



Análise experimental de vigas mistas de lajes *Light Steel Framing*: relevância da paginação do substrato

Experimental analysis of Light Gauge Steel Framing composite beams flooring systems: importance of substrate layout

Resumo

O presente artigo apresenta uma investigação experimental sobre o comportamento estrutural de vigas do sistema de lajes do *Light Steel Framing* (LSF), construídas com perfis formados a frio. A pesquisa enfatiza o comportamento misto obtido pela interação entre esses perfis e o substrato constituído por painéis de *plywood* (compensado estrutural), avaliando, adicionalmente, a influência da paginação das placas – isto é, da posição relativa entre juntas e apoios – no desempenho global da estrutura. Foram ensaiados cinco modelos de lajes com diferentes configurações de substrato, analisando parâmetros como flechas, tensões, deformações e modo de falha. Os resultados indicam a ocorrência de ação mista significativa entre o substrato em madeira e os perfis metálicos, com acréscimo superior a 50% na resistência última em relação ao modelo composto apenas por perfis de aço. Também foram observadas reduções entre 16% e 21% nos deslocamentos verticais. A comparação entre quatro diferentes paginações de placas revelou resultados muito próximos entre si, demonstrando que essa variável exerce influência mínima na resistência e na rigidez da laje. O estudo contribui para o aperfeiçoamento de soluções construtivas em LSF, oferecendo subsídios técnicos para a otimização de lajes secas mistas.

^{1*}Alexandre Kokke Santiago

¹Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Belo Horizonte - MG - Brasil
alexandrekokke@gmail.com

²Rodrigo Barreto Caldas

²Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte - MG - Brasil
caldas@dees.ufmg.br

³Francisco Carlos Rodrigues

³Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte - MG - Brasil
francisco@dees.ufmg.br

⁴Richard Brito Braga

⁴Centro Universitário de Belo Horizonte UNIBH
Belo Horizonte - MG - Brasil
richard@estudionexus.arq.br

⁵Rodrigo Tamaliunas Fabbrini

⁵Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte - MG - Brasil
rtfabbrini@hotmail.com

Recebido em 21/11/25

Revisado em 28/11/25

Aceito em 14/12/25

*autor correspondente

Palavras-chave: *Light Steel Framing*. Construção metálica. Vigas mistas. Laje seca. Compensado estrutural.

Abstract

This paper presents an experimental investigation into the structural behavior of flooring systems in Light Gauge Steel Framing (LGSF), composed of cold-formed steel beams associated with plywood panel substrates. The research focuses on evaluating the composite action developed between the steel profiles and the wooden panels, as well as the influence of different board layout configurations – namely, the relative positioning of joints and supports – on the mechanical response. Five full-scale flooring models with distinct substrate arrangements were tested, assessing deflection, stress, strain, and failure mechanisms. The results confirm the presence of significant composite behavior, with increases above 50% in ultimate load capacity compared to the bare-steel model. Vertical deflections were also reduced by 16% to 21%. The four plywood layout configurations exhibited very similar responses, indicating that board arrangement has negligible influence on both stiffness and strength. The study advances the technical understanding of composite dry flooring systems and supports the development of optimized structural solutions for LGSF construction.

Keywords: *Light Gauge Steel Framing*. Steel construction. Composite beams. Flooring systems. Plywood.

1 Introdução

A utilização de estruturas mistas em aço e concreto é consolidada como prática recorrente devido à complementaridade dos materiais (Oliveira, 2001). O aço apresenta excelente desempenho sob esforços de tração, enquanto o concreto se destaca sob compressão, permitindo que sistemas mistos aproveitem o melhor de cada componente, resultando em soluções mais eficientes e econômicas.

A norma brasileira NBR 8800 (ABNT, 2024) estabelece critérios para o dimensionamento de estruturas mistas com perfis laminados, soldados e tubulares, considerando a contribuição do concreto na resistência aos esforços. Seus princípios também são retomados na NBR 14762 (ABNT, 2010), voltada ao dimensionamento de perfis formados a frio (PFF), quando aplicada a sistemas mistos de aço e concreto.

O sistema construtivo *Light Steel Framing* (LSF) caracteriza-se por uma estrutura leve composta por perfis de aço galvanizado conformados a frio, dispostos com espaçamento regular e interligados para formar o esqueleto estrutural da edificação. Esse sistema inclui placas de fechamento para paredes e lajes, conforme Santiago, Freitas e Crasto (2012).

No caso das lajes em LSF, a estrutura é composta por um reticulado horizontal de perfis Ue (U enrijecido), sobre o qual é instalado um substrato que define o plano horizontal da laje. As soluções mais comuns para esse tipo de substrato incluem placas OSB (*Oriented Strand Board*) – placas compostas por tiras pequenas e estreitas de madeira dispostas em camadas e coladas – *plywood* (compensado estrutural) – placas compostas por lâminas de madeira coladas em camadas com direção alternada das fibras – placas cimentícias e, ainda, placas compósitas – com camadas alternadas de OSB e cimentícia – fixadas aos perfis metálicos por meio de parafusos. Essa configuração resulta em um sistema a seco, industrializado e de rápida execução.

Segundo Rodrigues e Caldas (2016), os perfis das lajes em LSF devem ser dimensionados para resistir ao momento fletor, à força cortante e às combinações entre esses esforços, conforme os critérios da NBR 14762 (ABNT, 2010). No entanto, essa norma, assim como suas principais equivalentes internacionais, não contempla o dimensionamento das vigas de piso como sistema misto, desconsiderando a contribuição de placas do substrato na resistência e rigidez, o que limita o comportamento misto às lajes em concreto armado.

Embora o sistema LSF seja amplamente empregado, ainda existem lacunas quanto à consideração do comportamento misto entre perfis metálicos e os diferentes tipos de substrato utilizados. Estudos prévios com OSB e placas compósitas (Kyvelou, 2017; Kyvelou; Gardner; Nethercot, 2015, 2017a, 2017b; Zhou *et al.*, 2014, 2019; Leite, 2020) demonstraram que a fixação do substrato com parafusos pode conferir ação mista parcial à viga, promovendo aumento de rigidez e resistência. Entretanto, há carência de investigações que abordem especificamente o uso de *plywood*, material amplamente adotado em sistemas *Wood Framing* e reconhecido por sua elevada rigidez e estabilidade (Williamson; Yeh, 2008), mas cuja interação com PFF em lajes LSF ainda não foi estudada.

Da mesma forma, não há estudos disponíveis que avaliem a diversidade de situações de montagem do substrato em edificações, em que a paginação (posição de placas e juntas) do substrato gera variadas configurações de encontro de placas (ora um perfil suporta o centro da placa, ora é sobreposto pelo encontro entre bordas de placas diferentes) e, com isso, também de espaçamentos entre parafusos (uma vez que fabricantes indicam parafusos mais próximos nas bordas das placas do que no centro). Os estudos citados anteriormente consideraram sempre a fixação com parafusos uniforme, tanto nos encontros entre placas quanto no parafusamento do centro delas, não avaliando a presença desta variável, representada pela diversidade de paginações e parafusamento em um mesmo perfil de viga da laje.

Diante destas lacunas, o presente artigo apresenta os resultados de um programa experimental que avaliou lajes secas compostas por PFF e substrato em *plywood*, com 4 diferentes situações de paginação de placas e parafusamento, submetidas a ensaios de flexão. Os dados obtidos demonstram não só os ganhos em resistência e rigidez da estrutura, evidenciando o substrato *plywood* como elemento colaborante na formação de vigas mistas, mas também, a ínfima interferência da variável da paginação das placas de substrato na grandeza desses ganhos.

2 Fundamentação teórica

2.1 Sistema *Light Steel Framing*

O *Light Steel Framing* (LSF) é um sistema construtivo industrializado, predominantemente autoportante, que se destaca pela elevada precisão e agilidade na execução. Sua principal característica é a estrutura em perfis

leves de aço galvanizado, conformados a frio, que formam esqueleto estrutural responsável por absorver as cargas atuantes na edificação, em conjunto com os demais elementos estruturais. Mais do que um sistema estrutural, o LSF configura-se como uma solução construtiva integrada, composta por diversos subsistemas inter-relacionados. Além da estrutura metálica, o sistema abrange fundações, isolamentos, fechamentos internos e externos e instalações, compondo uma construção racional e industrializada (Santiago; Freitas; Crasto, 2012).

A montagem da estrutura é realizada por perfis metálicos que compõem painéis de parede, vigas de piso, treliças e tesouras de cobertura. Esses perfis apresentam seções “U enrijecido” (Ue) e “U simples” (U), fabricadas em aço galvanizado estrutural. As dimensões mais comuns para os perfis são almas de 90 mm, 140 mm e 200 mm, mesas de 40 mm e enrijecedores (se houver) com 12 mm, conforme NBR 6355 (ABNT, 2012a) e NBR 15253 (ABNT, 2014) e espessuras das chapas de 0,80 mm, 0,95 mm e 1,25 mm (Santiago; Freitas; Crasto, 2012).

Os painéis estruturais, lajes e coberturas são formados por perfis parafusados e espaçados regularmente, de acordo com a modulação definida no projeto estrutural, geralmente entre 400 mm e 600 mm.

Complementando a estrutura metálica, os elementos de fechamento são constituídos por placas leves fixadas à estrutura. No contexto brasileiro, as placas mais utilizadas incluem OSB (associadas a EIFS ou *siding*), placas cimentícias e gesso acartonado, combinados com barreiras de vapor e mantas de isolamento, para desempenho adequado da edificação.

Algumas das vantagens do sistema LSF são: emprego de insumos industrializados e padronizados; facilidade de montagem, manuseio e transporte devido à leveza dos elementos; durabilidade e longevidade; redução do uso de recursos naturais e desperdício; facilidade de execução das instalações prediais; rapidez de construção; leveza da construção, permitindo economia na fundação; além de flexibilidade no projeto arquitetônico (Santiago; Freitas; Crasto, 2012).

2.2 Lajes secas do sistema *Light Steel Framing*

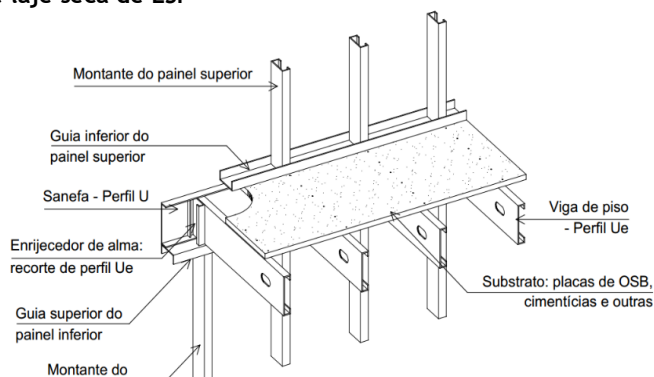
As lajes do sistema LSF são constituídas por perfis de aço galvanizado com espaçamento similar ao do restante da construção, com modulação em função das cargas a serem resistidas.

As vigas de piso são responsáveis por transmitir as cargas a que a laje está sujeita aos apoios, servindo, também, como sustentação para o substrato. Essas vigas são perfis de seção Ue, dispostos na horizontal, com altura da alma determinada em cálculo, sendo as mais comuns 140 mm e 200 mm.

Também fazem parte do sistema estrutural da laje de LSF as guias de arremate ou sanefas, que são perfis U instalados nas extremidades das vigas de piso, para dar forma à estrutura (Figura 1). Já os enrijecedores de alma são perfis Ue 90 mm, dispostos na vertical e fixados através de suas almas às vigas nos pontos onde a laje se apoia, evitando o esmagamento da alma (*web crippling*) dos perfis da laje causado pelos esforços concentrados nesta região (Santiago; Freitas; Crasto, 2012).

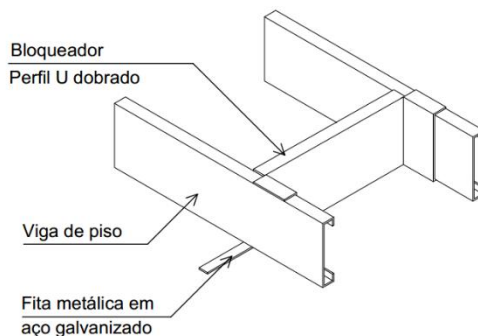
Para evitar o estado limite de flambagem lateral com torção, as vigas de piso devem ser travadas lateralmente. Esse travamento é feito por bloqueadores em perfis U e fitas de aço instaladas na face inferior dos painéis e ligadas aos bloqueadores por parafusos (Figura 2). Na face superior, a placa de substrato é responsável pela contenção lateral dos perfis.

Figura 1 - Estrutura de laje seca de LSF



Fonte: Santiago, Freitas e Crasto (2012).

Figura 2 - Bloqueadores em perfis e fitas em vigas de laje



Fonte: Santiago, Freitas e Crasto (2012).

O conjunto formado pelas vigas de piso, substrato e perfis de travamento deve trabalhar formando um diafragma horizontal rígido, tendo apenas movimento de corpo rígido no plano horizontal, ao possuir a capacidade de restringir os deslocamentos horizontais relativos entre as vigas que formam a laje, preservando a forma da edificação (Rodrigues; Caldas, 2016).

Para criação de superfície plana horizontal, a solução com substrato em placas é a mais comum no LSF, em função de menor peso próprio, emprego de solução a seco e maior velocidade de execução (Santiago; Freitas; Crasto, 2012). As placas usualmente empregadas são OSB, *plywood*, placas cimentícias ou placas compósitas, parafusadas aos perfis da laje.

2.3 Estados limites dos perfis das lajes LSF

O estado limite de flambagem pode ocorrer em perfis de aço com elementos – mesas, alma ou enrijecedores – esbeltos solicitados à compressão centrada, à flexão simples e à flexão composta, devido à instabilidade de um ou mais elementos que compõem sua seção transversal (Rodrigues; Caldas, 2016). Os principais estados limites de flambagem aos quais os perfis das lajes LSF estão sujeitos são relacionados, principalmente, à sua esbeltez e ao fato de serem compostas por perfis de seção aberta, característica comum aos perfis formados a frio.

A flambagem local é modo de instabilidade relevante em perfis formados a frio em função de sua esbeltez. Ela ocorre quando elementos planos da seção transversal sofrem deformações fora do plano (ondulações ou encurvamentos) devido às tensões de compressão. A flambagem local não envolve o deslocamento de toda a viga, mas sim a instabilidade localizada em um ou mais elementos do perfil. Importante ressaltar que isso só ocorre nos trechos em que há esforços de compressão (Figura 3a).

Exatamente por se tratar de perfis abertos – como U, C, Z ou I enrijecidos – a seção das vigas da laje de LSF apresenta baixa rigidez à torção e à flexão lateral, tornando-a suscetível ao estado limite de flambagem lateral com torção (FLT), modo de instabilidade global que ocorre quando a viga, ao ser submetida à flexão, sofre deslocamento lateral e torção, simultaneamente (Figura 3c).

A flambagem distorcional é outro estado limite que pode ocorrer nas vigas de lajes LSF. Este modo de instabilidade é caracterizado pela distorção da seção transversal da viga durante o carregamento. Neste tipo de flambagem, elementos da seção, geralmente as mesas e seus enrijecedores, que estão sujeitos a compressão, se deformam em conjunto com rotação e deslocamento relativo da alma, sem que ocorra necessariamente o deslocamento lateral global da viga (Figura 3b). A flambagem distorcional pode ocorrer em cargas menores que aquelas que causam flambagem local.

2.4 Placas *plywood* para substrato de lajes secas de LSF

O *plywood*, também conhecido como compensado estrutural, é uma placa de madeira engenheirada formado por várias lâminas finas de madeira (chamadas *folhas* ou *laminados*) coladas entre si com fibras orientadas em direções alternadas. Esta disposição cruzada confere ao *plywood* boa resistência mecânica, estabilidade dimensional e resistência à deformação.

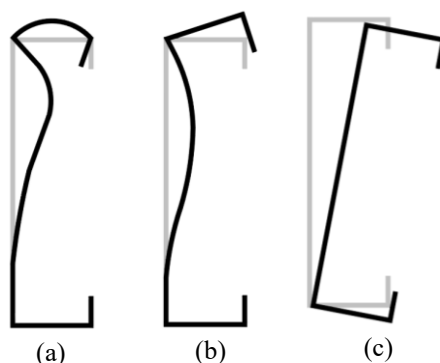
As placas *plywood*, utilizadas como substrato de lajes, possuem dimensões típicas de 1200 x 2400 mm ou 1100 x 2200 mm, espessura mínima de 18,3 mm, bordas transversais retas e bordas longitudinais com encaixe

tipo macho-fêmea. São fixadas à estrutura com parafusos e posicionadas com a borda longitudinal perpendicular à direção das vigas da laje e borda transversal desalinhada entre placas (Figura 4).

Essa placa é instalada com parafusos fabricados em aço baixo carbono, bitola 4,2 mm, comprimento 32 mm, ponta broca, rosca inteira autoatarraxante, cabeça chata, estriada e fenda Philips. Os parafusos são instalados a, no mínimo, 10 mm das bordas e espaçamento máximo entre parafusos sobre montantes de 150 mm no perímetro das placas e 300 mm nos apoios intermediários (Figura 5).

A paginação de placas de substrato em uma laje de LSF é o planejamento da disposição, orientação e sequência de montagem delas sobre a estrutura metálica. Este processo define como as placas serão posicionadas, unidas e fixadas aos perfis de aço galvanizado, garantindo distribuição uniforme das cargas, estabilidade estrutural e eficiência na execução.

Figura 3 - Modos de flambagem em perfis das vigas de lajes LSF: (a) local, (b) distorcional e (c) lateral com torção



Fonte: adaptado de Carvalho, Grigoletti e Barbosa (2014).

Figura 4 - Esquema de paginação típica de placas *plywood*

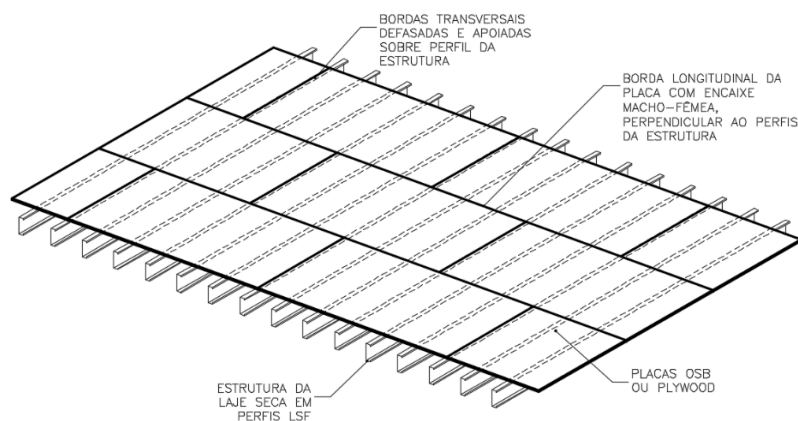
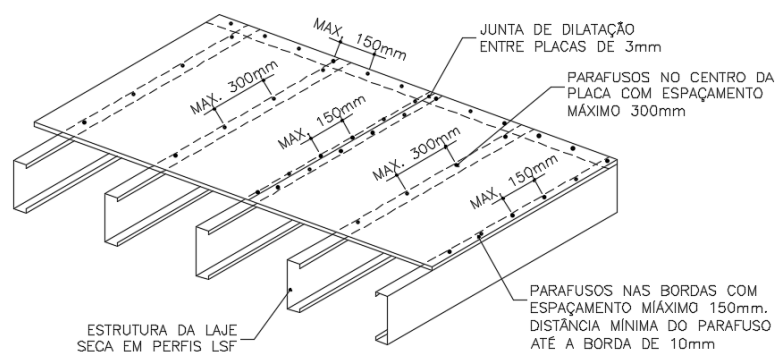


Figura 5 - Esquema de parafusamento típico de *plywood*



A paginação das placas de *plywood* sobre a estrutura pode gerar, em um mesmo perfil de viga, diversidade de situações de parafusamento ao longo de seu comprimento, uma vez que ora ele dá apoio ao centro da placa (parafusos a cada 300 mm), ora dá apoio às bordas transversais (parafusos a cada 150 mm). Além disso, há perfis sobre os quais sempre se apoiam trechos centrais de placas (parafusos a cada 300 mm).

2.5 Estudos análogos

Kyvelou (2017), Kyvelou, Gardner e Nethercot (2015, 2017a, 2017b), Zhou *et al.* (2014, 2019) e Leite (2020), desenvolveram estudos sobre o comportamento de vigas mistas nos perfis que compõem a laje do sistema LSF, considerando sua associação ao substrato em placas. Os substratos utilizados nos estudos supracitados foram as placas de OSB, com exceção de Leite (2020), que investigou o uso de placas compósitas (OSB e cimentícia) como parte das vigas mistas.

Os autores demonstraram haver ganhos significativos em rigidez (redução das flechas) e resistência (aumento do momento fletor máximo suportado) ao se considerar a contribuição do substrato parafusado às vigas metálicas na formação de vigas mistas em lajes de LSF. Essas investigações, conduzidas por meio de ensaios experimentais e simulações numéricas, demonstraram que variáveis como altura da seção do perfil, espessura do aço, espessura das placas de substrato, densidade de parafusamento e resistência ao escoamento do aço influenciam no maior ou menor ganho de rigidez e resistência da viga mista. Nenhum desses autores, entretanto, investigou a influência da variável de mudança na paginação do substrato no desempenho da laje seca.

A APA (*The Engineered Wood Association*), associação de construção em madeira nos EUA considera em suas prescrições técnicas que há ação mista entre vigas de madeira de lajes e placas de *plywood* de substrato. Apesar desta prescrição ser conservadora, ao exigir, além de pregos, uso de adesivo em todo comprimento da união entre vigas e substrato, seu emprego demonstra a efetividade e segurança da associação estrutural das vigas às placas de substratos *plywood* em lajes *Wood Framing* (Williamson; Yeh, 2008).

3 Materiais e métodos

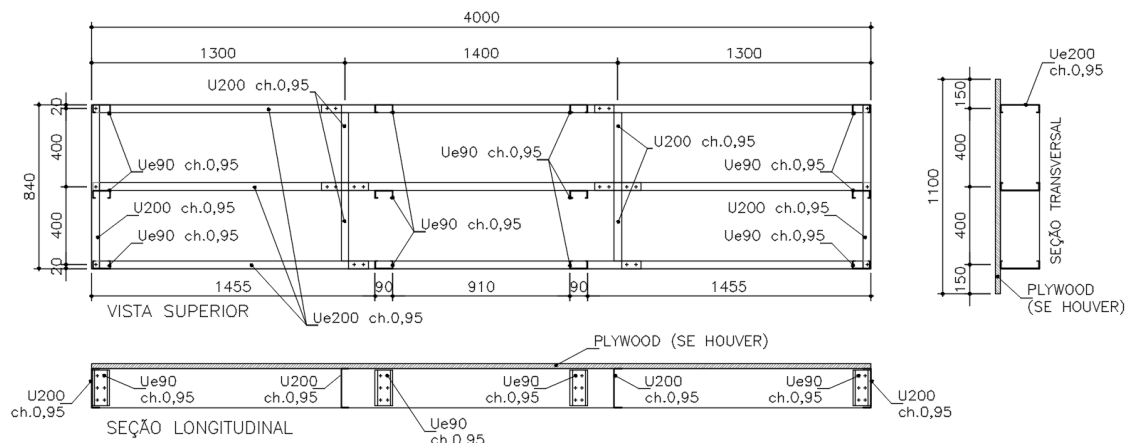
Esta seção apresenta a configuração estrutural das vigas de laje ensaiadas, os materiais empregados, o procedimento construtivo dos modelos experimentais, a montagem do ensaio e a instrumentação utilizada para registro dos dados. O objetivo é garantir rastreabilidade e permitir a reprodutibilidade dos resultados obtidos.

3.1 Sistema estrutural e paginação do substrato dos modelos ensaiados

Os modelos para os ensaios foram concebidos de forma a representar uma laje típica de *Light Steel Framing*. A montagem da estrutura seguiu práticas usuais do sistema, baseadas em Santiago, Freitas e Crasto (2012), Rodrigues e Caldas (2016) e NBR 16970-2 (ABNT, 2022).

Os modelos foram construídos com perfis Ue 200 mm e espessura de chapa de 0,95 mm, especificação mais comum de seção empregada em lajes secas LSF. O espaçamento entre perfis foi de 400 mm, medido entre os eixos longitudinais dos perfis das vigas (Figura 7).

Figura 7 - Estrutura dos modelos de lajes



As sanefas foram executadas com perfis U 200x40 mm e nelas foram encaixadas as extremidades dos perfis das vigas de laje. Nas extremidades dos perfis das vigas de laje (encontro com sanefas) e abaixo dos pontos previstos para aplicação das cargas, foram empregados enrijecedores de alma, compostos por perfis Ue 90x40x12 mm, espessura 0,95 mm, instalados na vertical (Figura 8). Seu emprego pretendeu evitar enrugamento da alma (*web crippling*) dos perfis das vigas nestes locais, já que tal estado limite não é foco do estudo.

A estrutura das lajes ensaiadas também recebeu bloqueadores compostos por perfis U 200x40 mm, para reduzir, ou mesmo eliminar, o efeito da FLT das vigas de piso.

Para obter dados comparativos entre modelos com e sem substrato e com outros estudos análogos, foram realizados, primeiramente, ensaios em modelos sem substrato, composto somente pela estrutura metálica, denominado [.-].

O compensado estrutural usado como substrato tem, também, função de travamento da mesa superior dos perfis, atuando como um diafragma rígido horizontal. Esta configuração contribui para a estabilidade da estrutura, reduzindo o risco do estado limite de flambagem lateral com torção nas vigas. Nos modelos em que esse substrato não foi aplicado, avaliou-se uma maior vulnerabilidade à FLT frente àqueles com *plywood*, o que comprometeria a avaliação dos dados comparativos entre os diferentes modelos de laje.

Assim, para permitir uma análise adequada, foi instalada estrutura auxiliar de travamento na mesa superior das vigas de piso no modelo L-1. Essa estrutura consistia em tiras de *plywood* com largura 30 mm, dispostas transversalmente aos perfis da laje, espaçadas em 300 mm. Cada tira foi fixada a todas as vigas por meio de um parafuso em cada ponto de sobreposição (Figura 9). Esta solução teve como objetivo simular o efeito de travamento lateral proporcionado pelo substrato, sem que essa estrutura auxiliar contribuísse na resistência ou rigidez da seção transversal.

O substrato utilizado nos ensaios foi o compensado estrutural (*plywood*), fabricado pela FormaComp Ltda., com especificações recomendadas para uso em lajes secas (espessura de 18,3 mm, bordas longitudinais com encaixe macho-fêmea e bordas transversais retas). Os modelos de laje com substrato em *plywood*, nomeados L-2 a L-5, tiveram esta placa instalada na face superior, com a direção longitudinal perpendicular aos perfis da laje e 4 variações de paginação (Figura 10). Para confecção dos modelos, optou-se pelo uso da fixação típica desse substrato – espaçamento de 150 mm no perímetro das placas, e 300 mm no centro. A largura do plaqueamento das estruturas foi de 1100 mm, assim, a borda lateral do substrato ultrapassa o eixo do perfil da borda em 150 mm.

Figura 8 - Esquema de instalação de enrijecedores de alma

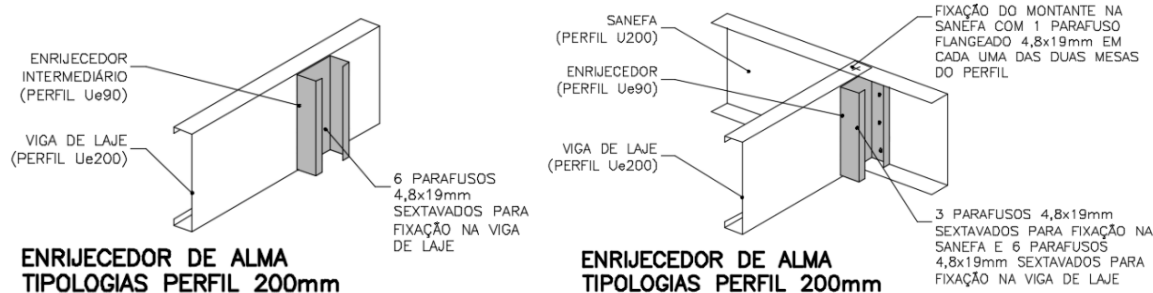


Figura 9 - Vista superior do travamento com perfis para modelo L-1 (sem substrato)

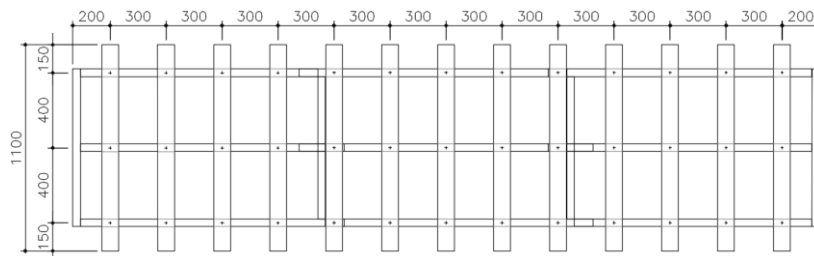
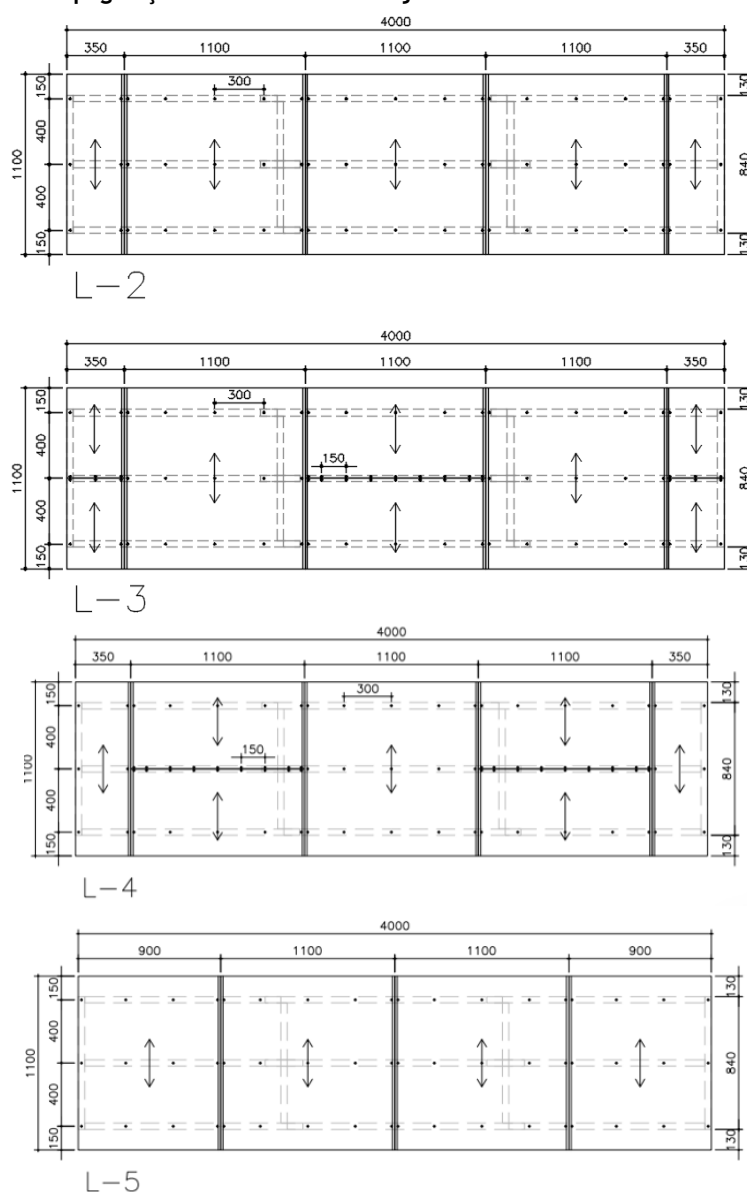


Figura 10 - Variáveis de paginação de substrato nas lajes modelos L-2 a L-5



3.2 Caracterização dos materiais

Os perfis empregados nos ensaios foram fabricados com aço estrutural com espessura 0,95 mm e denominação ZAR230 Z275, conforme NBR 7008-3 (ABNT, 2021). Suas propriedades mecânicas reais foram determinadas por meio de ensaios de tração realizados pelo Laboratório de Ensaios Mecânicos do CDTN (Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear), tendo como referência a norma E111-17 (ASTM, 2017). Foram ensaiados 8 corpos de prova em máquina universal Instron 5882, com extensômetro tipo *Clip-Gauge* para determinação do módulo de elasticidade longitudinal (E). Os dados obtidos nos ensaios estão na Tabela 1.

A seção transversal real dos perfis empregados nos ensaios está representada na Figura 6 e suas propriedades geométricas apresentadas na Tabela 2, sendo A a área da seção, I_x e I_y os momentos de inércia nos eixos x e y , W_x e W_y os módulos de resistência nos eixos x e y e M a massa linear do perfil.

As propriedades mecânicas das placas de *plywood* foram obtidos por Rezende (2019) através de ensaios para determinação do módulo de elasticidade (E) e da tensão de ruptura ($\sigma_{m\acute{a}x}$), conforme NBR 9533 (ABNT, 2012b), com placas de *plywood* de 18,3 mm do mesmo tipo e fabricante daquelas empregadas nos ensaios deste estudo. A Tabela 3 apresenta os valores obtidos pela autora.

Tabela 1 - Propriedades do aço empregado nos corpos de prova ensaiados

f_y (MPa)	f_u (MPa)	f_{rup} (MPa)	Alongamento (%)	Estricção (%)	Módulo de elasticidade longitudinal (E)
301,86	369,70	249,98	30,44	47,89	189.635

Figura 6 - Seção transversal dos perfis de vigas dos modelos ensaiados

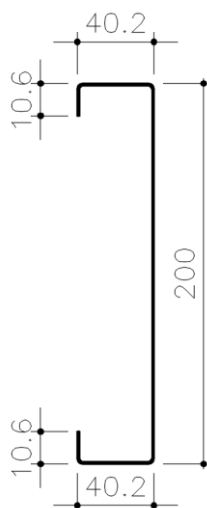


Tabela 2 - Propriedades da seção das vigas dos modelos

Perfil	A (cm ²)	I_x (cm ⁴)	I_y (cm ⁴)	W_x (cm ³)	W_y (cm ³)	M (kg/m)
Ue200x40,2x10,6x0,95	2,80	150,28	4,88	15,03	1,52	2,18

Tabela 3 - Propriedades de placas *plywood* (Rezende, 2019)

$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)	E (MPa)
40,69	6.312,13

3.3 Montagem experimental

Para avaliação do comportamento das lajes foram realizados ensaios de flexão com os modelos descritos no Centro Multiusuário de Análise Experimental de Estruturas (CEMAEES) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Para os ensaios foram fabricados dois corpos de prova (CP) de cada modelo de laje. Esses CPs, denominados CP-A e CP-B, foram submetidos a forças verticais aplicadas transversalmente em duas linhas perpendiculares ao vão, de forma a gerar uma região de momento constante no centro do vão. Nas extremidades dos modelos, foram utilizados aparelhos de apoio para garantir a condição de viga bi-rotulada (Figura 11). As vigas e demais elementos de distribuição das cargas sobre a laje apresentaram peso próprio total de 92 kg, que foi somado à força aplicada pelo atuador hidráulico.

O comportamento das vigas mistas foi avaliado por meio da instalação de transdutores de deslocamentos (DT) e extensômetros elétricos de resistência (EER), para o aço e madeira.

Para obtenção de dados relativos às deformações presentes na laje mista, foram utilizados 13 extensômetros elétricos de resistência (EER) uniaxiais, com objetivo de medir as deformações longitudinais nos perfis e no substrato em *plywood* (Figura 12).

Foram instalados 5 EER no perfil metálico central da estrutura, no meio do vão da laje. Por eles, foi possível monitorar as deformações no perfil, calcular as tensões e verificar a posição da linha neutra elástica (LNE) do sistema misto, ao longo de todo o ensaio. Também foram instalados 8 EER na placa de *plywood*, nas duas faces, no centro do vão da laje, para acompanhar as deformações no substrato durante o ensaio.

Figura 11 - Esquema de montagem empregada nos ensaios

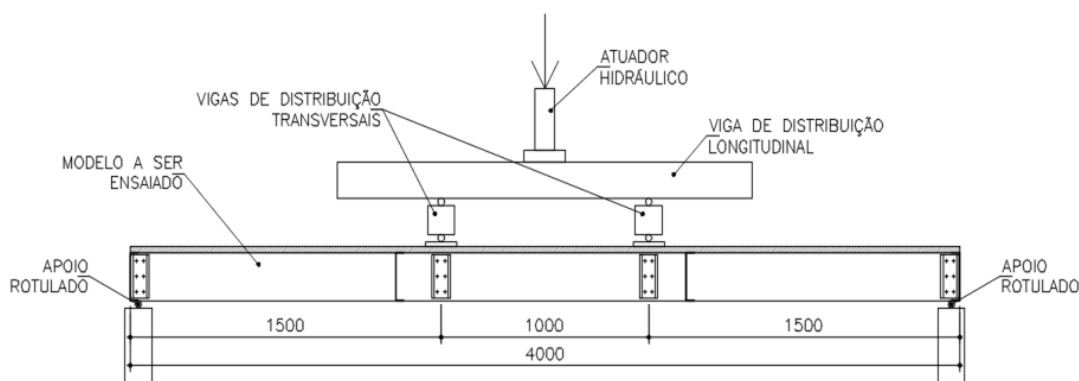
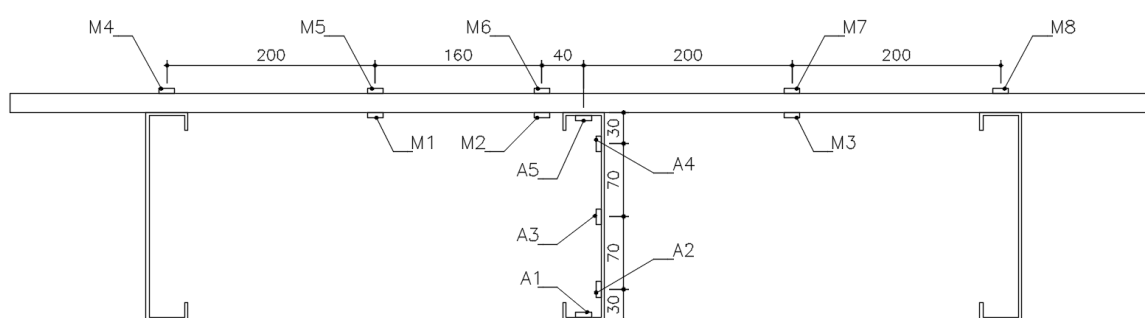


Figura 12 - Esquema de instalação de EER nos perfis e placa de substrato



Os deslocamentos da estrutura e do substrato foram medidos com emprego de 7 transdutores de deslocamento (DT) com capacidade de 100 mm, dispostos em pontos relevantes da estrutura (Figura 13), para medir os deslocamentos verticais do modelo (DT.1 a DT.5) e verificar o deslizamento relativo entre aço e placas de substrato (DT.6 e DT.7).

A aplicação de carga no modelo foi realizada com atuador hidráulico com capacidade de 50 tf, montado em pórtico de carga com capacidade para 100 tf. Para os ensaios, foram estimadas cargas entre 1 tf e 2 tf. Um anel dinamométrico foi agregado à montagem, para aferir as cargas aplicadas, uma vez que havia grande diferença entre as cargas estimadas para o ensaio e a capacidade do atuador hidráulico. A solicitação foi imposta ao modelo de forma monotônica, em etapas de carga com valores correspondentes a 1 unidade do anel dinamométrico (93,41 kgf). Foi utilizado sistema de aquisição de dados fabricado pela Lynx Eletrônica, com 18 canais, para obter dados dos extensômetros, e sistema HBM Spider 8 para dados advindos dos DTs e atuador hidráulico.

Todos os corpos de prova ensaiados foram levados até o limite em que eram capazes de manter o carregamento aplicado por, pelo menos, 3 minutos.

4 Resultados e discussões

4.1 Comportamento geral dos modelos nos ensaios

Os corpos de prova da laje modelo L-1 apresentaram, com carga 839,3 kg (75% da carga total suportada) flambagem distorcional das seções das vigas (Figura 14), na região de momento constante. O comprimento das semiondas formadas nos perfis correspondeu à distância entre os travamentos transversais com régua de madeira, demonstrando sua contribuição para evitar o deslocamento lateral da mesa superior das vigas (FLT), que seria um modo de falha improvável para perfis com substrato.

A carga máxima suportada pela estrutura L-1 foi de 1119,5 kgf, tanto do CP-A quanto no CP-B. Acima deste carregamento, houve falha por flambagem local dos perfis, iniciada pela mesa superior (comprimida), na região de momento constante (Figura 15).

Figura 13 - Distribuição de transdutores de deslocamento (DT) nos ensaios

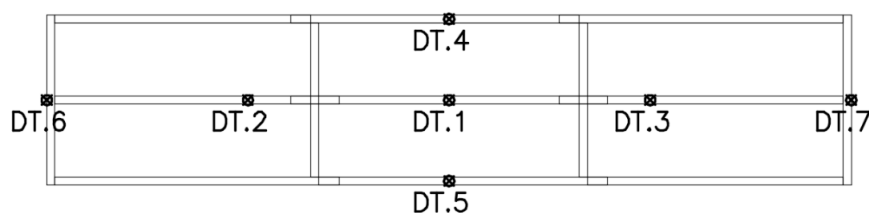
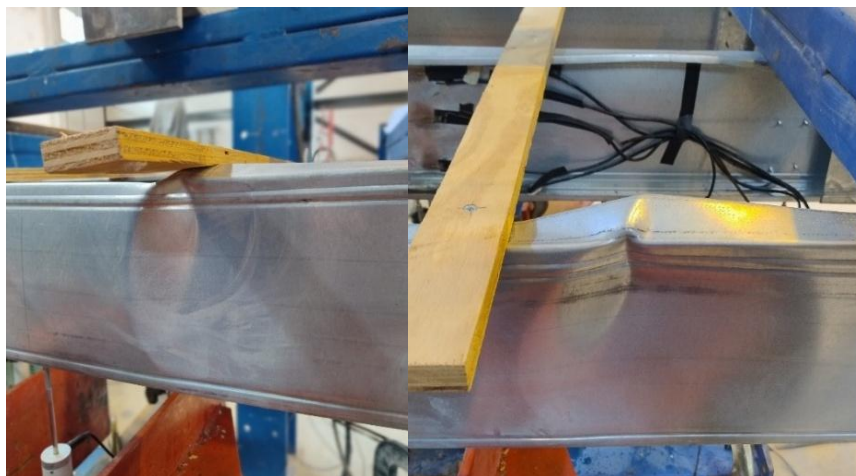


Figura 14 - Flambagem distorcional nos perfis (laje L-1, CP-B)



Figura 15 - Flambagem local nos corpos de prova da laje L-1



Nos modelos de laje com substrato em *plywood* (L-2 a L-5), a flambagem local da alma das seções das vigas foi o primeiro fenômeno observado, ocorrendo, na região de momento constante (Figura 16). A flambagem foi inicialmente percebida com carga que correspondia a cerca de 50% a 65% da carga máxima suportada por cada corpo de prova ensaiado. A presença das placas de substrato restringiu a ocorrência de flambagem distorcional do perfil e não foi percebida a ocorrência de flambagem lateral com torção (FLT) nos modelos ensaiados.

As cargas últimas que os corpos de prova das lajes com substrato suportaram variaram entre 1586,6 kgf e 1773,4 kgf. Tais valores representam aumento da carga máxima suportada pelas lajes entre 42% e 58%, se comparado à laje sem *plywood* (L-1).

O modo de falha de todos os modelos com substrato (L-2 a L-5) foi a flambagem local das mesas superiores dos perfis das vigas, que ocorreu na região de momento constante (entre os pontos de aplicação das cargas), conforme apresentado na Figura 17, e sempre dentro do regime elástico de deformações. Em todos os modelos, a flambagem local, que levou a laje a falha, ocorreu primeiro nos perfis das bordas da laje.

Figura 16 - Flambagem local da alma no perfil da laje L-2 (CP-B)



A falha da estrutura por flambagem local no trecho de momento constante também é descrita nos trabalhos de Kyvelou, Gardner e Nethercot (2017a) e Leite (2020), cuja montagem dos ensaios (com 2 pontos de aplicação de carga) é similar à executada no presente estudo. Zhou *et al.* (2014, 2019) utilizaram montagem do ensaio com aplicação de cargas simulando carregamento uniformemente distribuído, entretanto, também apontaram a flambagem local como modo de falha da estrutura.

4.2 Resultados: resistência (incremento $M_{u,exp}$)

A Tabela 4 apresenta resumo dos principais dados últimos obtidos através dos ensaios realizados nas estruturas L-1 a L-5, sendo $P_{u,exp}$ a carga última suportada pela laje, $M_{u,exp}$ o momento solicitante máximo, σ_{max} as tensões máximas de tração e compressão medidas na aplicação da carga última, $f_{u,exp}$ o deslocamento vertical máximo medido no centro do vão (média 3 DTs) e $s_{u,exp}$ o deslizamento máximo entre substrato e estrutura (média 2 DTs). Todos os dados, desta e das demais tabelas, representam a média dos valores dos dois CPs de cada modelo. As tensões foram calculadas a partir dos dados de deformação obtidos nos ensaios e do módulo de elasticidade do aço determinado experimentalmente.

A partir dos dados da Tabela 4, percebe-se que as lajes com *plywood* (L-2 a L-5) suportaram momentos últimos com valores bastante maiores que o modelo sem substrato (L-1), com acréscimo de resistência entre 42% e 58%. Tal fato é evidência da ocorrência de ação mista entre perfis metálicos da estrutura das vigas da laje e as placas de substrato em madeira nos modelos com *plywood*. A Figura 18 apresenta diagrama que compara o momento fletor último experimental ($M_{u,exp}$) de cada tipologia de laje ensaiada ao momento fletor último experimental da laje L-1 ($M_{u,exp,L-1}$).

Percebe-se, também, que todos os ensaios das estruturas analisadas ocorreram dentro do regime elástico de deformação, visto que as tensões máximas registradas não ultrapassaram a tensão de resistência ao escoamento (f_y) do material (301,86 MPa).

Os dados obtidos estão alinhados com os resultados apresentados no estudo análogo revisado de Kyvelou, Gardner e Nethercot (2017a), em que o momento fletor último experimental ($M_{u,exp}$) da laje com substrato foi 44% maior que da laje sem substrato. Zhou *et al.* (2014, 2019) e Leite (2020) não realizaram ensaios de estrutura sem substrato para comparação.

Os valores das grandezas das cargas e momentos máximos suportados, nos ensaios, pelas diversas lajes com substrato ($M_{u,exp}$) apresentaram variação em relação ao seu valor médio ($4,18 \times 10^5$ N.cm) de até 4% para mais ou para menos. Esta diferença é muito pequena e indica que a variável de mudança na paginação das placas de *plywood* nos modelos teve pouca ou nenhuma influência na resistência de cada estrutura de laje ensaiada.

4.3 Resultados: distribuição de deformações

A Tabela 5 apresenta as máximas deformações (ϵ) e tensões (σ) de compressão e tração presentes nos perfis de aço das estruturas de laje ensaiadas, para carga (P) de 1119,5 kgf (10978,5 N). Esta carga é equivalente à carga máxima suportada pela estrutura sem substrato (L-1) e à 65% da carga máxima média suportada pelos modelos com substrato (L-2 a L-5).

A Figura 19 apresenta o diagrama de distribuição de deformações ao longo da altura do perfil metálico central e substrato, quando presente, das lajes para o mesmo carregamento citado.

Figura 17 - Flambagem local dos perfis de L-4 CP-A (esquerda) e L-2 CP-B (direita)



Tabela 4 - Resumo da média dos valores experimentais máximos nos modelos de lajes ensaiadas

Modelo	$P_{u,exp}$ (kgf)	$P_{u,exp}$ (N)	$M_{u,exp}$ (N.cm)	$\sigma_{max,tração}$ (MPa)	$\sigma_{max,comp.}$ (MPa)	$f_{u,exp}$ (mm)	$S_{u,exp}$ (mm)
L-1	1119,5	10978,5	$2,74 \times 10^5$	158,3	-157,9	17,14	-
L-2	1773,6	17390,9	$4,35 \times 10^5$	224,0	-209,0	23,92	1,66
L-3	1726,7	16932,9	$4,23 \times 10^5$	217,5	-191,5	24,61	1,02
L-4	1680,0	16474,9	$4,12 \times 10^5$	200,2	-180,7	26,04	0,41
L-5	1633,3	16016,9	$4,00 \times 10^5$	195,2	-153,9	23,24	1,18

Figura 18 - Momento fletor último comparado das estruturas ensaiadas

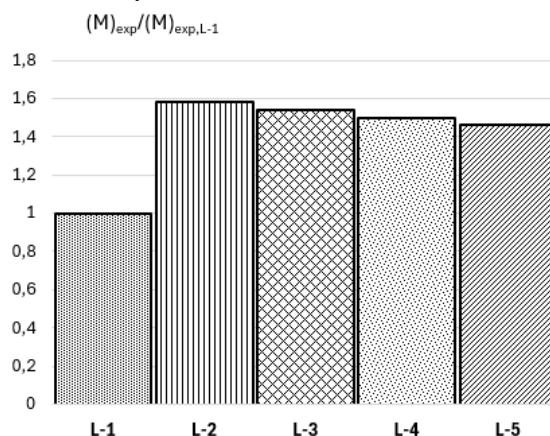
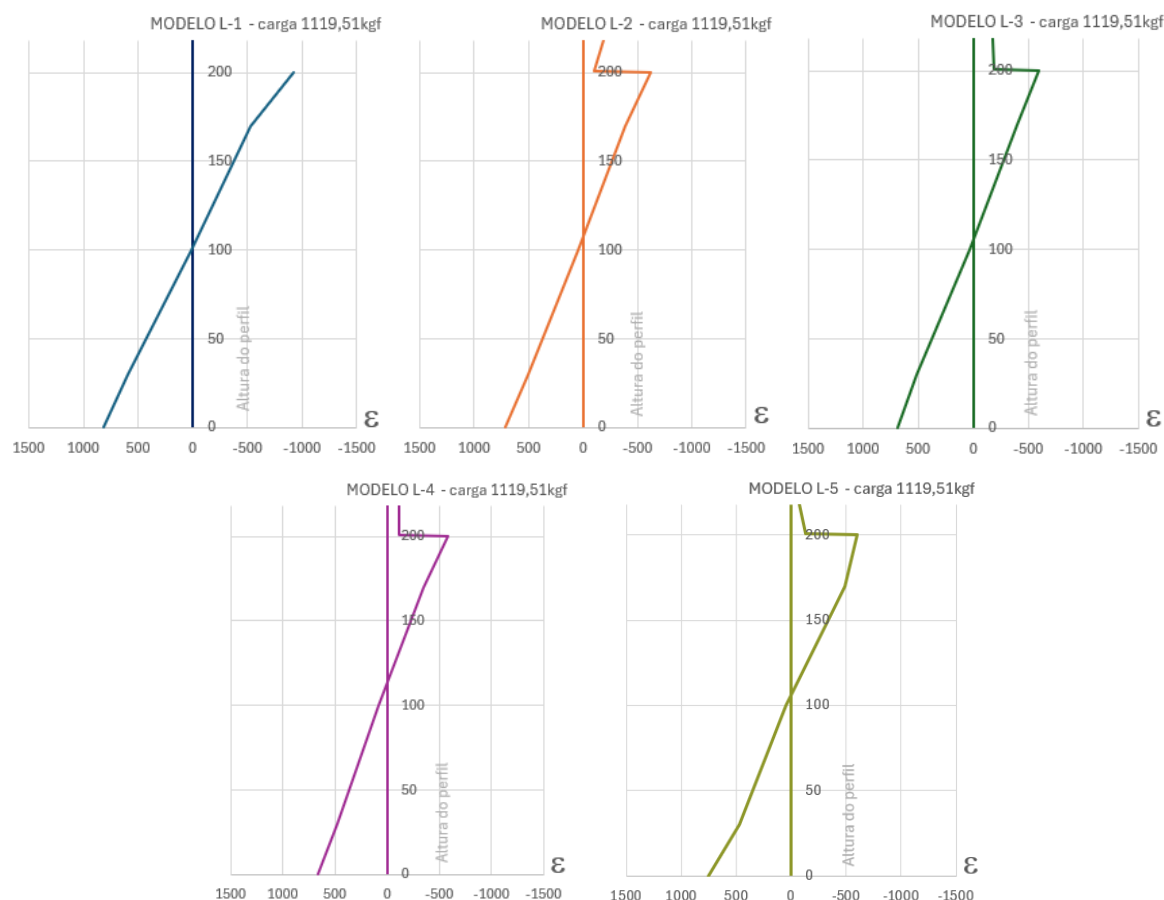


Tabela 5 - Deformações e tensões normais máximas nos perfis das lajes (carga 1119,5 kgf)

Modelo	P_{exp} (kgf)	P_{exp} (N)	$\epsilon_{comp.}$ (μm)	$\sigma_{compressão}$ (MPa)	$\epsilon_{tração}$ (μm)	$\sigma_{tração}$ (MPa)
L-1	1119,5	10978,5	834,7	158,3	-832,6	-157,9
L-2			718,1	136,2	-620,4	-117,6
L-3			693,1	131,4	-592,6	-112,4
L-4			668,5	126,8	-585,6	-111,1
L-5			670,7	127,2	-597,6	-113,3

Figura 19 - Diagramas de deformações ao longo da altura do perfil metálico e substrato, quando presente - carga 1119,51kgf



Os dados da Tabela 5 demonstram que as deformações e tensões presentes nos perfis das estruturas com placas de *plywood* (L-2 a L-5) foram significativamente menores que aquelas obtidas nos perfis de lajes sem substrato (L-1), com redução média de 18% nas deformações e tensões de tração e 28% nas de compressão nesta comparação. Associada à redução nas tensões no perfil metálico, a presença de deformações de compressão nos substratos das lajes L-2 a L-5 (Figura 19) reforça o entendimento de colaboração significativa do *plywood* a resistência da estrutura e, assim, junto aos perfis de aço, compõe viga mista nas estruturas avaliadas.

As grandezas das tensões de compressão e tração obtidas nos modelos de laje L-1, sem substrato, apresentaram distribuição simétrica ao longo da altura do perfil metálico, com linha neutra elástica (LNE) na metade da altura do perfil (Figura 19). Já as lajes com substrato em *plywood* apresentaram tensões de tração no perfil metálico, em média, 13% menores que as tensões de compressão também no aço, com a LNE deslocada em direção ao substrato, reforçando o entendimento do comportamento da estrutura das lajes ensaiadas como vigas mistas resultante da associação entre aço e madeira, uma vez que parte dos esforços de compressão é absorvido pelo substrato.

Os valores dos esforços máximos nos perfis de aço das lajes L-2 a L-5 apresentaram números bastante próximos. A variação das deformações e tensões de tração em relação aos valores médios foi de até 4% para mais ou 3% para menos. Já os dados de compressão variaram em até 4% para mais ou 2% para menos em relação aos valores médios. A ínfima diferença entre as grandezas dos dados reforça a percepção de que a variável de mudança na paginação das placas *plywood* nos modelos teve pouca influência na distribuição das deformações na seção das vigas.

4.4 Resultados: rigidez

Para análise comparativa da rigidez, o valor da rigidez experimental (EI_{exp}) da viga mista de cada modelo de laje foi obtido com emprego da Equação 1 que permite calcular a flecha – deslocamento vertical – máxima

para a situação de cargas e apoios dos ensaios, no regime elástico. Na referida equação, f_{max} é a flecha máxima no centro do vão, P' é a carga em cada ponto de aplicação da viga (equivalente a 1/6 da carga total P aplicada), L é o vão da viga, E é o módulo de elasticidade do aço e I equivale à inércia da seção mista na estrutura.

$$f_{max} = \frac{23P'L^3}{648EI} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que:

f_{max} é a flecha máxima no centro do vão.

A Tabela 6 apresenta os dados de rigidez calculados, com a Equação 1, para os diversos modelos ensaiados, sendo I_{exp} a inércia média para as 3 vigas mistas que compõem cada laje, EI_{exp} a rigidez média das 3 vigas mistas que compõem a laje e f_{exp} o deslocamento vertical no centro do vão (média dos 3 DTs). Para este cálculo tomou-se como referência os dados obtidos nos ensaios com aplicação da carga P de 1119,51 kgf, equivalente à carga máxima suportada pela estrutura sem substrato (L-1) e à 65% da carga máxima média suportada pelas estruturas com compensado estrutural (L-2 a L-5).

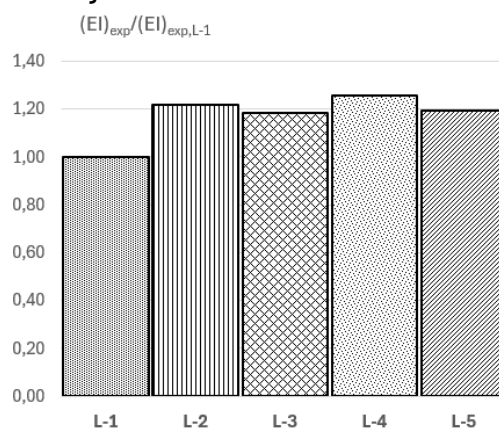
A partir dos dados da Tabela 6, percebe-se que os modelos de lajes com *plywood* (L-2 a L-5) tiveram aumento significativo da sua rigidez (EI_{exp}) comparado ao modelo de laje sem substrato (L-1), com ganhos entre 18% e 26%. O ganho de rigidez da estrutura mista implicou em flechas entre 16% e 21% menores das lajes com substrato comparadas à estrutura perfis de aço isolados. Tais fatos são evidências da ocorrência de comportamento de viga mista na associação entre perfis metálicos e *plywood* nas lajes estudadas. A Figura 20 apresenta gráfico com os dados de rigidez experimental (EI_{exp}) de cada laje ensaiada comparada à rigidez experimental da laje L-1 ($EI_{exp,L-1}$).

Os dados de ganhos de rigidez obtidos nos ensaios deste estudo (entre 18% e 26%) foram maiores que aqueles apresentados por Kyvelou *et al.* (2017a), em que a rigidez (EI_{exp}) da laje com substrato foi 14% maior que da laje composta apenas por perfis de aço. Os autores citados empregaram perfis Ue de altura 250 mm com chapas de aço de espessura 1,5 mm e 3,0 mm, que, portanto, já possuíam inércia bastante mais elevada que os perfis empregados no presente estudo (Ue 200 com chapa 0,95 mm). Conforme conclusões comuns a Kyvelou (2017), Kyvelou, Gardner e Nethercot (2015, 2017a) e Zhou *et al.* (2014, 2019), após estudos paramétricos, perfis de aço com menor inércia tendem a se beneficiar mais da ação mista resultante da associação com substratos em madeira, o que é percebido quando se comparam os ganhos obtidos no presente estudo aos apresentados por Kyvelou, Gardner e Nethercot (2017a).

Tabela 6 - Rigidez das lajes ensaiadas (carga 1119,5 kgf)

Modelo	P_{exp} (kgf)	P_{exp} (N)	P'_{exp} (N)	I_{exp} (cm ⁴)	EI_{exp} (N.cm ²)	f_{exp} (mm)
L-1	1119,5	10978,5	1829,8	127,9	2,43 x 10 ⁹	17,14
L-2				155,7	2,95 x 10 ⁹	14,08
L-3				151,5	2,87 x 10 ⁹	14,47
L-4				160,9	3,05 x 10 ⁹	13,62
L-5				152,6	2,89 x 10 ⁹	14,36

Figura 20 - Rigidez comparada das lajes ensaiadas



Conforme discutido, diversos dados obtidos no presente estudo subsidiam a percepção da ocorrência de comportamento de viga mista na estrutura de laje de LSF composta por perfis metálicos e substrato. A ocorrência de deslizamento relativo entre as placas de *plywood* e os perfis em aço (Tabela 4) e o formato dos diagramas de deformações ao longo da altura da viga mista (Figura 19) evidenciam, ainda, que a interação entre estes materiais é parcial.

Para avaliação dos ganhos de rigidez que resultariam de uma teórica viga mista com interação total nas lajes de LSF, a seção equivalente composta por perfil de aço e placa de substrato em *plywood* foi calculada pelo método da seção transformada.

O fator de transformação (n) empregado no método é a razão entre os módulos de elasticidade dos materiais que compõem a viga mista ($E_{plywood}/E_{aço}$). O resultado desta relação n entre os materiais em estudo é de $3,328 \times 10^{-2}$.

A largura efetiva (b_{eff}) do substrato que contribui para a composição da seção mista equivale à metade da distância entre vigas paralelas ou à distância entre o eixo da viga e a borda da placa de substrato, quando se tratar do perfil da extremidade. Esta consideração da largura efetiva está alinhada aos procedimentos dos autores revisados e em consonância com a prática indicada pela NBR 8800 (ABNT, 2024) para vigas mistas de aço e concreto.

A seção mista da viga central dos modelos ensaiados apresenta inércia ligeiramente maior que a seção mista das vigas das bordas, já que a distância entre perfis é de 400 mm e a placa de substrato ultrapassa a estrutura lateralmente em 150 mm (Figura 21).

Na transformação da largura efetiva (b_{eff}) do substrato de *plywood* em largura equivalente de aço, foi mantida a altura da placa existente (18,3 mm). A largura equivalente é obtida multiplicando-se o valor da largura efetiva do substrato (b_{eff}), em cada perfil, pelo fator de transformação (n). As seções equivalentes em aço para as vigas mistas das bordas e central dos modelos L-2 a L-5 estão ilustradas na Figura 22.

Figura 21 - Seções transformadas para determinação da inércia das vigas mistas

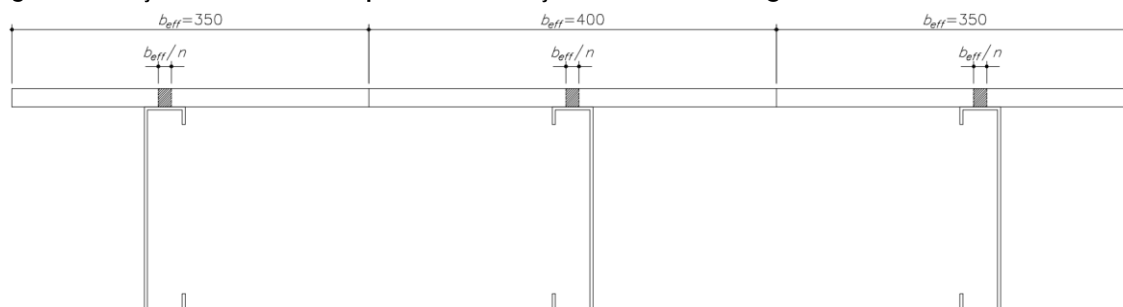
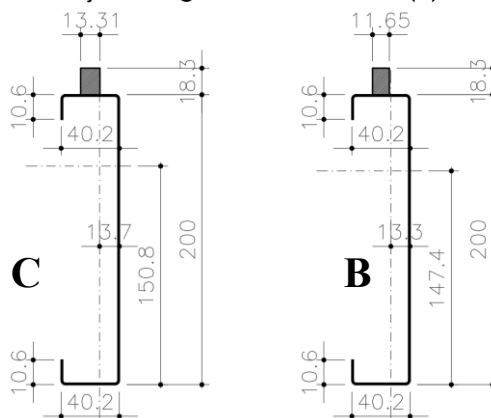


Figura 22 - Seções equivalentes em aço das vigas mistas - Central (C) e Bordas (B)



A avaliação comparativa do comportamento dos modelos ensaiados com aquele previsto para viga mista com interação total foi realizada empregando-se como valor da inércia dessa viga (I_{total}) o valor médio entre as inércias das vigas equivalentes das bordas (2 vigas) e central (Tabela 7). Essa tabela também apresenta a rigidez da seção equivalente média (EI_{total}), calculada pelo produto do módulo de elasticidade do aço (E) por I_{total} . Os valores de inércias das seções equivalentes apresentados ($I_{total,ef}$) tiveram como base a grandeza da inércia do perfil isolado calculada, considerando sua seção efetiva ($I_{aço,ef}$), conforme NBR 14762 (ABNT, 2010).

A Figura 23 apresenta o comparativo entre a rigidez experimental (EI_{exp}) das vigas mistas das lajes ensaiadas e a rigidez teórica da estrutura mista com interação total ($EI_{total,ef}$). Aqui, percebe-se que a rigidez das vigas em perfis de aço isolados (L-1) alcança 49% da rigidez teórica da viga mista com interação total. Já a rigidez das vigas mistas com substrato (L-2 a L-6) alcança entre 58% e 61% da rigidez de referência. Apesar da rigidez das vigas mistas estudadas ser maior que a rigidez das vigas em perfis isolados, elas ainda são menores que a rigidez teórica da viga mista com interação total, confirmando uma interação parcial nas estruturas estudadas.

A Figura 24 compara as flechas medidas experimentalmente (f_{exp}) em cada modelo de laje ensaiado ao longo do seu comprimento, na carga 1119,5 kgf. Percebe-se que a estrutura composta por perfis de aço isolados (L-1) apresentou flecha bastante maior que aquela percebida nos modelos com substrato (L-2 a L-5), evidenciando a contribuição do substrato no aumento de rigidez da estrutura.

Percebe-se, também, que as flechas máximas de todos os modelos com substrato são bastante similares, apresentando variação em relação ao valor médio de até 2% para mais e 4% para menos. As pequenas variações no valor da flecha máxima reforçam o entendimento de baixa influência da mudança na paginação do *plywood* na rigidez da viga mista.

A Figura 25 apresenta o comportamento das flechas máximas nas diversas estruturas estudadas com o incremento da carga nos ensaios. Percebe-se que a redução comparativa entre flechas nos modelos de vigas mistas e modelo sem substrato foi crescente a medida em que se aumentou a carga.

Nas Figuras 24 e 25 as flechas medidas experimentalmente são comparadas também às flechas calculadas para a estrutura com vigas mistas com teórica interação total, cuja grandeza dos deslocamentos verticais é significativamente menor. A diferença apontada reforça o entendimento de interação parcial nas estruturas de vigas mistas ensaiadas.

4.5 Síntese dos resultados

A interpretação dos resultados evidencia que o *plywood* exerce papel relevante no comportamento estrutural das vigas mistas em lajes de LSF. Sua presença alterou o comportamento da flambagem, elevou a resistência, aumentou a rigidez e reduziu deslocamentos, configurando um sistema misto aço–madeira de interação parcial. As diferenças de comportamento foram pequenas entre os modelos com variável de paginação de placas, mostrando esta tem pouca relevância no desempenho. Assim, os resultados consolidam a viabilidade do uso de *plywood* em lajes secas do sistema LSF e ampliam o entendimento sobre comportamento misto entre aço e madeira.

Tabela 7 - Inércia e rigidez da seção mista equivalente com interação total

Vigas do modelo	$I_{aço,ef}$ (cm ⁴)	$I_{total,ef-viga}$ (cm ⁴)	Quantidade vigas	$I_{total,ef}$ (cm ⁴)	$EI_{total,ef}$ (N.cm ²)
Viga central (C)	115,50	270,87	1	263,52	5,00 x 10 ⁹
Vigas bordas (B)	115,50	259,85	2		

Figura 23 - Rigidez das vigas mistas ensaiadas comparadas à rigidez da viga mista com interação total

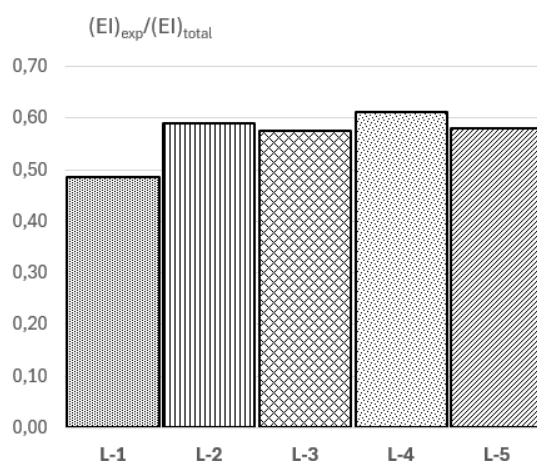


Figura 24 - Variação das flechas em cada modelo de laje

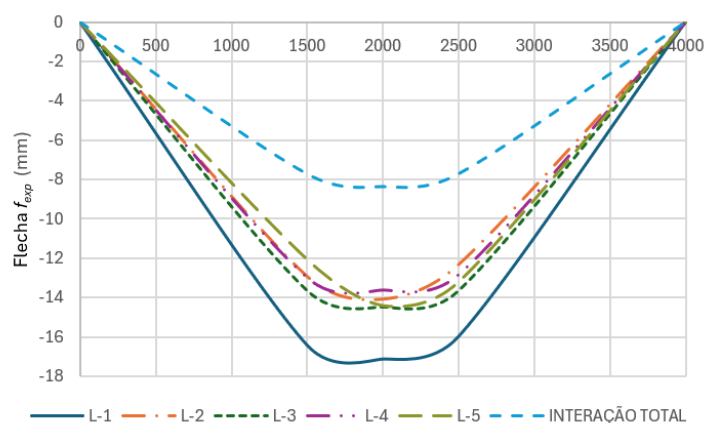
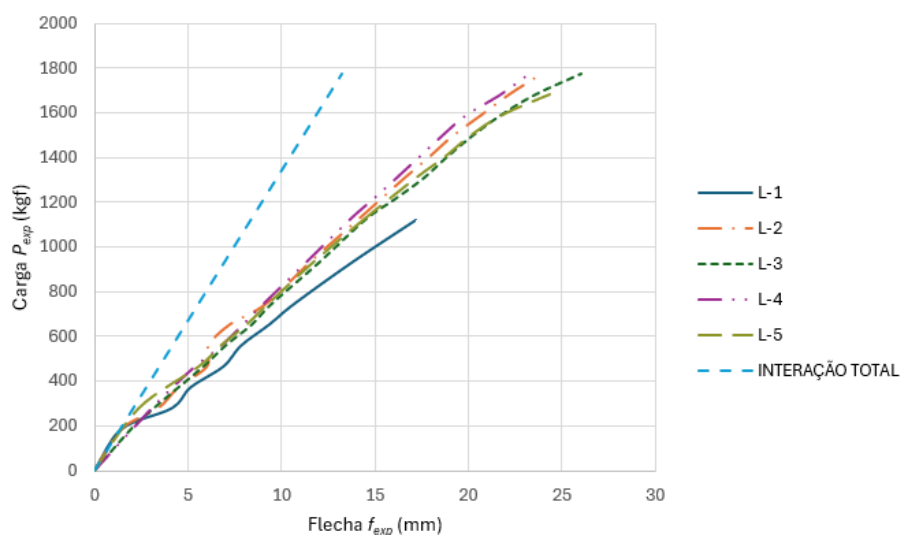


Figura 25 - Variação das flechas em relação ao incremento de cargas



5 Conclusões

O estudo apresentado neste artigo demonstra que as vigas metálicas, associadas ao substrato em *plywood*, que compõem as lajes de LSF, se comportam como estruturas de vigas mistas com interação parcial. Os resultados obtidos demonstraram que a presença do substrato altera de maneira significativa o desempenho das vigas, não apenas por promover o travamento lateral da mesa comprimida, mas também por contribuir diretamente para o aumento da rigidez e da resistência última do sistema.

Os ensaios realizados demonstraram acréscimo de resistência acima de 50%, ao se comparar a carga última da laje com associação das placas de *plywood* àquela composta por perfis metálicos isolados. Também há redução de até 21% nos deslocamentos verticais, comparando-se as estruturas com e sem placas de substrato, com redução percentual maior nas cargas mais altas, mesmo com interação parcial. Os resultados deste estudo estão alinhados aos dados e conclusões apresentados em estudos similares nacionais e internacionais, realizados com perfis de LSF e placas de OSB ou compósitas.

Os dados de resistência e rigidez das 4 estruturas ensaiadas, com variável de paginação das placas de *plywood*, apresentaram grandezas dos resultados semelhantes. Assim, evidencia-se que tal variação na posição das placas pouco interfere no desempenho das vigas mistas de lajes LSF resultantes da associação entre perfis de aço e *plywood*, o que representa vantagem prática em termos de execução, pois demonstra que pequenas variações construtivas não comprometem o desempenho estrutural do conjunto das vigas da laje.

Os resultados obtidos reforçam a viabilidade técnica do emprego de *plywood* como elemento colaborante em lajes secas do LSF e ampliam o entendimento sobre o comportamento misto entre aço e madeira em sistemas de piso. A adoção consciente desse comportamento misto pode levar ao desenvolvimento de soluções estruturais mais eficientes, com maior economia de materiais, melhor desempenho e potencial para expansão do uso do LSF.

Referências

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E111-17**: standard test method for young's modulus, tangent modulus, and chord modulus. Philadelphia, 2017.
- 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 15253**: perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis estruturais reticulados em edificações: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16970-2**: sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço formados a frio, com fechamentos em chapas delgadas: parte 2: projeto Estrutural. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6355**: perfis estruturais de aço formados a frio: padronização. Rio de Janeiro, 2012a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7008-3**: chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou liga de zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente: parte 3: aços estruturais. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto. Rio de Janeiro, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9533**: compensado: determinação da resistência à flexão estática. Rio de Janeiro, 2012b.
- CARVALHO, P. R. M.; GRIGOLETTI, G.; BARBOSA, G. D. **Curso Básico de Perfis de aço formados a frio**. 3. ed. Porto Alegre: edição dos autores, 2014.
- KYVELOU, P. **Structural behavior of composite cold-formed steel systems**. Londres, 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Estrutural) – Imperial College, Londres, 2017.
- KYVELOU, P.; GARDNER, L.; NETHERCOT, D. A. Composite action between cold-formed steel beams and wood-based floorboards. **International Journal of Structural Stability and Dynamics**, v. 15, n. 8, p. 1540029–1540046, 2015.

- KYVELOU, P.; GARDNER, L.; NETHERCOT, D. A. Design of composite cold-formed steel flooring systems. **Structures**, v. 12, p. 242–252, 2017b.
- KYVELOU, P.; GARDNER, L.; NETHERCOT, D. A. Testing and analysis of composite cold-formed steel and wood-based flooring systems. **Journal of Structural Engineering**, v. 143, n. 11, p. 04017146-1, 2017a.
- LEITE, G. C. V. M. **Análise experimental de sistema de piso misto em estrutura de perfis de aço formados a frio e placas mistas OSB-cimentícias**. Rio de Janeiro, 2020. Tese (Mestrado em Projeto de Estruturas) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.
- OLIVEIRA, L. A. F. **Estudo do comportamento e da resistência das vigas mistas aço-concreto constituídas por perfis formados a frio e lajes pré-fabricadas**. Belo Horizonte, 2001. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Civil) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.
- REZENDE, J. C. **Estudo experimental da ligação de placas de compensado estrutural com perfis do sistema construtivo Light Steel Framing**. Belo Horizonte, 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- RODRIGUES, F. C.; CALDAS, R. B. **Steel Framing**: engenharia. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/CBCA, 2016.
- SANTIAGO, A. K.; FREITAS, A. M. S.; CRASTO, R. C. M. **Steel Framing**: arquitetura. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil/CBCA, 2012.
- WILLIAMSON, T. G.; YEH, B. Composite action of I-joist floor systems. In: INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION, St. Andrews, 2008. **Proceedings [...]** St. Andrews, 2008.
- ZHOU, X. H. *et al.* A simplified method to evaluate the flexural capacity of lightweight cold formed steel floor system with oriented strand board subfloor. **Thin-Walled Structures**, v. 134, p. 40–51, 2019.
- ZHOU, X. H. *et al.* Study on the flexural capacity of cold-formed steel joists: OSB composite floors. **International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures**, v. 4, 2014.

Declaração sobre IA Generativa e Tecnologias Assistidas por IA no Processo de Escrita

Durante a preparação deste trabalho, o(s) autor(es) utilizou(aram) o ChatGPT para verificar problemas gramaticais e melhorar a legibilidade e organização do artigo. Após a utilização desta ferramenta/serviço, o(s) autor(es) revisou(aram) e editou(aram) o conteúdo conforme necessário e assume(m) total responsabilidade pelo conteúdo da publicação.

Suporte Financeiro

Fundação Cristiano Ottoni; Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da UFMG

Declaração de Disponibilidade de Dados

Dados de pesquisa somente disponíveis mediante solicitação ao autor correspondente.

Conflito de Interesses

Não há conflito de interesse.

Contribuição dos Autores

Alexandre L. Santiago: Pesquisa, Curadoria de dados, Análise de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição. **Rodrigo B. Caldas:** Administração do projeto, Supervisão, Validação de dados e experimentos. **Francisco C. Rodrigues:** Administração do projeto, Metodologia. **Richard B. Braga:** Disponibilização de ferramentas, Redação do manuscrito original. **Rodrigo T. Fabbrini:** Disponibilização de ferramentas.

Editor: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.