

AValiação de Segurança Estrutural de Vigas de Piso em Light Steel Frame (LSF) sob Flexão e Deslocamento

STRUCTURAL SAFETY ASSESSMENT OF FLOOR BEAMS IN LIGHT STEEL FRAME (LSF) UNDER BENDING AND DISPLACEMENT

Júlio Ícaro Quirino Tavares*

RESUMO

O sistema Light Steel Frame (LSF) tem se destacado como uma alternativa construtiva eficiente, devido à sua leveza, rapidez de execução e menor impacto ambiental. Este trabalho analisa o comportamento estrutural de vigas de piso em edificações residenciais desse sistema, considerando os estados-limites último (relativo à flexão) e de serviço (relativo ao deslocamento excessivo). Foram verificados parametricamente perfis do tipo Ue enrijecido, com dois travamentos laterais posicionados nos terços médios do vão, por meio de ferramentas de modelagem numérica e do Método da Resistência Direta. Como contribuição, são propostos gráficos para o pré-dimensionamento de vigas no sistema estrutural analisado, visando auxiliar no projeto de estruturas em LSF.

Palavras-chave: Light Steel Frame (LSF), vigas de piso, estados limites, Método da Resistência Direta.

ABSTRACT

The Light Steel Frame (LSF) system has emerged as an efficient construction alternative due to its lightweight, rapid execution, and reduced environmental impact. This study investigates the structural behavior of floor beams in residential buildings using the LSF system, considering both ultimate limit states (related to bending) and serviceability limit states (related to excessive deformation). A parametric analysis was conducted on lipped channel section, with two lateral bracings positioned at the mid-thirds of the span, using numerical modeling tools and the Direct Strength Method. As a contribution, design charts are proposed for the preliminary sizing of beams in the analyzed structural system, aiming to support the design of LSF structures.

Keywords: Light Steel Frame (LSF), Floor beams, Limit states, Direct Strength Method.

* Graduando em Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, campus Pau dos Ferros/RN, e-mail: julio.tavares@alunos.ufersa.edu.br

1 INTRODUÇÃO

O sistema Light Steel Frame (LSF) tem sido amplamente adotado na construção civil devido à sua capacidade de reduzir prazos e custos, oferecer uma estrutura leve e gerar menos desperdício de material (RODRIGUES; CALDAS, 2016). No entanto, os elementos estruturais do LSF, sendo compostos por perfis formados a frio (PFF), estão sujeitos a instabilidades estruturais que necessitam de uma análise rebuscada para garantir seu desempenho adequado.

Tem-se como foco a análise estrutural de vigas de piso de uma edificação residencial de dois pavimentos no sistema LSF. A investigação considera os estados-limites último (relativo à flexão) e de serviço (relativo ao deslocamento excessivo), visando avaliar a segurança e a eficiência desses elementos estruturais. Para isso, são analisados perfis do tipo U enrijecido (Ue), com travamentos laterais posicionados nos terços médios do vão, utilizando ferramentas de modelagem e análise numérica, com base no Método da Resistência Direta (MRD).

O MRD é uma abordagem avançada que permite avaliar a estabilidade de perfis formados a frio considerando os principais modos de flambagem: lateral com torção (FLT), local e distorcional. A interação entre esses modos pode comprometer a capacidade resistente da viga e, portanto, seu comportamento estrutural deve ser devidamente analisado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010). Esse método utiliza a curva de assinatura para determinar as cargas críticas e as esbeltezes reduzidas associadas aos diferentes modos de flambagem, permitindo uma avaliação mais precisa da segurança estrutural.

Diante disso, busca-se verificar a adequação das vigas de piso em LSF aos critérios normativos estabelecidos pela ABNT NBR 14762 (2010). Como contribuição, foi elaborado um gráfico de pré-dimensionamento, que pode auxiliar projetistas na escolha de perfis mais adequados para vigas de piso em edificações desse sistema estrutural. Além disso, foram utilizados os gráficos de pré-dimensionamento para perfis do sistema LSF desenvolvidos por Caldas e Rodrigues (2015), como efeito de comparação com a análise paramétrica realizada, demonstrando a eficácia do modelo adotado na seleção de perfis para diferentes vãos estruturais.

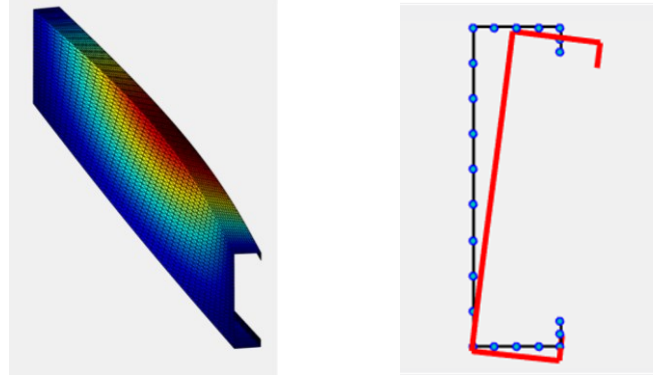
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Verificação do Estado Limite Último à flexão

2.1.1 Flambagem Lateral com Torção

A flambagem lateral com torção é um estado limite último decorrente da perda de estabilidade lateral da viga em função do giro por torção da seção transversal acompanhado de deslocamento lateral do banzo comprimido, tal como representado no perfil na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Comportamento do perfil submetido à Flambagem Lateral com Torção



Fonte: FStr v.1.4.0 (2024).

Segundo a NBR 14762 (2010), o momento crítico em regime elástico que provoca a Flambagem Lateral com Torção em barras com seção monossimétrica sujeitas a flexão em torno do eixo de maior inércia (eixo x), é dado pela Equação 2.1:

$$M_e = C_b \cdot r_0 \cdot \sqrt{N_{ey} \cdot N_{ez}} \quad \text{Eq. (2.1)}$$

Onde r_0 é o raio giração de polar com $r_0^2 = r_x^2 + r_y^2 + x_0^2$, em que x_0 é a distância do centro de gravidade (CG) ao centro de cisalhamento (CC) na direção do eixo x (ver Figura 2.2); N_{ey} é a força axial de compressão para flambagem elástica por flexão em torno do eixo y; e N_{ez} é a força axial de compressão para flambagem elástica por torção em torno do eixo z. O coeficiente C_b é o fator de modificação para momento fletor não uniforme. Para trechos entre travamentos laterais, e com momento fletor uniforme, o coeficiente C_b é igual a 1,0, por definição do próprio coeficiente.

No caso de trecho destravados com variação do momento fletor, para cada trecho entre travamentos laterais efetivos (ver Figura 2.3), o coeficiente C_b pode ser calculado pela expressão:

$$C_b = \frac{12,5 M_{max}}{2,5M_{max} + 3M_A + 4M_B + 3M_C} \quad \text{Eq. (2.2)}$$

Onde M_{max} é o máximo valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, no trecho entre travamentos laterais analisado; M_A é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, em uma seção a $1/4L_b$ do trecho analisado; M_B é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, em uma seção a $1/2L_b$ do trecho analisado; M_C é o valor do momento fletor solicitante de cálculo, em módulo, em uma seção a $3/4L_b$ do trecho analisado.

Figura 2.2 – Posição do CC em relação ao CG para um perfil Ue

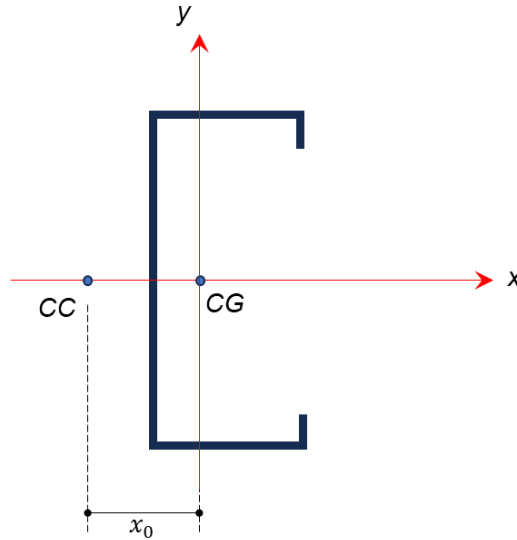
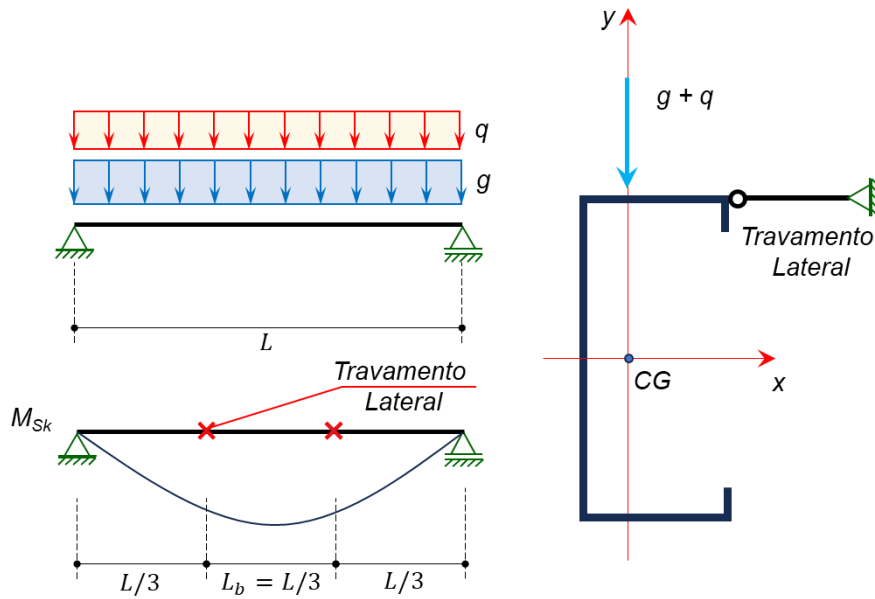


Figura 2.3 – Situação de carregamento e travamento lateral para uma viga biapoíada



Pelo Método da Resistência Direta, a esbeltez reduzida com relação à flambagem lateral é expressa por:

$$\lambda_{FLT} = \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_e}} \quad \text{Eq. (2.3)}$$

Em que W_c é o módulo de resistência elástico da seção bruta em relação à fibra extrema comprimida; e f_y é a resistência ao escoamento do aço. Como a estrutura analisada possui uma seção simétrica, tem-se que $W_c = W_x$, em que W_x representa o módulo de resistência elástico da seção bruta em pontos extremos em flexão simples.

Segundo a ABNT NBR 14762 (2010), se a esbeltez reduzida for menor ou igual a 0,6, o momento resistente a esse tipo de flambagem é dado por:

$$M_{Re} = W_c \cdot f_y \quad \text{Eq. (2.4)}$$

Se o valor da esbeltez reduzida for superior a 1,336, o momento fletor resistente será dado pela equação:

$$M_{Re} = 1,11 \cdot (1 - 0,278 \cdot \lambda_{FLT}^2) \cdot W_c \cdot f_y \quad \text{Eq. (2.5)}$$

Caso o resultado da esbeltez esteja no intervalo entre os dois valores acima apresentados, o momento resistente será calculado por:

$$M_{Re} = \frac{W_c \cdot f_y}{\lambda_{FLT}^2} \quad \text{Eq. (2.6)}$$

2.1.2 Momento resistente à interação entre os modos local e global de flambagem

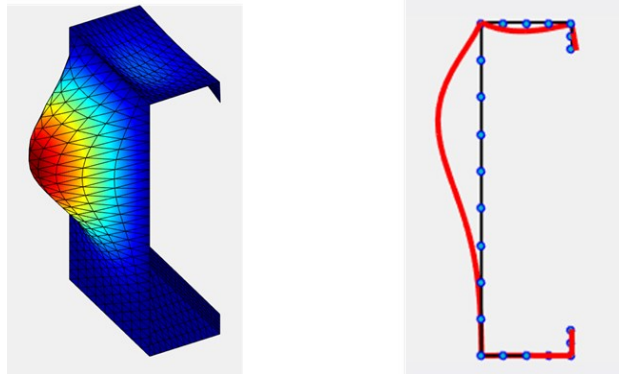
A flambagem local é caracterizada quando uma parte da seção transversal do perfil (como uma mesa ou alma) sofre deslocamento perpendicular ao seu plano devido a tensões de compressão, resultando em uma deformação localizada. Contudo, a seção transversal preserva a sua forma, sem deslocamentos dos vértices, tal como representado na Figura 2.4.

Pelo MRD, o momento resistente à flambagem local é obtido a partir do conhecimento da esbeltez reduzida para esse modo de flambagem, que é dada pela equação:

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{M_{Re}}{M_l}} \quad \text{Eq. (2.7)}$$

Onde M_{Re} é o momento fletor de flambagem lateral com torção, em regime elástico, e M_l é o momento elástico para a flambagem local, obtido por meio da curva de assinatura.

Figura 2.4 – Comportamento do perfil submetido à Flambagem Local



Fonte: FStr v.1.4.0 (2024).

Se a esbeltez reduzida (λ_l) for menor ou igual a 0,776, tem-se que:

$$M_{Rl} = M_{Re} \quad \text{Eq. (2.8)}$$

Se a condição não for atendida, o resultado será obtido resolvendo a seguinte equação.

$$M_{Rl} = \left(1 - \frac{0,15}{\lambda_l^{0,8}}\right) \cdot \frac{M_{Re}}{\lambda_l^{0,8}} \quad \text{Eq. (2.9)}$$

2.1.3 Momento Resistente ao Modo Distorcional

A flambagem distorcional ocorre quando elementos enrijecidos (como mesas) e enrijecedores de borda sofrem deslocamentos laterais combinados com rotações, resultando em uma deformação que altera significativamente a forma da seção transversal. Esse modo de flambagem é típico em perfis com enrijecedores de borda, tal como representado na Figura 2.5.

Para cálculo do momento fletor resistente devido a flambagem distorcional, inicialmente deve ser determinada a esbeltez reduzida do modo distorcional, obtida pela Eq. 2.10.

$$\lambda_{dist} = \sqrt{\frac{W_c \cdot f_y}{M_{dist}}} \quad \text{Eq. (2.10)}$$

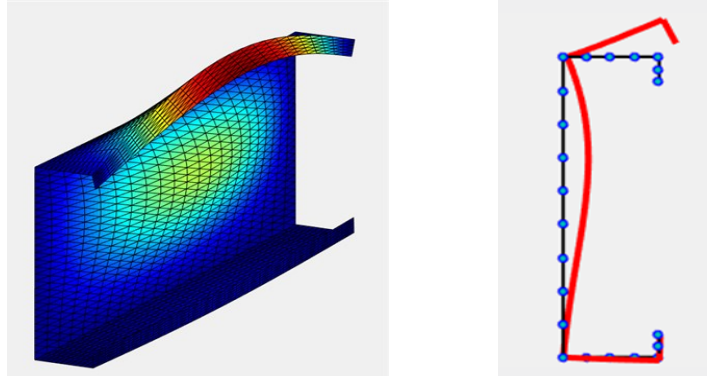
Se a esbeltez reduzida λ_{dist} for inferior ou igual a 0,673, o momento resistente à flambagem distorcional será dado por:

$$M_{Rdist} = W_c \cdot f_y \quad \text{Eq. (2.11)}$$

Se não, o valor do momento resistente a esse modo de flambagem, será calculado pela equação:

$$M_{Rdist} = \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_{dist}}\right) \cdot \frac{W_c \cdot f_y}{\lambda_{dist}} \quad \text{Eq. (2.12)}$$

Figura 2.5 – Comportamento do perfil submetido à Flambagem Distorcional



Fonte: FStr v.1.4.0 (2024).

O valor característico do momento fletor resistente, M_{Rk} , deve ser adotado como o menor valor entre os momentos resistentes calculados para os modos de flambagem global, local e distorcional, representados por M_{Re} , M_{Rl} e M_{Rdist} , respectivamente. O momento fletor resistente de cálculo, M_{Rd} , é obtido pela minoração de M_{Rk} por meio do coeficiente de ponderação γ , igual a 1,1, conforme a expressão:

$$M_{Rd} = \frac{M_{Rk}}{\gamma} \quad \text{Eq. (2.13)}$$

2.2 Estado Limite de Serviço de Deslocamentos Excessivos

De acordo com Carvalho et al. (2021), a rigidez à flexão de um perfil formado a frio é reduzida devido ao efeito da flambagem local, o que pode resultar em flechas excessivas. Em vigas biapoiadas submetidas a carregamento uniformemente distribuído, os momentos fletores solicitantes variam ao longo do vão, gerando diferentes níveis de tensão de compressão nos elementos que compõem a seção transversal. Nas seções onde o momento fletor solicitante é máximo, observam-se as maiores reduções na inércia da seção.

Válida a superposição dos efeitos, a carga e o momento fletor solicitante em uma combinação quase permanente são dados por:

$$p_{cpq} = g + \psi_2 q \quad \text{Eq. (2.14)}$$

$$M_n = M_g + \psi_2 M_q$$

Onde g e M_g são as ações permanentes agrupadas e o momento fletor provocado por elas, respectivamente; q e M_q são a carga variável e o momento fletor provocado por ela, respectivamente; e ψ_2 é o coeficiente do valor quase permanente das ações variáveis.

Para o cálculo da Inércia efetiva da seção no meio do vão, utiliza-se da equação descrita na Eq. (2.15).

$$I_{ef} = I_g \left(\frac{M_{Rser}}{M_n} \right) \leq I_g \quad \text{Eq. (2.15)}$$

Em que I_g é o momento de inércia da seção bruta (valor sem redução), M_{Rser} é o momento fletor resistente obtido calculado conforme apresentado nos itens 2.1.2 a 2.13, porém substituindo o produto $W_x f_y$, por M_{cqp} .

Para o caso de uma viga biapoiada com carga distribuída, o deslocamento máximo ocorre no meio do vão, conforme representado na Figura 2.6, dado pela Eq. (2.16).

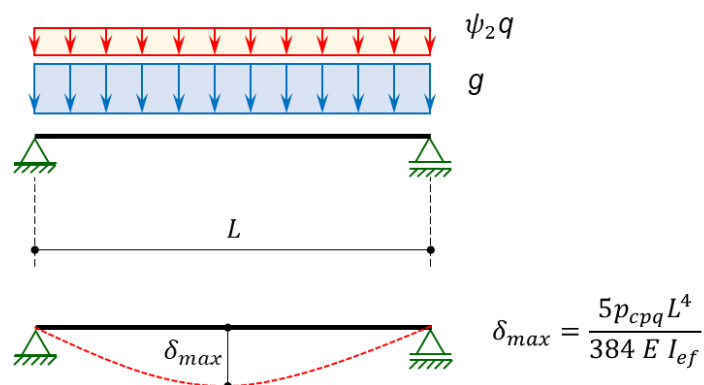
$$\delta_{max} = \frac{5p_{cqp}L^4}{384EI_{ef}} \quad \text{Eq. (2.16)}$$

Em que p_{cqp} é a carga distribuída na viga da combinação quase permanente, L é a distância entre os apoios da viga, E é o módulo de elasticidade do aço, e I_{ef} é a Inércia efetiva da seção considerando as reduções devido aos efeitos de instabilidade local na seção mais solicitada pela flexão.

A verificação do ELS, com relação aos deslocamentos máximos que podem ocorrer em uma viga de piso em conformidade com a ABNT NBR 14762 (2010), estabelece que o deslocamento limite é de:

$$\delta_{lim} = \frac{L}{350} \quad \text{Eq. (2.17)}$$

Figura 2.6 – Esquema estático e a máxima para uma viga biapoiaada

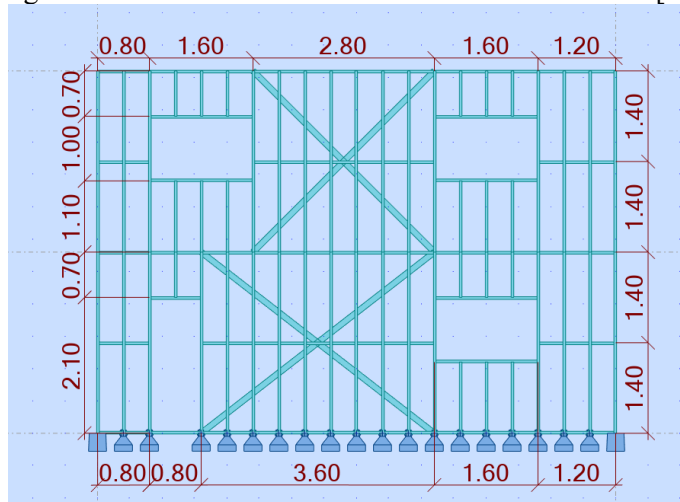


3 ESTUDO DE CASO

3.1 Características gerais

Foi realizada a análise estrutural de uma edificação residencial de dois pavimentos, composta pelo térreo e um pavimento superior. No pavimento térreo, foram previstas aberturas para uma porta e uma janela, com dimensões de $2,10 \times 0,80\text{m}$ e $1,00 \times 1,60\text{m}$, respectivamente. Já no pavimento superior, foram previstas duas aberturas de dimensões $1,00 \times 1,60\text{m}$, que correspondem a duas janelas, com peitoril de $1,10\text{m}$, como pode ser observado na Figura 3.1.

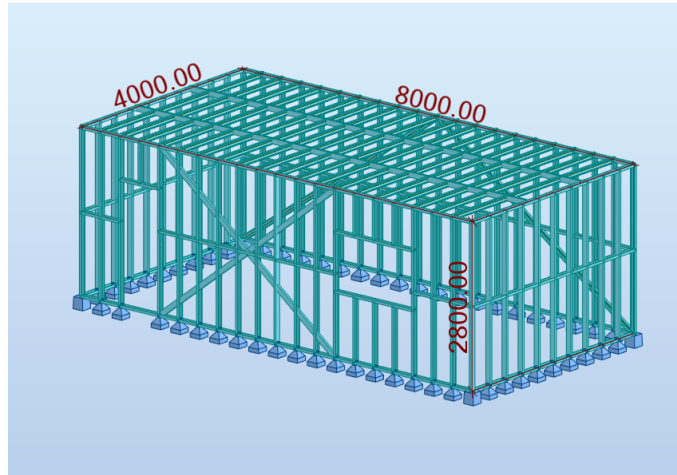
Figura 3.1 – Vista frontal do Estudo de Caso. Cotas em [m]



Fonte: Robot Autodesk (2024)

Em ambos os pavimentos, a estrutura é constituída por painéis com dimensões de 8000mm ou 4000mm de comprimento, e 2800 mm de altura. O travamento lateral dos montantes é posicionado à meia-altura da seção do perfil, visando garantir a rigidez e estabilidade. Além disso, o espaçamento entre os montantes é de 400 mm , configurando um sistema de suporte usual às cargas previstas. Na Figura 3.2, pode-se observar uma vista isométrica do pavimento térreo, com as dimensões iguais para o pavimento superior.

Figura 3.2 – Dimensões do modelo de estudo de caso. Cotas em [mm]



Fonte: Robot Autodesk (2024)

Foram utilizados dois tipos de perfis para as barras que compõem o modelo estrutural. A descrição do perfil para cada tipo de elemento é apresentada na Tabela 1. Na Tabela 2 são apresentadas, resumidamente, as propriedades geométricas dos perfis.

O perfil do tipo U foi utilizado para os travamentos de montantes e vigas de piso, com a finalidade de promover o travamento lateral das vigas nos terços médios, sendo destacado em azul na Figura 3.3. Em todos os perfis da estrutura, foi considerado o emprego do aço CIVIL 300, com propriedades mecânicas listadas na Tabela 3.

Tabela 1 – Perfis utilizados no modelo

Elemento	Perfil
Montantes	<i>Ue</i> 90 × 40 × 12 × 0,95
Vigas	<i>Ue</i> 90 × 40 × 12 × 0,95
Travamentos	<i>U</i> 90 × 40 × 0,95

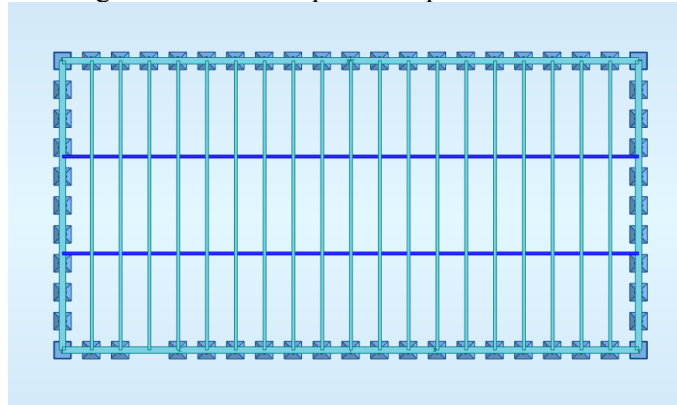
Tabela 2 – Propriedades Geométricas dos perfis

Perfil	A_g (mm ²)	I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)
<i>Ue</i> 90 × 40 × 12 × 0,95	1,78	23,19	4,07
<i>U</i> 90 × 40 × 0,95	1,59	20,29	2,52

Tabela 3 – Propriedades Mecânica do Aço Civil 300

Resistência ao escoamento - f_y (kN/cm ²)	Módulo de elasticidade longitudinal - E (kN/cm ²)	Módulo de elasticidade transversal - G (kN/cm ²)
30	20000	7700

Figura 3.3 - Vista superior do pavimento térreo



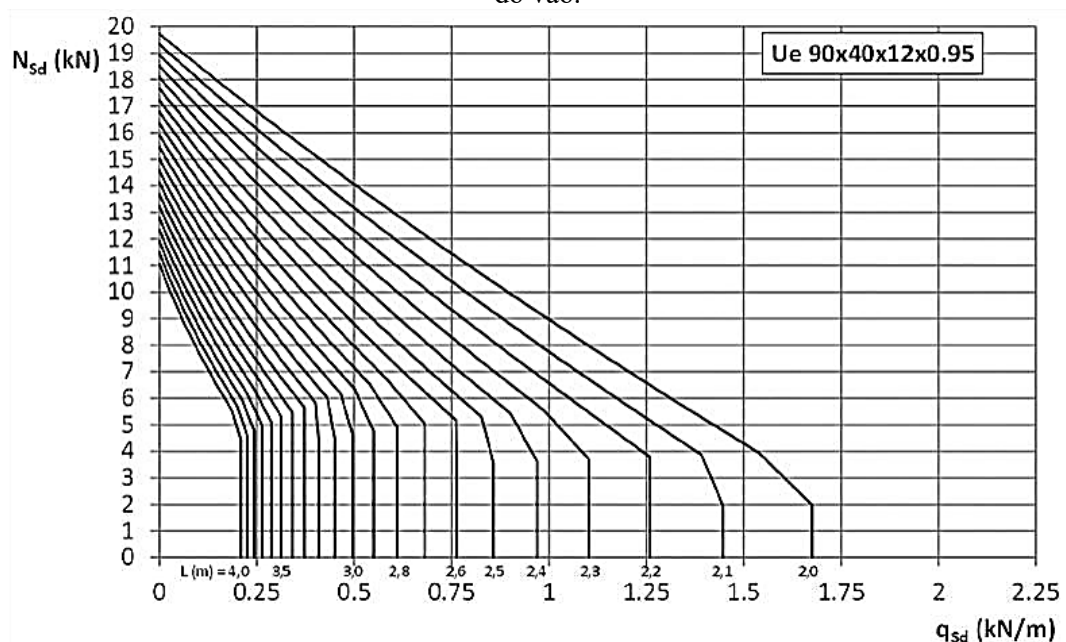
Fonte: Robot Autodesk (2024)

Caldas e Rodrigues (2015) elaboraram uma série de gráficos para pré-dimensionamento de vigas de piso para estruturas em *steel framing*. A figura 3.4 retrata a relação $q_{sd} \times N_{sd}$ de pré-dimensionamento das barras submetidas à flexocompressão com dois travamentos ao longo do vão, em conformidade com a modelagem adotada no estudo, na qual $[N_{sd}]$ é o valor da máxima força axial de compressão solicitante de cálculo que pode ser aplicada na barra e $[q_{sd}]$ é o valor da carga uniformemente distribuída de cálculo.

Segundo a NBR 6120:2019, para revestimentos de pisos em edifícios residenciais com 5 cm de espessura, deve-se considerar uma carga permanente de 1 kN/m^2 . Da mesma forma, a carga variável para salas de edifícios residenciais é estabelecida em $1,5 \text{ kN/m}^2$.

Considerando-se que as vigas de piso possuem um espaçamento de 40cm entre si, as cargas permanentes e variáveis, uniformemente distribuídas, foram estimadas em aproximadamente $0,39 \text{ kN/m}$ e $0,59 \text{ kN/m}$, respectivamente.

Figura 3.4 - Perfil Ue 90×40×12×0,95, submetido a flexocompressão, com dois travamentos ao longo do vão.



Fonte: Caldas e Rodrigues (2015)

Para o desenvolvimento da análise estrutural foi utilizado o software ROBOT®, que permite trabalhar com modelos tridimensionais em elementos finitos e avaliar os esforços internos e deslocamentos. Além disso, ele possui rotinas específicas para verificação de elementos estruturais em aço segundo normas nacionais e internacionais.

Nas extremidades inferiores dos montantes posicionados nos quatro vértices, foi aplicada a condição de engaste, impedido a rotação e a translação destes nós segundo as direções X, Y e Z (6 graus de liberdade restringidos). Para os demais montantes, suas extremidades inferiores tiveram apenas as translações impedidas segundo as direções X e Z locais.

3.2 Considerações sobre o FStr

Para a análise de estabilidade elástica dos perfis Ue foi utilizado o software FStr (<https://sites.google.com/coc.ufrj.br/fstr/>). Segundo Lazzari e Batista (2021), o aplicativo é baseado no Método das Faixas Finitas (MFF), e determina as formas modais de flambagem elástica, carregamentos críticos de flambagem e curva de assinatura. A solução generalizada do problema de estabilidade é obtida resolvendo a equação de autovalores descrita na Eq. (3.1).

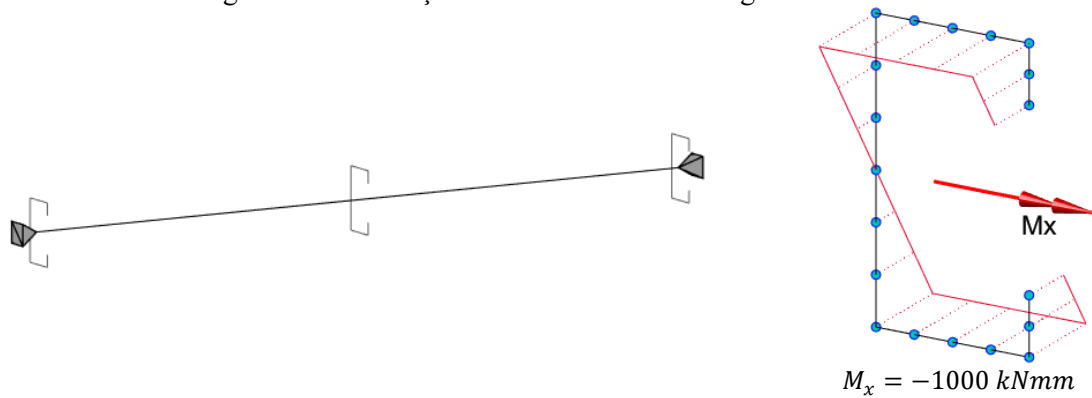
$$([K] - [\Lambda][K_g])[\phi] = [0] \quad \text{Eq. (3.1)}$$

Em que $[K]$ é a matriz de rigidez elástica global; $[K_g]$ é a matriz de rigidez geométrica global; $[\Lambda]$ são os autovalores do problema, indicativos dos carregamentos críticos da flambagem elástica; $[\phi]$ são os autovetores que representam os modos críticos de flambagem elástica, associados aos carregamentos críticos.

Considerando a análise de estabilidade das vigas de piso, foram consideradas seções U enrijecido (Ue), com condição de contorno simplesmente apoiado nas duas extremidades, com todas as bordas longitudinais livres e apenas um termo de meia-onda. Para fins de exemplificação, considerando o perfil apresentado na Figura 3.5, com dimensões $b_w = 75 \text{ mm}$, $b_f = 40 \text{ mm}$, $b_s = 15 \text{ mm}$ e $t = 0,65 \text{ mm}$, foi feita uma análise de estabilidade elástica. Os comprimentos atribuídos para a viga (comprimentos de meia onda) variaram de 10mm a 10000mm, com 100 subdivisões. O carregamento aplicado no modelo consiste em um momento fletor na direção do eixo de maior inércia do perfil de $M_x = -1000 \text{ kNmm}$, de modo a provocar tensões de tração nas fibras inferiores. Desse modo, todo o vão L da viga está sujeito ao mesmo esforço interno. Para o material aço foi empregado um módulo de elasticidade de 200 GPa (200 kN/mm^2), e coeficiente de Poisson de 0,3.

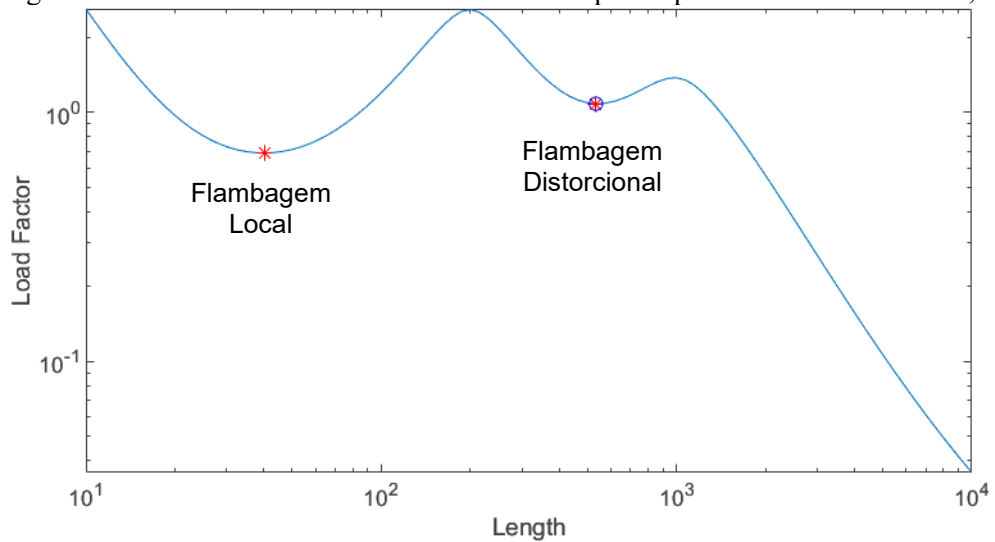
Os resultados desta análise de estabilidade elástica, com a curva de assinatura, modos de flambagem e respectivas cargas críticas estão apresentados na Figura 3.6.

Figura 3.5 – Condições de contorno e de carregamento nos modelos

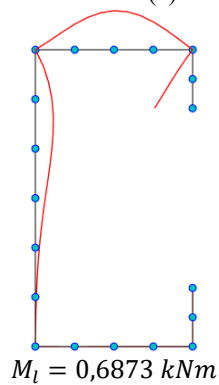


Fonte: FStr v.1.4.0.

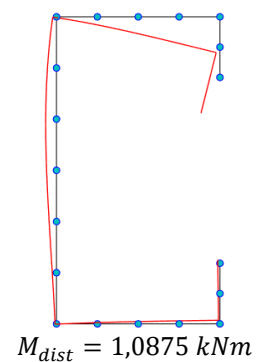
Figura 3.6 – Resultados da análise de estabilidade para o perfil Ue $75 \times 45 \times 15 \times 0,65$



(a) Curva de assinatura com os autovalores vs $L(\text{mm})$



(b) Modo de flambagem local



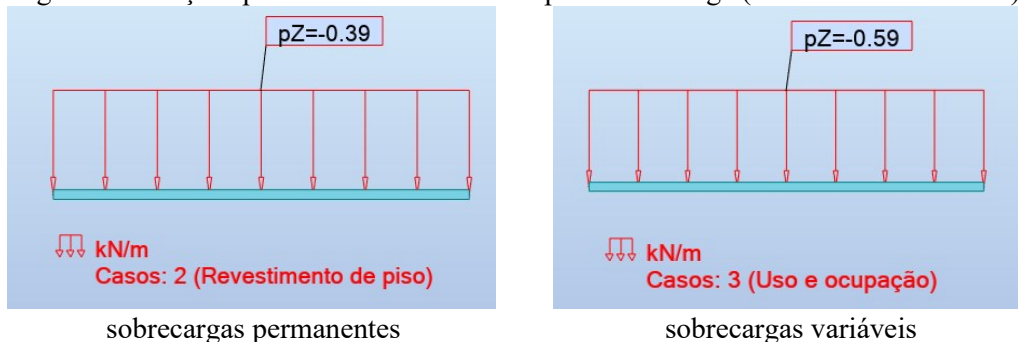
(c) Modo de Flambagem distorcional

Fonte: FStr v.1.4.0.

3.3 Verificação de Estado-Limite último à flexão

Para o estudo de caso apresentado, foi verificada a resistência à flexão de uma viga em perfil Ue $90 \times 40 \times 12 \times 0,95$, em relação aos modos local, global e distorcional. A viga está sujeita a uma carga uniformemente distribuída e travada lateralmente nos apoios e nos terços médios do vão de 4000mm. Na Figura 3.7, pode-se observar as sobrecargas permanente e variáveis adotadas conforme a ABNT NBR 6120 (2019), como já descrito na seção 3.1 do presente artigo.

Figura 3.7 – Ações permanentes e variáveis aplicadas na viga (valores característicos)

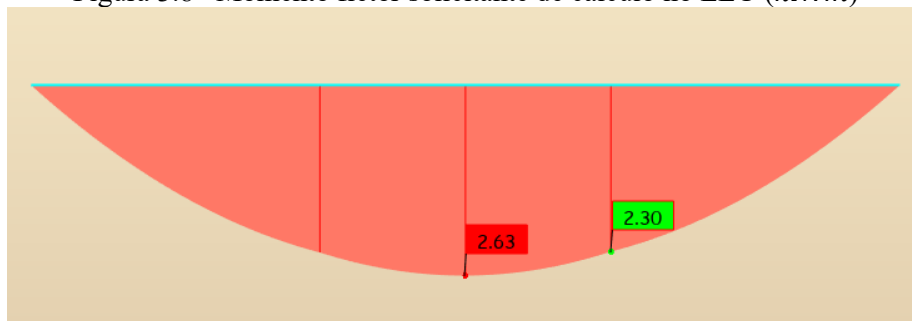


Fonte: Robot Autodesk (2024)

Ao se realizar a análise no Robot, considerando uma Combinação Normal no ELU, com $\gamma_g = 1,40$ e $\gamma_q = 1,50$, pode-se obter que o valor de momento fletor máximo no meio do vão é de $M_{sd} = 2,63 \text{ kN.m}$.

Consultando o ábaco da Figura 3.4, com a carga uniformemente distribuída de cálculo na viga para o ELU, $q_{sd} = 1,4 \cdot 0,39 + 1,5 \cdot 0,59 = 1,46 \text{ kN/m}$, observa-se que o perfil analisado não é adequado para essa aplicação, pois está submetido a cargas superiores àquelas suportadas para o vão considerado, estando sujeito a instabilidades.

Figura 3.8– Momento fletor solicitante de cálculo no ELU (kN.m)



Fonte: Robot Autodesk (2024)

De acordo com o diagrama apresentado Figura 3.8, pode-se observar que o momento fletor ao longo do terço médio da peça (trecho entre travamentos laterais) apresenta pequena variação. Devido a este fato, foi considerado um coeficiente de uniformização dos momentos igual a $C_b = 1$ para cálculo do momento crítico que provoca flambagem lateral. Seguem na Tabela 4 os principais resultados da verificação do ELU à flexão da viga.

Tabela 4 – Resumo dos Resultados da verificação do ELU à flexão

Flambagem Lateral com Torção
$L_b = L_y = \frac{L}{3} = 1,33m$ $M_e = 1,96 \text{ kNm}$ $\lambda_e = 0,89$ $M_{Re} = 1,34 \text{ kNm}$
Flambagem Local
$M_l = 2,56 \text{ kNm}$ $\lambda_l = 0,72$ $M_{Rl} = M_{Re} = 1,34 \text{ kNm}$
Flambagem Distorcional
$M_{dist} = 2,21 \text{ kNm}$ $\lambda_{dist} = 0,84$ $M_{Rdist} = 1,36 \text{ kNm}$

Por fim, tomando o valor mínimo entre os três modos de flambagem, e adotando $\gamma = 1,1$, foi encontrado, pela Eq. (2.11), que o momento fletor resistente de cálculo na direção x do modelo analisado é de $M_{Rdx} = 1,22 \text{ kNm}$.

Com isso, tem-se que o momento resistente é menor que o momento fletor máximo no meio do vão, indicando o perfil não é adequado considerando as ações que foram aplicadas à viga no caso estudado.

3.4 Verificação de Estado-Limite de Serviço de deformação excessiva

Foi verificado o ELS-DEF da viga em perfil Ue $90 \times 40 \times 12 \times 0,95$. A viga está sujeita a uma carga uniformemente distribuída, como já apresentado anteriormente. Para esta verificação, a sobrecarga permanente e variável como $0,39 \text{ kN/m}$ e $0,59 \text{ kN/m}$ (valores característicos), respectivamente.

Na Tabela 5 são apresentados os principais resultados da verificação de ELS de deformação excessiva da viga.

Os resultados apontam que o perfil não é adequado para a situação do modelo analisado, em relação ao Estado Limite de Serviço, visto que, apresenta um deslocamento máximo superior ao valor do deslocamento limite permitido pela ABNT NBR 14762 (2010).

Tabela 5 – Resumo dos Resultados da verificação do ELS de deformação excessiva

Momento de Serviço
$\psi_2 = 0,3$ $M_g = 0,78 \text{ kNm}$ $M_q = 1,18 \text{ kNm}$ $M_n = 1,13 \text{ kN}$
Flambagem Lateral com Torção
$L_b = \frac{L}{3} = 1,33m$ $M_e = 1,96 \text{ kNm}$ $\lambda_e = \sqrt{\frac{M_n}{M_e}} = 0,76$ $M_{Re} = 1,64 \text{ kNm}$
Flambagem Local
$M_l = 2,568 \text{ kNm}$

$\lambda_l = 0,64$
$M_{Rl} = 1,06 \text{ kNm}$
Flambagem Distorcional
$M_{dist} = 2,215 \text{ kNm}$
$\lambda_{dist} = 0,72$
$M_{Rdist} = 1,1 \text{ kNm}$
Cálculo da Flecha
$M_{Rserv} = 1,06 \text{ kNm}$
$I_{ef} = 21,6 \text{ cm}^4$
$\delta_{max} = 43,76 \text{ mm}$
$\delta_{lim} = L/350 = 11,43 \text{ mm}$

3.5 Parametrização para perfis segundo catálogo de perfis da NBR 6355

Com base no estudo de caso apresentado no item anterior, foi feita uma parametrização da verificação alterando o perfil *Ue* catalogados na ABNT NBR 6355 (2012), em aço zincado. Foram feitas análise de estabilidade elástica por meio do software FStr v1.4.0, conforme descrito anteriormente, e os momentos de flambagem local e distorcional foram determinados para cada perfil catalogado na referida norma.

Na análise paramétrica, variou-se o vão da viga (L) e buscou-se o perfil *Ue* mais leve possível, em aço CIVIL 300, que atendia às verificações de ELU e ELS já apresentadas. Os vãos adotados na análise paramétrica estão apresentados na Tabela 6.

A Tabela 6 apresenta a altura b_w dos perfis *Ue* para se considerar em um pré-dimensionamento de acordo com o tamanho do vão e determina qual o tipo de perfil escolhido na análise. Foi feita uma regressão linear nos dados obtidos de L vs b_w , conforme apresentado na Figura 3.9, e a seguinte expressão é proposta para pré-dimensionamento:

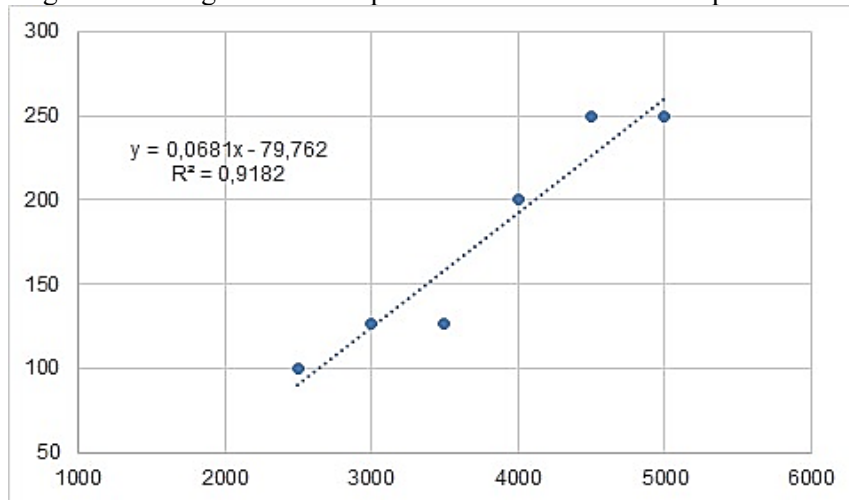
$$b_w = 0,0681 L - 79,762 \quad \text{Eq. (3.2)}$$

com L e b_w em milímetros.

Tabela 6 – Altura b_w dos perfis *Ue* para pré-dimensionamento em função do vão

$L \text{ (mm)}$	$b_w \text{ (mm)}$	Perfil
2500	100	<i>Ue</i> 100 × 50 × 17 × 0,95
3000	127	<i>Ue</i> 127 × 50 × 17 × 0,95
3500	127	<i>Ue</i> 127 × 50 × 17 × 1,55
4000	200	<i>Ue</i> 200 × 40 × 12 × 1,25
4500	250	<i>Ue</i> 250 × 40 × 12 × 0,95
5000	250	<i>Ue</i> 250 × 40 × 12 × 1,25

Figura 3.9 – Regressão linear para os resultados da análise paramétrica



Ao analisar os resultados paramétricos obtidos neste estudo, verifica-se que, para o vão de 4 metros, o perfil *Ue* 200 × 40 × 12 × 1,25 foi identificado como a alternativa mais adequada. Esse mesmo perfil também foi indicado pelos gráficos de Caldas e Rodrigues (2015) como sendo capaz de suportar as cargas atuantes sem comprometer a segurança estrutural. Dessa forma, a análise conduzida neste estudo não apenas confirma os resultados da literatura, como também reforça a validade da equação de regressão linear proposta para o pré-dimensionamento.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise investigou a segurança estrutural de vigas de piso do sistema Light Steel Frame (LSF) sob flexão e deformação, considerando os estados-limites último e de serviço. A análise foi realizada utilizando ferramentas de modelagem numérica e o Método da Resistência Direta, permitindo a avaliação da estabilidade estrutural de perfis submetidos a diferentes vãos e carregamentos.

Os resultados obtidos demonstram que, para o perfil *Ue* 90 × 40 × 12 × 0,95, com dois travamentos ao longo do vão de 4 metros, as cargas atuantes superaram os valores limite de segurança estabelecidos na ABNT NBR 14762:2010, evidenciando a necessidade de um perfil de maior capacidade resistente. Essa observação foi confirmada pela análise comparativa com os gráficos de Caldas e Rodrigues (2015), onde perfis com maior altura e espessura foram indicados para suportar a mesma condição de carregamento.

A análise paramétrica realizada permitiu identificar o perfil *Ue* 200 × 40 × 12 × 1,25 como a solução mais adequada para o vão de 4 metros, sendo essa mesma recomendação observada nos gráficos de pré-dimensionamento da literatura.

Dessa forma, os gráficos propostos neste estudo contribuem para o pré-dimensionamento de vigas de piso, fornecendo uma ferramenta auxiliar para projetistas e engenheiros estruturais, permitindo a seleção eficiente de perfis conforme os requisitos normativos e de desempenho.

REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações**. Rio de Janeiro, 2019.

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

CALDAS, R. B.; RODRIGUES, F. C.; MEIRA, L. de O. **Pré-dimensionamento de perfis de aço para o sistema light steel framing – gráficos**. Revista [ISSN 2238-9377], v. 4, n. 2, p. 134-153, ago. 2015.

CARVALHO, P. R. M.; GRIGOLETTI, G.; BARBOSA, G. D. **Curso básico de perfis formados a frio**. 4. ed. Porto Alegre, RS: Publicado pelos autores, 2021.

FAKURY, R. H.; SILVA, A. L. R. C.; CALDAS, R. B. **Dimensionamento de elementos estruturais de aço e mistos de aço e concreto**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

LAZZARI, J. A. DE; BATISTA, E. DE M. **Finite Strip Computer Application: Análise de Flambagem Elástica para Estruturas de Paredes Finas**. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE PONTES E ESTRUTURAS, 2021, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Federal University of Rio de Janeiro COPPE, 2021. p. 123-134.

RODRIGUES, Francisco Carlos; CALDAS, Rodrigo Barreto. **Steel Framing: Engenharia**. 2ª ed. rev. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil / Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2016. 224 p. ISBN 978-85-89819-39-8.