

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA COMPUTACIONAL

Larissa de Lima e Silva

Estudo do Efeito de Aberturas no Comportamento de Painéis de *Light Steel*
Frame com Perfis “U”

Juiz de Fora
2025

Larissa de Lima e Silva

**Estudo do Efeito de Aberturas no Comportamento de Painéis de *Light Steel*
Frame com Perfis “U”**

Trabalho Final de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Computacional Área de concentração: Modelagem Computacional

Orientadora: Doutora Flávia de Souza Bastos

Juiz de Fora

2025

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Silva, Larissa de Lima e.

Estudo do Efeito de Aberturas no Comportamento de Painéis de *Light Steel Frame* com Perfis “U” / Larissa de Lima e Silva. – 2025.

49 f. : il.

Orientadora: Flávia de Souza Bastos

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Curso de Graduação em Engenharia Computacional, 2025.

1. Perfil de Aço. 2. Perfis de aço formados a frio. 3. *Light Steel Framing*
4. Abaqus. 5. Modelagem computacional 6. análise numérica

Larissa de Lima e Silva

Estudo do Efeito de Aberturas no Comportamento de Painéis de *Light Steel Frame* com Perfis “U”

Trabalho Final de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Computacional da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheira Computacional Área de concentração: Modelagem Computacional

Aprovada em (dia) de (mês) de (ano)

BANCA EXAMINADORA

Doutora Michèle Cristina Resende Farage

Doutor Leonardo Goliatt da Fonseca

Dedico este trabalho aos meus pais, Janice e José, que
sob muito sol, fizeram-me chegar até aqui, na sombra.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, fonte de toda vida, e a Nossa Senhora de Fátima, minha devota, por sua proteção e intercessão. Em cada passo desta caminhada, senti suas presenças constantes, iluminando meus caminhos e fortalecendo minha fé.

À minha mãe, deixo um parágrafo inteiro de gratidão e amor. Mãe, sua vida foi inteiramente dedicada a mim: cada cuidado, cada gesto de amor, cada dia de esforço para que eu tivesse a oportunidade de estudar e crescer. Mesmo nos meus momentos de estresse, compreendeu-me, acolheu-me e fortaleceu-me. Sua fé, orações e seu apoio incondicional foram alicerces que sustentaram minha trajetória. Sinto profundamente a sua falta, mas carrego comigo tudo o que me ensinou e a certeza de que grande parte desta conquista é dela. Dedico-lhe este TCC com todo meu amor e gratidão.

Dedico este trabalho ao meu pai, cuja vida é uma verdadeira construção. Cada tijolo carregado, cada dia sob o sol, cada esforço silencioso para me colocar sempre à frente, é uma inspiração que me acompanhou na elaboração deste TCC. Assim como ele ergue paredes firmes e resistentes, eu busquei, tijolo a tijolo, construir este trabalho com dedicação, paciência e amor.

Agradeço também à minha irmã sensata, pelos conselhos e pela calma nos meus nervosismos, que sempre trouxe leveza, companhia e colo nos dias difíceis. À tia Jurema, em especial, pela fé, carinho e apoio financeiro, e por acreditar em mim mesmo nos momentos tensos. Agradeço a todos da minha família, por estarem comigo em cada etapa desta caminhada.

Expresso minha imensa gratidão a todos que, de alguma forma, me ajudaram a construir este trabalho. À minha amiga Luciana Paixão, que esteve comigo desde o início da faculdade, compartilhando alegrias, desafios e conquistas; e ao meu melhor amigo Thiago Luiz, que me acompanhou nos momentos mais difíceis, oferecendo incentivo, equilíbrio e fé quando eu mesma duvidava de mim.

Agradeço profundamente à professora Flávia, que confiou em meu potencial e me guiou com paciência e sabedoria. Seu apoio constante me ajudou a crescer não apenas como estudante, mas também como pessoa.

Por fim, agradeço a mim mesma, por perseverar, por levantar-me quando pensei em desistir. Que cada conquista seja também um reflexo de todos que estiveram comigo nesta construção da minha trajetória.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise numérica do comportamento estrutural de painéis compostos por vigas em perfil U, formadas a frio, utilizadas no sistema construtivo *Light Steel Framing* (LSF), sob a ação de carregamentos de compressão. A modelagem e simulação dos modelos numéricos foram realizadas no software *Abaqus*. O objetivo principal é avaliar o desempenho estrutural dos perfis em LSF com e sem aberturas do tipo janelas e portas. As análises foram conduzidas em modelos bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), mantendo-se constantes as dimensões e espessuras dos perfis.

Os resultados das simulações foram apresentados por meio das imagens geradas pelo *Abaqus*, que representam os deslocamentos estruturais com o uso de escalas de cores. Essas representações visuais foram utilizadas para comparar o comportamento dos modelos 2D e 3D, com foco nas diferenças de deslocamento entre as diferentes configurações analisadas. Verificou-se que a presença de aberturas aumenta significativamente os deslocamentos, principalmente nas regiões próximas às bordas, devido à redução da área resistente e à concentração de deformações. Além disso, a comparação entre os modelos evidenciou que a modelagem 3D é mais sensível à distribuição realista das cargas e ao comportamento estrutural global, enquanto os modelos 2D, mais simples, podem ser mais adequados para análises preliminares. Portanto, conclui-se que a escolha entre modelagem 2D ou 3D deve considerar o nível de detalhamento necessário e o objetivo da análise.

Palavras-chave: *Light Steel Framing*, perfil U, *Abaqus*, deformações, análise estrutural.

ABSTRACT

This paper presents a numerical analysis of the structural behavior of panels composed of cold-formed U-beams used in the Light Steel Framing (LSF) construction system under compressive loads. The numerical models were modeled and simulated using Abaqus software. The main objective is to evaluate the structural performance of LSF profiles with and without window and door openings. The analyses were conducted on two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) models, keeping the profile dimensions and thicknesses constant.

The simulation results were presented using images generated by Abaqus, which represent structural displacements using color scales. These visual representations were used to compare the behavior of the 2D and 3D models, focusing on the displacement differences between the different configurations analyzed. It was found that the presence of openings significantly increases displacements, especially in regions near the edges, due to the reduction in the resistant area and the concentration of deformations. Furthermore, the comparison between the models showed that 3D modeling is more sensitive to realistic load distribution and global structural behavior, while simpler 2D models may be more suitable for preliminary analyses. Therefore, it is concluded that the choice between 2D or 3D modeling should consider the level of detail required and the objective of the analysis.

Keywords: Light Steel Framing, U-profile, Abaqus, structural analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1–Componentes estruturais e de vedação em uma edificação do tipo Light Steel Frame. Santiago <i>et al.</i> [2012]	16
Figura 3.2–Exemplo de edificação em construção utilizando o sistema LSF, evidenciando a estrutura metálica formada por perfis de aço galvanizado. [Decorações, n.d.]	17
Figura 3.3–Processo de enrijecimento do PFF.Carvalho <i>et al.</i> [2020]	18
Figura 3.4–Principais tipos de perfis formados a frio (PFF) e suas designações conforme a ABNT NBR 14762:2010 Silva & Pignatta e Silva [2008]	19
Figura 4.1–Criação de peça, com parâmetros definidos para o modelo “guia”.	22
Figura 4.2–Esboço da seção transversal da peça “guia”.	23
Figura 4.3–Esboço da seção transversal da peça “montante”.	23
Figura 4.4–Modelo do painel liso com 9 montantes espaçados a 400 mm no <i>Abaqus</i>	24
Figura 4.5–Aplicação de carregamento por pressão uniforme no painel liso no <i>Abaqus</i>	25
Figura 4.6–Configuração da malha no painel liso	26
Figura 4.7–Modelo bidimensional do painel desenvolvido para comparação com os modelos 3D.	27
Figura 4.8–Aplicação de condição de contorno do tipo encastre no modelo 2D do painel.	29
Figura 4.9–Esquema geométrico do painel 2D com abertura central do tipo janela.	30
Figura 4.10–Esquema geométrico do painel 2D com abertura central do tipo porta.	31
Figura 4.11–Modelagem 2D do painel com abertura de porta e janela no <i>Abaqus</i>	32
Figura 5.1–Distribuição do deslocamento total no painel liso com montantes.	36
Figura 5.2–Distribuição do deslocamento total no painel com abertura de porta.	37
Figura 5.3–Distribuição do deslocamento total no painel com abertura de janela.	38
Figura 5.4–Distribuição do deslocamento total no painel com abertura de janela e porta.	39
Figura 5.5–Distribuição do deslocamento total no modelo 2D sem abertura com carga concentrada.	40
Figura 5.6–Distribuição do deslocamento total no modelo 2D com abertura para porta, utilizando carga concentrada.	41
Figura 5.7–Distribuição do deslocamento total no modelo 2D com abertura para janela, utilizando carga concentrada.	42
Figura 5.8–Distribuição do deslocamento total no modelo 2D com aberturas para porta e janela, utilizando carga concentrada.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Parâmetros variáveis dos modelos simulados no Abaqus	33
Tabela 4.2 – Resumo da malha e tempo de simulação para os diferentes modelos . .	34
Tabela 5.1 – Comparação dos deslocamentos totais entre os modelos 2D e 3D	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
LSF	<i>Light Steel Framing</i> (Estrutura em Aço Leve)
NBR	Norma Brasileira
PFF	Perfil Formado a Frio
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso

LISTA DE SÍMBOLOS

$\cup$	União
ε	Deformação unitária (adimensional)
ΔL	Variação de comprimento
L_0	Comprimento inicial do elemento
σ	Tensão normal
E	Módulo de elasticidade do material
U	perfil U simples
U_e	perfil U enrijecido e
p	pressão distribuída

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1	O LIGHT STEEL FRAMING	15
3.1.1	PERFIL FORMADO A FRIO (PFF)	17
3.2	Comportamento Estrutural de Perfis Metálicos	19
3.2.1	Esforços de Compressão em Perfis Metálicos	19
3.2.2	Deformações em Elementos Estruturais	20
4	METODOLOGIA	22
5	RESULTADOS	35
6	CONCLUSÃO	45
7	Trabalhos Futuros	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o setor da construção civil vivenciou mudanças relevantes, motivadas pela procura de abordagens mais eficientes, ecológicas e industrializadas. O aumento da população, a rápida urbanização e a urgência em minimizar os impactos ambientais têm estimulado a criação e a implementação de técnicas de construção que se afastam dos métodos convencionais em alvenaria [Santiago *et al.*, 2012]. Nesse cenário, o sistema *Light Steel Frame* (LSF) tem-se destacado como uma alternativa inovadora, leve e sustentável.

O LSF é uma técnica de construção que utiliza perfis de aço galvanizado moldados a frio, formando a estrutura básica de prédios residenciais, comerciais e industriais [Santiago *et al.*, 2012]. Dentre seus principais benefícios, destacam-se a agilidade na montagem, a diminuição de desperdícios, o aprimoramento do desempenho térmico e acústico (quando aliado a materiais apropriados) e a viabilidade de padronização e controle de qualidade em ambiente industrial [Milan *et al.*, 2011]. Essas qualidades fazem do LSF uma solução atrativa para as necessidades da construção moderna.

O uso do LSF na engenharia civil contemporânea é bastante diversificado, abrangendo desde moradias voltadas para a população de baixa renda até grandes edifícios. Entretanto, mesmo com sua crescente aceitação, persistem dificuldades técnicas e áreas de conhecimento que precisam ser exploradas, principalmente em relação ao desempenho estrutural de componentes específicos, como painéis com aberturas para janelas e portas [Kechidi & Iuorio, 2022]. Essas aberturas criam descontinuidades na estrutura, que podem impactar sua rigidez, resistência e estabilidade geral.

Diversos estudos anteriores, como Wang & Salhab [2009], e recentes publicações da MDPI Perera *et al.* [2022], Yao *et al.* [2023], investigaram o comportamento estrutural de painéis LSF submetidos a carregamentos diversos por meio de simulações numéricas utilizando o software *Abaqus*. Neste sentido, a presente pesquisa também se propõe a examinar o comportamento estrutural de diferentes configurações de painéis LSF.

Diante desse contexto, surge a questão central desta pesquisa: É possível, por meio da modelagem computacional no software *Abaqus*, quantificar os efeitos da inclusão de aberturas (porta e/ou janela) no comportamento estrutural de painéis em *Light Steel Frame*.

Para investigar isso, quatro tipos de painéis foram modelados e analisados: um sem aberturas, um que contém porta e janela, um que possui apenas porta e outro que tem somente janela. A comparação dessas configurações facilita a compreensão do impacto das aberturas na distribuição de deformações e contribui para o aprimoramento do processo construtivo desses perfis.

2 OBJETIVO

Estudar, por meio de modelagem computacional, o comportamento estrutural de painéis compostos por perfis do tipo “U” em aço galvanizado formados a frio, amplamente utilizados em sistemas construtivos do tipo *Light Steel Frame*, quando submetidos a esforços de compressão. A pesquisa concentra-se na análise dos deslocamentos estruturais resultantes da presença ou ausência de aberturas, como janelas e portas.

Para isso, foram realizadas simulações computacionais no software *Abaqus*, com variações nas características geométricas dos modelos. Essa abordagem permite a comparação entre diferentes cenários estruturais, contribuindo para a compreensão do desempenho dos painéis em situações reais de carregamento.

Este estudo dá continuidade aos trabalhos desenvolvidos por Gustavo Matias Gonçalves [Gonçalves, 2017] e Nicolay Sabadin Ribeiro [Ribeiro, 2023], com o intuito de aprimorar e atualizar o conhecimento técnico sobre modelagem computacional aplicada à construção civil. A proposta reforça a importância da interdisciplinaridade entre engenharia estrutural, simulação numérica e inovação tecnológica como ferramenta para a resolução de problemas complexos da engenharia moderna.

Objetivo científico: Contribuir para o aprimoramento do conhecimento técnico sobre o uso de *Light Steel Frame* na construção civil, especialmente no que se refere à modelagem computacional de elementos estruturais com descontinuidades, por meio da análise comparativa de diferentes configurações de painéis submetidos a esforços de compressão e à presença de aberturas.

Objetivo prático: Avaliar se as deformações observadas nas regiões próximas às aberturas justificam a adoção de reforços estruturais, oferecendo subsídios técnicos para decisões de projeto que evitem falhas, retrabalhos ou custos adicionais em obras reais, contribuindo para a melhoria da qualidade e da durabilidade das construções em LSF.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 O LIGHT STEEL FRAMING

Light Steel Frame é um dos métodos construtivos modernos, cujo nome vem do inglês, onde “*steel*” refere-se a aço e “*framing*” significa estrutura, moldura. Assim, o termo steel framing pode ser entendido como uma estrutura composta por perfis de aço [Milan *et al.*, 2011], [Holanda *et al.*, 2023]. Esse método surgiu a partir do *wood frame* no século XIX, em resposta ao crescimento populacional da América do Norte. Um dos princípios do *Light Steel Frame* é a adição de perfis de aço galvanizado ao invés de alvenaria, tornando o processo construtivo leve, preciso e rápido.

Para ilustrar os principais componentes do sistema LSF, utilizou-se a Figura 3.1, adaptada de [Santiago *et al.*, 2012], destacando elementos como cumeeira, pontalotes, caibros e ripas metálicas na cobertura, *steel deck* e laje de concreto no piso, além das paredes compostas por montantes, guias e elementos de vedação interna e externa.

No Brasil, as primeiras edificações utilizando essa tecnologia surgiram para atender à crescente demanda por práticas mais industrializadas na construção civil. No entanto, foi somente na década de 90 que o LSF começou a ser incorporado ao cenário da construção do país [Milan & outros, 2011], [Holanda *et al.*, 2023]. Sua aplicação, porém, ainda se encontra em grande parte artesanal, em um ciclo de baixa produtividade e alto desperdício de materiais. O uso deste sistema ainda tem se concentrado nas regiões Sudeste, onde há maior oferta de tecnologia e mão de obra qualificada [Chan & Fontanini, 2017]. Embora já existam avanços recentes em termos de normatização, como a publicação da NBR 16970 (ABNT) [2022], ainda se faz necessário um processo de consolidação e maior difusão técnica para ampliar o uso do LSF em escala nacional.

Segundo levantamento do Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA) & Associação Brasileira da Construção Metálica (ABCEM) [2024], a produção de perfis destinados ao sistema cresceu 27,7% em 2023 em relação a 2022, totalizando cerca de 107,6 mil toneladas e um faturamento aproximado de R\$ 1,6 bilhão.

Além do crescimento observado no mercado, destacam-se também os benefícios ambientais e executivos do sistema. Uma das principais vantagens do sistema é a redução dos resíduos gerados durante a construção, juntamente com a utilização eficaz de materiais e a rapidez com que pode ser concluída. Dessa forma, com a implementação do LSF, os cálculos, tanto de material quanto de trabalho, podem ser realizados com mais precisão [Teixeira & Simplicio, 2018]. Em relação ao desempenho executivo, estudos comparativos demonstram vantagens significativas frente à alvenaria convencional. Em um estudo de caso de edificação unifamiliar, a obra em LSF foi concluída em 58 dias, contra 96 dias no método tradicional, representando uma redução de aproximadamente 39,6% no prazo [Bortolini *et al.*, 2020]. Além disso, o sistema proporciona ganhos ambientais associados à

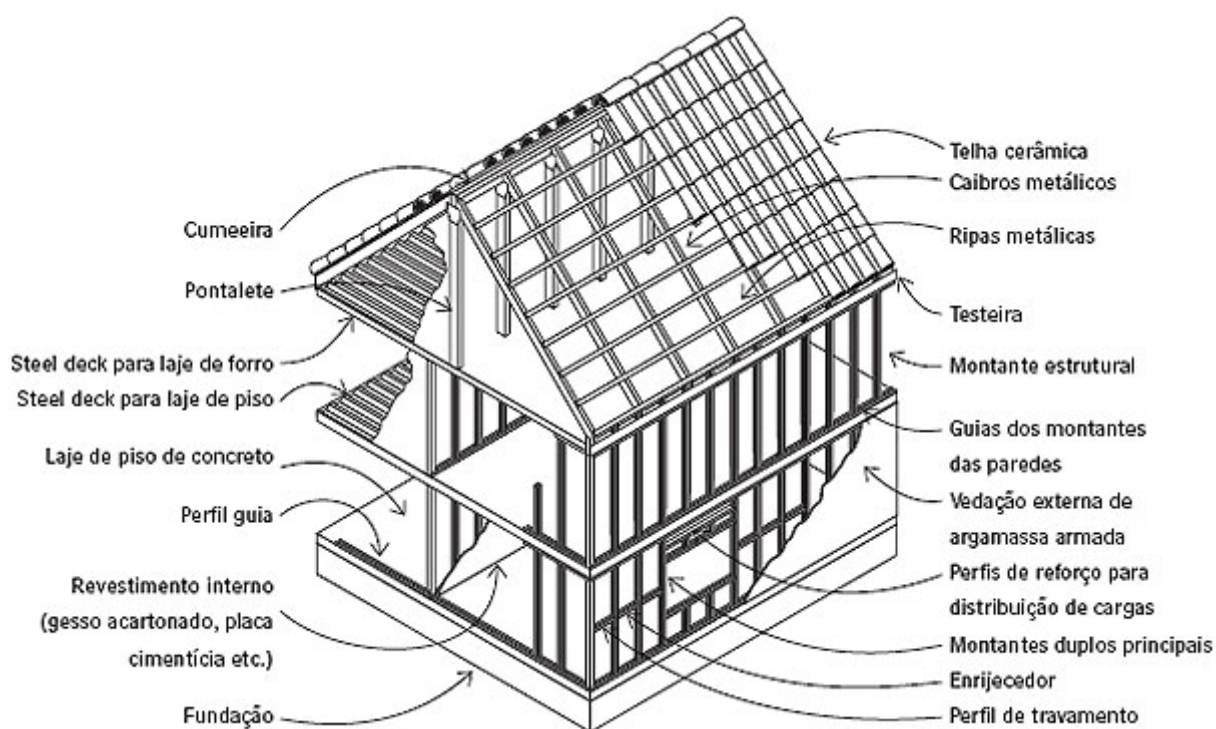


Figura 3.1 – Componentes estruturais e de vedação em uma edificação do tipo Light Steel Frame. Santiago *et al.* [2012]

racionalização de insumos e ao menor volume de resíduos gerados: enquanto uma obra em alvenaria pode produzir até $0,616 \text{ t/m}^2$ de resíduos, no LSF esse valor foi de apenas $0,095 \text{ t/m}^2$, uma redução próxima de 84,6% [Silva *et al.*, 2021].

Embora apresente diversas vantagens, o LSF também possui limitações. A altura das edificações exige cuidados adicionais com os revestimentos internos, que são mais frágeis e exigem acessórios específicos para suportar objetos pesados. Em acréscimo, a falta de conhecimento técnico e a baixa qualificação da mão de obra no Brasil dificultam a adoção em larga escala [Teixeira & Simplicio, 2018]. Outro ponto é a baixa resistência à água e ao fogo em determinadas situações, além da ausência de normatização técnica e incentivos financeiros, que dificultam sua consolidação no mercado nacional [Chan & Fontanini, 2017].

A Figura 3.2 mostra um exemplo real de edificação em execução com o uso do sistema LSF, evidenciando a estrutura metálica formada por perfis de aço galvanizado.



Figura 3.2 – Exemplo de edificação em construção utilizando o sistema LSF, evidenciando a estrutura metálica formada por perfis de aço galvanizado. [Decorações, n.d.]

3.1.1 PERFIL FORMADO A FRIO (PFF)

Os tipos de perfis estruturais metálicos utilizados na construção civil, segundo a forma de fabricação, são três: laminados a quente, soldados a partir de chapas e formados a frio [Santos, 2022]. O último grupo, de formação a frio, faz parte do escopo desse trabalho. Cada grupo possui normas técnicas específicas da ABNT, sendo que os PPF estão submetidos às diretrizes da norma ABNT NBR 14762:2010 ¹, que estabelece os requisitos para o dimensionamento de estruturas de aço formadas a frio, não destinadas a edifícios.

Conforme a norma ABNT NBR 14762, de 2010, os perfis pela conformação a frio são obtidos por meio do dobramento de fitas de metal, que podem ser contínuas, por meio de rolaadores, ou descontínuas, com prensas dobradeiras. Este processo utiliza chapas ou bobinas que podem ser laminadas a frio ou a quente e podem ou não ter revestimentos. A diferença mais marcante entre os processos é o nível de produção e a tecnologia utilizada.

O processo contínuo se caracteriza pelo perfilamento da chapa metálica numa linha de perfilamento com roletes, sendo esse mais adequado para produção em larga escala. Ao final desse processo, os perfis são cortados às medidas do projeto. Em contraste, o processo descontínuo é mais indicado para quantidades e produções específicas menores, utilizando prensas que realizarão dobras sequenciais na chapa metálica até ela assumir a geometria

¹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14762:2010 – Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio*. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://abnt.org.br/normalizacao/normas-publicadas/>.

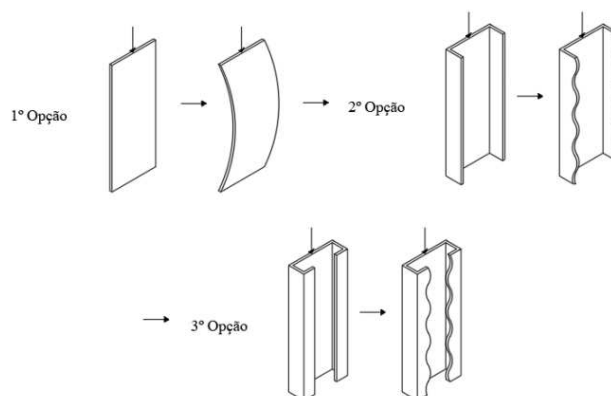


Figura 3.3 – Processo de enrijecimento do PFF. Carvalho *et al.* [2020]

final desejada para o perfil [Silva & Pignatta e Silva, 2008]. Aqui, o comprimento dos perfis está limitado às dimensões da prensa. O foco desta pesquisa são os descontínuos, visto que abordaremos casos de aberturas, interrupções de continuidade na distribuição de esforços ao longo da estrutura.

O processo de enrijecimento do PFF pode ser visualizado na Figura 3.3. Na primeira configuração, um perfil plano é submetido à ação de uma carga contínua. Devido à sua baixa rigidez estrutural, esse perfil é menos resistente à flambagem. É possível realizar uma dobra nas extremidades, aumentando a carga crítica, como na 2ª opção. A terceira configuração propõe uma nova dobra nas extremidades da mesa, resultando em uma geometria mais estável e com maior capacidade de resistir à flambagem [Santos, 2022].

Quanto aos tipos de perfis formados a frio utilizados na construção civil, a Figura 3.4 apresenta as seções transversais e as designações padronizadas conforme a norma ABNT NBR 14762:2010. São incluídos perfis como cantoneiras de abas iguais (L), perfis U simples e enrijecidos (U e Ue), e perfis Z enrijecidos a 90° e 45°.

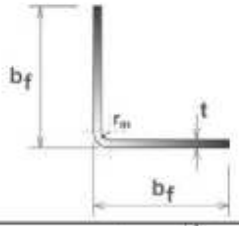
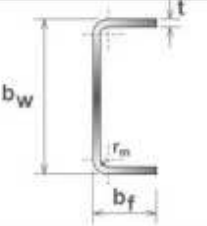
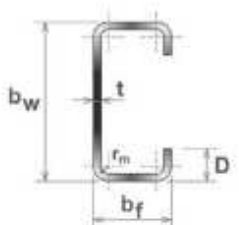
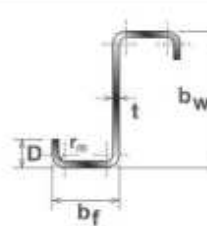
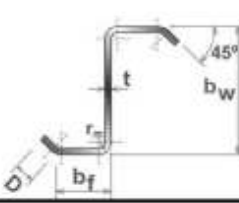
Série	Seção transversal	Designação
Cantoneira de abas iguais		L $b_f \times t$ Ex: L 50 x 3,00
U simples		U $b_w \times b_f \times t$ Ex: U 150 x 50 x 2,65
U enrijecido		Ue $b_w \times b_f \times D \times t$ Ex: Ue 150 x 60 x 20 x 2,65
Z enrijecido a 90°		Z₉₀ $b_w \times b_f \times D \times t$ Ex: Z₉₀ 200 x 75 x 20 x 2,25
Z enrijecido a 45°		Z₄₅ $b_w \times b_f \times D \times t$ Ex: Z₄₅ 200 x 75 x 20 x 2,25

Figura 3.4 – Principais tipos de perfis formados a frio (PFF) e suas designações conforme a ABNT NBR 14762:2010 Silva & Pignatta e Silva [2008]

3.2 Comportamento Estrutural de Perfis Metálicos

Nesta seção, são apresentados os conceitos fundamentais relacionados aos esforços de compressão e às deformações em elementos estruturais, que servem de base para a análise numérica desenvolvida neste trabalho.

3.2.1 Esforços de Compressão em Perfis Metálicos

Os esforços de compressão atuam nos elementos estruturais no sentido de reduzir seu comprimento longitudinal, aplicando forças opostas que tendem a aproximar as extremidades do componente. Em estruturas metálicas, como os perfis formados a frio

utilizados no sistema construtivo LSF, esses esforços são comuns em montantes e colunas verticais que suportam cargas de peso próprio, elementos de cobertura e ações externas.

A compressão axial uniforme gera tensões normais distribuídas ao longo da seção transversal do perfil. A resistência de um perfil metálico à compressão depende diretamente de suas propriedades geométricas (como área da seção transversal) e do material utilizado. No caso do aço estrutural, são considerados parâmetros como o limite de escoamento e o módulo de elasticidade, definidos segundo normas técnicas como a ABNT NBR 8800:2008, que trata do projeto de estruturas de aço, e a ABNT NBR 14762:2010, que regulamenta especificamente o dimensionamento de perfis formados a frio.

Em aplicações práticas, como em painéis LSF, é essencial garantir que os perfis resistam aos esforços de compressão impostos pelas cargas verticais, sem exceder os limites admissíveis de tensão e deformação. O conhecimento das propriedades do material e da geometria dos perfis é indispensável, pois esforços resultam em deformações axiais nos perfis, que devem ser avaliadas para garantir a funcionalidade e segurança da estrutura.

3.2.2 Deformações em Elementos Estruturais

As deformações em elementos estruturais são resultantes diretas da aplicação de cargas externas, que provocam alterações dimensionais nos corpos. No caso de elementos submetidos à compressão axial, como os montantes verticais de painéis estruturais, essas deformações ocorrem ao longo do eixo longitudinal, reduzindo o comprimento original da peça.

A deformação axial pode ser expressa pela relação entre a variação de comprimento e o comprimento inicial do elemento, conforme a equação:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.1)$$

onde:

- ε é a deformação unitária (adimensional);
- ΔL é a variação de comprimento;
- L_0 é o comprimento inicial do elemento.

Para materiais que obedecem ao comportamento elástico linear, a deformação está diretamente relacionada à tensão aplicada por meio da Lei de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.2)$$

em que:

- σ é a tensão normal (MPa);
- E é o módulo de elasticidade do material (MPa);
- ε é a deformação unitária.

No contexto de estruturas compostas por perfis formados a frio, como o Perfil U enrijecido (Ue) ou seção U formada a frio, utilizados em sistemas leves de construção, a análise das deformações é fundamental para prever o comportamento da estrutura sob carregamentos reais. A esbeltez dos montantes, aliada à presença de descontinuidades (como aberturas e conexões), pode intensificar os efeitos das deformações e comprometer a estabilidade global do sistema [Brandão, 2007].

Segundo Hibbeler (2010), a análise das deformações é essencial para garantir que os deslocamentos permaneçam dentro de limites admissíveis, evitando falhas por instabilidade ou perda de funcionalidade da estrutura.

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada envolveu a modelagem numérica de diferentes configurações de painéis em *Light Steel Frame* (LSF), compostos por perfis do tipo “U” formados a frio. As simulações foram realizadas no software *Abaqus*, amplamente reconhecido por sua eficiência em análises por elementos finitos, permitindo avaliar o comportamento estrutural dos painéis quando submetidos a esforços de compressão.

Além das configurações geométricas básicas, foram incluídas aberturas nos modelos, como portas e janelas, com o objetivo de investigar os efeitos dessas discontinuidades na estabilidade e resistência dos painéis. Essa análise possibilitou compreender como tais elementos influenciam os mecanismos de instabilidade e os deslocamentos estruturais, especialmente em situações críticas de carregamento.

Com o ambiente devidamente configurado, foi iniciada a construção da peça denominada “guia”, conforme apresentado na Figura 4.2. O componente foi definido como tridimensional e deformável, com base sólida e perfil extrudado, características adequadas para simulações de esforços mecânicos em estruturas alongadas. O tamanho aproximado foi estabelecido em 6000 unidades, compatível com os requisitos dimensionais do projeto.

Na sequência, elaborou-se o esboço da seção transversal da peça “guia”, considerando todas as dimensões em milímetros. O perfil geométrico adotado, exibido na Figura 4.2, possui 92 mm de comprimento e 39 mm de altura, definidos segundo as especificações técnicas do projeto. Esse contorno foi posteriormente utilizado na operação de extrusão para gerar o modelo tridimensional.

Para a peça “montante”, o procedimento foi semelhante. A Figura 4.3 apresenta o esboço com formato em “Ue”, composto por base de 90,4 mm, altura lateral de 39

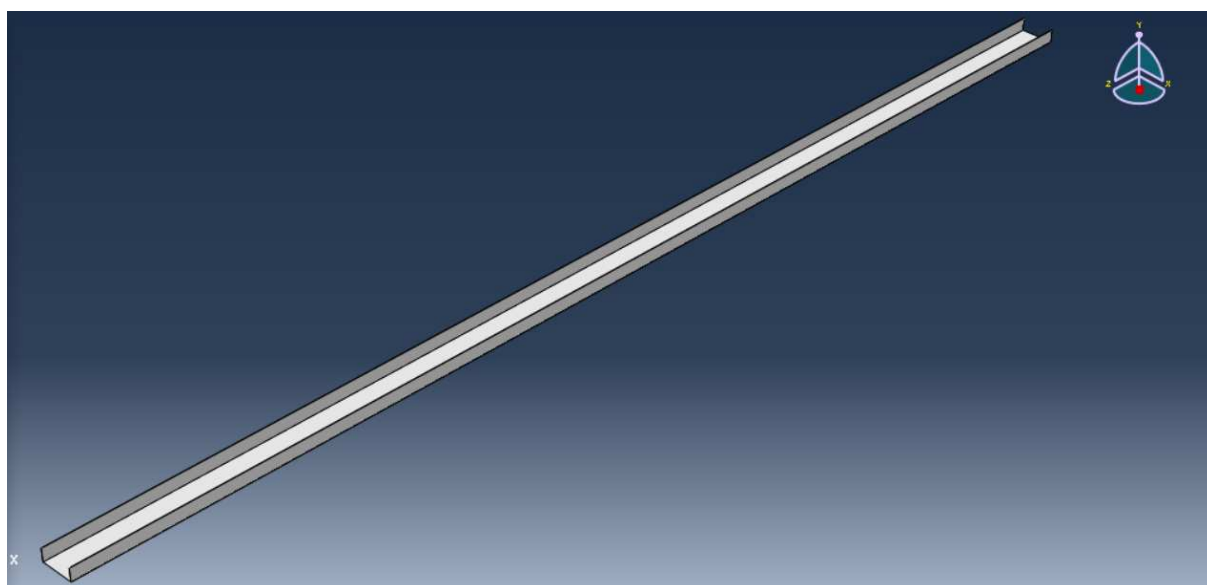


Figura 4.1 – Criação de peça, com parâmetros definidos para o modelo “guia”.

mm e aba superior de 17,2 mm. O comprimento foi ajustado de 92 mm para 90,4 mm para possibilitar o encaixe interno na guia, descontando-se 0,8 mm em cada extremidade, correspondente à espessura das paredes da peça guia.

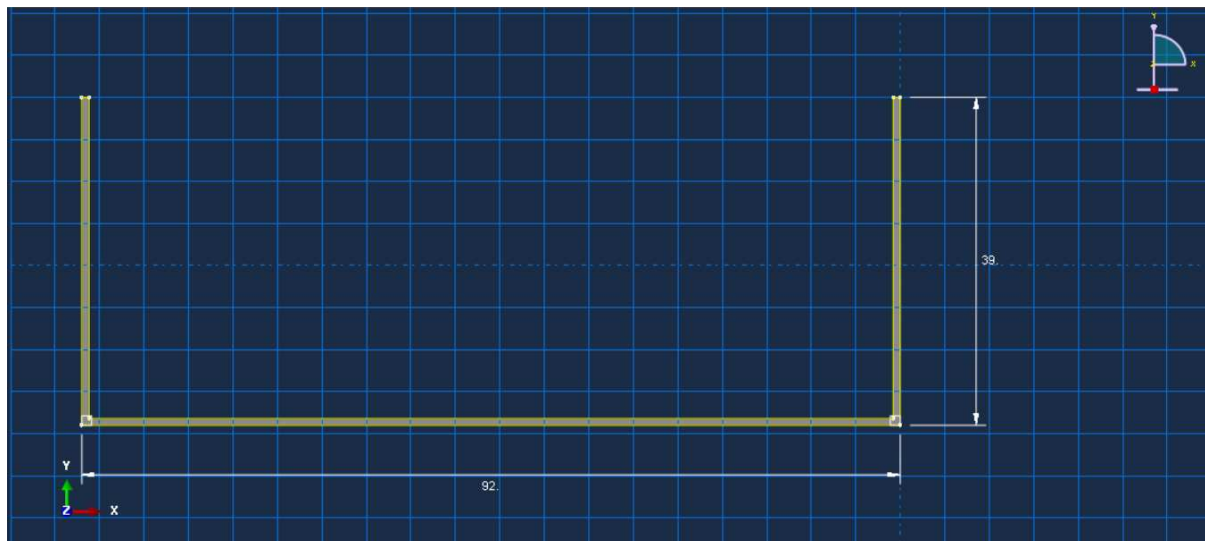


Figura 4.2 – Esboço da seção transversal da peça “guia”.

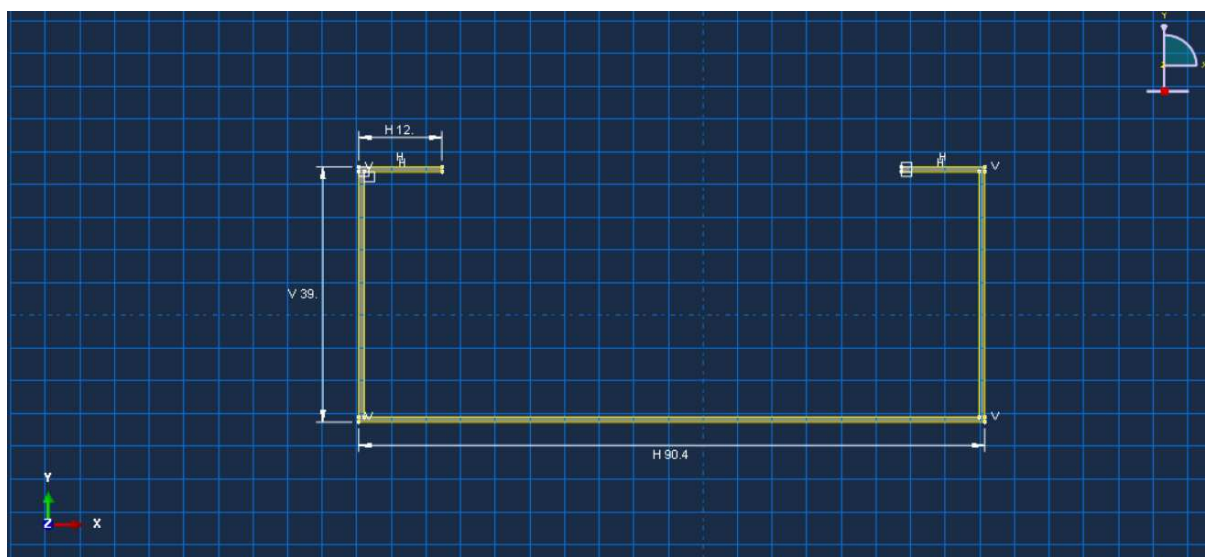


Figura 4.3 – Esboço da seção transversal da peça “montante”.

Propriedades do Material

Para representar adequadamente o comportamento mecânico das peças modeladas, foi criado no *Abaqus* um material denominado *aço*, cujas propriedades foram definidas com base em valores típicos do aço estrutural.

Inicialmente, foi atribuída uma densidade uniforme de 7850 kg/m^3 , valor compatível com o aço carbono amplamente utilizado em aplicações estruturais. Em seguida, foram especificadas as propriedades elásticas do material, assumindo comportamento isotrópico.

O módulo de elasticidade (Young) foi definido como 205.000 MPa, enquanto o coeficiente de Poisson adotado foi de 0,3.

Modelagem do Painel Liso - 3D

O primeiro modelo desenvolvido corresponde a um painel liso, ou seja, sem aberturas. Seguindo as recomendações da ABNT NBR 15758-1:2009, que estabelece o espaçamento entre montantes em sistemas estruturais leves com perfis metálicos, foi adotada uma distância de 400 mm entre os eixos dos montantes [ABNT, 2009]. Com base nesse valor, foram posicionados 9 montantes no ambiente de montagem (Assembly) do *Abaqus*, conforme ilustrado na Figura 4.4.

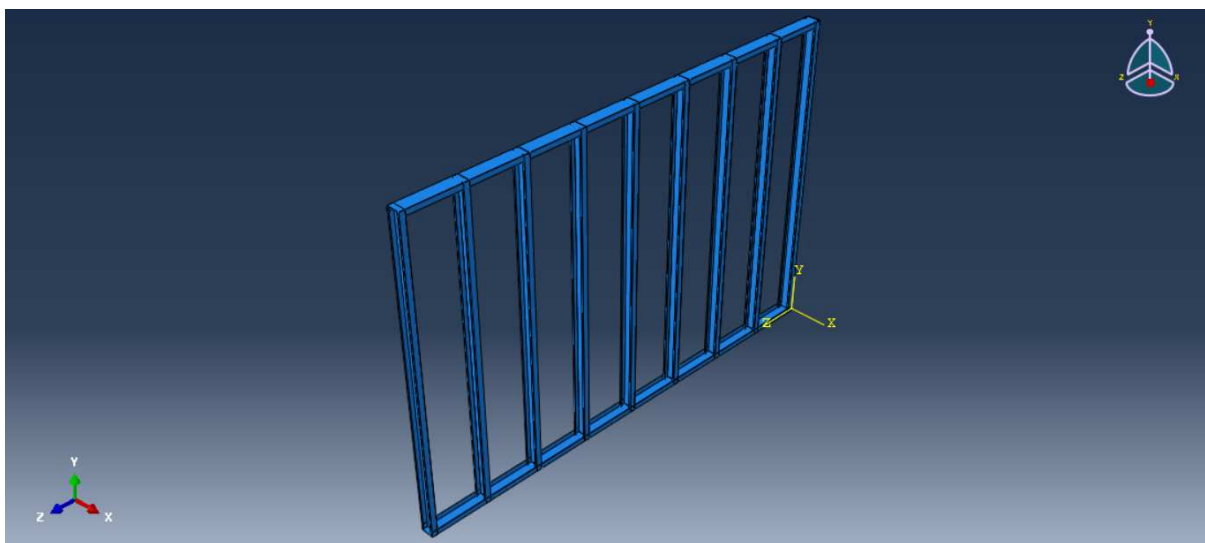


Figura 4.4 – Modelo do painel liso com 9 montantes espaçados a 400 mm no *Abaqus*.

Com o modelo do painel liso finalizado, aplicou-se uma condição de carregamento para simular a ação de pressão sobre a superfície externa. A Figura 4.5 apresenta a configuração desse carregamento. A parte superior, indicada por setas verticais apontando para baixo ao longo do comprimento, corresponde à superfície denominada *Surf-1*. Logo abaixo encontra-se a guia inferior, identificada como *Set-12*. A carga do tipo *pressure*, com magnitude de 0,014 MPa, foi aplicada na região identificada como *Surf-10 ls*, durante o passo de análise *Step-1 (Static, General)*.

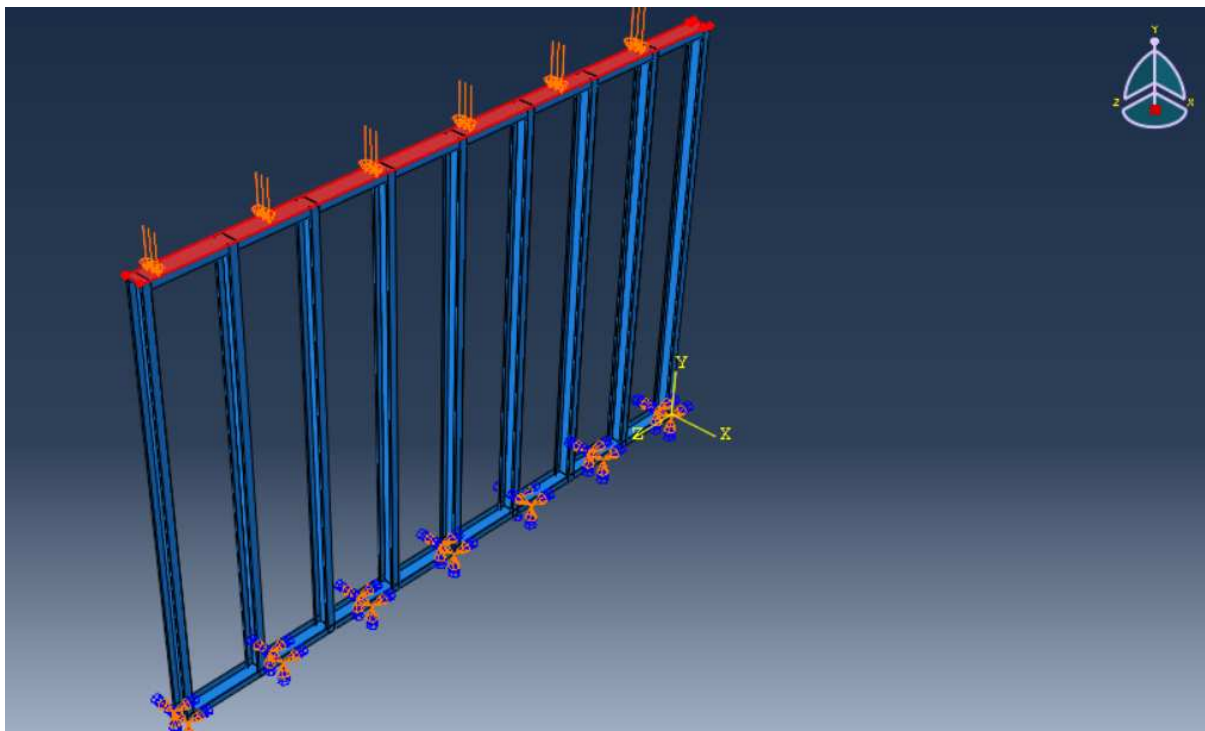


Figura 4.5 – Aplicação de carregamento por pressão uniforme no painel liso no *Abaqus*

Para garantir a estabilidade do modelo e representar adequadamente as restrições estruturais, foi aplicada uma condição de contorno do tipo engaste. Foi aplicada à região *Set-12* durante o passo de análise *Step-1 (Static, General)*. A condição de encastre selecionada ($U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$) impede qualquer deslocamento ou rotação nos nós da região especificada, simulando uma fixação rígida.

Cabe destacar que, na realidade, um painel de vedação leve é estabilizado pelo trabalho conjunto com os painéis adjacentes em um cômodo, e não por um engaste perfeito. Entretanto, como o modelo desenvolvido não incluiu a representação completa do ambiente com os quatro painéis, adotou-se o engaste como simplificação numérica para viabilizar a análise estrutural.

Após a definição da geometria, materiais, carregamentos e condições de contorno, foi realizada a discretização do modelo por meio da geração de malha. A malha foi aplicada utilizando elementos do tipo *Hex-dominated*, com técnica *Sweep*, visando garantir boa qualidade de discretização e compatibilidade com a geometria extrudada. O algoritmo de crescimento interno foi ajustado com taxa de 1,05, permitindo uma transição suave entre os elementos. A malha gerada é exibida sobre o modelo com sobreposição em vermelho, indicando a distribuição dos elementos ao longo da estrutura.

Para garantir uma discretização adequada da geometria, foi configurada a semente global de malha. O tamanho global aproximado dos elementos foi definido como 160, com controle de curvatura ajustado para um fator de desvio máximo de 0,1 e número aproximado de elementos por círculo igual a 8.

Além disso, foi especificado um tamanho mínimo de elemento, tanto por fração do tamanho global (0,1) quanto por valor absoluto (16). Esses parâmetros foram escolhidos para equilibrar a qualidade da malha com o custo computacional da simulação.

Finalmente, a malha construída possui 13.977 nós e 6.721 elementos, conforme exibido na Figura 4.7.

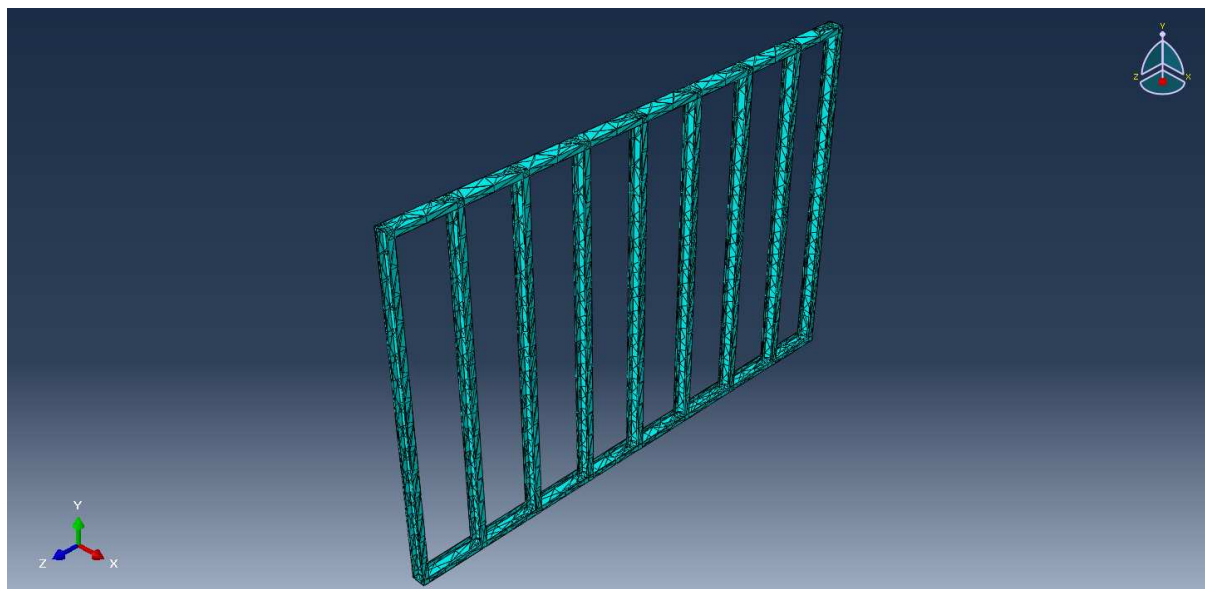


Figura 4.6 – Configuração da malha no painel liso

Modelo Bidimensional

O modelo bidimensional (2D) do painel, desenvolvido no *Abaqus*, está ilustrado na Figura 4.7. Ele foi criado para possibilitar uma comparação direta com os modelos tridimensionais (3D) simulados anteriormente, permitindo avaliar as diferenças na resposta estrutural entre as duas abordagens.

Com dimensões de 3,220 mm de largura e 2,300 mm de altura (conforme indicado pelas cotas na imagem), o painel 2D teve sua malha gerada sobre a geometria plana, utilizando elementos adequados para análise bidimensional.

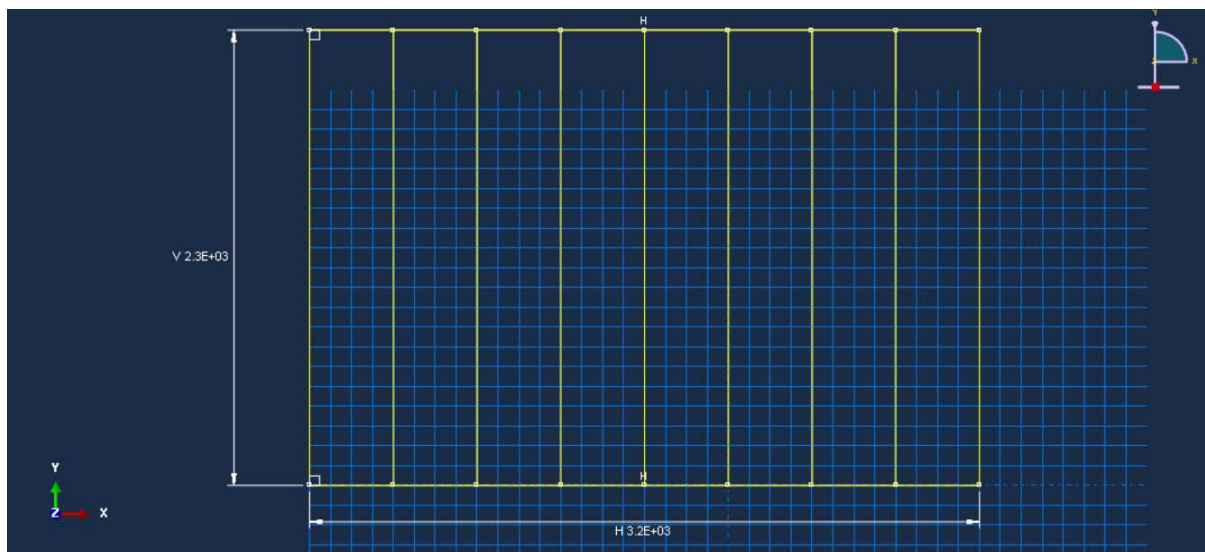


Figura 4.7 – Modelo bidimensional do painel desenvolvido para comparação com os modelos 3D.

Na sequência, realizou-se a atribuição da seção estrutural ao modelo 2D. A seção denominada *Section-montante*, do tipo *Beam (viga)* com propriedades constantes, foi associada ao material aço previamente definido.

Por fim, a mesma seção *Section-montante* foi atribuída à região Set-2 do modelo, garantindo que todos os elementos estruturais estejam corretamente configurados para a análise, utilizando o material aço.

Definição da Seção de Viga – Modelo 2D

A seção *Section-guia* foi definida como do tipo *Beam*, com integração durante a análise (*During analysis*) e perfil geométrico arbitrário denominado *Profile-U*. A seção *Section-montante* foi configurada da mesma forma, utilizando o perfil *Profile-Ue*. Ambas compartilham o material aço, garantindo consistência nas propriedades mecânicas dos elementos estruturais.

Como o *Abaqus* não dispõe de perfis pré-estabelecidos compatíveis com os montantes utilizados neste estudo, optou-se por utilizar a opção de seção arbitrária para representar os perfis “U” e “Ue”.

A definição do perfil arbitrário *Profile-U* representa a seção transversal da peça “guia” e foi criada a partir de quatro pontos conectados por segmentos, com espessura constante de 0,8 mm. As coordenadas foram inseridas conforme posicionamento geométrico na origem do sistema de coordenadas.

De maneira similar, a construção do perfil *Profile-Ue* representou a seção da peça “montante” no modelo 2D, utilizando pontos manualmente posicionados e espessura constante de 0,8 mm.

Carregamento 2D

No modelo bidimensional do painel, foi aplicada uma carga concentrada na região *Set-2* durante o passo de análise *Step-1 (Static, General)* do *Abaqus*.

O valor da carga foi calculado a partir da pressão inicialmente considerada, convertendo-se a carga distribuída em forças concentradas aplicadas nos montantes. A fórmula utilizada foi:

$$F = p \times \frac{L}{n} = 0,014 \times \frac{3.200}{9} \approx 4,97$$

onde:

- $p = 0,014$ representa a pressão distribuída (unidades de força por unidade de comprimento);
- $L = 3.200$ mm é o comprimento total do painel;
- $n = 9$ é o número de montantes, correspondendo aos pontos de aplicação da carga.

Assim, cada montante recebeu uma carga concentrada vertical para baixo de aproximadamente 4,97 N.

Contorno 2d

No modelo bidimensional do painel restrição foi definida como do tipo engaste, aplicada à região *Set-1* durante o passo de análise *Step-1 (Static, General)*, figura 4.8.

A condição de engaste implica que todos os graus de liberdade de translação e rotação estão bloqueados ($U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$), simulando uma fixação rígida na base da estrutura. Na visualização do modelo, os símbolos laranja indicam os pontos de aplicação da restrição, enquanto as setas amarelas representam os carregamentos previamente definidos.

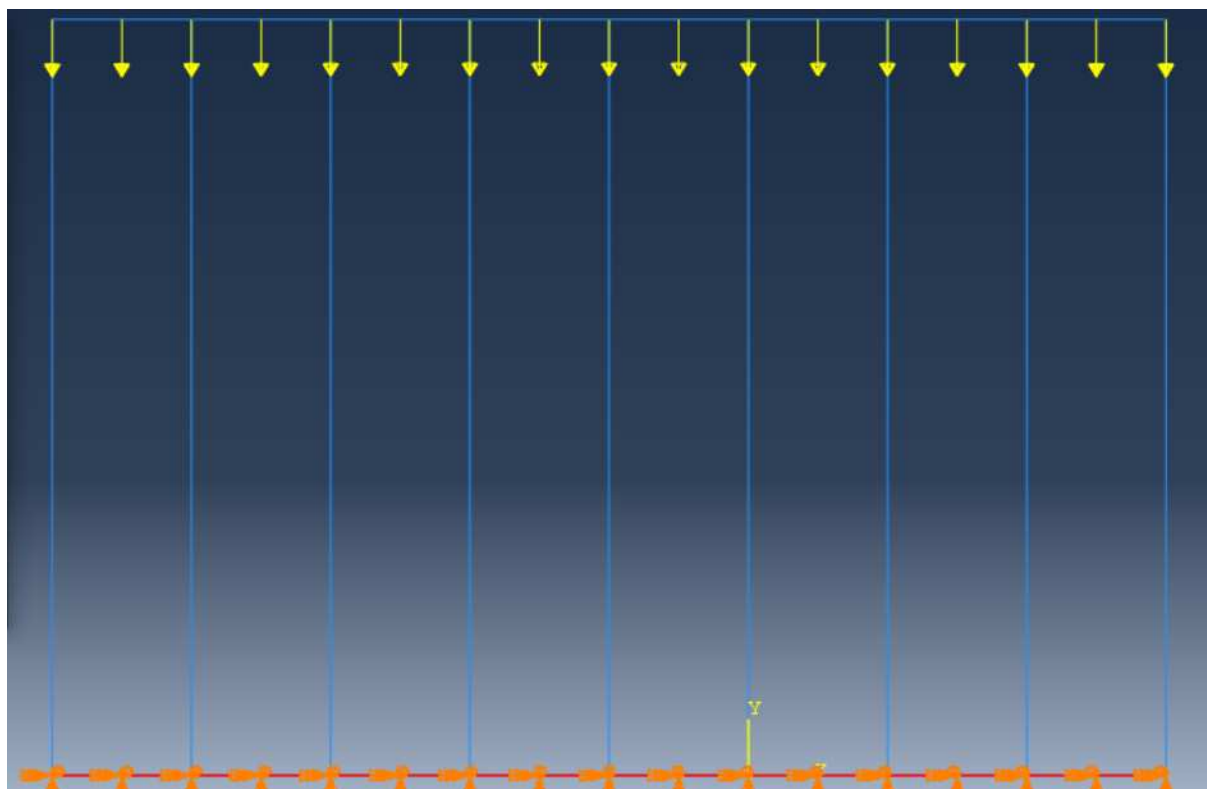


Figura 4.8 – Aplicação de condição de contorno do tipo encastre no modelo 2D do painel.

Embora essa condição de contorno não reproduza exatamente o comportamento real da estrutura, onde os painéis atuam conjuntamente, conectados entre si formando um cômodo, optou-se por aplicar a mesma restrição do modelo tridimensional para uma base de comparação coerente.

Modelo Geométrico – Painel 2D com Janela

Neste modelo bidimensional, foi inserida uma abertura central do tipo janela, com 800 mm de largura. As dimensões externas do painel permaneceram as mesmas do modelo sem aberturas, ou seja, 3.200 mm de largura e 2.300 mm de altura.

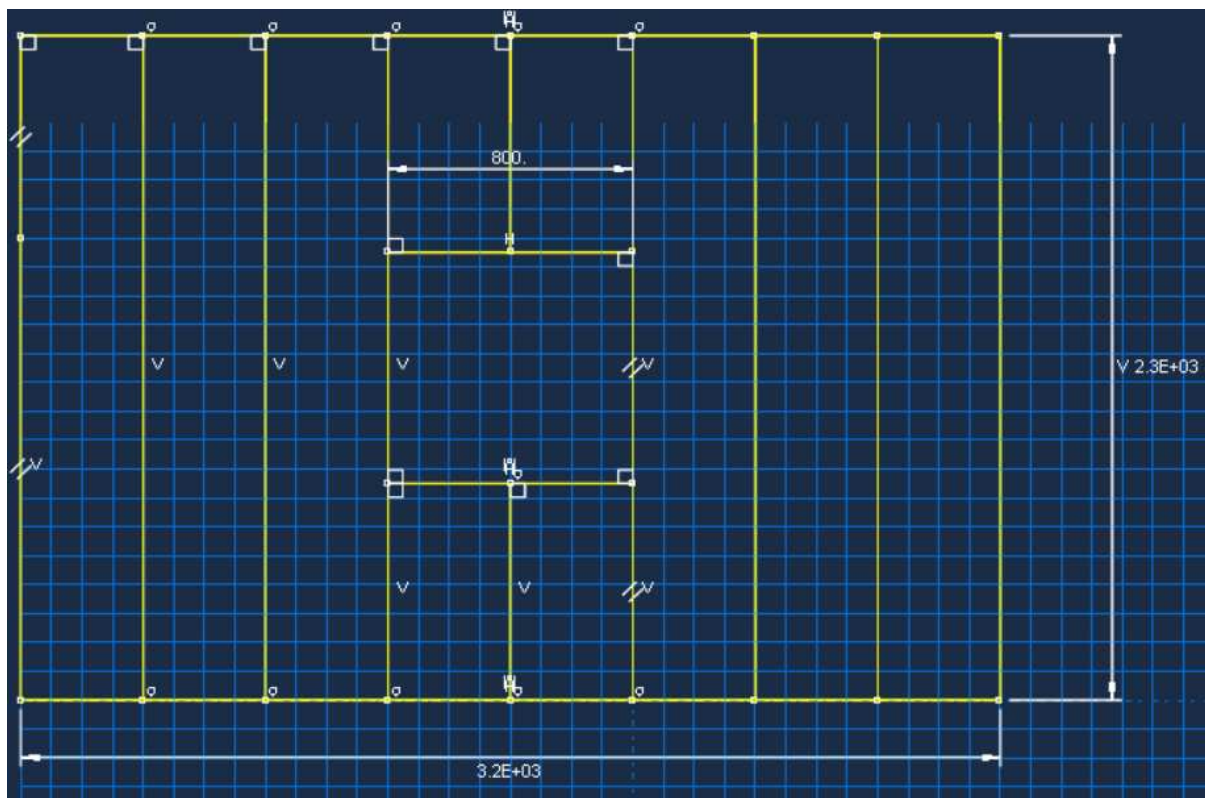


Figura 4.9 – Esquema geométrico do painel 2D com abertura central do tipo janela.

Modelo Geométrico – Painel 2D com Porta

O modelo com abertura do tipo porta foi configurado com largura de 800 mm e altura de 1.600 mm, mantendo as dimensões globais do painel em 3.200 mm de largura e 2.300 mm de altura.

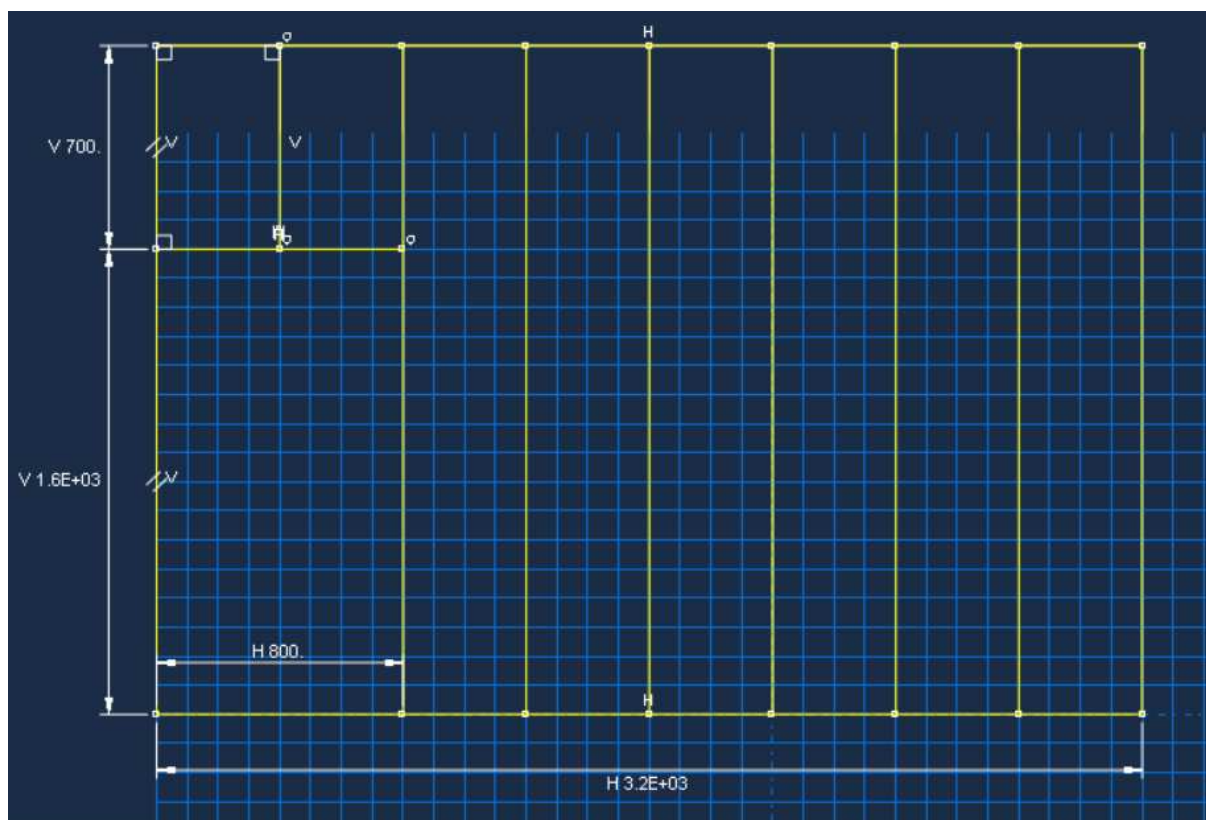


Figura 4.10 – Esquema geométrico do painel 2D com abertura central do tipo porta.

Modelagem 2D com Abertura de Porta e Janela

O painel bidimensional com aberturas para porta e janela foi modelado no *Abaqus*, conforme ilustrado na Figura 4.11. As dimensões adotadas seguem medidas típicas de aplicação real:

- Altura total do painel: 2.300 mm;
- Largura total do painel: 3.200 mm;
- Abertura superior (janela): 800×700 mm (largura $\times$ altura);
- Abertura inferior (porta): 800×1.600 mm (largura $\times$ altura).

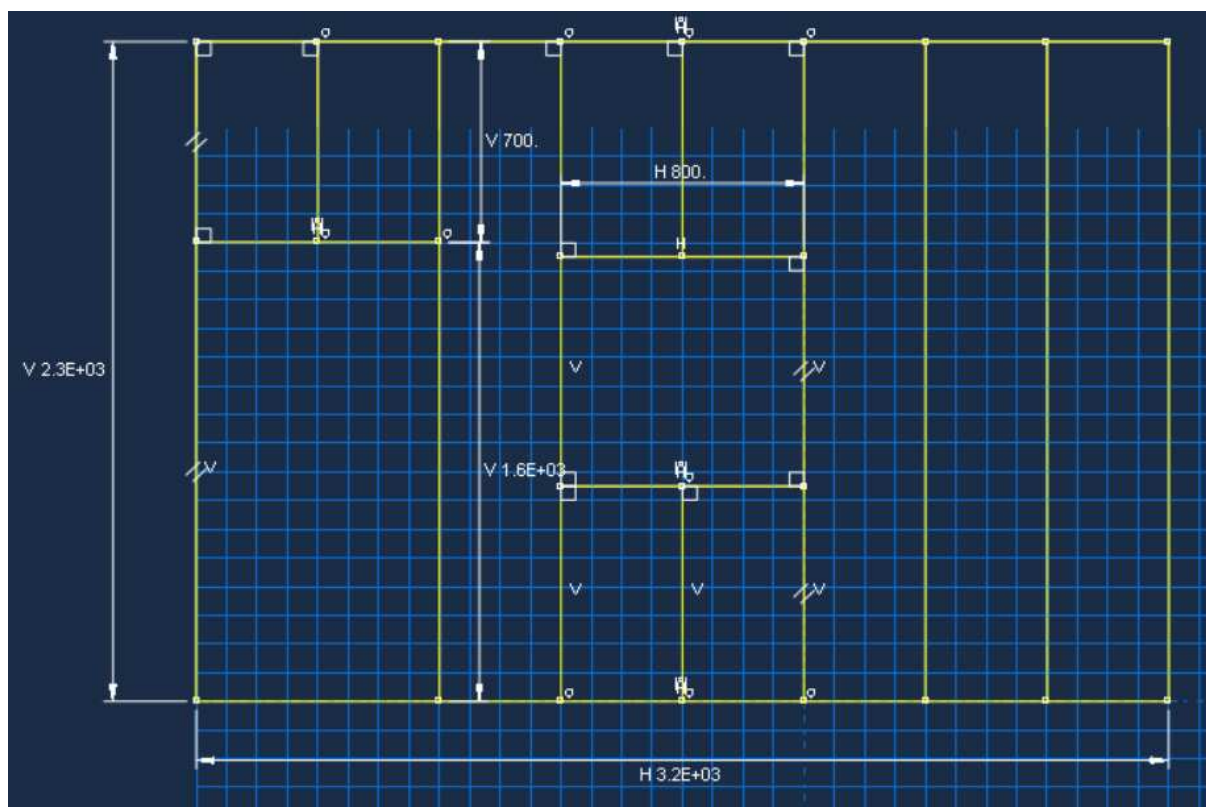


Figura 4.11 – Modelagem 2D do painel com abertura de porta e janela no *Abaqus*

Malha 2d

Durante a definição da malha para o modelo 2D, foi selecionado o tipo de elemento B31, correspondente a uma viga linear com dois nós no espaço. Essa escolha foi realizada por meio da janela de configuração de tipo de elemento, onde foram definidos os seguintes parâmetros: biblioteca *Standard*, ordem geométrica *Linear*, família *Beam* e tipo de viga *Shear-flexible*. Essa configuração é adequada para representar o comportamento estrutural dos perfis utilizados no painel.

O tamanho global aproximado dos elementos foi definido como 230 mm, com controle de curvatura ativado e número aproximado de elementos por círculo igual a 8. Além disso, foi especificado um tamanho mínimo absoluto de 23 mm, garantindo uma malha mais refinada nas regiões críticas da geometria. A malha gerada pode ser visualizada ao fundo da imagem, com os elementos distribuídos de forma regular sobre o painel.

Para sintetizar e facilitar a configuração dos diferentes cenários, a Tabela 4.1 apresenta os principais parâmetros variáveis considerados. Foram analisados painéis lisos e com aberturas (porta, janela ou ambos), em configurações tridimensionais (3D) e bidimensionais (2D). A malha utilizada possui 264 nós e 271 elementos. Já o resumo da malha e o tempo de simulação para os diferentes modelos estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 – Parâmetros variáveis dos modelos simulados no Abaqus

Modelo	Tipo de Painel	Dimensão	Abertura(s)	Tipo de Carga	Carga	Espessura (mm)	Nº Montantes	Elemento	Tipo de Malha
1	Painel liso	3D	Nenhuma	Pressão uniforme	0,014 MPa	0,8	9	Hex-dom.	Sweep
2	Painel com janela	3D	Janela	Pressão uniforme	0,014 MPa	0,8	9 (ajustado)	Hex-dom.	Sweep
3	Painel com porta	3D	Porta	Pressão uniforme	0,014 MPa	0,8	9 (ajustado)	Hex-dom.	Sweep
4	Porta + Janela	3D	Porta e janela	Pressão uniforme	0,014 MPa	0,8	9 (ajustado)	Hex-dom.	Sweep
5	Painel liso	2D	Nenhuma	Carga conc. nos perfis	~4.97 N/mm	0,8	9	B31	Lin. regular
6	Painel com abertura	2D	Abertura central	Carga conc. nos perfis	~4.97 N/mm	0,8	9	B31	Lin. regular
7	Painel com janela	2D	Janela	Carga conc. nos perfis	~4.97 N/mm	0,8	9	B31	Lin. regular
8	Porta + Janela	2D	Porta e janela	Carga conc. nos perfis	~4.97 N/mm	0,8	9	B31	Lin. regular

Tabela 4.2 – Resumo da malha e tempo de simulação para os diferentes modelos

Modelo	Malha			Tempo de Simulação (segundos)		
	Nós	Elementos	User Time (s)	System Time (s)	CPU Time (s)	Tempo Total Aproximado (s)
Modelos 2D						
Painel Liso	264	271	0.3	0.1	0.4	19
Porta 2D	110	118	0.2	0.1	0.3	21
Janela 2D	114	124	0.2	0.1	0.3	21
Porta + Janela 2D	109	120	0.3	0.1	0.4	22
Modelos 3D						
Painel Liso	13977	6721	2.4	0.1	2.5	21
Porta 3D	13927	6735	3.2	0.1	3.3	23
Janela 3D	15902	7748	4.1	0.2	4.3	30
Porta + Janela 3D	15925	7823	4.1	0.2	4.3	31

5 RESULTADOS

Com o objetivo de garantir uma comparação mais direta e confiável entre os modelos 2D e 3D, optou-se por concentrar a análise nos deslocamentos. Essa escolha se justifica pelo fato de que os deslocamentos representam uma resposta estrutural global menos sensível a variações locais de malha, tipo de elemento ou forma de carregamento. Além disso, os deslocamentos são grandezas diretamente comparáveis entre diferentes domínios dimensionais, mesmo quando há diferenças na forma de aplicação da carga (como pressão em superfícies no 3D e força concentrada ou distribuída em linhas no 2D). Dessa forma, a análise dos deslocamentos permite avaliar com maior clareza a coerência entre os modelos e a influência das aberturas na rigidez da estrutura.

Resultados da Simulação – Painel Sem Abertura

A Figura 5.1 apresenta o resultado da simulação do deslocamento total (U , *Magnitude*) do painel liso, considerando o engaste na base da guia e os montantes distribuídos uniformemente. O contorno de cores indica a magnitude dos deslocamentos, variando de 0,000 mm (azul) até 0,060 mm (vermelho), conforme a legenda exibida à esquerda.

Observa-se que os maiores deslocamentos ocorrem na região superior do painel, próxima à aplicação da carga, enquanto a base permanece praticamente sem deslocamento, o que era esperado devido à condição de engaste. Além disso, os deslocamentos máximos concentraram-se nas bordas do painel, o que é típico para painéis esbeltos submetidos à pressão distribuída.

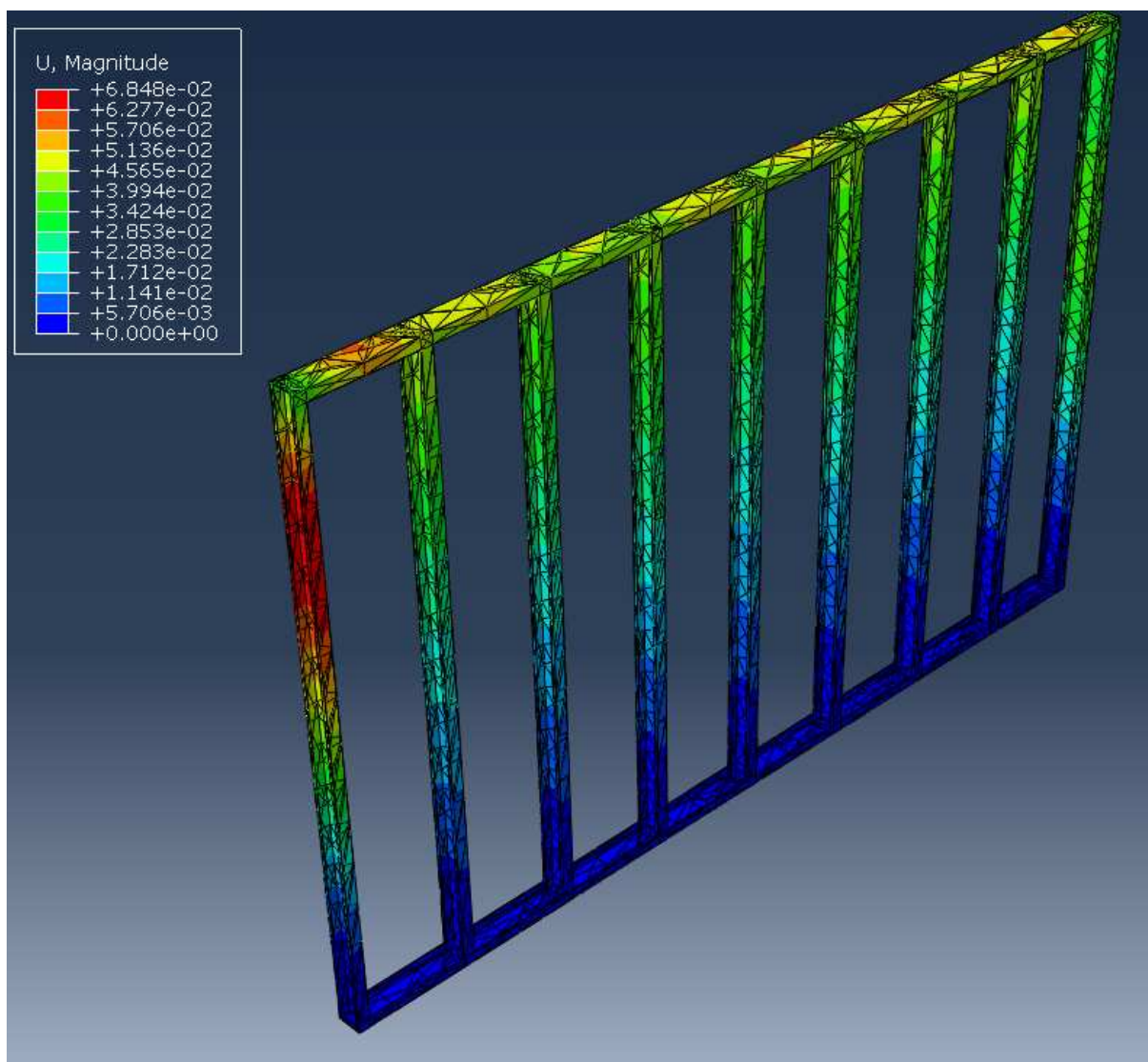


Figura 5.1 – Distribuição do deslocamento total no painel liso com montantes.

Resultados da Simulação – Painel com Abertura de Porta

No modelo com abertura de porta, a distribuição do deslocamento total (U , *Magnitude*) apresentou valores entre 0,000 mm e 0,123 mm, conforme a escala cromática exibida na Figura 5.2.

As maiores deformações concentram-se ao redor da abertura e nos cantos superiores do painel, onde a perda de continuidade estrutural reduz a rigidez. Nota-se também uma tendência de amplificação dos deslocamentos na região central do montante superior a porta, enquanto a base permanece praticamente estável devido ao engaste.

Esse comportamento evidencia o impacto da presença de aberturas alongadas sobre a resposta estrutural e reforça a necessidade de reforços adicionais em painéis que possuam portas ou grandes vãos.

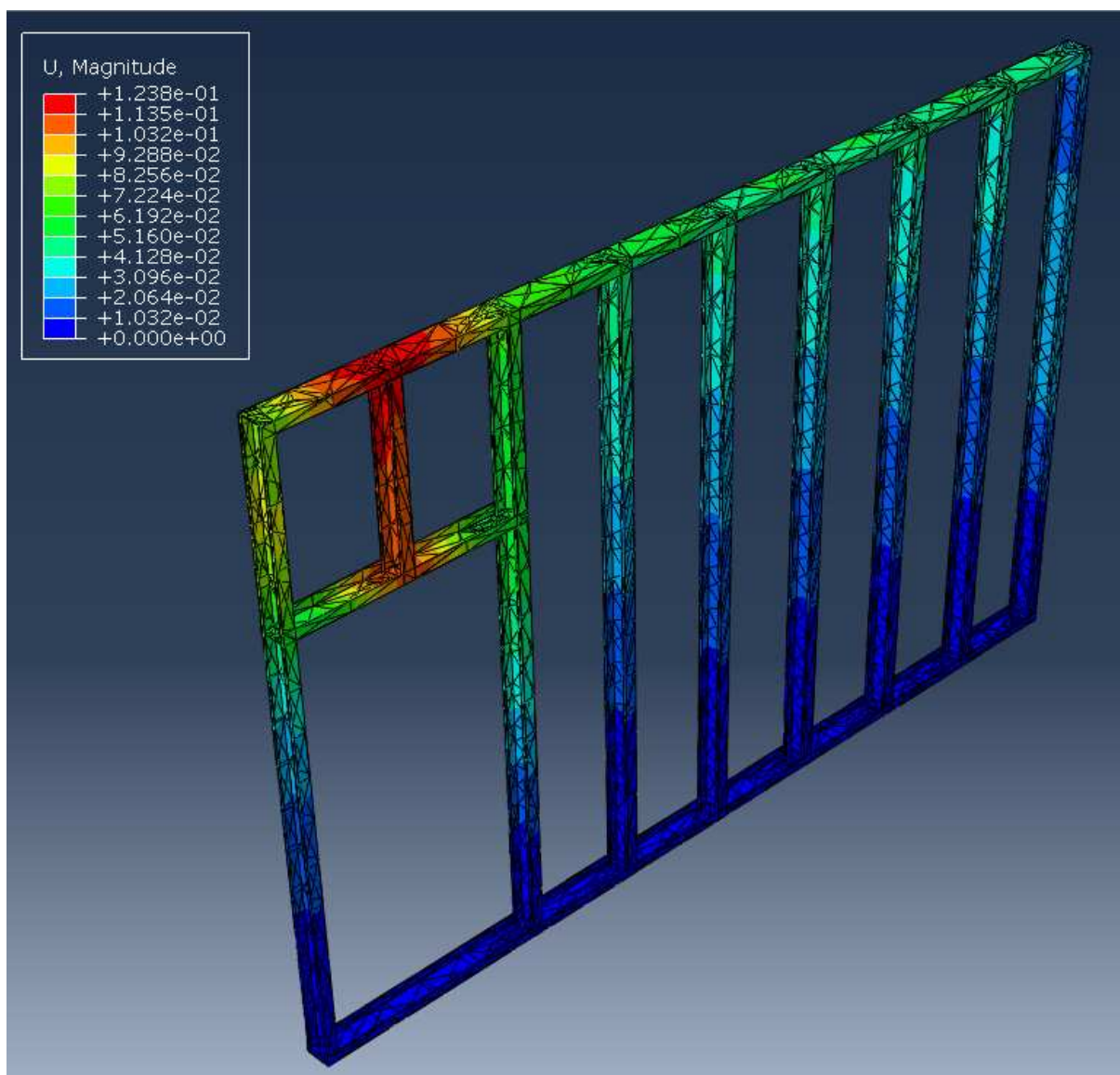


Figura 5.2 – Distribuição do deslocamento total no painel com abertura de porta.

Resultados da Simulação – Painel com Abertura de Janela

A simulação do painel com abertura de janela resultou na distribuição de deslocamento total (U , *Magnitude*) mostrada na Figura 5.3. A variação ocorre entre 0,000 mm (azul) e 0,1304 mm (vermelho), conforme a legenda lateral.

As deformações concentram-se principalmente ao redor da abertura, com maior intensidade no montante superior à janela, onde há descontinuidade de rigidez. A presença da janela reduz a capacidade de resistência local do painel, aumentando sua flexibilidade sob a carga aplicada, enquanto as regiões inferiores e próximas ao engaste apresentam deslocamentos mínimos.

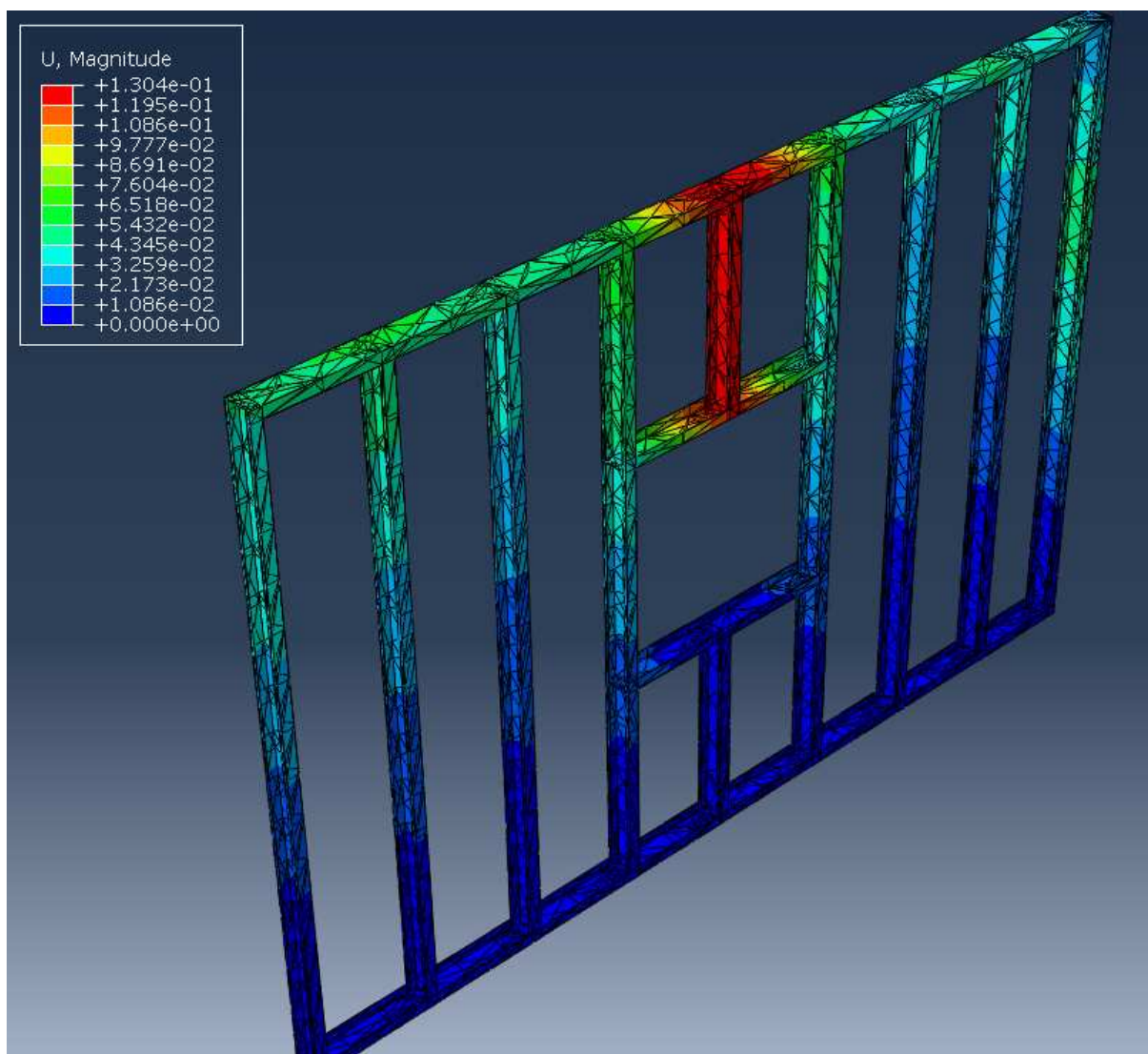


Figura 5.3 – Distribuição do deslocamento total no painel com abertura de janela.

Resultados da Simulação – Painel com Abertura de Janela e Porta

O painel com abertura dupla, composto por uma porta e uma janela, apresentou a distribuição do deslocamento total (U , *Magnitude*) mostrada na Figura 5.4. Os valores obtidos na simulação variam entre 0,000 mm e 0,1237 mm, de acordo com a escala de cores indicada na legenda.

O comportamento estrutural observado em cada abertura individualmente segue o mesmo padrão verificado nos modelos com aberturas isoladas, com deslocamentos mais acentuados nos cantos da janela e ao longo da borda superior da porta. No entanto, a presença simultânea das duas aberturas promove uma redistribuição de esforços que torna o painel globalmente mais flexível, aumentando a probabilidade de deslocamentos máximos em regiões críticas. Esse resultado evidencia que a combinação de vãos reduz a rigidez global da estrutura e demanda atenção especial ao projeto de reforços.

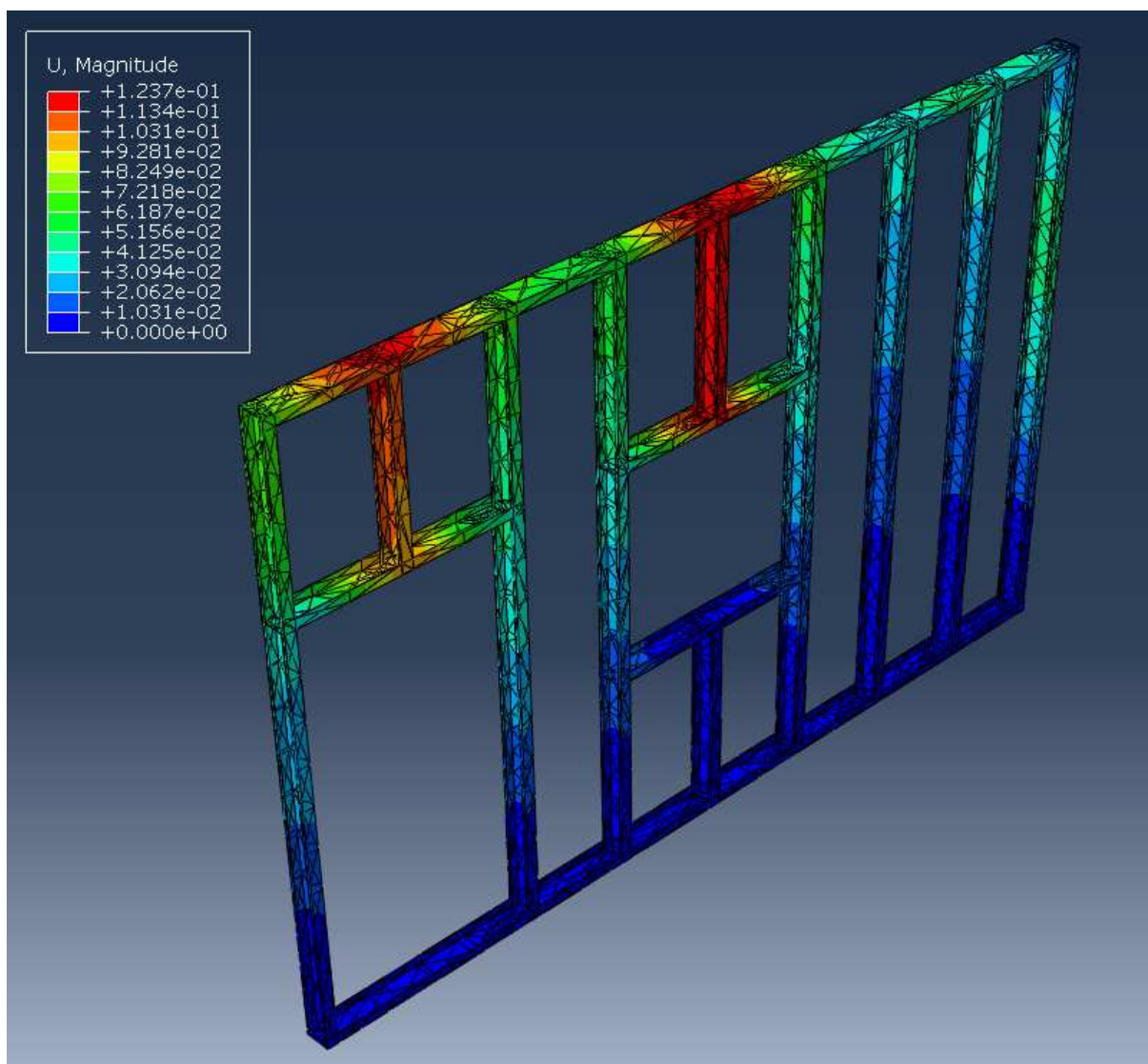


Figura 5.4 – Distribuição do deslocamento total no painel com abertura de janela e porta.

Deslocamento Total – Modelo 2D sem Abertura com Carga Concentrada

A simulação do modelo bidimensional sem abertura, submetido a carga concentrada nos perfis, apresentou deslocamentos entre 0,000 mm e aproximadamente 0,01447 mm, conforme ilustrado na Figura 5.5. A distribuição obtida é coerente com o comportamento esperado para um painel sem descontinuidades, com deformações mais pronunciadas na região superior, próxima à aplicação da carga, e mínima movimentação na base fixada.

Este resultado funciona como referência para comparação com os modelos que possuem aberturas, permitindo avaliar de forma clara como a presença de vãos afeta a rigidez global e a concentração de deslocamentos na estrutura.

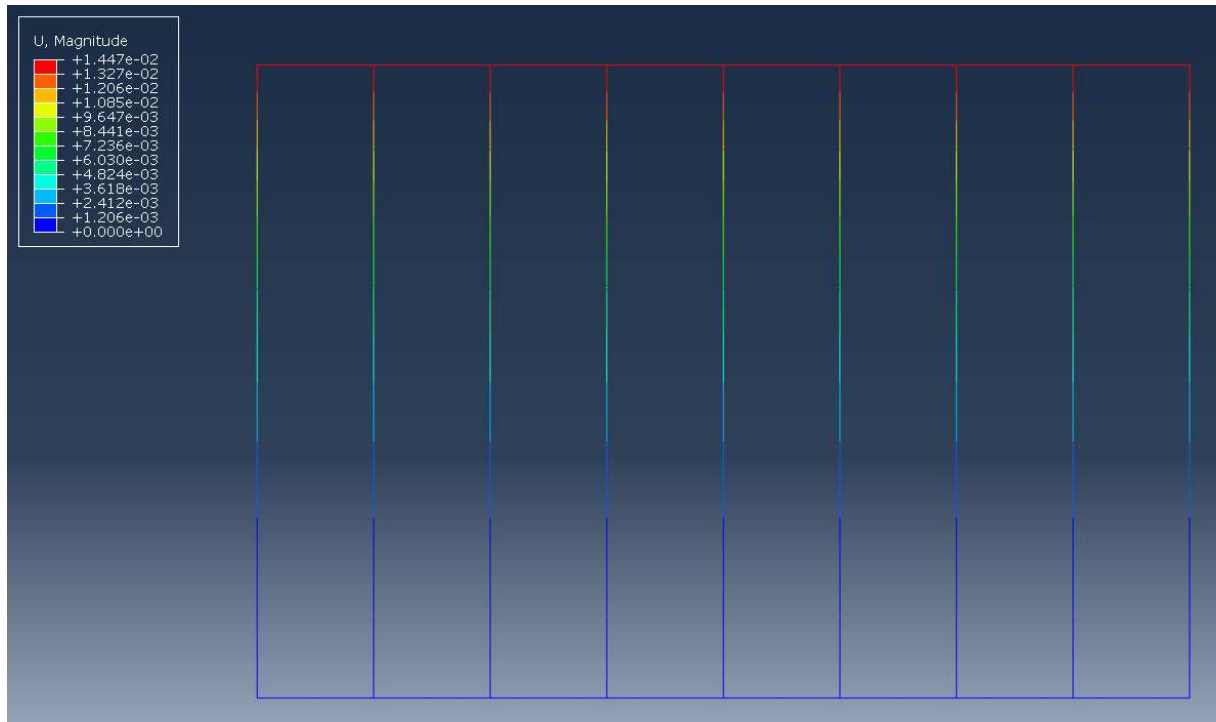


Figura 5.5 – Distribuição do deslocamento total no modelo 2D sem abertura com carga concentrada.

Deslocamento Total – Modelo 2D com Abertura de Porta

A simulação do modelo bidimensional com abertura para porta, submetido à carga concentrada nos perfis, indicou deslocamentos máximos em torno de 0,020068 mm. As deformações mais significativas concentram-se na parte superior do painel em cima da porta, refletindo a redução da rigidez local causada pela descontinuidade geométrica.

Esse comportamento está alinhado com as expectativas para estruturas que apresentam vãos, evidenciando pontos críticos que podem demandar reforços para garantir a estabilidade estrutural.

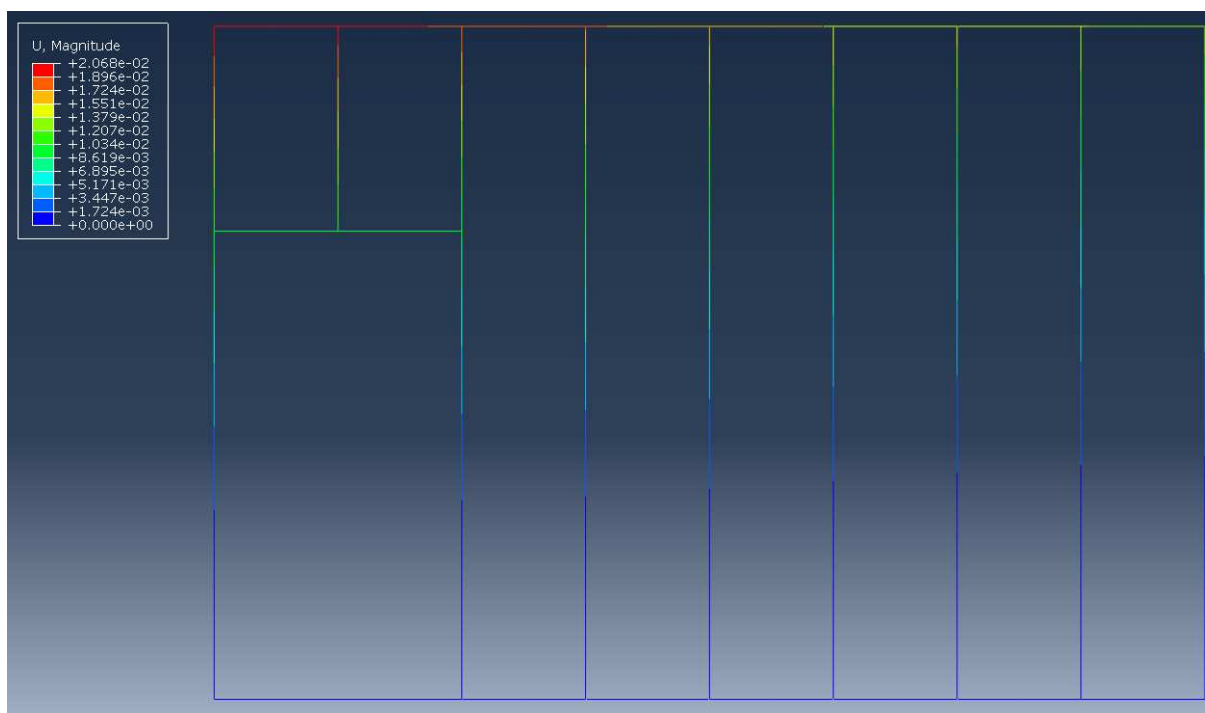


Figura 5.6 – Distribuição do deslocamento total no modelo 2D com abertura para porta, utilizando carga concentrada.

Deslocamento Total – Modelo 2D com Abertura de Janela

No modelo com abertura de janela, a análise revelou deslocamentos máximos próximos a 0,0165 mm. Os maiores valores ocorreram nas regiões na parte superior do painel. Os resultados obtidos aproximam-se da ordem de grandeza observada nos modelos tridimensionais, indicando que a carga concentrada nos perfis representa uma abordagem adequada para simular o carregamento neste contexto.

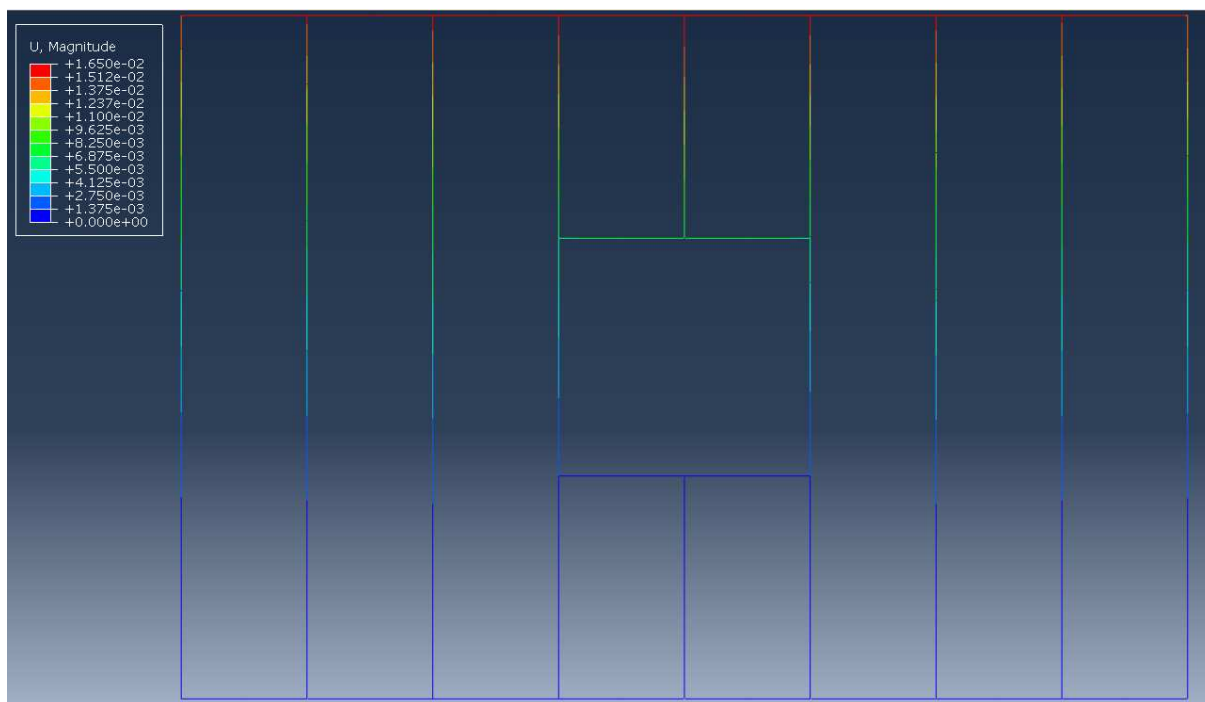


Figura 5.7 – Distribuição do deslocamento total no modelo 2D com abertura para janela, utilizando carga concentrada.

Deslocamento Total – Modelo 2D com Abertura de Porta e Janela

A simulação do painel com aberturas para porta e janela, submetido à carga concentrada, apresentou deslocamentos máximos em torno de 0,02186 mm. As maiores deformações concentraram-se na guia superior mais à esquerda, próximo à porta.

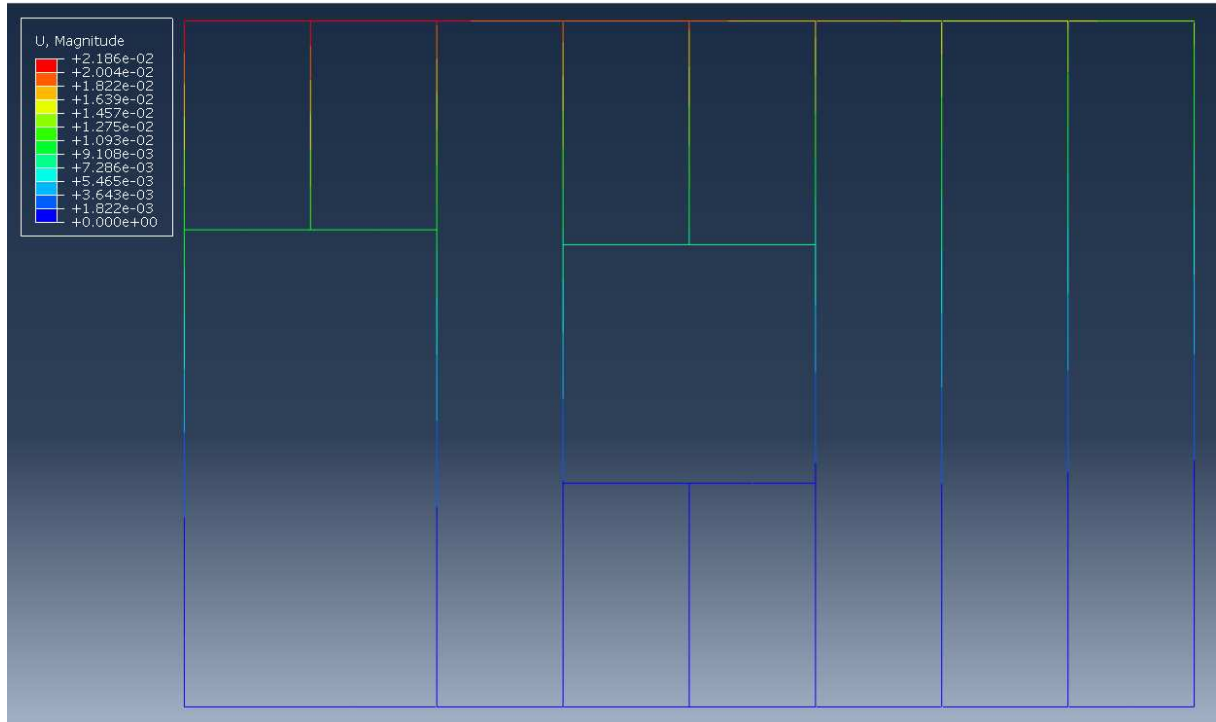


Figura 5.8 – Distribuição do deslocamento total no modelo 2D com aberturas para porta e janela, utilizando carga concentrada.

A Tabela 5.1 apresenta os valores de deslocamento total máximo obtidos nas simulações dos modelos 2D e 3D, considerando diferentes configurações geométricas: painel liso, com abertura de porta, com abertura de janela e com ambas as aberturas.

Observa-se que os modelos tridimensionais apresentam deslocamentos significativamente maiores em relação aos modelos bidimensionais, o que é esperado devido à maior complexidade geométrica e à forma de aplicação da carga (pressão distribuída em superfície no 3D versus carga concentrada nos perfis no 2D).

Tabela 5.1 – Comparação dos deslocamentos totais entre os modelos 2D e 3D

Configuração do Pannel	Modelo 2D (mm)	Modelo 3D (mm)
Sem abertura	0,00 – 0,01447	0,00 – 0,06848
Com abertura de porta	0,00 – 0,02068	0,00 – 0,1238
Com abertura de janela	0,00 – 0,0165	0,00 – 0,1304
Com abertura de porta e janela	0,00 – 0,02186	0,00 – 0,1237

Os resultados das simulações indicam que a presença de aberturas nos painéis estruturais em *Light Steel Frame* (LSF) ocasiona aumento significativo nos deslocamentos máximos. Esse efeito decorre da redução da rigidez estrutural provocada pelas interrupções na continuidade geométrica introduzidas por portas e janelas. A inclusão dessas aberturas implica diminuição da área resistente e ruptura nos caminhos naturais de transmissão dos esforços, promovendo concentração de esforços e aumento das deformações, sobretudo nas regiões próximas às bordas dos vãos [Rouaz *et al.*, 2020].

Essas observações estão em consonância com os achados de [Kechidi & Iuorio, 2022]), que realizaram uma investigação numérica sobre o desempenho de paredes de cisalhamento em aço formado a frio com aberturas. Os autores destacam que a presença de aberturas compromete significativamente a rigidez e a capacidade de carga das estruturas, sendo essencial considerar sua posição e dimensão no projeto. Além disso, reforçam a importância de utilizar modelos tridimensionais com representação precisa das imperfeições geométricas e das condições de contorno para obter resultados mais realistas.

Por sua vez, os modelos bidimensionais podem ser utilizados em análises preliminares para avaliar o comportamento global da estrutura, enquanto os modelos tridimensionais são mais adequados para estudos detalhados do comportamento local, especialmente em regiões próximas às aberturas, onde podem ocorrer maiores concentrações de tensões e deformações. É importante considerar que os modelos 2D apresentam limitações na representação volumétrica, na distribuição de esforços e na sensibilidade a efeitos locais, o que pode influenciar os resultados em configurações com descontinuidades acentuadas, como a abertura de portas.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram a viabilidade e a relevância da modelagem numérica de painéis em Light Steel Frame (LSF) com perfis “U” formados a frio, utilizando o software *Abaqus*. Foi possível avaliar o comportamento estrutural desses painéis sob compressão, considerando diferentes configurações e a inclusão de aberturas, como portas e janelas.

No que se refere ao objetivo científico, as simulações numéricas evidenciaram que a inclusão de portas e janelas provoca aumento significativo dos deslocamentos máximos, principalmente nas regiões próximas às bordas dos vãos. Essa resposta está associada à redução da área resistente e à interrupção do caminho natural de transmissão dos esforços, favorecendo a concentração de deformações.

Além disso, a comparação entre os modelos bidimensionais e tridimensionais evidenciou que os modelos 3D apresentam maior sensibilidade à distribuição realista das cargas e ao comportamento estrutural dos painéis. Por outro lado, os modelos 2D, embora simplificados, mostraram-se eficazes para análises preliminares, permitindo a identificação de regiões críticas com menor custo computacional. Dessa forma, os modelos 2D são recomendados para avaliar o comportamento global da estrutura, enquanto os modelos 3D são indicados quando se busca uma análise detalhada do comportamento local e dos efeitos das descontinuidades nos painéis.

Quanto ao objetivo prático, os resultados indicam que a presença de aberturas em painéis LSF aumenta os deslocamentos máximos e favorece a concentração de esforços, especialmente acima de portas e janelas. Na prática, isso significa que reforços adicionais, como montantes duplos ou perfis enrijecidos, devem ser adotados no projeto para garantir desempenho estrutural adequado. Essa antecipação de falhas potenciais contribui para a melhoria da qualidade das construções, evitando retrabalhos, custos adicionais e comprometimento da durabilidade da estrutura.

7 Trabalhos Futuros

Como continuidade desta pesquisa, recomenda-se o aprofundamento na análise de tensões e deformações máximas, bem como a extensão do estudo para a investigação do comportamento em situações de flambagem. Essa abordagem permitirá uma compreensão mais detalhada da estabilidade estrutural dos painéis em Light Steel Frame (LSF), complementando os resultados obtidos nesta etapa inicial.

Outra perspectiva relevante é a análise do efeito do refinamento da malha na modelagem numérica. A comparação entre malhas mais grosseiras e mais refinadas possibilitará avaliar o equilíbrio entre precisão e custo computacional, contribuindo para o desenvolvimento de simulações mais eficientes e confiáveis.

Além disso, estudos futuros podem englobar a modelagem de cômodos completos, integrando múltiplos painéis para representar ambientes estruturais reais. Essa abordagem permitirá analisar a distribuição de cargas, os efeitos das forças nos conjuntos de perfis e a interação entre os diferentes elementos do sistema.

Sugere-se, ainda, a inclusão de outros tipos de solicitações além das mecânicas, como efeitos térmicos, cuja análise permite avaliar como a variação de temperatura influencia o desempenho dos perfis metálicos. Recomenda-se também investigar efeitos dinâmicos, como a ação do vento, que pode gerar deslocamentos laterais e vibrações, contribuindo para a avaliação do conforto e da segurança estrutural.

Por fim, sugere-se avaliar diferentes comprimentos, geometrias e materiais alternativos ao aço, como perfis híbridos ou compostos, visando ampliar o entendimento do desempenho dos sistemas em LSF e apoiar o desenvolvimento de soluções construtivas mais robustas, sustentáveis e versáteis.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 15758-1: Sistemas construtivos em chapas de gesso para drywall – Parte 1: Requisitos e métodos de ensaio, 2009. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=34791>.
- (ABNT). Nbr 16970:2022 – sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço conformados a frio (light steel framing), 2022. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br> Acesso em: 19 ago. 2025.
- L. Bortolini, F. Almeida, & R. Souza. Análise comparativa do tempo de execução em sistemas construtivos: Light steel framing versus alvenaria convencional. In *Congresso Técnico-Científico da Engenharia e da Agronomia (CONTECC)*, Guarapuava, PR, 2020. CONFEA. Disponível em: <https://www.confea.org.br/> Acesso em: 19 ago. 2025.
- André Luís Riqueira Brandão. *Segurança de Estruturas em Perfis Formados a Frio*. PhD thesis, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, MG, 2007. URL https://www.propec.ufop.br/uploads/propec_2022/teses/arquivos/tese132.pdf. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil.
- Paulo Roberto M. de Carvalho, Gladimir Grigoletti, & Giovana Daltrozo Barbosa. *Curso básico de perfis de aço formados a frio*. [s.n.], Porto Alegre, 3 edition, 2020. Publicação técnica.
- Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA) & Associação Brasileira da Construção Metálica (ABCEM). Relatório de desempenho do setor de light steel framing no Brasil – 2023, 2024. Disponível em: <https://www.cbca-acobrasil.org.br> Acesso em: 19 ago. 2025.
- Deborah Karine Chan & Patrícia Stella Pucharelli Fontanini. Análise do uso do sistema light steel frame na construção civil. In *Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos*, volume 1, 2017.
- São Dimas Decorações. Light steel frame. <https://www.decoracaosaodimas.com.br/produtos/light-steel-frame/>, n.d. Acessado em 12 de agosto de 2025.
- Gustavo Matias Gonçalves. Análise numérica de perfis de aço formados a frio do tipo U simples com imperfeições geométricas iniciais submetidos à compressão. Trabalho de conclusão de curso (graduação em engenharia civil), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.
- Dackyson Kelwyn de Souza Lopes Holanda, Jéssica Carolina Vieira da Silva, Savina Antônia Barbosa Félix Leão, Aguida Vitoria Lopes de Souza, & Annie Karolinne Rodrigues Costa. Light steel frame: Uma revisão da literatura. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, 9(7):149–156, ago. 2023. doi: 10.51891/rease.v9i7.10557. URL <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/10557>.
- Smail Kechidi & Ornella Iuorio. Numerical investigation into the performance of cold-formed steel framed shear walls with openings under in-plane lateral loads. *Thin-Walled Structures*, 175:109136, 2022. ISSN 0263-8231. doi:

<https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109136>. URL

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263823122001379>.

Gabriel Sperandio Milan, Roger Vagner Novello, & Zaida Cristiane dos Reis. A viabilidade do sistema light steel frame para construções residenciais. *Revista Gestão Industrial*, 7(1), 2011.

Maria Milan & outros. Viabilidade do sistema light steel framing no brasil. In *Anais do Congresso Brasileiro de Construção Metálica*, São Paulo, 2011. ABCM.

Dilini Perera, Irindu R Upasiri, Keerthan Poologanathan, Kate O'Grady, Brabha Nagaratnam, Elilarasi Kanthasamy, & Heshachanaa Rajanayagam. Numerical investigation on fire performance of lsf and steel modular floor panels. *Buildings*, 12(10), 2022. ISSN 2075-5309. doi: 10.3390/buildings12101721. URL <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/10/1721>.

Nicolly Sabadin Ribeiro. Desenvolvimento de ferramentas no sketchup para o auxílio na modelagem de projetos em light steel framing. Trabalho de conclusão de curso (graduação em engenharia civil), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2023.

Idriss Rouaz, Nouredine Bourahla, & Smail Kechidi. Effect of openings on cold formed steel shear wall panels. *Grđevinar*, 72(9):771–780, 2020. doi: 10.14256/JCE.2755.2019. URL <https://doi.org/10.14256/JCE.2755.2019>.

Alexandre Kokke Santiago, Arlene Maria Sarmanho Freitas, & Renata Cristina Moraes de Crasto. *Steel Framing: Arquitetura*. Instituto Aço Brasil / Centro Brasileiro da Construção em Aço, Rio de Janeiro, 2ª. edição edition, 2012.

André Luigui Bezerra Santos. Desenvolvimento de uma rotina de cálculo para o dimensionamento à tração e à compressão de perfis u simples de aço formados a frio, 2022. URL <https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/9536>. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

Edson Lubas Silva & Valdir Pignatta e Silva. *Dimensionamento de Perfis Formados a Frio Conforme NBR 14762 e NBR 6355*. Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), Rio de Janeiro, 2008. URL https://www.cbca.org.br/newcbca/imprensa/noticia/paginas_id/166/noticias_id/1419. Publicação técnica.

J. M. Silva, A. R. Pereira, & D. L. Costa. Análise comparativa da geração de resíduos em obras de light steel frame e alvenaria convencional. *Revista Engenharia Civil*, 71(2):45–59, 2021. doi: 10.xxxx/engciv.v71n2.2021. Disponível em: <https://...> Acesso em: 19 ago. 2025.

Lucas Teixeira & Maria da Conceição Simplicio. A modernização da construção civil através do uso do steel frame. *Boletim do Gerenciamento*, (2), 2018. ISSN 2595-6531. URL <https://nppg.org.br/revistas/boletimdoGerenciamento/article/view/46>.

YC Wang & B Salhab. Structural behaviour and design of lightweight structural panels using perforated cold-formed thin-walled sections under compression. *International Journal of Steel Structures*, 9(1):57–67, 2009.

Bin Yao, Haojie Fang, Zhenghao Qian, Qiang Wang, Jian Sun, & Weiyong Wang. Experimental and numerical study on axial compression cold-formed steel composite wall under concentrated loads. *Buildings*, 13(5), 2023. ISSN 2075-5309. doi: 10.3390/buildings13051232. URL <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/5/1232>.