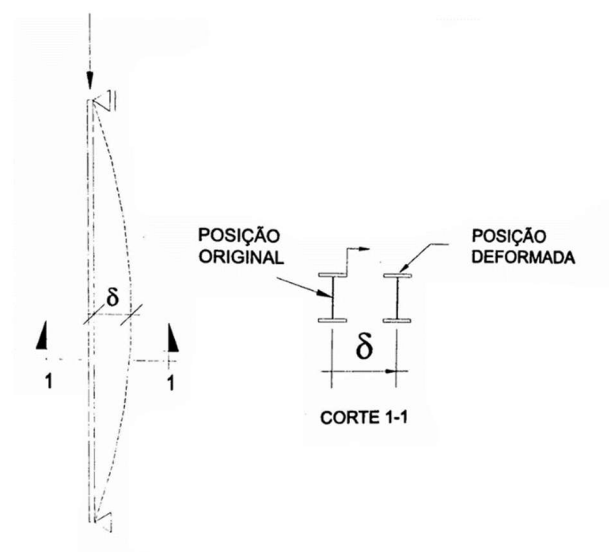
A instabilidade global está associada à perda de estabilidade do elemento estrutural como um todo, envolvendo deslocamentos e rotações da barra completa. Diferentemente dos modos local e distorcional, que se relacionam ao comportamento dos elementos da seção transversal, a instabilidade global depende principalmente do comprimento do elemento, das propriedades geométricas da seção, das condições de apoio e da presença de vínculos ou travamentos. Entre os principais modos de instabilidade global, destacam-se a flambagem por flexão, a flambagem por torção e a flambagem por flexo-torção.

2.3.3.1 Flambagem por flexão

A flambagem por flexão é o modo clássico de instabilidade de barras comprimidas, caracterizado pela perda de estabilidade por meio do deslocamento lateral do elemento em torno de um de seus eixos principais de inércia. Esse fenômeno ocorre quando a carga de compressão atinge um valor crítico, a partir do qual pequenas imperfeições geométricas ou perturbações podem provocar deformações significativas e levar à instabilidade do elemento.

Esse modo de flambagem é fortemente influenciado pela esbeltez da barra, sendo mais crítico em elementos esbeltos. Além disso, está diretamente relacionado às condições de vinculação e ao eixo em torno do qual a seção apresenta menor rigidez, sendo tradicionalmente descrito pela formulação clássica de Euler. A Figura 6 mostra a instabilidade global por flexão em uma barra.

Figura 6 – Flambagem por flexão

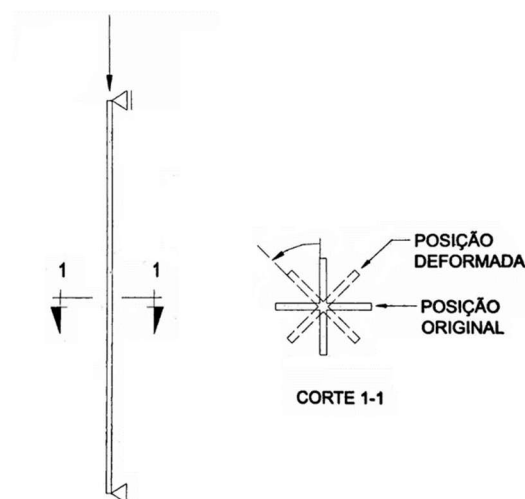


2.3.3.2 Flambagem por torção

A flambagem por torção ocorre quando a barra perde estabilidade por meio de rotação em torno de seu eixo longitudinal, sem que o deslocamento lateral seja o comportamento predominante. Esse modo está associado, principalmente, a seções com baixa rigidez torsional, como perfis abertos e de paredes delgadas, que apresentam maior suscetibilidade a deformações por torção.

A ocorrência desse fenômeno depende de fatores como a geometria da seção, a posição do centro de cisalhamento e as propriedades relacionadas à rigidez à torção. Em perfis formados a frio, esse modo pode ser relevante em determinadas condições, embora, em muitos casos práticos, a presença de travamentos e a própria configuração estrutural contribuam para restringir sua ocorrência. A Figura 7 mostra a instabilidade global por torção em uma barra.

Figura 7 – Flambagem por torção



Fonte: Adaptado de Carvalho et al. (2020) apud Ferreira (2025)

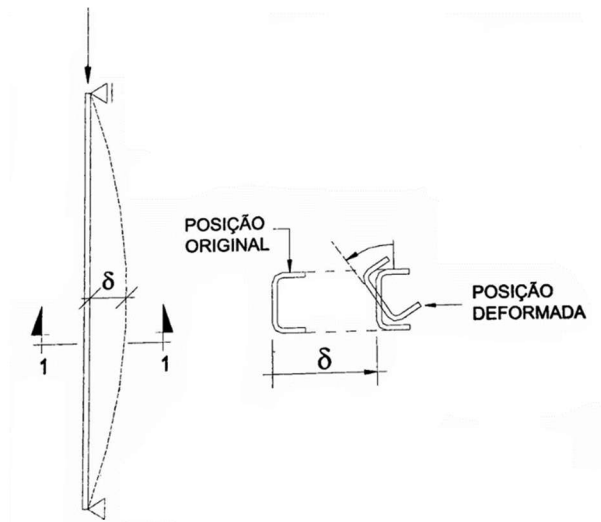
2.3.3.3 Flambagem por flexo-torção

A flambagem por flexo-torção caracteriza-se pela ocorrência simultânea de deslocamentos laterais e rotações, representando um modo acoplado de instabilidade em que os efeitos de flexão e torção atuam de forma conjunta. Esse comportamento é comum em elementos cuja geometria ou condições de apoio favorecem a interação entre esses mecanismos, sendo particularmente relevante em perfis com baixa simetria ou reduzida rigidez torsional.

Por envolver o acoplamento entre dois mecanismos de instabilidade, sua análise é mais complexa do que nos casos isolados de flexão ou torção. Em perfis formados a frio, esse modo

pode influenciar significativamente a capacidade resistente dos elementos, embora, em sistemas como terças em aço com linhas de corrente e travamentos intermediários, sua suscetibilidade possa ser reduzida em função das restrições impostas ao deslocamento lateral e à rotação da seção. A Figura 8 mostra a instabilidade global por flexo-torção em uma barra.

Figura 8 – Flambagem por flexo-torção



Fonte: Adaptado de Carvalho et al. (2020) apud Ferreira (2025)

2.4 Procedimento da ABNT NBR 14762:2010

A ABNT NBR 14762:2010 estabelece os procedimentos para o dimensionamento de estruturas constituídas por perfis de aço formados a frio, contemplando metodologias específicas para a verificação da capacidade resistente e dos efeitos associados aos diferentes modos de instabilidade. Devido às particularidades desses perfis, especialmente relacionadas à elevada esbelteza dos elementos da seção e à ocorrência de modos de flambagem local, distorcional e global, a norma adota procedimentos capazes de representar adequadamente esse comportamento estrutural.

Dentre os métodos previstos, destaca-se o Método da Largura Efetiva (MLE), tradicionalmente empregado para considerar a redução da capacidade resistente decorrente da flambagem local por meio da determinação das larguras efetivas dos elementos comprimidos da seção. Associado a essa abordagem, tem-se o Método da Seção Efetiva (MSE), no qual as propriedades geométricas da seção bruta são reduzidas para representar os efeitos da flambagem local no dimensionamento. Embora amplamente difundidos e consolidados, esses métodos exigem a determinação das propriedades da seção efetiva, tornando o processo de cálculo mais trabalhoso, sobretudo em seções com geometria complexa e múltiplos elementos enrijecidos.

Como alternativa, a norma também contempla o Método da Resistência Direta (MRD), que se baseia nas cargas críticas elásticas obtidas para cada modo de instabilidade, permitindo determinar diretamente a resistência nominal sem a necessidade do cálculo das propriedades da seção efetiva (Schafer, 2008). Este método utiliza as cargas críticas elásticas correspondentes aos modos de flambagem local, distorcional e global para determinação direta da resistência nominal dos elementos. Dessa forma, o MRD elimina a necessidade de calcular as propriedades da seção efetiva, simplificando o procedimento de dimensionamento e permitindo a consideração explícita dos diferentes modos de instabilidade previstos pela norma.

Embora os procedimentos normativos conduzam a resultados compatíveis e seguros, o MRD apresenta maior praticidade quando associado a ferramentas computacionais de análise de estabilidade, além de possibilitar uma avaliação individual da influência de cada modo de flambagem na capacidade resistente do perfil. Por esse motivo, o presente trabalho adotou o Método da Resistência Direta, em razão de sua compatibilidade com as análises realizadas no software CUFSM, que fornece diretamente as cargas críticas elásticas necessárias à aplicação do método, bem como por sua maior facilidade de aplicação em estudos comparativos envolvendo diferentes geometrias de perfis formados a frio.

2.4.1 Método da Resistência Direta

O Método da Resistência Direta foi proposto por Schafer e Peköz (1998) como uma alternativa aos procedimentos tradicionais de dimensionamento baseados nas propriedades da seção efetiva. Seu desenvolvimento teve como principal objetivo simplificar o processo de dimensionamento de perfis formados a frio, mantendo níveis adequados de segurança e confiabilidade por meio de formulações calibradas com resultados experimentais e análises numéricas.

A metodologia é baseada na determinação das cargas críticas elásticas correspondentes aos diferentes modos de instabilidade do perfil, obtidas por meio de análises de estabilidade. A partir desses valores, o método emprega expressões de dimensionamento que permitem determinar diretamente a resistência nominal do elemento, considerando os efeitos da flambagem local, distorcional e global, sem a necessidade de recalculas as propriedades geométricas da seção. Sua aplicação em elementos estruturais como terças foi posteriormente ampliada por Pham e Hancock (2009), que demonstraram a eficiência do Método da Resistência Direta para o dimensionamento de sistemas contínuos de cobertura, evidenciando sua

capacidade de representar adequadamente os diferentes modos de instabilidade presentes nesses elementos.

No presente trabalho, as tensões críticas elásticas associadas aos modos de flambagem local e flambagem distorcional foram obtidas por meio do software CUFSM, que utiliza o Método das Faixas Finitas (Finite Strip Method) para realizar a análise de estabilidade dos perfis formados a frio. O programa fornece diretamente os valores das tensões críticas elásticas correspondentes a esses modos de instabilidade, os quais são utilizados nas equações do Método da Resistência Direta para determinação dos momentos resistentes.

Para a flambagem global, entretanto, não foi utilizado o auxílio do CUFSM. A verificação foi realizada integralmente por meio das expressões estabelecidas pela ABNT NBR 14762:2010, utilizando exclusivamente as propriedades geométricas da seção transversal e as condições de vinculação e carregamento do elemento estrutural. Dessa forma, o momento resistente associado à instabilidade global foi determinado de maneira analítica, sendo posteriormente comparado aos resultados obtidos para os modos local e distorcional.

Segundo Schafer (2008), essa abordagem representa uma evolução em relação aos métodos convencionais, principalmente por possibilitar uma avaliação mais direta da influência de cada modo de instabilidade no comportamento resistente do perfil. Além disso, a integração do MRD com ferramentas computacionais, como o CUFSM, torna o procedimento particularmente eficiente em estudos comparativos envolvendo diferentes geometrias de perfis formados a frio, permitindo a obtenção rápida e precisa das tensões críticas elásticas necessárias às verificações de flambagem local e distorcional, enquanto a avaliação da flambagem global permanece fundamentada nas expressões analíticas previstas pela norma.

No MRD, o momento resistente de cálculo é calculado de acordo com a Equação 1.

$$M_{Rd} = \frac{M_{Rk}}{\gamma} \quad (\gamma = 1,1) \quad (1)$$

Onde:

M_{Rk} é o valor característico do momento fletor resistente, devendo ser adotado o menor valor encontrado para a flambagem global (M_{Re}), local (M_{Rl}) e distorcional (M_{Rdist}).

2.4.1.1 Flambagem lateral com torção (M_{Re})

A formulação apresentada pelo Anexo C da ABNT NBR 14762:2010 para o cálculo do momento fletor resistente associado à flambagem lateral com torção (FLT) baseia-se na determinação da capacidade resistente de elementos submetidos à flexão, considerando a possibilidade de deslocamento lateral e rotação da seção transversal. Esse modo de instabilidade

ocorre, principalmente, em vigas não adequadamente travadas ao longo do comprimento, sendo particularmente relevante em elementos como terças em aço. A expressão para o cálculo do momento resistente é apresentada pela Equação 2.

$$\begin{aligned} M_{Re} &= Wf_y && \text{para } \lambda_0 \leq 0,6 \\ M_{Re} &= 1,11(1 - 0,278\lambda_0^2) Wf_y && \text{para } 0,6 < \lambda_0 \leq 1,336 \\ M_{Re} &= \frac{Wf_y}{\lambda_0^2} && \text{para } \lambda_0 > 1,336 \end{aligned} \quad (2)$$

Onde:

W é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação a fibra extrema que atinge o escoamento.

f_y é o limite de escoamento do aço.

λ_0 é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global cujo valor é calculado pela Equação 3.

$$\lambda_0 = \left(\frac{Wf_y}{M_e} \right)^{0,5} \quad (3)$$

M_e é o momento fletor de flambagem global elástica (flambagem lateral com torção), calculado pelas Equações 4, 5, 6, para os casos mais comuns encontrados.

Para barras com seção duplamente simétrica ou monossimétrica sujeitas à flexão em torno do eixo de simetria (eixo x), o momento fletor crítico de flambagem lateral com torção é dado pela Equação 4.

$$M_e = C_b \cdot r_0 \left(N_{ey} \cdot N_{ez} \right)^{0,5} \quad (4)$$

Barras com seção Z pontossimétrica (simétricas em relação a um ponto), com carregamento no plano da alma, o momento fletor crítico de flambagem lateral com torção é dado pela Equação 5.

$$M_e = 0,5 \cdot C_b \cdot r_0 \left(N_{ey} \cdot N_{ez} \right)^{0,5} \quad (5)$$

Barras com seção fechada (caixão), sujeitas à flexão em torno do eixo x, o momento fletor crítico de flambagem lateral com torção é dado pela Equação 6.

$$M_e = C_b \left(N_{ey} \cdot G \cdot J \right)^{0,5} \quad (6)$$

Onde:

r_0 é o raio de giração polar da seção bruta em relação ao centro de torção.

N_{ey} é a força axial de flambagem global elástica por flexão em relação ao eixo y, calculada pela Equação 7.

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2} \quad (7)$$

N_{ez} é a força axial de flambagem global elástica por torção, calculada pela Equação 8.

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right] \quad (8)$$

Onde:

E é o módulo de elasticidade, adotado igual a 200000 MPa.

G é o módulo de elasticidade transversal, adotado igual a 77000 MPa.

I_y é o momento de inércia em relação ao eixo y .

$K_y L_y$ é o comprimento efetivo de flambagem por flexão em relação ao eixo y .

$K_z L_z$ é o comprimento efetivo de flambagem por torção.

C_w é a constante de empenamento da seção.

J é a constante de torção da seção.

C_b é o fator de modificação para diagrama de momentos fletores não uniformes, obtido pela Equação 9, ou, a favor da segurança, pode ser tomado igual a 1,0.

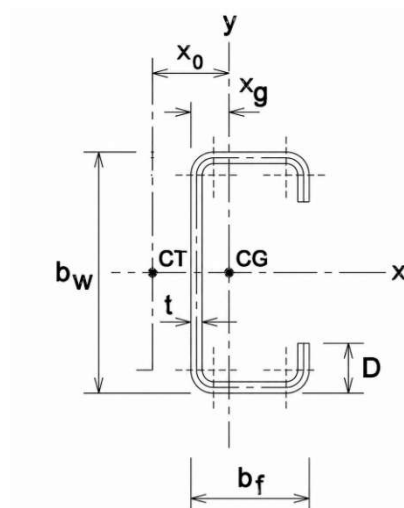
$$C_b = \frac{12,5M_{\max}}{2,5M_{\max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad (9)$$

Onde:

M_A , M_B e M_C são, respectivamente, os momentos a um quarto, no meio e a três quartos do trecho entre travamentos laterais.

$M_{\max}$ é o máximo momento atuante no vão entre travamentos laterais. A Figura 9 indica as dimensões, as distâncias e os eixos da seção.

Figura 9 – Indicação das dimensões, distâncias e eixos da seção



Fonte: Adaptado d Adaptado da ABNT NBR 6355:2012

2.4.1.2 Flambagem local (M_{Rl})

A flambagem local está associada à instabilidade dos elementos que compõem a seção transversal, como mesas e alma, sendo fortemente influenciada pela esbeltez dessas chapas. No contexto do Método da Resistência Direta, a verificação desse modo de instabilidade é realizada a partir da determinação do momento fletor resistente considerando a flambagem local, com base na carga crítica elástica correspondente. A formulação adotada pela ABNT NBR 14762:2010 para esse caso é apresentada pela Equação 10.

$$\begin{aligned} M_{Rl} &= M_{Re} & \text{para } \lambda_l \leq 0,776 \\ M_{Rl} &= \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}}\right) \frac{M_{Re}}{\lambda_l^{0,8}} & \text{para } \lambda_l > 0,776 \end{aligned} \quad (10)$$

Onde:

λ_l é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem local cujo valor é calculado pela Equação 11.

$$\lambda_l = \left(\frac{M_{Re}}{M_l}\right)^{0,5} \quad (11)$$

M_{Re} é o valor característico do momento fletor associado a flambagem global (flambagem lateral com torção).

M_l é o momento fletor de flambagem local elástica, cujo valor é apresentado pela Equação 12.

$$M_l = W * \sigma_l \quad (12)$$

Onde:

σ_l é a tensão crítica local elástica, obtida pelo programa CUFSM.

2.4.1.3 Flambagem distorcional (M_{Rdist})

A flambagem distorcional caracteriza-se pela deformação da seção transversal com alteração de sua geometria original, envolvendo a interação entre seus elementos constituintes, como mesa, alma e enrijecedores. Esse modo de instabilidade é particularmente relevante em perfis formados a frio e é considerado de forma específica no Método da Resistência Direta, por meio da utilização do momento crítico elástico associado a esse comportamento. A seguir, apresenta-se a formulação para o cálculo do momento fletor resistente considerando a flambagem distorcional. O valor característico do momento fletor resistente para a flambagem distorcional (M_{Rdist}) é calculado pela Equação 13.

$$\begin{aligned}
M_{Rdist} &= Wf_y && \text{para } \lambda_{dist} \leq 0,673 \\
M_{Rdist} &= \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}}\right) \frac{Wf_y}{\lambda_{dist}} && \text{para } \lambda_{dist} > 0,673
\end{aligned} \tag{13}$$

Onde:

W é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema que atinge o escoamento.

f_y é o limite de escoamento do aço;

λ_{dist} é o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem distorcional cujo valor é dado pela Equação 14.

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{Wf_y}{M_{dist}} \right)^{0,5} \tag{14}$$

M_{dist} é o momento fletor de flambagem distorcional elástica, cujo valor é apresentado pela Equação 15.

$$M_{dist} = W * \sigma_{dist} \tag{15}$$

Onde:

σ_{dist} é a tensão crítica distorcional elástica, obtida pelo programa CUFSM.

2.5 Enrijecedores de alma

Segundo Pham, Bruneau e Hancock (2015), a introdução de enrijecedores intermediários modifica o comportamento resistente da alma, aumentando sua rigidez e alterando os modos de instabilidade predominantes. Esses enrijecedores são, em geral, obtidos por meio de dobras adicionais na chapa, formando nervuras ou vincos ao longo da alma do perfil. Sua principal função é restringir as deformações fora do plano da alma, contribuindo para o aumento da resistência à flambagem local e para uma melhor distribuição de tensões na seção transversal.

É importante diferenciar os enrijecedores de alma dos enrijecedores de borda longitudinais. Enquanto os enrijecedores de borda são posicionados nas extremidades das mesas, com a função de aumentar a rigidez dessas regiões comprimidas e reduzir a suscetibilidade à flambagem local das mesas, os enrijecedores de alma atuam diretamente na região central da seção, modificando o comportamento da alma. Dessa forma, cada tipo de enrijecedor exerce papel específico no controle dos modos de instabilidade, atuando em diferentes partes da seção transversal.

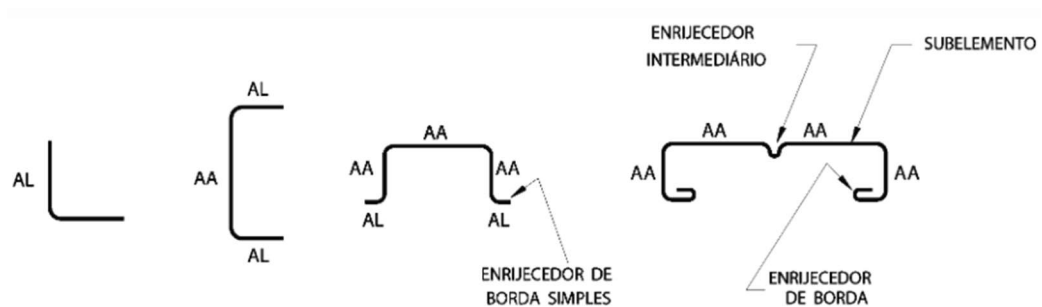
Dentre as principais vantagens dos enrijecedores de alma, destaca-se a redução da esbeltez dos painéis que compõem a alma do perfil. Em perfis formados a frio, a relação entre

altura da alma e espessura da chapa (h/t) é geralmente elevada, o que torna esses elementos altamente suscetíveis à flambagem local. A introdução de enrijecedores promove a subdivisão da alma em painéis menores, reduzindo a dimensão livre entre restrições e, conseqüentemente, diminuindo a esbeltez de cada painel. Com isso, há um aumento da rigidez local e um atraso na ocorrência da flambagem, possibilitando um melhor aproveitamento da capacidade resistente do perfil.

Além disso, a presença de enrijecedores de alma pode contribuir para a melhoria do comportamento global do elemento, ao proporcionar maior estabilidade da seção transversal e reduzir a sensibilidade a imperfeições geométricas.

No contexto específico das terças em aço, a utilização de enrijecedores de alma torna-se ainda mais relevante, uma vez que esses elementos estão, em geral, submetidos à flexão e apresentam elevada esbeltez, o que os torna suscetíveis a diferentes modos de instabilidade. A adoção de enrijecedores permite melhorar o desempenho estrutural desses perfis sem a necessidade de aumento significativo de material, contribuindo para soluções mais eficientes e econômicas. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre perfis semelhantes, com e sem a presença de enrijecedores de alma, avaliando sua influência no comportamento estrutural e na capacidade resistente das terças em aço. A Figura 10 mostra alguns exemplos de perfis formados a frio com enrijecedores, de borda ou intermediário.

Figura 10 – Perfis formados a frio com enrijecedores



Fonte: ABNT NBR 14762:2010

3 METODOLOGIA

O presente trabalho tem como base a análise de um projeto real de cobertura em aço constituída por terças em perfis de aço formados a frio, especificamente seções do tipo Z com enrijecedores intermediários na alma (ZAE). A partir desse projeto, são utilizados dados representativos das condições reais de aplicação, como vãos das terças, espaçamento entre elementos, distâncias entre linhas de corrente (travamentos laterais), tipologia das seções e combinações de carregamento adotadas em projeto.

A metodologia consiste na realização de uma análise comparativa entre o perfil originalmente especificado e outros perfis formados a frio com características geométricas semelhantes, como perfis do tipo Ue e perfis Z sem enrijecedores intermediários. O objetivo é avaliar a influência dos enrijecedores de alma no comportamento estrutural das terças, buscando identificar a solução mais eficiente sob os pontos de vista resistente e de estabilidade.

Inicialmente, foi utilizado o programa FTOOL para modelagem estrutural das terças, no qual foram inseridos os vãos, propriedades geométricas das seções e carregamentos atuantes. A partir das combinações de ações no Estado Limite de Serviço (ELS), foram obtidos os deslocamentos verticais (flechas), os quais foram comparados com os limites estabelecidos pela ABNT NBR 14762:2010, norma que define parâmetros de resistência de perfis formados a frio, permitindo a verificação do desempenho em serviço dos perfis analisados.

Na sequência, foram consideradas as combinações de carregamento referentes ao Estado Limite Último (ELU), com o objetivo de determinar os esforços solicitantes, em especial os momentos fletores de cálculo (M_{Sd}) ao longo dos vãos. Esses valores foram comparados com os momentos resistentes (M_{Rd}) das seções, determinados com base no Método da Resistência Direta (MRD), conforme os procedimentos estabelecidos na ABNT NBR 14762:2010.

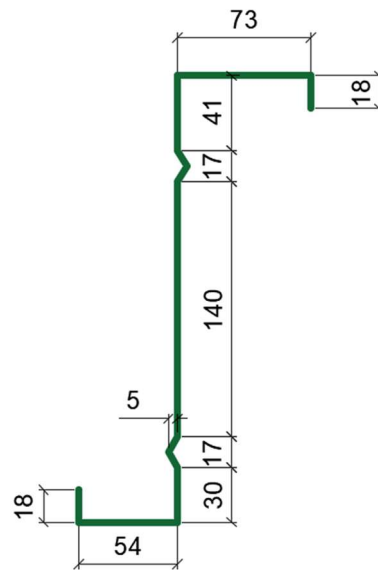
Complementarmente, foi empregado o programa CUFSM para a determinação das tensões críticas elásticas associadas aos diferentes modos de flambagem - local, distorcional e global - por meio do Método das Faixas Finitas. A partir desses resultados, foram obtidos os parâmetros necessários para aplicação do MRD, permitindo a avaliação da capacidade resistente dos perfis e a análise detalhada de seu comportamento estrutural frente aos fenômenos de instabilidade.

3.1 Informações de projeto

Para a realização das análises propostas neste trabalho, foi adotada como objeto de estudo a terça em aço correspondente ao maior vão livre da cobertura, por representar a condição mais crítica em termos estruturais. Considerando a existência de transpasse entre as terças e o alinhamento entre elas, optou-se por analisar um conjunto de quatro vãos consecutivos, uma vez que o comportamento de uma terça influencia diretamente o desempenho das demais.

Para as terças do projeto, o perfil adotado foi de uma seção Z com enrijecedores intermediários e de borda, denominado ZAE 245, que possui 245 mm de altura e mesas distintas com 54 e 73 mm. O perfil possui espessura nominal de 1,95 mm, no entanto, visto que possui revestimento de zinco de 0,04 mm, sua espessura de cálculo passa a ser de 1,91 mm. A Figura 11 representa a seção do perfil e suas respectivas dimensões.

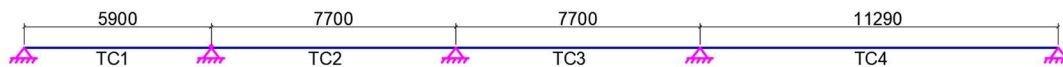
Figura 11 – Seção ZAE 245 e suas respectivas dimensões em milímetros



Fonte: Autor (2026)

Os vãos analisados foram denominados TC1, TC2, TC3 e TC4, apresentando vãos de 5900 mm, 7700 mm, 7700 mm e 11290 mm, respectivamente, onde todas as terças são apoiadas em vigas em aço com seção do tipo I. A Figura 12 apresenta o modelo estrutural das terças adotado para a análise.

Figura 12 – Vãos das terças em aço do projeto escolhido

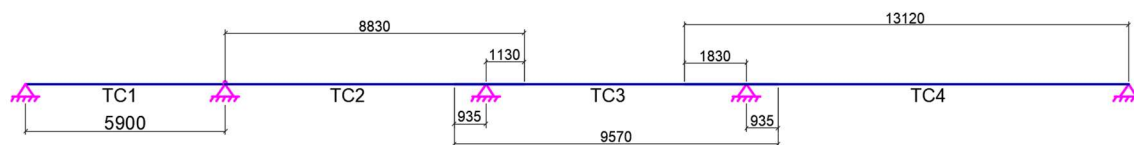


Fonte: Autor (2026)

Devido à presença de transpasse entre as terças, com exceção da terça TC1, os comprimentos efetivos dos elementos tornam-se superiores aos seus respectivos vãos livres. Dessa forma, os comprimentos totais adotados para as terças TC1, TC2, TC3 e TC4 são de 5900 mm, 8830 mm, 9570 mm e 13120 mm, respectivamente. A Figura 13 apresenta, de forma detalhada, as dimensões individuais de cada terça, bem como as extensões dos trechos de transpasse. Os valores nominais dos transpasses foram apenas apresentados no projeto, sem maiores identificações das metodologias utilizadas para seus cálculos.

A consideração do transpasse entre as terças é fundamental para a análise estrutural, uma vez que influencia diretamente a distribuição de esforços, na rigidez do sistema e no comportamento global das terças, especialmente no que se refere à estabilidade e aos efeitos de continuidade.

Figura 13 – Dimensões das terças e transpasses do projeto escolhido

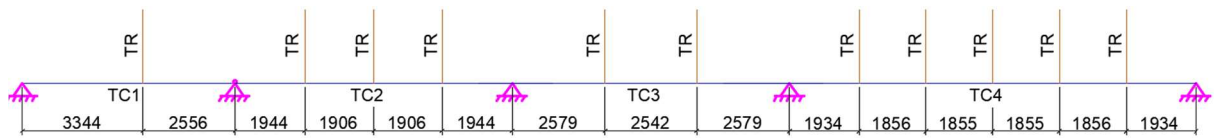


Fonte: Autor (2026)

As terças analisadas possuem tirantes rígidos (TR) atuando como elementos de travamento lateral, com a finalidade de restringir deslocamentos transversais e reduzir a suscetibilidade à flambagem lateral com torção. Esses tirantes são constituídos por perfis cantoneira de abas iguais L 50×50 mm, distribuídos ao longo das terças conforme apresentado na Figura 14.

A disposição dos travamentos laterais foi definida de acordo com o projeto estrutural original, resultando em diferentes espaçamentos entre linhas de corrente ao longo dos vãos. A consideração desses elementos é de grande importância para a análise estrutural das terças, uma vez que os travamentos influenciam diretamente o comprimento destravado dos perfis e, conseqüentemente, sua capacidade resistente frente aos modos de instabilidade global.

Figura 14 – Disposição dos travamentos laterais das terças



Fonte: Autor (2026)

Além das características geométricas e dos sistemas de travamento, foram também adotados os carregamentos previstos no projeto estrutural da cobertura. Considerou-se uma carga permanente (CP) de $0,25 \text{ kN/m}^2$, correspondente ao peso próprio das telhas, terças e acessórios secundários da cobertura, uma sobrecarga de utilização (SC) de $0,25 \text{ kN/m}^2$ e uma ação de vento de sucção de $0,45 \text{ kN/m}^2$. Esses carregamentos foram utilizados na definição das combinações de ações nos Estados Limites de Serviço e Último, empregadas nas análises desenvolvidas ao longo deste trabalho.

Adicionalmente, foi adotado no estudo o espaçamento entre as linhas de terças definido no projeto original da cobertura, correspondente a $2,049 \text{ m}$. Essa distância influencia diretamente na área de contribuição de cada terça e, conseqüentemente, nos carregamentos distribuídos atuantes sobre os perfis. Dessa forma, sua consideração é fundamental para representar adequadamente as condições reais de funcionamento da estrutura e garantir maior fidelidade aos resultados obtidos nas análises desenvolvidas.

Considerando o espaçamento entre as linhas de terças adotado no projeto, correspondente a $2,049 \text{ m}$, os carregamentos superficiais da cobertura foram convertidos em carregamentos lineares distribuídos atuantes nas terças. Para isso, o valor de cada ação aplicada em área foi multiplicado pela distância entre as terças, obtendo-se as forças distribuídas equivalentes referentes à carga permanente, sobrecarga de utilização e ação do vento de sucção. Os valores resultantes dos carregamentos distribuídos utilizados nas análises estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Carregamentos distribuídos para cada tipo de ação

Carregamentos			
Tipo de carga	Valor da ação (kN/m^2)	Distância entre terças (m)	Carregamento distribuído (kN/m)
Carga Permanente (CP)	0,25	2,049	0,51225
Sobrecarga (SC)	0,25	2,049	0,51225
Vento (V)	-0,45	2,049	-0,92205

Fonte: Autor (2026)

3.2 Análise Estrutural

Após a definição das propriedades geométricas das seções, das condições de apoio, dos travamentos laterais e dos carregamentos atuantes, foi realizada a modelagem estrutural das terças utilizando o programa FTOOL. O programa foi empregado com o objetivo de determinar os esforços solicitantes e deslocamentos da estrutura, fornecendo os parâmetros necessários para as verificações nos Estados Limites de Serviço e Último.

Na modelagem estrutural, foram utilizadas as seções disponibilizadas pelo próprio programa FTOOL, que permite o lançamento de diferentes geometrias de perfis de aço, incluindo perfis de seção Z. Para representar os perfis analisados, foram inicialmente inseridas as dimensões da alma e das mesas correspondentes ao perfil original do projeto. Em seguida, realizou-se um processo de ajuste da espessura da seção, de forma que os valores de área da seção transversal (A) e do momento de inércia em relação ao eixo principal (I_x) obtidos no software apresentassem valores o mais próximo possível das propriedades geométricas do perfil real em estudo.

Dessa forma, buscou-se representar adequadamente a rigidez de cada perfil analisado sem a necessidade de modelar sua geometria detalhada. Nas regiões de transpasse, foi adotada uma seção equivalente com o dobro da inércia da seção original, de forma a representar o aumento de rigidez proporcionado pela sobreposição dos perfis nesses trechos. Essa consideração é importante para reproduzir com maior fidelidade o comportamento estrutural das terças contínuas, influenciando diretamente a redistribuição de esforços e os deslocamentos ao longo dos vãos.

Além das propriedades da seção, o modelo estrutural considerou os vãos das terças e as regiões de transpasse entre elementos consecutivos, conforme indicado no projeto estrutural. Para representar o aumento de rigidez proporcionado pela sobreposição dos perfis, a estrutura foi subdividida em trechos distintos, atribuindo-se propriedades geométricas específicas a cada um deles. Nas regiões sem transpasse foi utilizada a seção simples, enquanto nos trechos correspondentes ao transpasse foi adotada, como uma simplificação da modelagem, uma seção equivalente com o dobro da área da seção transversal ($2A$) e o dobro do momento de inércia em relação ao eixo de flexão principal ($2I_x$).

Ressalta-se que essa simplificação não representa integralmente o comportamento real da ligação entre os perfis, uma vez que, na prática, a interação entre as terças depende das características da conexão. Em ligações parafusadas, por exemplo, podem ocorrer escorregamentos relativos entre os perfis, e a rigidez e a resistência da seção composta são

influenciadas pela quantidade, disposição e características dos parafusos utilizados. Entretanto, considerando o objetivo do presente trabalho, essa aproximação mostrou-se adequada para representar o aumento de rigidez proporcionado pelo transpasse e avaliar sua influência no comportamento global da estrutura.

Essa estratégia permitiu reproduzir, de maneira simplificada, o acréscimo de rigidez existente sobre os apoios, influenciando a redistribuição dos esforços internos e dos deslocamentos ao longo da estrutura. A utilização do FTOOL nesta etapa possibilitou a obtenção dos diagramas de esforços solicitantes, reações de apoio e deslocamentos verticais, fornecendo os parâmetros necessários para as verificações dos Estados Limites de Serviço e Último.

3.2.1 Estado Limite de Serviço (ELS)

Para as verificações no Estado Limite de Serviço (ELS), foram consideradas as combinações de ações estabelecidas pela ABNT NBR 14762:2010, com o objetivo de avaliar o comportamento das terças em condições normais de utilização, especialmente no que se refere aos deslocamentos verticais e ao desempenho global da estrutura.

De acordo com a ABNT NBR 14762:2010, as combinações de serviço são classificadas em combinação rara, combinação frequente e combinação quase permanente. Cada uma dessas combinações possui formulação específica, diferenciando-se pelos coeficientes aplicados às ações variáveis. A formulação da combinação rara é apresentada pela Equação 16, a combinação frequente pela Equação 17 e a combinação quase permanente pela Equação 18. Os coeficientes de combinação (ψ_0) e de redução (ψ_1 e ψ_2) adotados para as ações variáveis estão apresentados na Tabela 2, conforme os valores estabelecidos pela ABNT NBR 14762:2010.

$$\sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\psi_{1j} F_{Qj,k}) \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\psi_{2j} F_{Qj,k}) \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^m F_{Gi,k} + \sum_{j=2}^n (\psi_{2j} F_{Qj,k}) \quad (18)$$

Onde:

$F_{G,k}$ são os valores característicos das ações permanentes;

$F_{Q1,k}$ é o valor característico da ação variável considerada principal para a combinação;

$F_{Qj,k}$ são os valores característicos das ações variáveis que podem atuar concomitantemente com a ação variável principal.

Tabela 2 – Valores dos fatores de combinação ψ_0 e de redução ψ_1 e ψ_2 para as ações variáveis

Ações		η_2^a		
		ψ_0	ψ_1	ψ_2^d
Ações variáveis causadas pelo uso e ocupação	Locais em que não há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, nem de elevadas concentrações de pessoas ^b	0,5	0,4	0,3
	Locais em que há predominância de pesos e de equipamentos que permanecem fixos por longos períodos de tempo, ou de elevadas concentrações de pessoas ^c	0,7	0,6	0,4
	Bibliotecas, arquivos, depósitos, oficinas e garagens e sobrecargas em coberturas	0,8	0,7	0,6
Vento	Pressão dinâmica do vento nas estruturas em geral	0,6	0,3	0
Temperatura	Variações uniformes de temperatura em relação à média anual local	0,6	0,5	0,3
Cargas móveis e seus efeitos dinâmicos	Passarelas de pedestres	0,6	0,4	0,3
	Pilares e outros elementos ou subestruturas que suportam vigas de rolamento de pontes rolantes	0,7	0,6	0,4
^a Ver alínea c) de 6.5.3. ^b Edificações residenciais de acesso restrito. ^c Edificações comerciais, de escritórios e de acesso público. ^d Para combinações excepcionais onde a ação principal for sismo, admite-se adotar para ψ_2 o valor zero.				

Fonte: ABNT NBR 14762:2010

Para a análise dos deslocamentos verticais das terças foi adotada a combinação rara do Estado Limite de Serviço (ELS), conforme recomendado pela ABNT NBR 14762:2010 para a verificação dos deslocamentos em terças de cobertura, critério apresentado na Tabela 3. De acordo com a norma, devem ser consideradas as combinações raras de serviço, utilizando-se as ações variáveis de mesmo sentido que a ação permanente. Dessa forma, a combinação rara representa a condição normativa para avaliação das flechas máximas da estrutura, sendo empregada nas verificações de deslocamentos realizadas neste trabalho.

Além disso, conforme recomendado pela ABNT NBR 14762:2010, ações variáveis que produzam efeitos favoráveis ou que reduzam os efeitos da ação variável principal devem ser desconsideradas nas combinações de serviço. Assim, considerando que a ação do vento de sucção atua em sentido oposto à sobrecarga de utilização, não foi adotada uma combinação simultânea entre essas ações variáveis. Dessa forma, foram analisadas separadamente duas

situações de carregamento: a primeira considerando a atuação da carga permanente juntamente com a sobrecarga de utilização e a segunda considerando a carga permanente associada à ação do vento de sucção.

Ainda de acordo com a ABNT NBR 14762:2010, os limites de deslocamentos verticais admissíveis para perfis formados a frio variam conforme o tipo de elemento estrutural e a condição de carregamento considerada. Os valores normativos adotados para a presente análise são apresentados na Tabela 3. Esses limites servirão como critério de avaliação dos deslocamentos verticais obtidos para as combinações do Estado Limite de Serviço, permitindo verificar o atendimento dos perfis aos requisitos de utilização estabelecidos.

Tabela 3 – Deslocamentos máximos para perfis formados a frio

Descrição	δ^a
Travessas de fechamento	$L/180^b$
	$L/120^{c,d}$
Terças de cobertura ^g	$L/180^e$
	$L/120^f$
Vigas de cobertura ^g	$L/250^h$
Vigas de piso	$L/350^h$
Vigas que suportam pilares	$L/500^h$
Galpões em geral e edifícios de um pavimento:	$H/300$
— Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base	$H/400^i$
— Deslocamento horizontal do nível da viga de rolamento em relação à base	
Edifícios de dois ou mais pavimentos:	
— Deslocamento horizontal do topo dos pilares em relação à base	$H/400$
— Deslocamento horizontal relativo entre dois pisos consecutivos	$H/500^j$
^a L é o vão teórico entre apoios ou o dobro do comprimento teórico do balanço, H é a altura total do pilar (distância do topo à base) ou a distância do nível da viga de rolamento à base, h é a altura do andar (distância entre centros das vigas de dois pisos consecutivos ou entre centros das vigas e a base no caso do primeiro andar). ^b Deslocamento paralelo ao plano do fechamento (entre linhas de tirantes, caso eles existam). ^c Deslocamento perpendicular ao plano do fechamento. ^d Considerar apenas as ações variáveis perpendiculares ao plano de fechamento (vento no fechamento) com seu valor característico. ^e Considerar combinações raras de serviço, utilizando-se as ações variáveis de mesmo sentido que o da ação permanente. ^f Considerar apenas as ações variáveis de sentido oposto ao da ação permanente (vento de sucção) com seu valor característico. ^g Deve-se também evitar a ocorrência de empoçamento, com atenção especial aos telhados de pequena declividade. ^h Caso haja paredes de alvenaria sobre ou sob uma viga, solidarizadas com essa viga, o deslocamento vertical também não deve exceder a 15 mm. ⁱ O diferencial do deslocamento horizontal entre pilares do pórtico que suportam as vigas de rolamento não pode superar 15 mm. ^j Tomar apenas o deslocamento provocado pelas forças cortantes no andar considerado, desprezando-se os deslocamentos de corpo rígido provocados pelas deformações axiais dos pilares e vigas.	

Fonte: ABNT NBR 14762:2010

3.2.2 Estado Limite Último (ELU)

As verificações do Estado Limite Último (ELU) têm como objetivo avaliar a segurança estrutural das terças em aço frente às condições mais críticas de carregamento, garantindo que os elementos resistam adequadamente aos esforços solicitantes sem atingir estados de colapso, plastificação excessiva ou instabilidade estrutural. Nessa etapa da análise, são determinados os esforços máximos atuantes nas terças, utilizados posteriormente na verificação da capacidade resistente das seções estudadas.

De acordo com a ABNT NBR 14762:2010, as combinações de ações no Estado Limite Último consideram coeficientes de ponderação aplicados aos carregamentos permanentes e variáveis, representados respectivamente por γ_g e γ_q . Esses coeficientes têm a finalidade de majorar as ações atuantes, incorporando margens de segurança relacionadas às incertezas dos carregamentos e das condições de utilização da estrutura. Os valores adotados para os coeficientes de ponderação variam conforme o tipo de ação considerada e estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores dos coeficientes de ponderação das ações

Combinações	Ações permanentes (γ_g) ^{a c}					
	Diretas					Indiretas
	Peso próprio de estruturas metálicas	Peso próprio de estruturas pré-moldadas	Peso próprio de estruturas moldadas no local e de elementos construtivos industrializados e empuxos permanentes	Peso próprio de elementos construtivos industrializados com adições <i>in loco</i>	Peso próprio de elementos construtivos em geral e equipamentos	
Normais	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,35 (1,00)	1,40 (1,00)	1,50 (1,00)	1,20 (0)
Especiais ou de construção	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,25 (1,00)	1,30 (1,00)	1,40 (1,00)	1,20 (0)
Excepcionais	1,10 (1,00)	1,15 (1,00)	1,15 (1,00)	1,20 (1,00)	1,30 (1,00)	0 (0)
	Ações variáveis (γ_q) ^{a d}					
	Efeito da temperatura ^b		Ação do vento	Ações truncadas ^e	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação	
Normais	1,20		1,40	1,20	1,50	

	Ações variáveis (%) ^{a d}			
	Efeito da temperatura ^b	Ação do vento	Ações truncadas ^e	Demais ações variáveis, incluindo as decorrentes do uso e ocupação
Especiais ou de construção	1,00	1,20	1,10	1,30
Excepcionais	1,00	1,00	1,00	1,00

^a Os valores entre parênteses correspondem aos coeficientes para as ações permanentes favoráveis à segurança; ações variáveis e excepcionais favoráveis à segurança não devem ser incluídas nas combinações.

^b O efeito de temperatura citado não inclui o gerado por equipamentos, o qual deve ser considerado ação decorrente do uso e ocupação da edificação.

^c Nas combinações normais, as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,35 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer. Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,25 e 1,30, e nas combinações excepcionais, 1,15 e 1,20.

^d Nas combinações normais, se as ações permanentes diretas que não são favoráveis à segurança forem agrupadas, as ações variáveis que não são favoráveis à segurança podem, opcionalmente, ser consideradas também todas agrupadas, com coeficiente de ponderação igual a 1,50 quando as ações variáveis decorrentes do uso e ocupação forem superiores a 5 kN/m², ou 1,40 quando isso não ocorrer (mesmo nesse caso, o efeito da temperatura pode ser considerado isoladamente, com o seu próprio coeficiente de ponderação). Nas combinações especiais ou de construção, os coeficientes de ponderação são respectivamente 1,30 e 1,20, e nas combinações excepcionais, sempre 1,00.

^e Ações truncadas são consideradas ações variáveis cuja distribuição de máximos é truncada por um dispositivo físico, de modo que o valor dessa ação não possa superar o limite correspondente. O coeficiente de ponderação mostrado nesta Tabela se aplica a esse valor-limite.

Fonte: ABNT NBR 14762:2010

Para o desenvolvimento das análises deste trabalho, foi utilizada a combinação última normal, empregada em situações correntes de dimensionamento estrutural. A formulação dessa combinação é apresentada pela Equação 19, sendo utilizada para a determinação dos esforços solicitantes máximos atuantes nas terças em aço.

$$\sum_{i=1}^m (\gamma_{gi} F_{Gi,k}) + \gamma_{q1} F_{Q1,k} + \sum_{j=2}^n (\gamma_{qj} \psi_{0j} F_{Qj,k}) \quad (19)$$

Conforme discutido anteriormente para as combinações do ELS, as ações variáveis consideradas neste estudo atuam em sentidos opostos. Enquanto a sobrecarga de utilização atua no mesmo sentido da carga permanente, a ação do vento de sucção produz esforços em sentido contrário. Dessa forma, para que os efeitos solicitantes máximos não sejam reduzidos ou anulados pela combinação simultânea dessas ações, optou-se por não considerar as ações variáveis conjuntamente nas combinações do Estado Limite Último. Assim, foram definidas duas combinações distintas para a análise estrutural das terças.

Com a obtenção dos momentos fletores solicitantes máximos nas terças, torna-se necessário determinar a capacidade resistente das seções analisadas, permitindo a verificação da segurança estrutural dos perfis frente às solicitações atuantes. Para isso, o momento fletor resistente das seções foi calculado por meio do Método da Resistência Direta (MRD), conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 14762:2010.

Para a aplicação do MRD, foi utilizado o programa CUFSM, que emprega o Método das Faixas Finitas para a análise de estabilidade elástica dos perfis. A partir da geometria da seção, das propriedades mecânicas do aço e das condições de contorno adotadas, o programa fornece as tensões críticas elásticas associados aos modos de flambagem local e distorcional da seção. Esses valores nos fornecem os momentos críticos elásticos e, posteriormente, os momentos resistentes pelo Método da Resistência Direta, permitindo avaliar a influência dos modos de instabilidade no comportamento estrutural dos perfis analisados.

O cálculo do momento fletor resistente das seções foi realizado em dois pontos distintos das terças, correspondentes às regiões de máximos momentos fletores obtidos nas análises estruturais. Inicialmente, foi determinado o momento resistente no meio do vão, sendo esse valor comparado ao momento fletor solicitante máximo positivo atuante nessa região. Posteriormente, foi realizada a mesma verificação para a região sobre os apoios, comparando-se o momento resistente com o momento fletor negativo máximo obtido nessa condição.

A adoção dessa metodologia deve-se à diferença geométrica existente entre essas regiões da terça. No trecho central dos vãos, a seção é composta por um perfil simples, enquanto nas regiões de transpasse sobre os apoios ocorre a sobreposição de perfis, resultando em uma seção duplicada e, conseqüentemente, com propriedades geométricas e rigidez superiores. Dessa forma, torna-se necessário realizar análises independentes para cada condição, permitindo representar adequadamente o comportamento estrutural das terças ao longo de toda sua extensão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

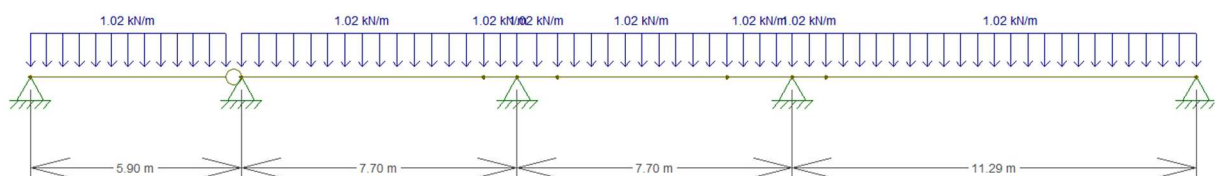
4.1 Estado Limite de Serviço (ELS)

Após a definição das combinações de carregamento e da modelagem da estrutura, apresentam-se os resultados obtidos para as verificações no Estado Limite de Serviço (ELS). Foram utilizados os valores dos carregamentos distribuídos apresentados na Tabela 1 para a análise das combinações. Para a primeira combinação de serviço, denominada ELS1, foi considerada a atuação simultânea da carga permanente e da sobrecarga de utilização, ambas atuando no mesmo sentido. Assim, o carregamento distribuído resultante é dado pela Equação 16.

$$F_d = 1,0 * 0,51225 + 1,0 * 0,51225 = 1,0245 \text{ kN/m}$$

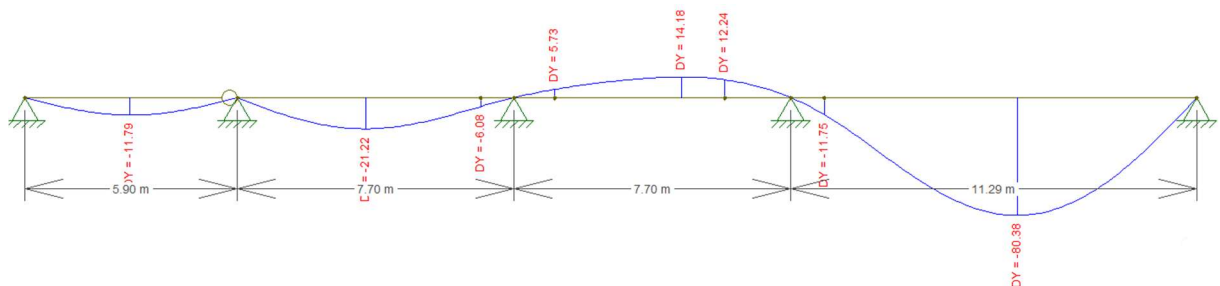
O modelo estrutural apresentado na Figura 15 contempla uma rótula interna, correspondente a uma região do projeto real em que não há transpasse entre as terças. Nesse trecho, a continuidade dos elementos é realizada por meio de uma ligação apoiada (rotulada), a qual não transmite momentos fletores entre as barras. Assim, a inserção da rótula no modelo do FTOOL teve como objetivo representar de forma mais fiel a condição de vinculação existente na estrutura analisada. A partir dessa análise, foram obtidos os deslocamentos verticais máximos das terças, apresentados na Figura 16.

Figura 15 – Carregamento devido à ELS1



Fonte: Autor (2026)

Figura 16 – Deslocamentos verticais máximos devidos à ELS1, em milímetros



Fonte: Autor (2026)

Como, na combinação ELS1, a ação variável atua no mesmo sentido da carga permanente, de acordo com a Tabela 3, adotou-se o limite de deslocamento vertical igual a $L/180$, em que L representa o vão teórico entre apoios. Os valores das flechas máximas obtidas para cada vão da terça, bem como os respectivos limites normativos, estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores das flechas obtidas e flechas limites devidos à ELS1

ELS1				
Vão	Vão (m)	Flecha (cm)	Flecha limite (cm)	Verificação
TC1	5,90	1,18	3,28	OK!
TC2	7,70	2,12	4,28	OK!
TC3	7,70	1,42	4,28	OK!
TC4	11,29	8,04	6,27	NÃO OK!

Fonte: Autor (2026)

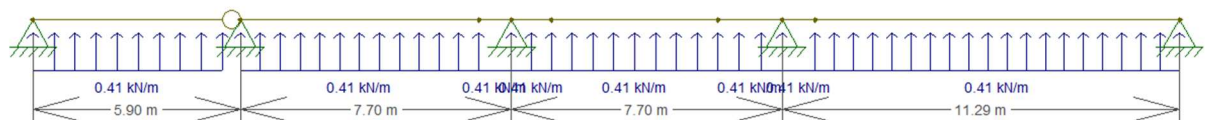
A partir dos resultados obtidos, verifica-se que os vãos das terças TC1, TC2 e TC3 atenderam aos limites máximos de deslocamento estabelecidos pela ABNT NBR 14762:2010. Entretanto, o vão TC4 apresentou flecha superior ao valor admissível, não satisfazendo o critério de deslocamento vertical para a combinação ELS1.

Para a segunda combinação de serviço, denominada ELS2, considerou-se a atuação da carga permanente juntamente com a ação do vento de sucção, que atua em sentido oposto ao carregamento gravitacional. Dessa forma, o carregamento distribuído resultante é dado pela Equação 16.

$$F_d = 1,0 * 0,51225 - 1,0 * 0,92205 = -0,41 \text{ kN/m}$$

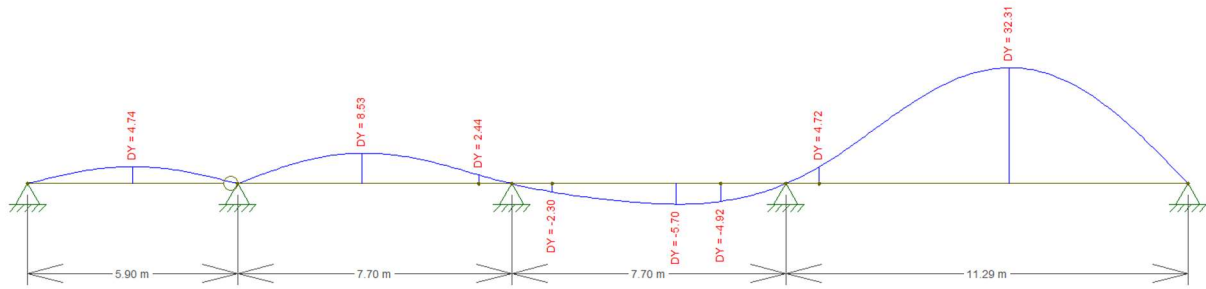
O carregamento correspondente foi aplicado na modelagem estrutural no FTOOL, conforme apresentado na Figura 17. Os deslocamentos verticais máximos obtidos para essa combinação são apresentados na Figura 18.

Figura 17 – Carregamento devido à ELS2



Fonte: Autor (2026)

Figura 18 – Deslocamentos verticais máximos devidos à ELS2, em milímetros



Fonte: Autor (2026)

Para essa situação, conforme previsto pela ABNT NBR 14762:2010, adotou-se o limite de deslocamento vertical igual a $L/120$, uma vez que a ação variável principal atua em sentido oposto à carga permanente. Os valores das flechas máximas obtidas e seus respectivos limites admissíveis estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores das flechas obtidas e flechas limites devidos à ELS2

ELS2				
Vão	Vão (m)	Flecha (cm)	Flecha limite (cm)	Verificação
TC1	5,90	0,47	4,92	OK!
TC2	7,70	0,85	6,42	OK!
TC3	7,70	0,57	6,42	OK!
TC4	11,29	3,23	9,41	OK!

Fonte: Autor (2026)

Observa-se que, para a combinação ELS2, todos os vãos das terças analisadas atenderam aos limites máximos de deslocamento vertical estabelecidos pela ABNT NBR 14762:2010, apresentando valores inferiores às flechas admissíveis.

4.2 Estado Limite Último (ELU)

4.2.1 Carregamentos

Após a avaliação do comportamento da estrutura em serviço, apresentam-se os resultados obtidos para as verificações no Estado Limite Último (ELU), considerando as combinações de carregamento estabelecidas na metodologia.

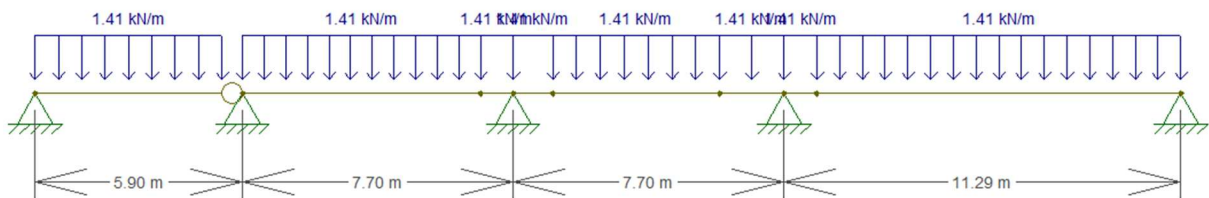
A primeira combinação, denominada ELU1, considera a atuação simultânea da carga permanente (CP) e da sobrecarga de utilização (SC). De acordo com os coeficientes de ponderação apresentados na Tabela 4, para o peso próprio de estruturas em aço em combinações

normais foi adotado o coeficiente $\gamma_g = 1,25$. Já para a sobrecarga de utilização, classificada como “demais ações variáveis”, foi utilizado o coeficiente $\gamma_q = 1,50$. Dessa forma, o carregamento distribuído resultante da combinação ELU1 é dado pela Equação 19.

$$F_d = 1,25 * 0,51225 + 1,5 * 0,51225 = 1,41 \text{ kN/m}$$

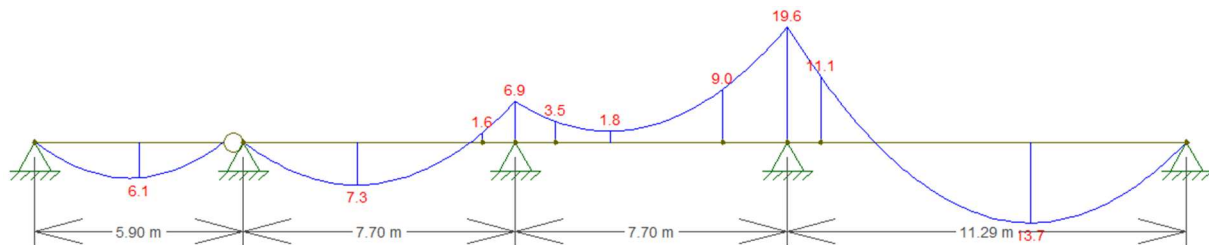
Os valores do carregamento distribuído aplicado nas terças para a combinação ELU1 estão apresentados na Figura 19. A partir da modelagem desenvolvida no programa FTOOL, foram obtidos os momentos fletores solicitantes máximos em cada vão, apresentados na Figura 20.

Figura 19 – Carregamento devido à ELU1



Fonte: Autor (2026)

Figura 20 – Momentos fletores máximos devidos à ELU1, em kN.m



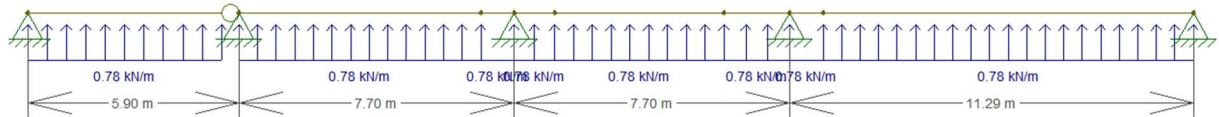
Fonte: Autor (2026)

A segunda combinação, denominada ELU2, considera a atuação simultânea da carga permanente (CP) e da ação do vento de sucção. Como a sucção do vento possui intensidade superior ao peso próprio da cobertura, a carga permanente passa a atuar de forma favorável, reduzindo o efeito resultante do carregamento. Dessa forma, conforme previsto pela ABNT NBR 14762:2010, foi adotado para a carga permanente o coeficiente de ponderação $\gamma_g = 1,0$. Para a ação do vento, classificada como ação variável principal, foi utilizado o coeficiente de ponderação $\gamma_q = 1,4$, conforme os valores apresentados na Tabela 4 para combinações últimas normais. Assim, o carregamento distribuído resultante da combinação ELU2 é dado pela Equação 19.

$$F_d = 1,0 * 0,51225 - 1,4 * 0,92205 = -0,78 \text{ kN/m}$$

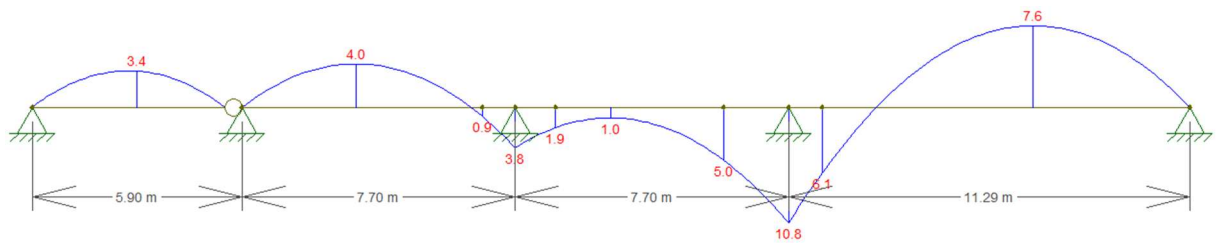
Os valores do carregamento distribuído aplicado nas terças devido à combinação ELU2 estão apresentados na Figura 21. A partir dessa condição de carregamento, foram obtidos no programa FTOOL os momentos fletores solicitantes máximos em cada vão, apresentados na Figura 22.

Figura 21 - Carregamento devido à ELU2



Fonte: Autor (2026)

Figura 22 – Momentos fletores máximos devidos à ELU2, em kN.m



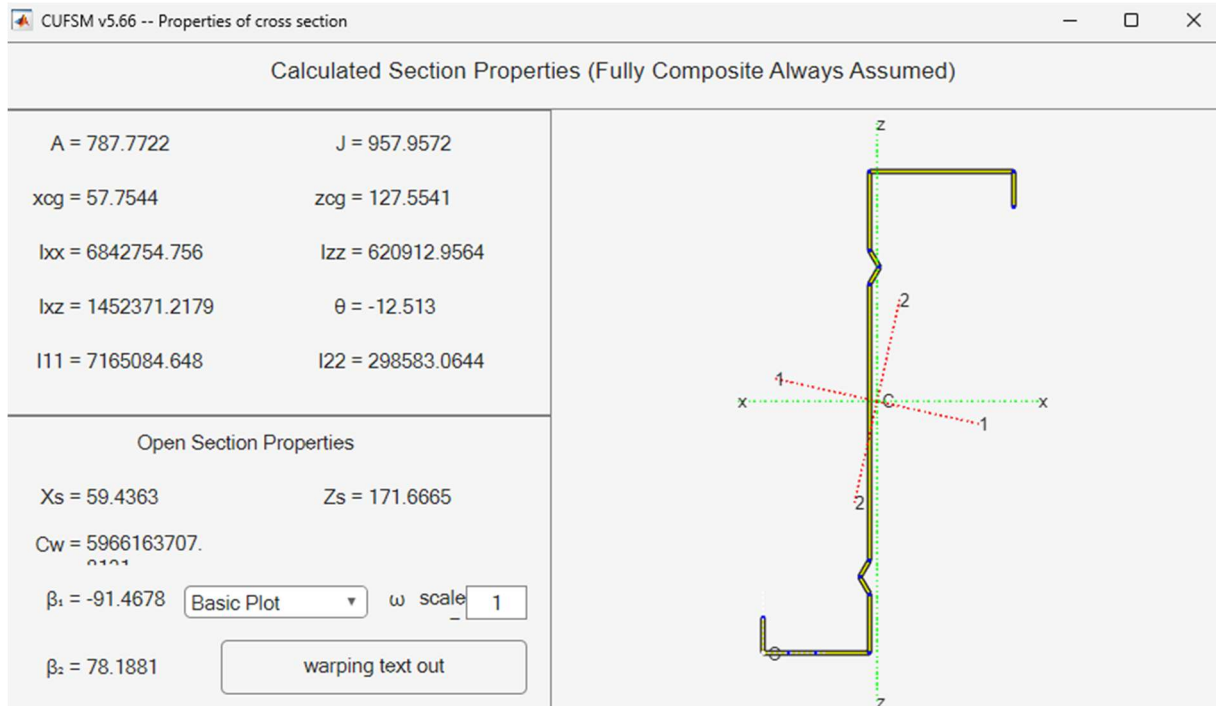
Fonte: Autor (2026)

Com a determinação dos momentos fletores solicitantes para as combinações do Estado Limite Último, torna-se possível iniciar a verificação da capacidade resistente das terças. Para isso, é necessário determinar inicialmente as propriedades geométricas das seções analisadas, as quais servirão de base para o cálculo dos momentos resistentes, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 14762:2010.

4.2.2 Propriedades geométricas dos perfis

Para a seção simples, representativa da região central dos vãos, as propriedades geométricas foram obtidas por meio do programa CUFSM, utilizando a geometria real do perfil Z enrijecido empregado no projeto (ZAE 245). A Figura 23 apresenta a seção analisada e os principais parâmetros geométricos calculados pelo programa.

Figura 23 – Propriedades da seção ZAE 245 em milímetros



Fonte: Autor (2026)

A partir dos resultados fornecidos pelo programa, foram obtidos parâmetros importantes para os cálculos de estabilidade, como área da seção transversal, momentos de inércia em relação aos eixos principais, constante de torção de Saint-Venant (J), constante de empenamento (C_w), módulo resistente elástico (W_x) e raios de giração. Essas propriedades são utilizadas diretamente nas equações do Método da Resistência Direta e influenciam significativamente a resistência da seção aos diferentes modos de flambagem. As propriedades da seção ZAE 245 são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Propriedades da seção ZAE 245

$A = 7,88 \text{ cm}^2$
$I_x = 684,28 \text{ cm}^4$
$I_y = 62,09 \text{ cm}^4$
$J = 0,096 \text{ cm}^4$
$C_w = 5966,16 \text{ cm}^6$
$W_x = \frac{I_x}{y_{cg}} = \frac{684,28}{12,76} = 53,65 \text{ cm}^3$
$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{684,43}{7,88}} = 9,32 \text{ cm}$

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{62,09}{7,88}} = 2,81 \text{ cm}$$

$$x_0 = x_s - x_{cg} = 5,94 - 5,78 = 0,17 \text{ cm}$$

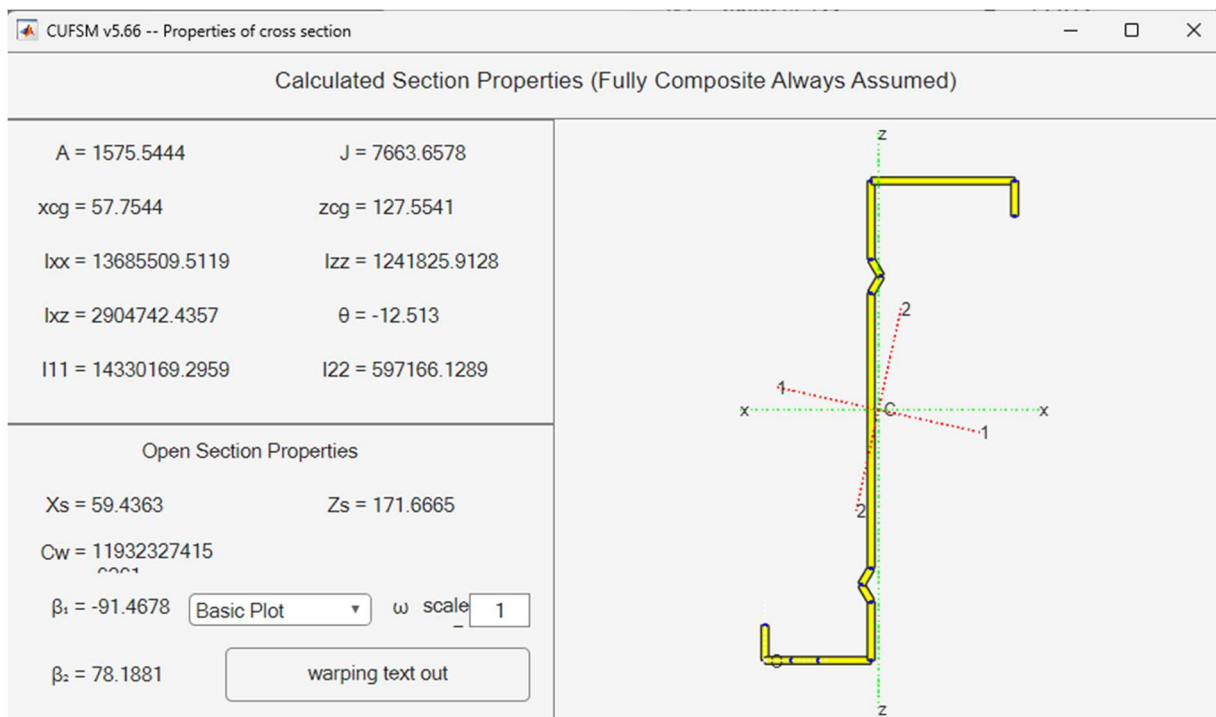
$$y_0 = y_s - y_{cg} = 17,17 - 12,76 = 4,41 \text{ cm}$$

$$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2} = \sqrt{9,32^2 + 2,81^2 + 0,17^2 + 4,41^2} = 10,69 \text{ cm}$$

Fonte: Autor (2026)

Na região dos apoios, devido à existência do transpasse entre terças consecutivas, a seção resistente passa a ser composta por dois perfis trabalhando em conjunto. Para representar adequadamente essa condição, foi modelada no CUFSM uma seção equivalente com espessura dobrada (2ZAE 245), mantendo-se as demais características geométricas originais. As propriedades obtidas para essa condição são apresentadas na Figura 24.

Figura 24 – Propriedades da seção 2ZAE 245



Fonte: Autor (2026)

Como esperado, a seção duplicada apresentou aumento significativo da área transversal, dos momentos de inércia, do módulo resistente e da constante de empenamento, resultando em maior rigidez e capacidade resistente quando comparada à seção simples. Essas propriedades foram empregadas nos cálculos dos momentos resistentes sobre os apoios, enquanto as

propriedades da seção simples foram utilizadas para a análise das regiões centrais dos vãos. As propriedades da seção 2ZAE 245 são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Propriedades da seção 2ZAE 245

$A = 15,76 \text{ cm}^2$
$I_x = 1368,55 \text{ cm}^4$
$I_y = 124,18 \text{ cm}^4$
$J = 0,766 \text{ cm}^4$
$C_w = 11932,33 \text{ cm}^6$
$W_x = \frac{I_x}{y_{cg}} = \frac{1368,55}{12,76} = 107,29 \text{ cm}^3$
$r_x = \sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{1368,55}{15,76}} = 9,32 \text{ cm}$
$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{124,18}{15,76}} = 2,81 \text{ cm}$
$x_0 = x_s - x_{cg} = 5,94 - 5,78 = 0,17 \text{ cm}$
$y_0 = y_s - y_{cg} = 17,17 - 12,76 = 4,41 \text{ cm}$
$r_0 = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + x_0^2 + y_0^2} = \sqrt{9,32^2 + 2,81^2 + 0,16^2 + 4,41^2} = 10,69 \text{ cm}$

Fonte: Autor (2026)

Com as propriedades geométricas definidas para ambas as situações, foi possível proceder à determinação dos momentos resistentes associados aos modos de flambagem global, local e distorcional, conforme os procedimentos do Método da Resistência Direta apresentados na ABNT NBR 14762:2010.

4.2.3 Flambagem lateral com torção (M_{Re})

A resistência à flambagem lateral com torção foi determinada por meio do Método da Resistência Direta, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 14762:2010. Inicialmente, foram calculadas as cargas críticas elásticas globais associadas à flexão em torno do eixo de menor inércia (N_{ey}) e à torção (N_{ez}), utilizando as propriedades geométricas obtidas no programa CUFSM e o comprimento destravado correspondente à região analisada.

Para a seção simples, localizada na região central dos vãos, foi adotado o comprimento destravado entre travamentos laterais, apresentado na Figura 14. A força crítica elástica por flexão em torno do eixo y foi calculada pela Equação 7. Em seguida, determinou-se a força

crítica elástica associada à torção, dada pela Equação 8. Os valores obtidos são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Cálculo das forças críticas elásticas para a seção ZAE 245

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 * 20000 * 62,09}{(185,6)^2} = 355,80 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right]$$

$$N_{ez} = \frac{1}{10,69^2} \left[\frac{\pi^2 * 20000 * 5966,16}{(185,6)^2} + 7700 * 0,096 \right] = 305,74 \text{ kN}$$

Fonte: Autor (2026)

Com os valores de N_{ey} e N_{ez} , calculou-se o momento crítico elástico de flambagem lateral com torção (M_e), dado pela Equação 5. Para isso, foi necessário determinar previamente o fator de modificação para diagramas de momentos não uniformes (C_b), dado pela equação 9, obtido a partir dos momentos fletores fornecidos pelo programa FTOOL. O cálculo é apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 – Cálculo do fator de modificação C_b e do momento crítico elástico para a seção ZAE 245

$$C_b = \frac{12,5 M_{MAX}}{2,5 M_{MAX} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C}$$

$$C_b = \frac{12,5 * 13,7}{2,5 * 13,7 + 3 * 5,99 + 4 * 10,29 + 3 * 12,79} = 1,3$$

$$M_e = 0,5 * C_b * r_0 (N_{ey} * N_{ez})^{0,5}$$

$$M_e = 0,5 * 1,3 * 10,69 (355,8 * 305,74)^{0,5} = 2291,32 \text{ kNcm}$$

Fonte: Autor (2026)

Posteriormente, foi determinado o índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global (λ_0), utilizado para avaliar os efeitos da instabilidade global sobre a resistência da seção, dado pela Equação 3. O Quadro 5 apresenta o cálculo do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global (λ_0).

De acordo com o fornecedor do perfil de terça, os perfis são fabricados com aço zincado ZAR 345, com resistência ao escoamento mínima de 345 MPa.

Quadro 5 – Cálculo do índice de esbeltez reduzido associado à flambagem global (λ_0) para a seção ZAE 245

$$\lambda_0 = \left(\frac{W_{fy}}{M_e} \right)^{0,5}$$

$$\lambda_0 = \left(\frac{53,65 \cdot 34,5}{2291,32} \right)^{0,5} = 0,90$$

Fonte: Autor (2026)

Sendo assim, tem-se que $0,6 < \lambda_0 \leq 1,336$ e, portanto, o momento fletor resistente referente à flambagem lateral com torção, foi calculado de acordo com a Equação 2 apresentado no Quadro 6.

Quadro 6 – Cálculo do momento resistente referente à flambagem lateral com torção para a seção ZAE 245

$$M_{Re} = 1,11(1 - 0,278\lambda_0^2) W_{fy}$$

$$M_{Re} = 1,11(1 - 0,278 * 0,90^2) 53,65 * 34,5 = 1593,31 \text{ kNcm} = 15,93 \text{ kNm}$$

Fonte: Autor (2026)

O valor encontrado representa a resistência da seção simples na região central do vão, onde ocorre o momento positivo máximo da terça analisada.

Entretanto, devido à existência de transpasse entre as terças, a região dos apoios apresenta uma condição geométrica distinta daquela observada no meio do vão. Nessa região, dois perfis atuam conjuntamente, formando uma seção composta com propriedades geométricas superiores às da seção simples. Dessa forma, torna-se necessária uma nova avaliação da resistência à flambagem lateral com torção, utilizando as propriedades da seção dupla apresentadas na Figura 24.

Para essa condição, foram repetidos os procedimentos anteriormente descritos, adotando-se as propriedades geométricas da seção composta e o comprimento destravado correspondente à região de transpasse mais crítica. Inicialmente, calcularam-se as forças críticas elásticas N_{ey} e N_{ez} , conforme Quadro 7.

Quadro 7 – Cálculo das forças críticas elásticas para a seção 2ZAE 245

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 EI_y}{(K_y L_y)^2}$$

$$N_{ey} = \frac{\pi^2 * 20000 * 124,18}{(257,9)^2} = 368,54 \text{ kN}$$

$$N_{ez} = \frac{1}{r_0^2} \left[\frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L_z)^2} + GJ \right]$$

$$N_{ez} = \frac{1}{10,69^2} \left[\frac{\pi^2 * 20000 * 11932,33}{(257,9)^2} + 7700 * 0,766 \right] = 361,66 \text{ kN}$$

Fonte: Autor (2026)

Em seguida, determinou-se o momento crítico elástico M_e , o índice de esbeltez reduzido λ_0 e, por fim, o momento resistente M_{Re} (Quadro 8).

Quadro 8 – Cálculo do momento crítico elástico M_e , do índice de esbeltez reduzido λ_0 e do momento resistente M_{Re} para a seção 2ZAE

$$C_b = \frac{12,5 M_{MAX}}{2,5 M_{MAX} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C}$$

$$C_b = \frac{12,5 * 19,6}{2,5 * 19,6 + 3 * 11,3 + 4 * 13,8 + 3 * 16,6} = 1,3$$

$$M_e = 0,5 * C_b * r_0 (N_{ey} * N_{ez})^{0,5}$$

$$M_e = 0,5 * 1,3 * 10,69 (368,54 * 361,66)^{0,5} = 2536,31 \text{ kNcm}$$

$$\lambda_0 = \left(\frac{W_{fy}}{M_e} \right)^{0,5}$$

$$\lambda_0 = \left(\frac{107,29 * 34,5}{2536,31} \right)^{0,5} = 1,21$$

$$M_{Re} = 1,11 (1 - 0,278 \lambda_0^2) W_{fy}$$

$$M_{Re} = 1,11 (1 - 0,278 * 1,21^2) 107,29 * 34,5 = 2441,73 \text{ kNcm} = 24,42 \text{ kNm}$$

Fonte: Autor (2026)

Observa-se que a seção composta apresentou resistência superior à seção simples, resultado esperado em função do aumento significativo da área, dos momentos de inércia e do módulo resistente proporcionado pelo transpasse entre perfis.

4.2.4 Flambagem local (M_{RI})

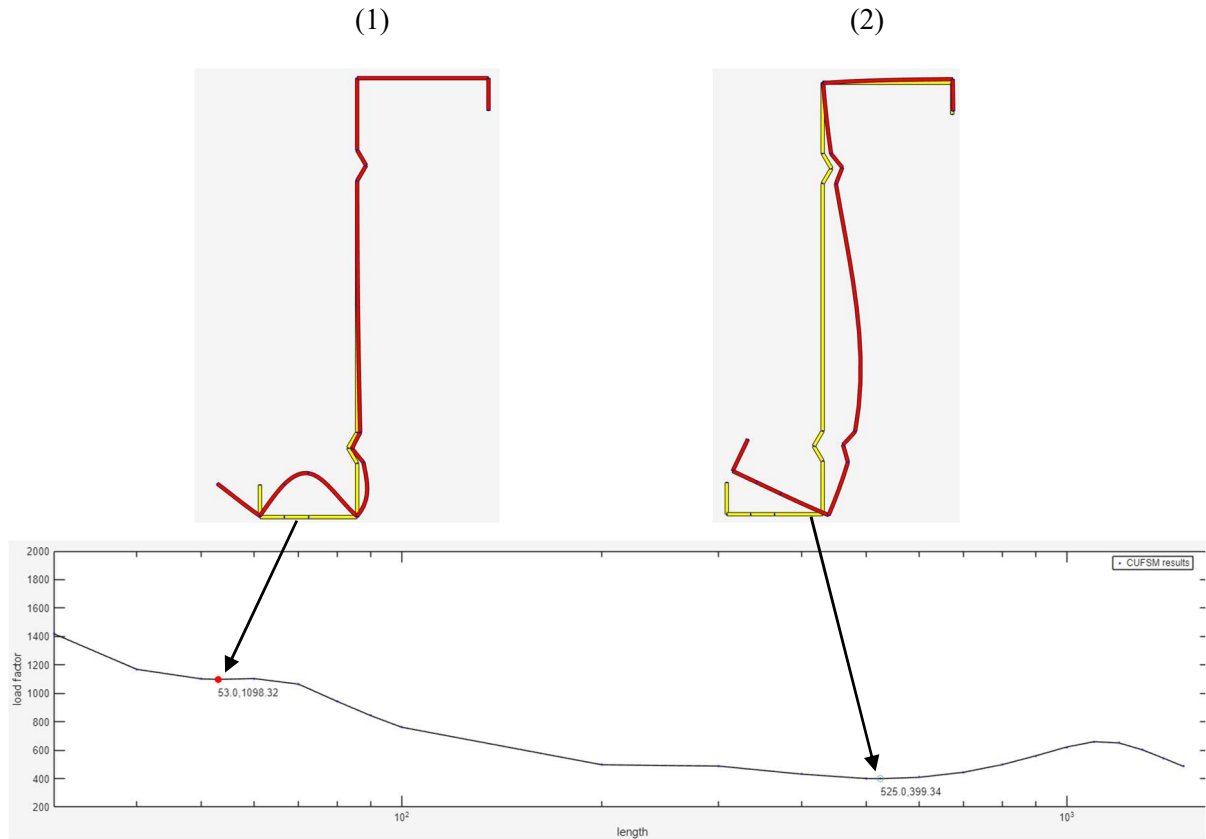
Para a seção simples, localizada no meio do vão, foi gerada a curva de assinatura apresentada na Figura 25. Nessa curva são identificados dois pontos de mínimo, correspondentes às tensões críticas elásticas associadas aos modos de flambagem local (1) e flambagem distorcional (2). A identificação de cada modo de instabilidade foi realizada por meio da análise das respectivas formas deformadas do perfil, também apresentadas na Figura 25, permitindo distinguir se o ponto da curva corresponde à flambagem local ou à flambagem distorcional.

Cada ponto da curva é definido por duas informações: a abscissa, que representa o comprimento de meia onda crítico, correspondente ao comprimento característico da deformação associado ao respectivo modo de flambagem, em milímetros, e a ordenada, que representa a tensão crítica elástica necessária para que essa instabilidade ocorra, em MPa. Dessa forma, a curva de assinatura permite identificar, para diferentes comprimentos de meia onda, a tensão crítica correspondente e o modo de instabilidade predominante.

Para o modo de flambagem local, foi obtida uma tensão crítica elástica de $\sigma_l = 1098,3 \text{ MPa}$, correspondente ao ponto (1) da Figura 25. Esse valor foi utilizado na determinação do momento crítico elástico local (M_l), através da Equação 12 (Quadro 9).

Com o valor do momento crítico elástico definido, foi calculado o índice de esbeltez reduzido local (λ_l), utilizado para avaliar a influência da flambagem local sobre a resistência da seção. Esse valor foi calculado a partir da Equação 11, apresentado no Quadro 10.

Figura 25 – Tensões críticas local (1) e distorcional (2) para a seção ZAE 245



Fonte: Autor (2026)

Quadro 9 – Cálculo do momento crítico elástico local (M_l) para a seção ZAE 245

$$M_l = W_x * \sigma_l$$

$$M_l = 53,65 * 109,83 = 5891,93 \text{ kNcm}$$

Fonte: Autor (2026)

Quadro 10 – Cálculo do índice de esbeltez reduzido local (λ_l) para a seção ZAE 245

$$\lambda_l = \left(\frac{M_{Re}}{M_l} \right)^{0,5}$$

$$\lambda_l = \left(\frac{1593,31}{5891,93} \right)^{0,5} = 0,52$$

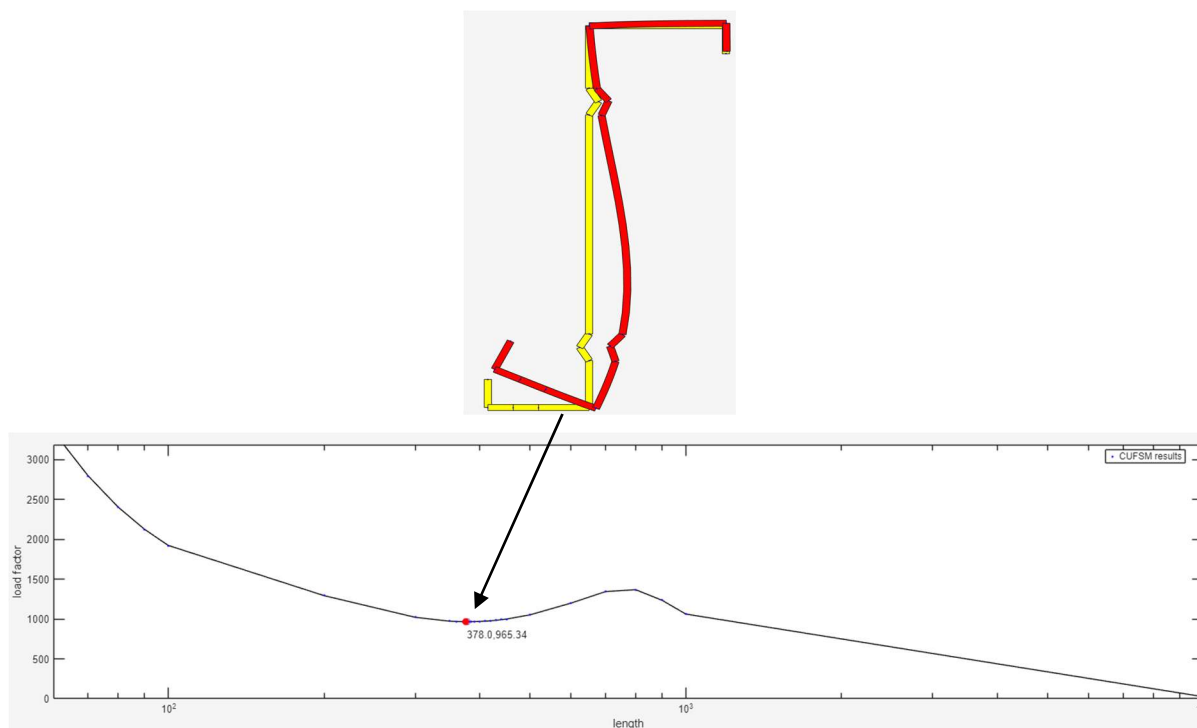
Fonte: Autor (2026)

Sendo $\lambda_l \leq 0,776$, tem-se que o valor característico do momento fletor associado à flambagem local (M_{Rl}), de acordo com a Equação 10, é igual ao valor do momento fletor crítico associado à flambagem global, portanto, $M_{Rl} = 15,93 \text{ kNm}$.

O resultado encontrado representa a resistência da seção simples considerando exclusivamente os efeitos da instabilidade local.

Para a seção composta, correspondente à região dos apoios, foi realizada uma nova análise no programa CUFSM utilizando as propriedades geométricas da seção duplicada. A curva de resistência obtida para essa condição está apresentada na Figura 26.

Figura 26 – Tensão crítica distorcional da seção 2ZAE 245



Fonte: Autor (2026)

Observou-se que, para a seção composta analisada, não foi identificado modo local de flambagem, visto que temos apenas um valor de tensão crítica elástica, representada por uma instabilidade distorcional da seção. Esse comportamento pode ser atribuído ao aumento da rigidez proporcionado pela sobreposição dos perfis, que reduz significativamente a suscetibilidade da seção à instabilidade local.

Dessa forma, conforme previsto pelo Método da Resistência Direta, o momento resistente associado à flambagem local foi adotado igual ao momento resistente global calculado anteriormente, ou seja, $M_{Rl} = 24,42 \text{ kNm}$.

Esse resultado evidencia a influência positiva do transpasse sobre o comportamento da seção, reduzindo a relevância da flambagem local como modo governante de dimensionamento.

4.2.5 Flambagem distorcional (M_{Rdist})

A flambagem distorcional caracteriza-se pela deformação conjunta da mesa comprimida, do enrijecedor e de parte da alma do perfil, promovendo alterações na geometria da seção transversal. Em perfis formados a frio, esse modo de instabilidade pode exercer influência significativa na resistência estrutural, especialmente em seções dotadas de elementos de enrijecimento.

Para a seção simples, a tensão crítica elástica associada ao modo distorcional (σ_{dist}) foi obtida por meio da curva de resistência gerada no programa CUFSM, apresentada na Figura 25. Com a tensão crítica distorcional fornecida pelo programa de 399,30 MPa, foi calculado o momento crítico elástico distorcional (M_{dist}), representado pela Equação 15 (Quadro 11).

Quadro 11 – Cálculo do momento crítico elástico distorcional (M_{dist}) para a seção ZAE 245

$$M_{dist} = W_x * \sigma_{dist}$$
$$M_{dist} = 53,65 * 39,93 = 2142,08 \text{ kNcm}$$

Fonte: Autor (2026)

Em seguida, foi determinado o índice de esbeltez reduzido distorcional (λ_{dist}), parâmetro utilizado para quantificar a influência desse modo de flambagem na resistência da seção, através da Equação 14, apresentado no Quadro 12.

Quadro 12 – Cálculo do índice de esbeltez reduzido distorcional (λ_{dis}) para a seção ZAE 245

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{W_{fy}}{M_{dist}} \right)^{0,5}$$
$$\lambda_{dist} = \left(\frac{53,65 * 34,5}{2142,08} \right)^{0,5} = 0,93$$

Fonte: Autor (2026)

Sendo $0,6 < \lambda_0 \leq 1,336$, o valor do momento resistente associado à flambagem distorcional (M_{Rdist}), de acordo com a Equação 13, é apresentado no Quadro 13.

Quadro 13 – Cálculo do momento resistente distorcional M_{Rdist} para a seção ZAE 245

$$M_{Rdist} = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}} \right) \frac{W_{fy}}{\lambda_{dist}}$$
$$M_{Rdist} = \left(1 - \frac{0,22}{0,93} \right) \frac{53,65 * 34,5}{0,93} = 1519,86 \text{ kNcm} = 15,20 \text{ kNm}$$

Fonte: Autor (2026)

Posteriormente, o mesmo procedimento foi realizado para a seção composta localizada sobre os apoios. Utilizando-se a curva de resistência apresentada na Figura 26, correspondente à seção duplicada, foram obtidas as tensões críticas elásticas necessárias para a determinação do momento crítico distorcional, do índice de esbeltez reduzido e do momento resistente associado a esse modo de instabilidade, conforme Quadro 14.

Quadro 14 – Cálculo do momento resistente distorcional M_{Rdist} para a seção 2ZAE 245

$$M_{dist} = W_x * \sigma_{dist}$$

$$M_{dist} = 109,54 * 96,53 = 10356,88 \text{ kNcm}$$

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{W_{fy}}{M_{dist}} \right)^{0,5}$$

$$\lambda_{dist} = \left(\frac{107,29 * 34,5}{10356,88} \right)^{0,5} = 0,60$$

$$M_{Rdist} = W_{fy}$$

$$M_{Rdist} = 107,29 * 34,5 = 37,02 \text{ kNm}$$

Fonte: Autor (2026)

4.2.6 Momento resistente de cálculo

Ao final desta etapa, foram determinados os momentos resistentes característicos associados aos três modos de instabilidade considerados pelo Método da Resistência Direta — flambagem lateral com torção, flambagem local e flambagem distorcional — tanto para a seção simples quanto para a seção composta. Conforme estabelece a ABNT NBR 14762:2010, o momento resistente característico da seção é governado pelo modo de instabilidade que resulta no menor valor de resistência.

Para a seção simples ZAE 245, verificou-se que o menor momento resistente característico foi associado à flambagem distorcional, tornando esse o modo crítico de instabilidade para a seção. Já para a seção composta 2ZAE 245, correspondente à região de transpasse, o menor momento resistente foi obtido para a flambagem lateral com torção, passando esse modo a governar a resistência da seção.

A partir desse valor, foi determinado o momento resistente de cálculo da seção, M_{Rd} , por meio da aplicação do coeficiente de resistência $\gamma = 1,10$, conforme apresentado pela Equação 1. Os cálculos dos momentos resistentes de cálculo para a seção simples e para a seção composta são apresentados nos Quadros 15 e 16, respectivamente.

Quadro 15 – Cálculo do momento resistente de cálculo para a seção ZAE 245

$$M_{Rd} = \frac{M_{Rk}}{\gamma}$$

$$M_{Rd} = \frac{15,20}{1,1} = 13,82 \text{ kNm}$$

Fonte: Autor (2026)

Quadro 16 – Cálculo do momento resistente de cálculo para a seção 2ZAE 245

$$M_{Rd} = \frac{M_{Rk}}{\gamma}$$

$$M_{Rd} = \frac{24,42}{1,1} = 22,2 \text{ kNm}$$

Fonte: Autor (2026)

Para a seção simples, localizada no meio do vão, o momento resistente obtido foi comparado ao momento fletor solicitante máximo $M_{Sd}=13,7$ kNm. Já para a seção composta, correspondente à região do transpasse sobre os apoios, a comparação foi realizada com o momento solicitante máximo $M_{Sd}=19,6$ kNm. Em ambas as situações, verificou-se que os momentos resistentes calculados foram superiores aos respectivos momentos solicitantes, atendendo ao critério $M_{Rd} \geq M_{Sd}$ estabelecido pela norma. Dessa forma, conclui-se que o perfil analisado apresenta resistência suficiente para suportar os esforços atuantes, sendo considerado aprovado para as verificações de Estado Limite Último (ELU).

4.3 Análise Comparativa

Após a verificação da seção originalmente especificada no projeto e a determinação de sua capacidade resistente por meio do Método da Resistência Direta, foi realizada uma análise comparativa entre diferentes perfis de aço formados a frio aplicados como terças. O objetivo desta etapa consistiu em avaliar a influência da geometria da seção transversal no comportamento estrutural dos perfis, buscando identificar soluções mais eficientes sob os aspectos de desempenho estrutural e consumo de material.

Para que a comparação entre as seções fosse realizada de forma coerente, foram mantidas constantes todas as condições do projeto original analisado. Dessa forma, todos os perfis foram avaliados considerando os mesmos vãos entre apoios, espaçamento entre linhas de terças, comprimento destravado entre linhas de corrente, condições de apoio, carregamentos

distribuídos atuantes e combinações de ações nos Estados Limites de Serviço e Último. Com isso, garantiu-se que as diferenças observadas nos resultados fossem decorrentes exclusivamente das características geométricas das seções analisadas.

Conforme apresentado no tópico anterior, o perfil originalmente adotado no projeto não atendeu aos critérios de deslocamento estabelecidos para o Estado Limite de Serviço (ELS), tornando necessária a busca por uma nova solução estrutural. Como ponto de partida para essa análise, foi inicialmente estudada uma nova configuração da própria seção ZAE, mantendo sua concepção geométrica original.

A seção ZAE que apresentou melhor desempenho dentre as alternativas analisadas possui altura total de 280 mm, mesas com larguras variáveis de 80 mm e 59 mm, enrijecedores de borda de 18 mm em ambas as mesas e espessura de 1,91 mm. A escolha dessa configuração ocorreu em função de sua capacidade de atender às verificações estruturais com menor incremento geométrico em relação à solução originalmente utilizada.

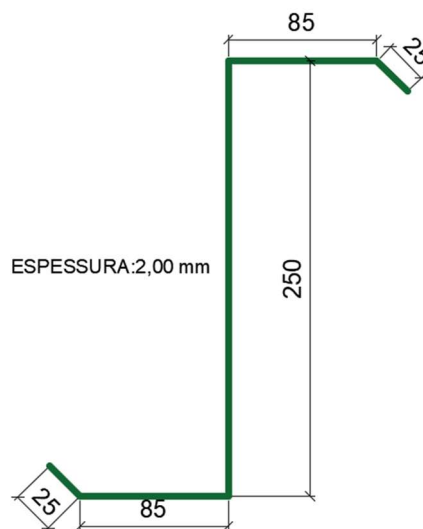
Além da nova seção ZAE, foram analisadas outras três configurações amplamente empregadas em perfis formados a frio para aplicação como terças: o perfil Z₄₅, o perfil Z₉₀ e o perfil U enrijecido (U_e). Para cada uma dessas tipologias foram avaliadas diferentes combinações geométricas, variando parâmetros como altura da alma, largura das mesas, presença de enrijecedores e espessura da chapa. As Figuras 27, 28 e 29 apresentam, respectivamente, as geometrias que apresentaram melhor desempenho estrutural para cada tipo de perfil analisado.

A seção Z₄₅ apresenta comportamento semelhante ao perfil ZAE no que se refere às condições construtivas de montagem, permitindo a execução de transpasse entre perfis nas regiões de máximos momentos negativos, localizadas sobre os apoios. Essa característica possibilita a utilização de seções mais leves ao longo dos vãos, uma vez que o aumento da resistência ocorre apenas nos trechos de maiores solicitações por meio da sobreposição dos perfis. Como consequência, obtém-se uma distribuição mais eficiente do material ao longo da estrutura, reduzindo o peso total do sistema.

Por outro lado, as seções Z₉₀ e U_e não permitem a execução de transpasse da mesma forma que os perfis do tipo Z utilizados neste estudo. Dessa forma, toda a capacidade resistente necessária deve ser fornecida por uma única seção ao longo de toda a extensão da terça, exigindo perfis com maiores propriedades geométricas para atender simultaneamente aos esforços solicitantes nos vãos e sobre os apoios. Em muitos casos, isso conduz à adoção de soluções estruturalmente mais robustas e com maior consumo de aço.

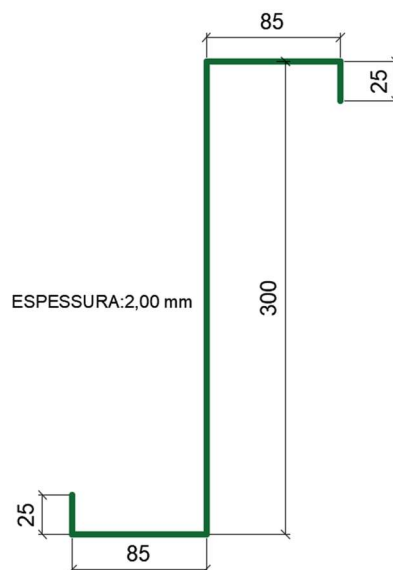
A Tabela 7 apresenta uma comparação entre os perfis selecionados, reunindo os principais parâmetros obtidos nas verificações realizadas. São apresentados o deslocamento vertical máximo obtido na análise estrutural, o deslocamento limite estabelecido pela ABNT NBR 14762:2010, os momentos fletores solicitantes nos trechos de meio de vão e de apoio, bem como os respectivos momentos resistentes de cálculo determinados pelo Método da Resistência Direta. A partir desses resultados, torna-se possível avaliar o desempenho estrutural de cada perfil quanto aos critérios de Estado Limite de Serviço e Estado Limite Último, subsidiando a comparação entre as diferentes geometrias estudadas.

Figura 27 – Perfil Z₄₅ mais eficiente



Fonte: Autor (2026)

Figura 28 – Perfil Z₉₀ mais eficiente



Fonte: Autor (2026)

Figura 29 – Perfil Ue mais eficiente



Fonte: Autor (2026)

Tabela 7 – Análise comparativa entre perfis escolhidos

ANÁLISE COMPARATIVA						
SEÇÃO	$\delta^{m\acute{a}x}$	δ^{lim}	$M_{Sd}^{v\tilde{a}o}$	$M_{Rd}^{v\tilde{a}o}$	M_{Sd}^{apoio}	M_{Rd}^{apoio}
ZAE 245	8,04	6,27	13,8	13,82	19,6	22,20
ZAE 280	5,69	6,27	13,7	15,85	19,6	28,59
Z ₄₅ 250x85x25x2,00	6,14	6,27	13,7	14,70	19,6	39,64
Z ₉₀ 300x85x25x2,00	4,52	6,27	14,9	21,11	16,7	19,77
Ue 300x85x25x2,00	4,06	6,27	14,9	21,10	16,7	17,39

Fonte: Autor (2026)

Além da comparação das propriedades geométricas e da capacidade resistente das seções analisadas, é importante avaliar o consumo de material de cada alternativa, uma vez que esse fator influencia diretamente o custo final da estrutura. Dessa forma, a Tabela 8 apresenta a massa linear, o comprimento total empregado e o peso total de aço necessário para a execução das terças utilizando cada um dos perfis considerados mais eficientes.

Tabela 8 – Análise comparativa do peso total dos perfis escolhidos

ANÁLISE COMPARATIVA			
SEÇÃO	Massa [kg/m]	Comprimento total [m]	Peso total [kg]
ZAE 245	6,07	37,42	227,14
ZAE 280	6,81	37,42	254,83
Z ₄₅ 250x85x25x2,00	7,25	37,42	271,30
Z ₉₀ 300x85x25x2,00	7,96	32,59	259,42
Ue 300x85x25x2,00	7,96	32,59	259,42

Fonte: Autor (2026)

Observa-se que os perfis ZAE e Z₄₅, por permitirem a execução de transpasses sobre os apoios, apresentam um comprimento total maior em relação às seções Z₉₀ e Ue. Em contrapartida, essa solução permite a utilização de perfis de menor massa linear, uma vez que a duplicação da seção ocorre justamente nas regiões de maiores momentos fletores, possibilitando reduzir as dimensões da seção ao longo da maior parte da terça.

Os resultados demonstram que o aumento do comprimento total não implica, necessariamente, em maior consumo de aço. Embora os perfis com transpasse utilizem mais material devido à sobreposição das seções, a redução da massa linear pode compensar esse acréscimo. Isso pode ser observado para a seção ZAE 280, que, mesmo apresentando o maior comprimento total, resultou no menor peso total entre as alternativas analisadas. Já a seção Z₄₅, apesar de também utilizar transpasse, apresentou maior massa linear e, consequentemente, o maior consumo de aço. As seções Z₉₀ e Ue, por sua vez, não utilizam transpasse, porém necessitam de perfis mais robustos ao longo de toda a extensão da terça para atender às solicitações de projeto, resultando em um consumo intermediário de material.

Dessa forma, verifica-se que a escolha da solução mais eficiente deve considerar simultaneamente a resistência estrutural, a geometria da seção e o consumo total de aço, uma vez que a adoção de transpasses pode representar uma alternativa vantajosa quando associada a perfis de menor massa linear.

4.4 Limitações do estudo

Embora a metodologia adotada tenha permitido atingir os objetivos propostos e realizar uma comparação consistente entre diferentes geometrias de perfis formados a frio aplicados como terças, algumas simplificações foram necessárias durante o desenvolvimento deste trabalho.

Uma das principais simplificações refere-se à representação das regiões de transpasse entre as terças no modelo estrutural desenvolvido no programa FTOOL. Nessas regiões, foi adotada uma seção equivalente com o dobro da área e do momento de inércia da seção simples, buscando representar o aumento de rigidez proporcionado pela sobreposição dos perfis. Entretanto, essa abordagem não reproduz integralmente o comportamento real da ligação, uma vez que a interação entre os perfis depende de fatores como a quantidade e a disposição dos parafusos, o espaçamento entre conectores, a rigidez da ligação e a possibilidade de escorregamento relativo entre as chapas.

Outra limitação está relacionada ao emprego de um modelo estrutural bidimensional. A análise realizada no FTOOL considera apenas o comportamento no plano da estrutura, não contemplando possíveis efeitos tridimensionais, como a interação espacial entre terças, telhas, contraventamentos e demais elementos do sistema de cobertura, que podem influenciar a distribuição dos esforços e dos deslocamentos.

Além disso, a determinação das tensões críticas elásticas foi realizada por meio do programa CUFSM, considerando perfis ideais e condições geométricas perfeitas. Dessa forma, não foram considerados efeitos decorrentes de imperfeições geométricas iniciais, tensões residuais provenientes do processo de conformação a frio ou variações nas propriedades mecânicas do material, fatores que podem influenciar o comportamento estrutural observado em situações reais.

Outra limitação refere-se às propriedades geométricas dos perfis ZAE utilizados neste estudo. Diferentemente dos perfis padronizados pela ABNT NBR 6355:2012, os perfis ZAE analisados não possuem tabelas normativas contendo suas propriedades geométricas e mecânicas. Dessa forma, foram adotadas as dimensões fornecidas pelo fabricante, enquanto as propriedades da seção, como área, momentos de inércia e demais parâmetros necessários ao dimensionamento, foram obtidas por meio do programa CUFSM. Embora o software seja amplamente empregado em estudos envolvendo perfis formados a frio e apresente elevada confiabilidade para esse tipo de análise, verificou-se, durante a comparação com os perfis Z90, Z45 e Ue, cujas propriedades são disponibilizadas pela ABNT NBR 6355:2012, a existência de pequenas diferenças entre as propriedades calculadas pelo programa e aquelas apresentadas na norma. Assim, admite-se que diferenças semelhantes também possam existir para os perfis ZAE, constituindo uma limitação inerente à metodologia adotada.

Por fim, ressalta-se que as análises foram desenvolvidas com base em um único estudo de caso, correspondente à cobertura metálica de um supermercado. Embora os resultados obtidos permitam avaliar o desempenho das seções analisadas para essa condição específica, eles não devem ser generalizados para todas as situações de projeto, sendo recomendada a realização de estudos envolvendo diferentes geometrias de cobertura, condições de carregamento, vãos e configurações estruturais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar o comportamento estrutural de terças em perfis formados a frio avaliando os Estados Limites de Serviço e Último, utilizando como estudo de caso um projeto real de cobertura em aço. Além da verificação da seção originalmente especificada em projeto, foi realizada uma análise comparativa entre diferentes geometrias de perfis, buscando identificar soluções estruturalmente eficientes e com menor consumo de material.

As verificações realizadas pelo Método da Resistência Direta evidenciaram a influência da geometria da seção no comportamento dos perfis frente aos diferentes modos de instabilidade. Em especial, observou-se que a presença de enrijecedores intermediários na alma dos perfis ZAE reduz significativamente a suscetibilidade à flambagem local. Para a seção ZAE245 analisada, tanto na região de perfil simples quanto na região de perfil duplicado sobre os apoios, o momento resistente associado à flambagem local foi superior ao obtido para a flambagem global. Dessa forma, conforme estabelece a ABNT NBR 14762:2010, o modo governante passou a ser a flambagem global. Esse comportamento demonstra que o enrijecedor intermediário aumenta a rigidez da seção transversal, permitindo a utilização de chapas de menor espessura sem comprometimento da capacidade resistente, contribuindo para o desenvolvimento de perfis estruturalmente mais leves.

Em contrapartida, a presença de enrijecedores intermediários na alma também altera o modo de instabilidade predominante da seção. Ao aumentar significativamente a rigidez da alma e reduzir a suscetibilidade à flambagem local, a flambagem distorcional passa a exercer maior influência sobre a capacidade resistente do perfil. Esse comportamento foi observado para o perfil ZAE245 analisado, em que, para a seção simples localizada no meio do vão, o momento resistente associado à flambagem distorcional foi inferior aos obtidos para as flambagens global e local, tornando-se o modo crítico de dimensionamento. Entretanto, para a seção duplicada sobre os apoios, o aumento da espessura efetiva decorrente do transpasse proporcionou maior rigidez aos elementos da seção transversal, elevando a resistência à flambagem distorcional. Como consequência, esse modo de instabilidade deixou de ser governante, evidenciando que o aumento da espessura constitui uma solução eficiente para reduzir a influência da flambagem distorcional em perfis com enrijecedores intermediários.

Outro aspecto importante observado foi a influência do transpasse entre terças. Os perfis ZAE e Z₄₅ apresentam a possibilidade de sobreposição sobre os apoios, formando uma seção duplicada exatamente na região onde ocorrem os maiores momentos fletores negativos. Esse

aumento localizado da rigidez possibilita a adoção de uma seção mais leve no restante do vão, onde os esforços são menores. Além disso, o transpasse promove uma redistribuição dos esforços ao longo da estrutura, reduzindo os momentos positivos no meio do vão e aumentando a eficiência estrutural do conjunto. Essa característica representa uma importante vantagem desses perfis quando comparados às seções que não admitem sobreposição.

Por outro lado, os perfis Z_{90} e U_e não permitem a execução de transpasse entre as terças, exigindo que toda a barra possua capacidade resistente suficiente para suportar os momentos máximos atuantes. Consequentemente, torna-se necessária a utilização de perfis com maiores dimensões e massa linear. Além disso, a inexistência do transpasse exige a utilização de chapas e dispositivos de ligação específicos entre as terças, tornando a montagem estrutural mais complexa e potencialmente aumentando os custos de fabricação e execução da cobertura.

Embora os perfis ZAE apresentem vantagens estruturais importantes, sua fabricação é mais complexa devido à presença dos enrijecedores intermediários na alma, que aumentam a quantidade de dobras durante o processo de conformação. Esse fator eleva o custo de produção quando comparado a perfis convencionais. Dessa forma, para que sua utilização seja economicamente justificável, é fundamental que a redução do consumo de aço obtida pela maior eficiência estrutural compense esse custo adicional de fabricação.

As verificações realizadas para o perfil originalmente especificado no projeto evidenciaram que a seção ZAE245 atendeu aos critérios do Estado Limite Último, apresentando momentos resistentes superiores aos momentos solicitantes em todas as verificações. Entretanto, essa seção não atendeu ao Estado Limite de Serviço, uma vez que a terça de maior vão apresentou deslocamento vertical superior ao limite estabelecido pela ABNT NBR 14762:2010 para a combinação ELS1. Diante desse resultado, foi necessária a seleção de uma nova seção para a continuidade das análises comparativas, sendo adotado o perfil ZAE280, que apresentou desempenho satisfatório tanto para o Estado Limite de Serviço quanto para o Estado Limite Último.

A análise comparativa demonstrou que a menor massa linear de um perfil nem sempre resulta no menor consumo total de aço na estrutura. Embora os perfis ZAE e Z45 sejam individualmente mais leves, a necessidade de transpasse aumenta o comprimento total de perfis empregados na cobertura. Conforme apresentado na Tabela 8, o perfil ZAE280 apresentou o menor consumo total de aço, com 254,83 kg, enquanto os perfis Z_{90} e U_e consumiram 259,42 kg, representando uma diferença de aproximadamente 2%. Esse resultado demonstra que, para a geometria analisada, a elevada eficiência estrutural proporcionada pelo transpasse foi parcialmente compensada pelo aumento do comprimento total de perfis utilizados.

Entretanto, é importante destacar que essa diferença reduzida decorre da necessidade de substituição da seção originalmente especificada no projeto. Caso o perfil ZAE245 tivesse atendido simultaneamente aos Estados Limite de Serviço e Último, sua massa linear seria significativamente menor, resultando em uma economia estimada da ordem de 15% em relação às soluções sem transpasse. Esse resultado evidencia o potencial dos perfis ZAE quando empregados em situações nas quais os critérios de deslocamento não sejam determinantes para o dimensionamento.

Por fim, conclui-se que a escolha da seção mais adequada para terças deve considerar simultaneamente aspectos de resistência, estabilidade, deformabilidade, facilidade construtiva e custo de fabricação. Os resultados obtidos demonstram que os perfis ZAE constituem uma alternativa estruturalmente eficiente, especialmente pela maior resistência à flambagem local proporcionada pelos enrijecedores intermediários e pela possibilidade de utilização de transpasses. Entretanto, sua aplicação deve ser analisada em conjunto com os custos de fabricação e com as exigências de desempenho em serviço, de forma que a solução adotada represente o melhor equilíbrio entre segurança estrutural, economia de material e viabilidade executiva.

6 REFERÊNCIAS

ALMATRAFI, M. **Behaviour, optimisation and design of cold-formed steel purlins**. PhD Thesis, University of Birmingham, 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6355:2012**. Perfis estruturais de aço formados a frio. Rio de Janeiro, 2012.

CARVALHO, P. R. M. de; GRIGOLETTI, G.; BARBOSA, G. D. **Curso Básico de Perfis de Aço Formados a Frio**. 3. ed. Porto Alegre: Rafael Tarcísio Forneck, 2020. 384 p.

CBCA. **Estruturas compostas por perfis formados a frio: dimensionamento pelo método das larguras efetivas e aplicação conforme ABNT NBR 14762:2010 e ABNT NBR 6355:2012**. Rio de Janeiro: CBCA, 2014. Disponível em: <https://www.cbca-acobrasil.org.br/site/biblioteca/estruturas-compostas-por-perfis-formados-a-frio>. Acesso em: 15 mar. 2026.

FERREIRA, S. L. **Análise numérica e dimensionamento de perfis de aço formados a frio submetidos à compressão: seção composta em duplo “u enrijecido” afastados**. Trabalho de Conclusão de Curso, UFJF, Juiz de Fora, 2025.

GUIMARÃES, V. M.; GILBERT, B. P.; TALEBIAN, N.; Wang, B. **Shape optimisation of singly-symmetric cold-formed steel purlins**. *Thin-Walled Structures*, v. 159, 2021.

HANCOCK, G. J.; MURRAY, T. M.; ELLIFRITT, D. S. **Cold-Formed Steel Structures to the AISI Specification**. New York: Marcel Dekker, 2001.

JACOB, Felipe. **Quais são as características das coberturas em estruturas metálicas? 2025**. Disponível em: <https://calculistadeaco.com.br/tercas-de-boca-para-cima-ou-para-baixo-qual-o-jeito-certo-de-instalar/>. Acesso em: 25 mai. 2026.

MOLITERNO, A.; BRASIL, R. M. L. R. d. F. **Elementos para projetos em perfis leves de aço**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

PHAM, C. H.; HANCOCK, G. J. **Direct Strength Design of Cold-Formed Purlins.** *Journal of Structural Engineering*, 2009.

PHAM, N. H.; VU, Q. A. **Effects of stiffeners on the capacities of cold-formed steel channel members.** *Steel Construction*, 2021.

SCHAFER, B. W. **Review: the direct strength method of cold-formed steel member design.** *Journal of Constructional Steel Research*, v. 64, n. 7-8, p. 766-778, 2008.

SILVA, J. M. M.; MALITE, M. **Longitudinally stiffened web purlins under shear and bending moment.** *Thin-Walled Structures*, v. 148, p. 106616, 2020.

YU, W. W.; LABOUBE, R. A. **Cold-Formed Steel Design. 4. ed.** Hoboken: John Wiley & Sons. 2010.