

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS**

Carolina Silva Oliveira

**MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS DE PAREDES DE CISALHAMENTO  
DO SISTEMA *LIGHT-STEEL-FRAMING* REVESTIDAS POR PLACAS DE OSB**

Belo Horizonte

2023

Carolina Silva Oliveira

**MODELAGEM EM ELEMENTOS FINITOS DE PAREDES DE CISALHAMENTO  
DO SISTEMA *LIGHT-STEEL-FRAMING* REVESTIDAS POR PLACAS DE OSB**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas

Belo Horizonte

2023

O48m

Oliveira, Carolina Silva.

Modelagem em elementos finitos de paredes de cisalhamento do sistema *Light-Steel-Framing* revestidas por placas de OSB [recurso eletrônico] / Carolina Silva Oliveira. - 2023.

1 recurso online (126 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Francisco Carlos Rodrigues.

Coorientador: Rodrigo Barreto Caldas.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 34-72.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Método dos elementos finitos - Teses. 3. Cisalhamento - Teses. 4. Madeira - Teses. 5. Chapas de aço - Teses. 6. Edificações - Teses. I. Rodrigues, Francisco Carlos. II. Caldas, Rodrigo Barreto. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 624(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS



UFMG

## **ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS Nº: 399 DA ALUNA CAROLINA SILVA OLIVEIRA**

Às **08:30** horas do dia **24** do mês de **maio** de **2023**, reuniu-se, por videoconferência, a Comissão Examinadora indicada pelo Colegiado do Programa em **03 de abril de 2023**, para julgar a defesa da Dissertação de Mestrado intitulada "**Modelagem em elementos finitos de Paredes de Cisalhamento do Sistema Light-Steel-Framing revestidas por placas de OSB**", cuja aprovação é um dos requisitos para a obtenção do Grau de MESTRE EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS na área de ESTRUTURAS.

Abrindo a sessão, o Presidente da Comissão, **Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues**, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares passou a palavra à candidata para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa da candidata. Logo após, a Comissão se reuniu, sem a presença da candidata e do público, para julgamento e expedição do resultado final. Foram atribuídas as seguintes indicações

- 1. Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues (orientador) - DEES - UFMG (Orientador) Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas - DEES - UFMG (Coorientador) Prof. Dr. Hermes Carvalho - DEES - UFMG**
- 2. Prof. Dr. Eduardo de Miranda Batista - COPPE - UFRJ**

Após reunião, a Comissão considerou a candidata APROVADA, conforme pareceres em anexo.

O resultado final foi comunicado publicamente a candidata pelo Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora. Belo Horizonte, 24 de maio de 2023. Observações:

3. A aprovação da candidata na defesa da Tese de Doutorado não significa que a mesma tenha cumprido todos os requisitos necessários para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia de Estruturas;
4. Este documento não terá validade sem a assinatura do Coordenador do Programa de Pós-Graduação.



Documento assinado eletronicamente por **Hermes Carvalho, Professor do Magistério Superior**, em 24/05/2023, às 11:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Carlos Rodrigues, Assessor(a) especial**, em 24/05/2023, às 13:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº10.543, de 13 de novembro de](#)

[2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo de Miranda Batista, Usuário Externo**, em 30/05/2023, às 11:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Barreto Caldas, Professor do Magistério Superior**, em 31/05/2023, às 16:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro](#)

[de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Felício Bruzzi Barros, Coordenador(a) de curso de pós- graduação**, em 14/06/2023, às 09:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art.5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2308929** eo código CRC **A3945434**.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues e Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas que me deram a o caminho a seguir.

Aos meus pais, Vânia e Arnaldo, por sempre acreditarem no meu potencial e por sempre me incentivarem a seguir os meus sonhos, fornecendo todo o suporte necessário para chegar até aqui. Eu dedico todo esse trabalho a vocês.

Aos meus irmãos, que sempre me deram todo suporte que eu precisei. Vocês são demais. Obrigada por me fazer sentir tamanha confiança em mim mesma.

Ao Flávio, meu companheiro, que ao longo de todos esses anos se fez presente e me forneceu a força que eu precisava para continuar.

Aos meus amigos do DEES (Bernardo, Bianca, Jorge, Laura e Zé Filho), sem vocês esse caminho seria impossível. Obrigada por deixar os dias mais leves, obrigada pelas ajudas, pelos estudos, pelas conversas e sobretudo pela amizade.

Aos professores do departamento, especialmente à Prof. Dra. Ana Lydia que contribuiu com grande ajuda às dúvidas relacionadas ao ABAQUS.

Às instituições de fomento à pesquisa, especialmente, à CAPES, que apoiou financeiramente a elaboração deste trabalho.

À Todos que direta, ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

*“A mente que se abre a uma nova  
ideia jamais voltará ao seu tamanho  
original.”  
Albert Einstein*

## RESUMO

O trabalho apresenta resultados do estudo numérico de paredes de cisalhamento do sistema construtivo *Light Steel Framing* (LSF), revestidas por placas de OSB e a análise da contribuição estrutural dessas placas no sistema. O principal objeto de resistência lateral das estruturas LSF é a parede de cisalhamento, sendo então o foco deste trabalho. A pesquisa avalia a utilização das placas de OSB, já empregadas no sistema com a função de vedação, no enrijecimento das paredes, o que torna as placas responsáveis por evitar deslocamentos laterais excessivos na edificação. O estudo numérico empregando o Método dos Elementos Finitos (MEF) foi embasado nas ligações parafusadas entre as chapas de aço e as placas de OSB, incluindo nestes pontos, comportamentos não lineares determinados experimentalmente por Datchoua (2018) e previamente verificados e validados numericamente no presente estudo. Posteriormente, foi realizada a validação numérica de uma parede de cisalhamento em escala real, com fechamento em OSB ensaiada por Faria (2023) e em seguida um estudo paramétrico foi realizado com base no modelo validado, para avaliação das seguintes variações na parede: espessura das chapas de aço, espessura das placas de OSB, quantidade de placas de fechamento em OSB e espaçamento dos parafusos de ligação entre chapas de aço e placas de OSB. O procedimento de simulação numérica conduzido alcançou resultados análogos aos resultados experimentais, o que indica boa calibração dos modelos numéricos. A análise paramétrica conduziu a resultados interessantes. A utilização de espessuras maiores de chapas dos perfis de aço resultou em maiores valores de força, porém menor fator de ductilidade e de rigidez elástica. A espessura maior de placa de OSB gerou uma maior capacidade de deformação da parede de cisalhamento, provocando um acréscimo na rigidez elástica e na ductilidade. O fechamento duplo por placas de OSB se mostrou eficiente no que diz respeito ao enrijecimento lateral das paredes. Ao se estudar modelos de parede de cisalhamento sem fechamento, foi possível observar a redução na rigidez elástica. Ao se utilizar espaçamentos maiores entre chapas de aço e placas de OSB, houve decréscimo de forças, mas grande acréscimo no fator de ductilidade, sem perda de rigidez elástica. Por outro lado, a utilização de espaçamentos menores, levou a um ganho de rigidez elástica. Os resultados do estudo paramétrico mostraram a grande contribuição estrutural das placas de OSB no contraventamento lateral das paredes de cisalhamento, seja pela sua espessura, pela quantidade de placas utilizadas ou pelo comportamento das ligações presentes entre as placas e as chapas de aço.

Palavras-chave: Paredes de cisalhamento. *Light Steel Framing*. Placas de OSB. Método dos Elementos Finitos.



## ABSTRACT

This work describes a numerical study of Light Steel Framing (LSF) shear walls with OSB panels. The objective is to evaluate the structural contribution of these panels in the system. The main object of lateral resistance of LSF structures is the shear wall, thus being the focus of this work. The research evaluates the use of OSB panels in the stiffening of the walls, which makes the panels responsible for transferring lateral forces to the foundation, avoiding excessive lateral displacements in the building. The numerical study using the Finite Element Method (FEM) was based on the bolted connections between cold-formed steel profiles and OSB panels, including at these points, nonlinear behaviors experimentally determined by Datchoua (2018) and previously verified and numerically validated in this work. Subsequently, a numerical validation of a shear wall with an OSB panel, tested by Faria (2023) was carried out, and then a parametric study was developed based on the validated model, to evaluate the following variations in the wall: the thickness of the cold-formed steel profiles, the thickness of OSB panels, number of OSB panels and spacing of connecting screws between steel profiles and OSB panels. The numerical simulation procedure conducted achieved results similar to the experimental results, which indicates high-quality calibration of the numerical models. The parametric analysis entailed in interesting results regarding the lateral strength of the shear walls. The use of greater thickness of cold-formed profiles resulted in a force versus displacement behavior with higher force values, but lower ductility factor and elastic stiffness. The use of greater thickness of the OSB panels generated a greater deformation capacity of the shear wall, causing an increase in elastic stiffness and ductility. In addition, the double closure with OSB plates proved to be efficient with regard to the lateral stiffening of the walls. In the study of shear wall models without OSB panels, it was possible to observe the loss of elastic stiffness. About the connections between the OSB panels and the cold-formed steel profiles, it was possible to perceive that they are parameters of great influence on the lateral behavior of the shear walls. When using larger external and internal spacings, there was a decrease in forces, but a large increase in the ductility factor, without elastic stiffness loss. On the other hand, the use of smaller internal and external spacing resulted in a gain in elastic stiffness.

Thus, the results of the parametric study showed the great structural contribution of OSB panels in the lateral stiffness of shear walls, whether due to their thickness, the number of panels used, or the behavior of connections present between OSB panels and the cold-formed steel profiles.

Keywords: Shear walls; Light Steel Framing; OSB panels; Finite Element Method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Residência no Sistema Construtivo LSF. Fonte: Full Estruturas, 2016. ....	21
Figura 1.2 - Sistema de distribuição de força lateral. Fonte: Faherty e Williamson, 1997. ....	24
Figura 1.3 - Painel com contraventamento em treliça vertical. ....	25
Figura 1.4 - Painel com contraventamento em X. ....	25
Figura 1.5 - Resultante das forças laterais e condições de contorno. ....	25
Figura 1.6 - Dispositivo <i>hold-down</i> . ....	26
Figura 1.7 - Componentes de um painel estrutural com abertura. ....	27
Figura 1.8 - Componentes de um painel estrutural sem abertura. ....	28
Figura 1.9 - Componentes de um painel de entrepiso em <i>Light Steel Framing</i> . ....	28
Figura 1.10 - Processo de fixação dos parafusos auto-atarraxantes. ....	29
Figura 1.11 - Modos de falha dos parafusos auto-atarraxantes. ....	30
Figura 1.12 - Posicionamento das lâminas de acordo com a orientação das partículas de OSB. .....	31
Figura 1.13 - Visão geral da pesquisa. ....	33
Figura 2.1 – Modos de flambagem local, distorcional e global. Fonte: Garcia (2016). ....	42
Figura 2.2 - Painéis de aço moldados a frio: (a) painel puro com pouca ou nenhuma resistência lateral, (b) painel com contraventamento e (c) painel revestido com resistência lateral desenvolvida nos locais de fixação painel. Fonte: Madsen <i>et al.</i> (2016). ....	44
Figura 2.3 - Modelo esquemático com contraventamento do montante pela ..... .....	45
Figura 2.4 - Exemplo de equipamento de teste de parede de cisalhamento. ....	46
Figura 2.5 - Exemplo de resposta histerética registrada em testes típicos de parede de cisalhamento cíclico para: paredes com fechamento em OSB; contraventada; com fechamento em chapa de aço. Fonte: Madsen <i>al.</i> (2016). ....	47
Figura 2.6 - Modelo M1 com espaçamento axial de 150 mm entre os parafusos: a) vista lateral e b) vista frontal. ....	49
Figura 2.7 - Modelo M2 com espaçamento axial de 150 mm entre os parafusos: a) vista lateral e b) vista frontal. ....	50
Figura 2.8 - Modelo M3 com espaçamento axial de 150 mm entre os parafusos: a) vista lateral e b) vista frontal. Fonte: Datchoua (2018). ....	50
Figura 2.9 - Orientação das molas a) Molas de translação, b) Molas de rotação. ....	52
Figura 2.10 - Gráfico Força <i>versus</i> Deslocamento do procedimento para determinar a rigidez inicial do sistema para um teste monotônico de duas amostras nominalmente idênticas. ....	53

Figura 2.11 - Configuração dos ensaios experimentais. ....	56
Figura 2.12 - Modelo em elementos finitos dos painéis. (a) Estrutura. (b) Revestimento. (c) Parafusos. (d) Malha. Fonte: Niari <i>et al.</i> (2015).....	57
Figura 2.13 - Comparação dos resultados numérico e experimental do modelo st1.2-sh1.5....	58
Figura 2.14 - Layout experimental.....	59
Figura 2.15 - Calibração do modelo numérico.....	60
Figura 2.16 - Modelo com diagonal em aço. ....	61
Figura 2.17 - Curva de força-deslocamento para modelos numéricos e testes experimentais. Fonte: adaptada de Henriques <i>et al.</i> (2017).....	61
Figura 2.18 - Configuração do ensaio em modelo real. ....	63
Figura 2.19 - Configuração dos modelos numéricos. ....	64
Figura 2.20 - Efeito da espessura do painel OSB nas relações P- $\Delta$ para paredes de cisalhamento. ....	65
Figura 2.21 - Configuração dos ensaios experimentais. ....	66
Figura 2.22 - Primeiro modelo analítico no <i>software</i> SAP2000, sem revestimento. ....	67
Figura 2.23 - Segundo modelo analítico no <i>software</i> SAP2000, com revestimento.....	67
Figura 2.24 - Forma deformada da estrutura de um andar após análise de <i>pushover</i> no <i>software</i> SAP2000. Fonte: Karabulut e Soyoz (2017). ....	68
Figura 2.25 - Parede de cisalhamento modelada no software OpenSees: a) PFF's e fechamento por OSB e b) detalhes da ligação utilizada na modelagem. Fonte: Bian <i>et al.</i> (2015).....	69
Figura 2.26 - Configuração dos ensaios experimentais. Fonte: Attari <i>et al.</i> (2016). ....	70
Figura 2.27 - Configuração dos modelos numéricos. Fonte: Attari <i>et al.</i> (2016). ....	71
Figura 2.28 - Esquematisação e detalhes do modelo de elemento finito desenvolvido. Fonte: Fiorino <i>et al.</i> (2018).....	72
Figura 3.1 - Modelo ensaiado M1 S3. Fonte: Datchoua (2018). ....	74
Figura 3.2 - Modelo numérico de dimensões reduzidas.....	74
Figura 3.3 - Modelo numérico para validação experimental.....	75
Figura 3.4 - Modelo experimental: a) esquematização do ensaio, b) modelo ensaiado. ....	75
Figura 3.5 - Composição da geometria do modelo principal. ....	78
Figura 3.6 - Comportamento elastoplástico adotado para o aço. ....	80
Figura 3.7 – Modelo numérico e numeração dos eixos. ....	81
Figura 3.8 - Discretização da malha para modelo de dimensões reduzidas.....	83
Figura 3.9 - Discretização da malha para modelo principal. ....	83
Figura 3.10 - Representação <i>Rigid MPC</i> das ligações aço-aço. ....	84

Figura 3.11 - Simplificação das curvas da ligação aço-OSB, obtidas experimentalmente. Fonte: Adaptado de Pedrosa (2015). .....	85
Figura 3.12 - Comportamento não linear das ligações entre aço e OSB: a) Média dos deslocamentos; b) Comportamento não linear adotado. ....	86
Figura 3.13 - Representação das ligações entre perfis de aço e placas de OSB: a) externas (nos contornos das placas) e b) internas (no interior das placas). ....	86
Figura 3.14 - Representação dos dispositivos <i>hold downs</i> nos ensaios e na modelagem numérica. ....	87
Figura 4.1 - Resultados do modelo numérico com dimensões reduzidas em comparação com os resultados experimentais (CP2). ....	89
Figura 4.2 - Resultados do modelo numérico com dimensões reduzidas em comparação com os resultados experimentais (CP3). ....	90
Figura 4.3 - Tensões resultantes no modelo numérico do corpo de prova com dimensões reduzidas (CP2). ....	91
Figura 4.4 - Tensões resultantes no modelo numérico do corpo de prova com dimensões reduzidas (CP3). ....	91
Figura 4.5 - Comportamento real e simplificado da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações externas espaçadas em 150 mm e espessura das chapas de aço de 0,95 mm e das placas de OSB de 9,5 mm. ....	92
Figura 4.6 - Comportamento real e simplificado da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações internas espaçadas em 300 mm e espessura das chapas de aço de 0,95 mm e OSB de 9,5 mm. ....	92
Figura 4.7 - Simplificação do comportamento da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações internas e externas, espessura das chapas de aço de 0,95 mm e de placas de OSB de 9,5 mm. ....	93
Figura 4.8 – Determinação do ponto de escoamento utilizando gráfico de força <i>versus</i> deslocamento. ....	94
Figura 4.9 - Reposta força <i>versus</i> deslocamento lateral do modelo computacional e experimental. ....	95
Figura 4.10 – Pontos da curva força <i>versus</i> deslocamento de interesse para o estudo. Fonte: Wang <i>et al.</i> (2019). ....	95
Figura 4.11 - Deformada do modelo experimental e tensões resultantes no modelo numérico. .	97
Figura 4.12 - Deformada do modelo experimental e tensões resultantes no modelo numérico. .	97
Figura 4.13 - Deformada do modelo experimental e tensões resultantes no modelo numérico. .	98

Figura 4.14 - Deformada do modelo experimental e tensões resultantes no modelo numérico.	98
Figura 4.15 - Comportamentos real e simplificado da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações externas espaçadas em 150 mm e espessura das chapas de aço de 0,80 mm. ....	100
Figura 4.16: Comportamentos real e simplificado da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações internas espaçadas em 300 mm e espessura das chapas de aço de 0,80 mm....	100
Figura 4.17: Simplificação do comportamento da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações externas e internas e espessura das chapas de aço de 0,80 mm. ....	101
Figura 4.18 - Deformada do modelo paramétrico com espessura do aço igual a 0,80 mm. ....	102
Figura 4.19 - Influência do parâmetro espessura das chapas de aço. ....	102
Figura 4.20 - Comportamentos real e simplificado da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações externas espaçadas em 150 mm e espessura das placas de OSB de 11,1 mm....	104
Figura 4.21 - Comportamentos real e simplificado da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações internas espaçadas de 300 mm e espessura das placas de OSB de 11,1 mm. ....	104
Figura 4.22 - Simplificação do comportamento da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações internas e externas e espessura das placas de OSB de 11,1 mm. ....	105
Figura 4.23 - Deformada do modelo paramétrico com espessura das placas de OSB igual a 11,10 mm. ....	106
Figura 4.24 - Influência do parâmetro espessura das placas de OSB. ....	106
Figura 4.25 - Deformada do modelo paramétrico com fechamento em ambos os lados por placas de OSB. ....	108
Figura 4.26 - Influência do parâmetro quantidade de placas de OSB. ....	108
Figura 4.27: Comportamentos real e simplificado da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações externas espaçadas em 300 mm. ....	110
Figura 4.28: Comportamentos real e simplificado da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações internas espaçadas em 300 mm. ....	110
Figura 4.29: Simplificação do comportamento da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações internas e externas espaçadas em 300 mm. ....	111
Figura 4.30: Simplificação do comportamento da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações internas e externas espaçadas em 150 mm. ....	111
Figura 4.31 - Deformada do modelo paramétrico com ligações aço-OSB espaçadas em 150 mm. ....	112
Figura 4.32 - Deformada do modelo paramétrico com ligações aço-OSB espaçadas em 300 mm. ....	113
Figura 4.33 - Influência do parâmetro espaçamento ligação aço-OSB. ....	113

Figura 4.34 - Deformada modelo paramétrico sem placas de OSB.....	115
Figura 4.35 - Influência da presença das placas de OSB. ....	115
Figura 4.36 - Influência da espessura das chapas de aço no fator de ductilidade das paredes de cisalhamento. ....	117
Figura 4.37 - Influência da espessura das chapas de aço na rigidez elástica das paredes de cisalhamento. ....	117
Figura 4.38 - Influência da espessura das placas de OSB no fator de ductilidade das paredes de cisalhamento. ....	118
Figura 4.39 - Influência da espessura das placas de OSB na rigidez elástica das paredes de cisalhamento. ....	118
Figura 4.40 - Influência do fechamento por placas de OSB no fator de ductilidade das paredes de cisalhamento. ....	119
Figura 4.41 - Influência do fechamento por placas de OSB na rigidez elástica das paredes de cisalhamento. ....	120
Figura 4.42 - Influência do espaçamento das ligações entre chapas de aço e placas de OSB no fator de ductilidade das paredes de cisalhamento.....	120
Figura 4.43 - Influência do espaçamento das ligações entre chapas de aço e placas de OSB na rigidez elástica das paredes de cisalhamento.....	121

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Designação e utilização dos perfis formados a frio.....	27
Tabela 1.2 - Pontas e cabeças dos parafusos auto-atarraxantes no sistema LSF.....	29
Tabela 1.3 - Indicações de aplicação dos parafusos auto-atarraxantes no sistema LSF.....	30
Tabela 2.1 - Valores nominais de cisalhamento para forças devidas ao vento para paredes de cisalhamento constituídas por perfis formados a frio.....	36
Tabela 2.2 - Valores nominais de cisalhamento para forças sísmicas para paredes de cisalhamento constituídas por perfis formados a frio.....	37
Tabela 2.3 - Valores nominais de cisalhamento para forças devidas ao vento para paredes de cisalhamento constituídas por perfis formados a frio. Fonte: adaptado de AISI, 2004.....	38
Tabela 2.4 - Valores nominais de cisalhamento para forças sísmicas para paredes de cisalhamento constituídas por perfis formados a frio. Fonte: adaptado de AISI, 2004.....	39
Tabela 2.5 - Fator de ajuste da resistência ao cisalhamento para paredes de cisalhamento tipo II. Fonte: adaptado de AISI, 2004. ....	39
Tabela 2.6 - Rigidez da mola usada nos modelos em elementos finitos. ....	52
Tabela 2.7 - Resumo dos resultados dos testes monotônicos.....	54
Tabela 2.8 - Resumo dos resultados dos testes cíclicos. ....	54
Tabela 2.9 - Recomendações básicas de parâmetros de resposta (por valores de parafuso). ....	55
Tabela 2.10 - Configuração dos ensaios experimentais. ....	56
Tabela 2.11 - Programa experimental em painéis LSF sujeitos a força lateral. Fonte: adaptada de Henriques <i>et al.</i> (2017). ....	58
Tabela 2.12 - Programa experimental em painéis LSF sujeitos a força lateral. Fonte: adaptada de Henriques <i>et al.</i> (2017). ....	59
Tabela 2.13 - Descrição dos modelos ensaiados. ....	62
Tabela 2.14 - Descrição dos modelos ensaiados. ....	62
Tabela 2.15 - Resultados experimentais.....	63
Tabela 2.16 - Modelos experimentais. ....	66
Tabela 3.1 - Resumo dos modelos numéricos implementados na presente pesquisa.....	77
Tabela 3.2 - Resumo dos detalhes geométricos dos modelos numéricos desenvolvidos neste estudo.....	79
Tabela 3.3 - Comportamento elastoplástico adotado para o aço. ....	79
Tabela 3.4 - Resumo dos resultados experimentais dos ensaios de caracterização do OSB. ....	80
Tabela 3.5 - Parâmetros de material OSB ortotrópico utilizados na simulação numérica. ....	82

Tabela 4.1 – Valores de força, deslocamento, fator de ductilidade e rigidez elástica para modelo numérico de validação e modelo experimental.....	96
Tabela 4.2 – Valores de força, deslocamento, fator de ductilidade e rigidez elástica para modelo com espessura da chapa de aço igual a 0,80 mm e modelo experimental com espessura igual a 0,95 mm. ....	103
Tabela 4.3 – Valores de força, deslocamento, fator de ductilidade e rigidez elástica para modelo com espessura da placa de OSB igual a 11,1 mm e modelo experimental com espessura igual a 9,5 mm. ....	107
Tabela 4.4 – Valores de força, deslocamento, fator de ductilidade e rigidez elástica para modelo o com fechamento duplo por OSB e modelo experimental com fechamento simples. ....	109
Tabela 4.5 – Valores de força, deslocamento, fator de ductilidade e rigidez elástica para modelos paramétricos do espaçamento das ligações entre aço e OSB. ....	114
Tabela 4.6 – Valores de força, deslocamento, fator de ductilidade e rigidez elástica para modelo sem placas de OSB e modelo experimental com fechamento por OSB.....	116



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI – *American Iron and Steel Institute*

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior

CPs – Corpos de Prova

DFS – Deslocamento de Fase Sequencial

ELU – Estado Limite Último

GI – Galvanizados por Imersão a quente

LSF – Light Steel Framing

MEF – Método dos Elementos Finitos

MFF – Método das Faixas Finitas

MLE – Método das Larguras Efetivas

MSE – Método da Seção Efetiva

PBSD – Performance Based Seismic Design

PFF – Perfis Formados a Frio

OSB – Oriented Strand Board

SLRF – Sistema Lateral de Resistência à Força

SRFS – Sistema de Resistência a Forças Sísmicas

U<sub>e</sub> – Perfis U enrijecidos

ZAR – Aço Zincado de Alta Resistência

## LISTA DE LETRAS ROMANAS

$A$  – Energia dissipada pela ligação

$b_w$  – Dimensão da alma do perfil de aço

$b_f$  – Dimensão da mesa do perfil de aço

$d_{montantes}$  – Distância entre montantes

$b_s$  – Dimensão do enrijecedor do perfil de aço

$e_{ext}$  – Espaçamento externo da ligação entre aço e OSB

$e_{int}$  – Espaçamento interno da ligação entre aço e OSB

$E$  – Módulo de Elasticidade Longitudinal

$E_1$  – Módulo de Elasticidade Longitudinal na direção do eixo principal

$E_2$  – Módulo de Elasticidade Longitudinal na direção do eixo secundário

$E_3$  – Módulo de Elasticidade Longitudinal na direção normal ao plano

$G$  – Módulo de elasticidade transversal

$G_{12}$  – Módulo de elasticidade transversal na direção 1-2

$G_{23}$  – Módulo de elasticidade transversal na direção 2-3

$G_{13}$  – Módulo de elasticidade transversal na direção 1-3

$h/w$  – Proporção entre altura da parede de cisalhamento e sua largura

$k_e$  – Rigidez elástica

$k_x$  – Coeficiente de translação da mola na direção x

$k_y$  – Coeficiente de translação da mola na direção y

$k_z$  – Coeficiente de translação da mola na direção z

$k_\phi$  – Coeficiente de rotação da mola

$L_i$  – Larguras da parede de cisalhamento

$P_{m,t}$  – Força máxima

$P_{y,t}$  – Força de escoamento

$P_{f,t}$  – Força de falha

$t_n$  – Espessura do perfil de aço

$t_{aço}$  – Espessura das chapas de aço

$t_{OSB}$  – Espessura das placas de OSB

## LISTA DE LETRAS GREGAS

$\alpha$  – Ângulo  $\alpha$  formado entre a fita e as guias do painel

$\Delta_{m,t}$  – Deslocamento referente à força máxima

$\Delta_{y,t}$  – Deslocamento referente à força de escoamento

$\Delta_{f,t}$  – Deslocamento referente à força de falha

$\varepsilon_{real\ plástica}$  – Deformação real plástica

$\mu$  – Fator de ductilidade de deslocamento

$\sigma_{real}$  – Tensão real

$\Sigma$  – Somatório

$\nu$  – Coeficiente de Poisson

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	21
1.1	Considerações Iniciais.....	21
1.2	Aspectos Gerais do Sistema Light Steel Framing .....	23
1.2.1	Concepção estrutural do sistema .....	24
1.2.2	Composição do sistema.....	26
1.2.3	Ligações do sistema LSF.....	28
1.3	Placas de OSB.....	31
1.3.1	Ensaio de caracterização.....	32
1.4	Objetivos.....	32
1.5	Justificativa .....	32
1.6	Metodologia.....	33
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	35
2.1	Desenvolvimento histórico .....	36
2.2	Perfis formados a frio .....	40
2.2.1	Desenvolvimento histórico do uso estrutural.....	40
2.2.2	Comportamento e flambagem .....	41
2.3	Paredes de cisalhamento .....	42
2.3.1	Comportamento sujeito a ações laterais.....	43
2.3.2	Modos de falha .....	47
2.4	Estudo experimental de Datchoua (2018).....	48
2.5	Estudo experimental de Vieira Junior (2011).....	51
2.6	Estudo experimental de Peterman e Schafer (2013).....	52
2.7	Modelos numéricos e experimentais em paredes de cisalhamento e seus componentes .....	55
2.7.1	Estudo de Niari <i>et al.</i> (2015).....	55
2.7.2	Estudo de Henriques <i>et al.</i> (2017).....	58
2.7.3	Estudo de Wang <i>et al.</i> (2019).....	62
2.7.4	Estudo de Karabulut e Soyoz (2017).....	65
2.7.5	Estudo de Leng <i>et al.</i> (2017).....	68
2.7.6	Estudo de Bian <i>et al.</i> (2015).....	69

2.7.7	Estudo de Attari <i>et al.</i> (2016).....	70
2.7.8	Estudo de Fiorino <i>et al.</i> (2018).....	71
2.7.9	Estudo de Hatami <i>et al.</i> (2014).....	73
3	MODELO NUMÉRICO .....	74
3.1	Geometria da modelagem .....	77
3.2	Propriedades dos materiais .....	79
3.3	Elementos finitos e discretização da malha .....	82
3.4	Conexões e modelagem dos Hold Downs .....	84
3.5	Condições de contorno e interações.....	87
3.6	Considerações sobre carregamento e tipo de análise.....	87
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	89
4.1	Modelo de conexão com dimensões reduzidas.....	89
4.2	Validação do modelo numérico principal .....	91
4.3	Estudo paramétrico .....	98
4.3.1	Influência da espessura da chapa de aço.....	99
4.3.2	Influência da espessura da placa de OSB .....	103
4.3.3	Influência da quantidade de placas de OSB.....	107
4.3.4	Influência do espaçamento entre ligações aço-OSB .....	109
4.3.5	Influência do revestimento em OSB .....	114
4.3.6	Influência dos parâmetros estudados no fator de ductilidade $\mu$ e na rigidez elástica $k_e$ .....	116
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	122
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

Cada vez mais, torna-se necessário o desenvolvimento sustentável no âmbito da construção civil. A procura por processos construtivos estruturais mais econômicos e que apresentem menor perturbação na perspectiva ambiental é crucial na construção civil. Sendo assim, o consumo racional de materiais é de extrema importância para a garantia da sustentabilidade da construção. Neste contexto, o *Light Steel Framing (LSF)*, sistema construtivo apresentado na Fig. 1.1, conquista espaço: pois é um sistema cuja concepção é feita de forma racional, permitindo mecanismo a seco, ou seja, sem utilização de água na composição estrutural, além da utilização de material 100% reciclável e incombustível, com desperdício e perda de material reduzidos, resultando em poucos resíduos de obra e menor consumo final de material.



Figura 1.1 - Residência no Sistema Construtivo LSF. Fonte: Full Estruturas, 2016.

O LSF é um sistema autoportante composto por painéis estruturados com reticulados de perfis de aço galvanizados formados a frio, que são obtidos a partir de bobinas de aço Zincado de Alta Resistência (ZAR), com resistência ao escoamento de no mínimo 230 MPa. As massas

superficiais mínimas de revestimentos são iguais a 150 g/m<sup>2</sup> (alumínio-zinco) e 275 g/m<sup>2</sup> (zinco) e as espessuras nominais dos perfis mais utilizados são 0,80; 0,95 e 1,25 mm.

No projeto das estruturas em LSF, uma das considerações relevantes se refere à rigidez lateral, para resistir às forças devidas à ação do vento ou forças de origem sísmica. Nesse aspecto, a parede de cisalhamento (*shear wall*) se configura como principal componente resistente a forças laterais e tem sido objeto de estudos atuais. Nos projetos, as placas utilizadas como revestimento da estrutura são tratadas apenas como elementos de vedação e sua contribuição no comportamento estrutural é desconsiderada, o que pode levar a projetos menos econômicos. Visando à confirmação dessa contribuição, o desempenho lateral das paredes com revestimento tem sido avaliado na literatura, usando três métodos: relações empíricas provenientes de resultados experimentais; derivações matemáticas simplificadas e a modelagem de elementos finitos.

Segundo Sharafi *et al.* (2018), a estrutura que constitui a parede de cisalhamento do LSF se deforma em cisalhamento sob forças laterais, enquanto as placas de revestimento tendem a girar. Dessa forma, demandas diferenciais são criadas em todos os pontos de fixação, desenvolvendo assim um mecanismo para resistir a forças laterais.

Ao longo das últimas décadas, diversas pesquisas têm demonstrado que as placas usadas para revestimento no LSF apresentam influência significativa no comportamento da estrutura. Essas placas aumentam a rigidez das paredes e, conseqüentemente, ajudam a limitar os deslocamentos da estrutura sujeita a ações laterais.

Baldassino *et al.* (2014) avaliaram a contribuição das placas cimentícias na rigidez das paredes de cisalhamento do LSF, por meio de estudo experimental. Henriques *et al.* (2017) realizaram estudo análogo, porém com fechamento com placas de OSB (*Oriented Strand Board*) por meio de testes experimentais em larga escala e análises numéricas. Niari *et al.* (2015) estudaram o desempenho sísmico estrutural de parede de cisalhamento do LSF com revestimento em aço, mediante testes experimentais. Buonopane *et al.* (2015) analisaram o comportamento não linear que ocorre na interface entre o material de revestimento e cada conector nas paredes de cisalhamento, por meio de ensaios experimentais.

Apesar de inúmeras pesquisas realizadas, incertezas ainda perduram sobre o tema, principalmente devido à complexidade do comportamento dos painéis em escala real. Vários fatores como propriedades dos diversos materiais que podem ser usados para revestimento, aberturas nos painéis e detalhes construtivos contribuem para um comportamento complexo do sistema. Sendo assim, ainda não há uma definição de parâmetros necessários para uma

especificação completa ou relevante e tampouco códigos normativos. Assim, os projetistas ainda desconsideram as placas de fechamento como elemento de contraventamento do sistema.

## 1.2 Aspectos Gerais do Sistema Light Steel Framing

A norma ABNT NBR 15253:2014 dita as propriedades geométricas e as respectivas aplicações dos perfis de séries comerciais para o sistema LSF e a ABNT NBR 14762:2010 especifica os procedimentos para dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio.

De acordo com Rosa *et al.* (2017), o LSF tem sido reconhecido como um sistema construtivo sustentável, que tem alcançado popularidade. As principais vantagens da construção em LSF são:

- a) Maior eficiência construtiva, devido à necessidade de menos etapas construtivas;
- b) utilização de materiais recicláveis sem perder as suas propriedades;
- c) baixo peso;
- d) construção rápida com um aumento de produção a baixos custos;
- e) redução dos recursos necessários para a construção, menor desperdício;
- f) controle de produção/qualidade em fábrica provinda da utilização de materiais industrializados.

No entanto, os perfis que compõem o sistema estrutural estão suscetíveis a alguns inconvenientes:

- a) suscetibilidade a fenômenos de flambagem;
- b) esmagamento da alma dos perfis devido a cargas concentradas;
- c) maiores deformações por torção.



### 1.2.1 Concepção estrutural do sistema

O LSF deve ser dimensionado para resistir a esforços diversos, inclusive quando submetidos a ações laterais. De acordo com Faherty e Williamson (1997), o painel de barlavento recebe a força lateral e transfere os esforços para a laje, que tem a função de diafragma horizontal. O diafragma, em seguida, recebe estes esforços e os distribui para os painéis de cisalhamento denominados internacionalmente de *Shear Wall* (Fig. 1.2). Como as ligações dos montantes às guias não garantem ao painel de cisalhamento rigidez suficiente para esforços horizontais no seu plano, torna-se necessário o emprego de algum dispositivo para garantia da estabilidade global, que pode ser de dois tipos: contraventamentos ou o efeito diafragma rígido obtido pelos materiais de fechamento. Os contraventamentos podem estar dispostos em treliças verticais de perfis  $U_e$  (Fig. 1.3), ou fitas metálicas galvanizadas dispostas em “X” (Fig.1.4), “K”, “ $\Lambda$ ” e “V”. No painel de cisalhamento, a guia superior recebe as forças e as distribuem para as placas e os montantes através dos parafusos auto atarraxantes. Em seguida, a guia inferior recebe essas forças e as descarrega na fundação através dos chumbadores de ancoragem. A resultante de forças laterais bem como as condições de contorno estão apresentadas na Fig. 1.5.

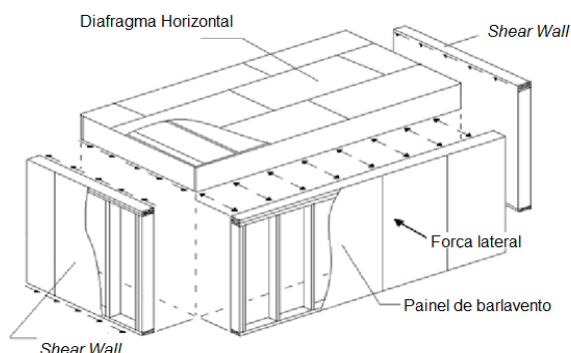


Figura 1.2 - Sistema de distribuição de força lateral. Fonte: Faherty e Williamson, 1997.



Figura 1.3 - Painel com contraventamento em treliça vertical.

Fonte: Nakamura, 2019.

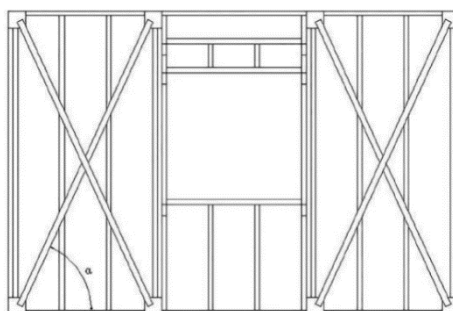


Figura 1.4 - Painel com contraventamento em X.

Fonte: Rodrigues *et al.*, 2016.

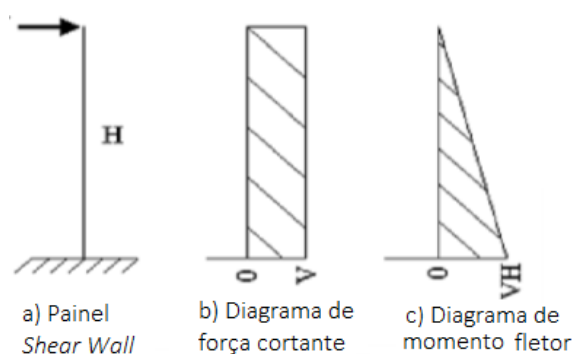


Figura 1.5 - Resultante das forças laterais e condições de contorno.

Fonte: Bredel, 2003.

Um dos aspectos construtivos importantes nos contraventamentos é o ângulo  $\alpha$ , presente na Fig. 1.4, formado entre a fita de aço utilizada como contraventamento e as guias do painel. Segundo Rodrigues *et al.* (2016), quando este ângulo é pequeno, tanto a tração na fita como a reação de

ancoragem são pequenas e tendem a diminuir ainda mais à medida que  $\alpha$  se aproxima de  $0^\circ$ . Portanto, para ângulos muito pequenos (menores que  $30^\circ$ ) a fita perde sua capacidade de evitar as deformações no painel, objetivo para o qual foi projetada. À medida que o ângulo aumenta, aumentam também a tração na fita e a reação de ancoragem do painel no piso. Portanto, são necessárias fitas de ancoragens com seções maiores para resistir às forças axiais de tração a que serão submetidas. Deste modo, o ângulo  $\alpha$  de inclinação das fitas diagonais deve estar compreendido entre  $30^\circ$  e  $60^\circ$ .

Os painéis de cisalhamentos são geralmente ancorados à fundação através de um dispositivo chamado de *hold-down* (Fig. 1.6). O dispositivo oferece a capacidade de fornecer maior resistência ao movimento de tombamento do sistema. É instalado nas extremidades de cada painel e fixado ao montante com os parafusos auto atarraxantes e na guia inferior com o chumbador apropriado.

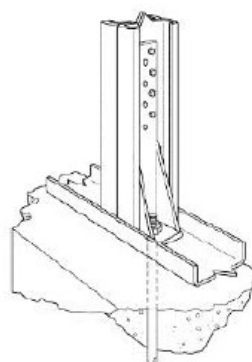


Figura 1.6 - Dispositivo *hold-down*.

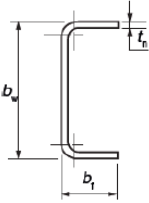
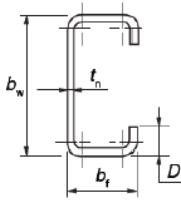
Fonte: Bredel, 2003.

### 1.2.2 Composição do sistema

As seções em perfis formados a frio mais utilizadas nas construções em LSF estão apresentadas na Tab. 1.1 e são constituídas por: seções “U” para uso em guia, ripa, bloqueador, sanefa e terça; “U” enrijecido para bloqueador, enrijecedor de alma, montante, verga, viga e terça; seções do tipo cartola usadas em ripas de telhados; e cantoneira utilizada para fazer conexões. As Figs. 1.7 e 1.8 apresentam a composição de um painel estrutural com abertura e sem abertura, respectivamente, e a Fig. 1.9 os perfis que compõem a estrutura de entrepiso do LSF.

Tabela 1.1 - Designação e utilização dos perfis formados a frio.

Fonte: adaptado de ABNT NBR 15253:2014.

Seção Transversal	Série Designação NBR 6355:2012	Utilização
	<p>U simples U <math>b_w \times b_f \times t_n</math></p>	<p>Guia; Ripa; Bloqueador; Sanefa; Terça</p>
	<p>U enrijecido U<sub>e</sub> <math>b_w \times b_f \times D (b_s)</math> x <math>t_n</math></p>	<p>Bloqueador; Enrijecedor de alma; Montante; Verga; Viga; Terça; Guia enrijecida (sistema com encaixes estampados)</p>

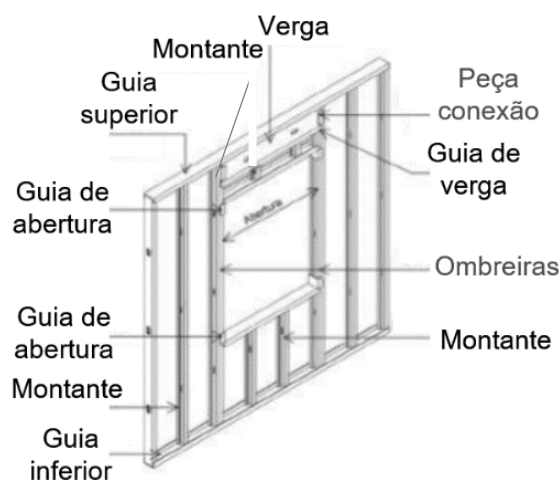


Figura 1.7 - Componentes de um painel estrutural com abertura.

Fonte: adaptado de Rodrigues *et al.*, 2016.

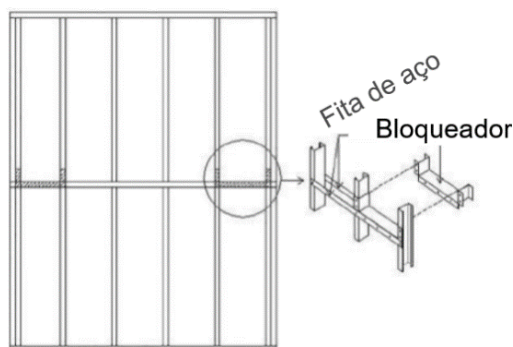


Figura 1.8 - Componentes de um painel estrutural sem abertura.

Fonte: adaptado de Rodrigues *et al.*, 2016.

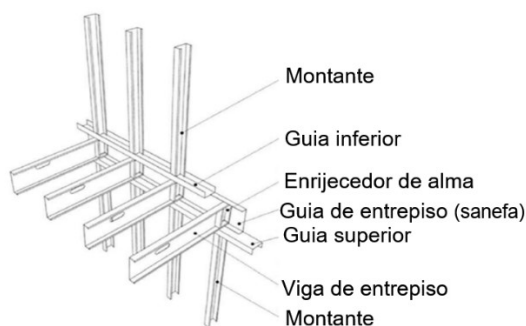


Figura 1.9 - Componentes de um painel de entrepiso em *Light Steel Framing*.






Fonte: adaptado de ABNT NBR 15253, 2014.

### 1.2.3 Ligações do sistema LSF

A fixação mais utilizada no sistema LSF se dá por meio de parafusos denominados de auto-atarraxantes e auto-brocantes, fabricados com diversos tipos de cabeça e ponta, conforme necessidade de instalação. As cabeças podem ser dos tipos lenticilha, sextavada, panela ou trombeta, sendo as pontas dos tipos broca ou agulha (Tab. 1.2). Podem ser estruturais ou ter apenas função de montagem. O processo de fixação é simples e é apresentado na Fig. 1.10 abaixo, retirada de Rodrigues *et al.* (2016). A ABNT NBR 14762:2010 apresenta em seu item 10.5 as prescrições para o dimensionamento das ligações com os parafusos auto-atarraxantes, tendo como base a norma americana AISI S100-2007.

Tabela 1.2 - Pontas e cabeças dos parafusos auto-atarraxantes no sistema LSF.

Fonte: adaptado de Rodrigues, 2016.

Parafusos auto-atarraxantes	
Tipo de cabeça	Representação
Cabeça lentilha	
Cabeça sextavada	
Cabeça trombeta	
Tipo de ponta	Representação
Ponta broca	
Ponta agulha	

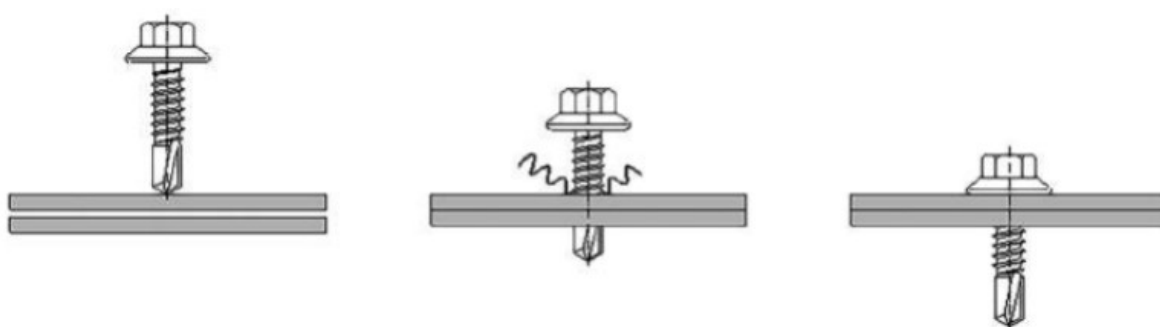


Figura 1.10 - Processo de fixação dos parafusos auto-atarraxantes.

Fonte: Rodrigues *et al.* (2016).

Segundo Rodrigues *et al.* (2016), os parafusos com pontas tipo S12 ou TRAXX e cabeça do tipo sextavada HEX, tipo oval ou tipo plana (LATH) são os mais utilizados para a função estrutural. A Tab. 1.3 apresenta indicações de aplicação dos parafusos auto-atarraxantes estruturais no sistema LSF, no que se refere à forma de sua cabeça.

Tabela 1.3 - Indicações de aplicação dos parafusos auto-atarraxantes no sistema LSF.

Fonte: adaptado de Rodrigues, 2016.

Ligação no sistema LSF	Tipo de cabeça
Guia-montante	Plana
Montante-montante	Sextavada HEX
Cantoneira-montante	Sextavada HEX
Cantoneira-verga	Sextavada HEX
Verga-montante	Sextavada HEX
Travamento da viga	Sextavada HEX
Contraventamento-guia	Plana ou oval
Contraventamento-montante	Plana ou oval
Placa de fechamento-aço	Trombeta

Quanto aos modos de falha observados nas ligações do sistema submetidas à tração e cisalhamento, cita-se o *pull-out* e o *pull-over*. O *pull-out* é definido pelo arrancamento do parafuso, ocorrendo desvinculação da base fixada. Já o *pull-over* é caracterizado pelo puncionamento da placa, ou seja, um elemento se desvincula da fixação soltando-se do conjunto. Utilizando-se como exemplificação a ligação entre reticulado metálico e placa de OSB, o *pull-out* ocorre quando a placa de OSB se desvincula junto com o parafuso, e o *pull-over* quando ocorre puncionamento da placa de OSB. A representação dos modos de falha citados estão presentes na Fig. 1.11.

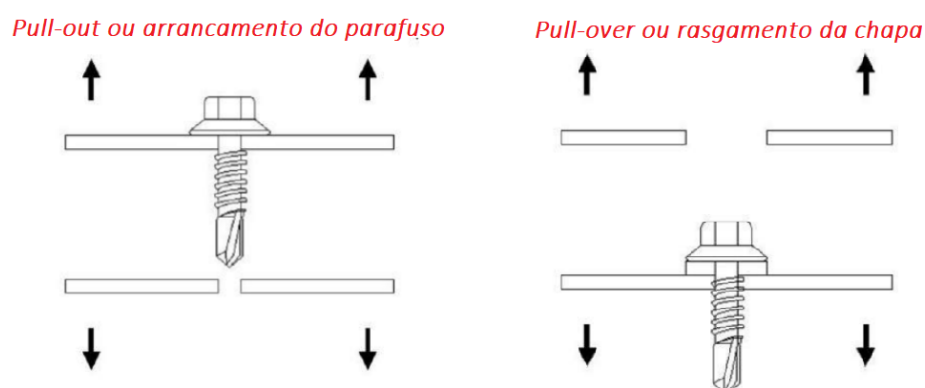


Figura 1.11 - Modos de falha dos parafusos auto-atarraxantes.

Fonte: adaptado de Rodrigues *et al.* (2016).

### 1.3 Placas de OSB

O material denominado internacionalmente de *Oriented Strand Board* (OSB) surgiu no Canadá, na região dos grandes lagos, conhecida pela abundância de Aspen (*populus.pps*) e pinus.

Conforme a Revista da Madeira (2006), a placa de OSB foi concebida originalmente para atender ao segmento de construção seca, desenvolvido no final dos anos 70, funcionando muito bem no contraventamento das estruturas de aço ou de madeira (*steel frame* e *wood frame*). A grande propagação no mercado mundial aconteceu apenas na década de 90. O setor da construção civil observou o potencial do produto, a ótima qualidade e o preço, inferior ao do compensado. Em virtude do menor custo, devido ao processo produtivo, muitas empresas que produziam compensado começaram a fabricar OSB. O aumento de demanda pelo produto resultou na instalação das primeiras plantas industriais fora do eixo Canadá e Estados Unidos, entre os anos de 1996 e 1997. Em 2000, a primeira fábrica brasileira foi instalada em Ponta Grossa (PR) e assim, a produção nacional iniciou-se em janeiro de 2002.

No Brasil, as placas de OSB são produzidas a partir de tiras de pinus, madeira de reflorestamento. São constituídas de partículas de madeira tipo “*strand*” (partículas longas, largas e finas) com a incorporação de resina a prova d’água e parafina, orientadas numa direção durante o processo de deposição e consolidadas por meio de prensagem à quente. Segundo Cichinelli (2005), nas camadas externas, as partículas estão dispostas longitudinalmente em relação ao comprimento da chapa, enquanto que nas camadas internas estão dispostas perpendicularmente ao comprimento no caso de quatro chapas, e nas duas direções no caso de três camadas.

Conforme Cloutier (1998), a geometria das partículas “*strand*”, a sua orientação e formação em três camadas ou quatro camadas, como mostra a Fig. 1.12, conferem às chapas OSB grande resistência mecânica (apud Setubal (2009)).

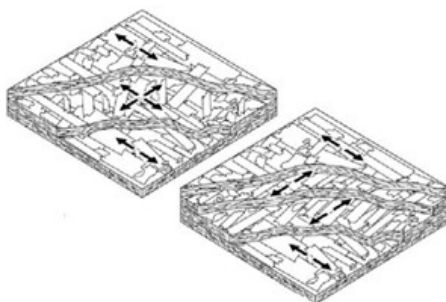


Figura 1.12 - Posicionamento das lâminas de acordo com a orientação das partículas de OSB.

Fonte: Setubal, (2009).



### 1.3.1 Ensaio de caracterização

A norma americana ASTM D3043-00 (2011) determina os procedimentos de ensaios para o conhecimento das propriedades de flexão das placas de OSB, por meio de quatro testes experimentais: Método A – *Center-Point Flexure Test*, Método B – *Two-Point Flexure Test*, Método C – *Pure Moment Test* e Método D – *Flexure Test for Quality Assurance*. A escolha do método a se utilizar depende do objetivo para o qual o teste será realizado, do tipo de material e disponibilidade de equipamento.

A norma americana ASTM D2719-13 (2019) determina os procedimentos de ensaios para o conhecimento das propriedades de cisalhamento através da espessura de painéis estruturais associados à distorção de cisalhamento, incluindo as placas de OSB. Três métodos de ensaio são descritos na norma e se diferem em sua aplicação: Método A – *Small Panel Shear Test*, Método B – *Large Panel Shear Test*, Método C – *Two-Rail Shear Test*.

## 1.4 Objetivos

Neste contexto, o presente trabalho objetiva investigar de forma aprofundada o desempenho das paredes de cisalhamento do sistema LSF, avaliando especificadamente a contribuição das placas de fechamento de OSB na rigidez lateral ao cisalhamento dos painéis, por meio de análises numéricas no software ABAQUS (2014).

## 1.5 Justificativa

Devido às inúmeras vantagens do LSF, o uso desse sistema vem crescendo no Brasil, tornando necessária a ampliação das pesquisas neste campo. Um dos aspectos relevantes de estudos nesta área é acerca da capacidade de as placas de fechamento, especialmente de OSB, contribuírem na resistência aos esforços laterais. A confirmação desta capacidade, por meio de formulações, metodologias de dimensionamento e normas nacionais e estrangeiras, poderá promover a substituição dos contraventamentos usuais em aço no sistema LSF, pelas próprias placas de OSB, que inicialmente oferecem somente função de fechamento aos painéis. Essa substituição representará uma inovação tecnológica para a construção civil e acarretará em custos mais baixos de construção, redução do consumo de aço na produção de edificações e maior incentivo ao uso do sistema industrializado LSF. Deste modo, também poderá contribuir para a diminuição do déficit habitacional no Brasil.

Sendo assim, observa-se a necessidade de uma metodologia que permita avaliar e estudar a resistência lateral das paredes de cisalhamento e, finalmente, confirmar e quantificar a contribuição no aumento da rigidez lateral proporcionada pelas placas de OSB. Os resultados obtidos nesta pesquisa poderão também ser úteis na criação ou revisão de normas de especificação e determinação de parâmetros de ensaios de paredes de cisalhamento, assunto ainda não tratado no escopo das normas nacionais.

## 1.6 Metodologia

O presente estudo concentra-se na resposta das paredes de cisalhamento submetidas à ação lateral. A fim de apresentar um modelo de elemento finito preciso e de alta confiabilidade, foi feita validação numérica por meio de um estudo experimental recente de Faria (2023). Dados experimentais determinados por Datchoua (2018), acerca dos comportamentos não lineares das ligações presentes entre as placas de OSB e perfis de aço, são usados nas conexões. Esses comportamentos não lineares das ligações representam o mecanismo de falha governante do sistema que forma as paredes de cisalhamento. A Fig. 1.2 ilustra uma visão geral das etapas da pesquisa realizada. Para alcançar os objetivos apresentados, as seguintes etapas foram cumpridas:

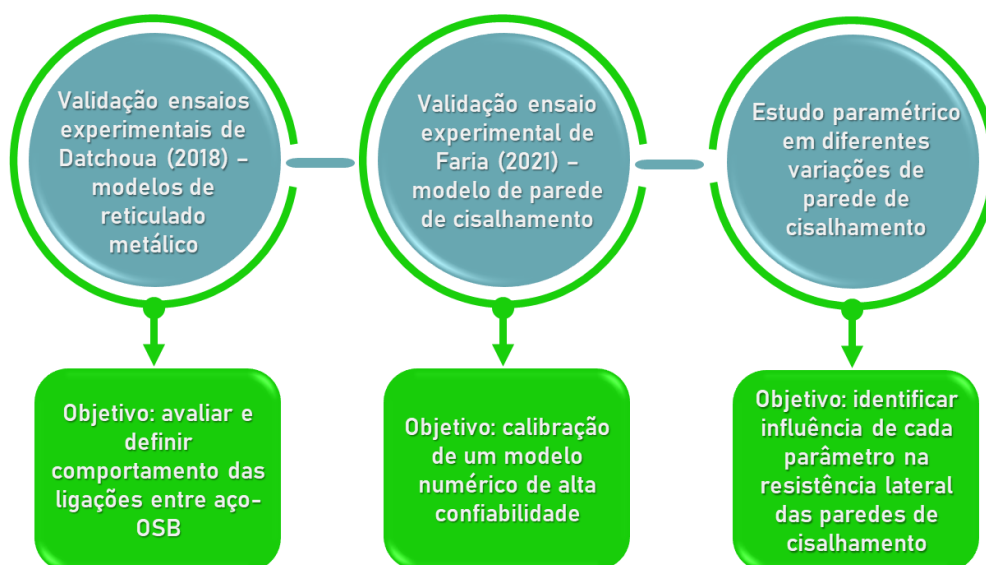


Figura 1.13 - Visão geral da pesquisa.

Primeiramente, foi realizado um estudo acerca das ligações que governam os deslocamentos da estrutura: as ligações entre os perfis de aço e as placas de OSB. Para tanto, resultados dos modelos experimentais em dimensões reduzidas de Datchoua (2018) foram utilizados para

análise do comportamento não linear dessas ligações. Dois corpos de prova (CPs) foram modelados numericamente no *software* ABAQUS (2014) e posteriormente validados com os resultados experimentais do autor. Dessa forma, foram definidas as curvas de força *versus* deslocamento a serem utilizadas nas ligações no modelo completo (escala 1:1) da parede de cisalhamento ensaiado por Faria (2023).

De posse do comportamento das ligações, foi realizada a modelagem numérica da parede completa e sua validação experimental baseada nos ensaios de Faria (2023). Assim, foi possível realizar estudo paramétrico avaliando-se os seguintes parâmetros: espessura das chapas de aço, espessura das placas de OSB, fechamento duplo por placa de OSB e ausência do fechamento por placa de OSB e espaçamento dos parafusos de ligação entre chapas de aço e placas de OSB. Por fim, todos os parâmetros tiveram suas influências estudadas e os respectivos resultados comparados entre si, para a discussão acerca da contribuição das placas de OSB no aumento da rigidez lateral das paredes de cisalhamento.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A origem do modelo construtivo usado no sistema LSF iniciou-se no início do século XIX, no território americano. A conquista da área e a migração, ocasionaram em um rápido crescimento populacional. Para suprir as necessidades habitacionais da crescente população, foi necessário buscar métodos produtivos, acessíveis e rápidos, utilizando materiais disponíveis em abundância na região: a madeira. Dessa forma, surgiu então o sistema *Wood Frame*.

Após a Segunda Guerra Mundial, o desenvolvimento da indústria de aço nos Estados Unidos, conduziu a substituição da madeira utilizada na construção pelas estruturas de aço, mais leves e resistentes a adversidades climáticas, originando o sistema *Steel Frame*. Também nessa época, as primeiras construções em *Steel Frame* surgiam no Japão e posteriormente na Inglaterra, Austrália e Canadá. No Brasil, o sistema surgiu apenas nos anos 90 e ainda passa por aceitação no mercado, apresentando até então, muito espaço para se expandir.

Os perfis formados a frio (PFF) têm sido cada vez mais empregados na construção civil, visto seu ótimo aproveitamento no aspecto econômico, à grande variedade das formas de seção transversal, menor peso e agilidade na sua fabricação e execução das estruturas. Por outro lado, esses perfis apresentam paredes finas e, portanto, são suscetíveis a fenômenos de flambagem, como flambagem local, flambagem por distorção e flambagem global por flexão, por torção ou por flexo-torção, ou a interação entre esses modos, o que pode reduzir gradativamente sua rigidez.

Devido ao baixo peso obtido na construção e aos altos índices de esbeltez dos perfis empregados, os painéis de LSF apresentam limitada capacidade de resistência à força lateral o que é um dos principais obstáculos ao uso desse sistema em construções mais altas. Para alcançar a rigidez lateral adequada e estabilidade global, é necessário que haja contraventamentos em algumas paredes que compõem o sistema, as chamadas paredes de cisalhamento ou *shear walls*. O contraventamento é usualmente realizado por perfis U enrijecidos (Ue) ou fitas metálicas. Os revestimentos do sistema por placas de OSB ou placas cimentícias, que exercem função de fechamento, fornecem também maior rigidez lateral aos painéis, devido à considerável resistência mecânica dos materiais constituintes.

Segundo Sharafi *et al.* (2018), avanços recentes na compreensão do comportamento lateral do sistema LSF e pesquisas em andamento relacionadas à resistência à força lateral são bastante

promissores para impulsionar a utilização do sistema e garantir seu uso em estruturas mais complexas, robustas e mais altas.

Para uma análise geral e precisa acerca da resistência ao cisalhamento lateral das paredes de cisalhamento, *softwares* baseados em Método dos Elementos Finitos (MEF) são orientados. A modelagem numérica assegura precisão de resultados e permite reproduzir um comportamento da estrutura, próximo do real, a partir de modelos numéricos devidamente validados e calibrados e validados.

## 2.1 Desenvolvimento histórico

As primeiras disposições de projeto para resistência lateral de paredes constituídas por estruturas de aço formadas a frio foram apresentadas pela primeira vez no código de construção *Uniform Building Code* de 1997, no capítulo 22, divisão número 8, intitulada de “Resistência lateral para sistemas de parede de aço”. O código especifica os requisitos para painéis de cisalhamento usados para resistir a forças laterais produzidas por vento ou terremoto.

As Tabs. 2.1 e 2.2, retiradas do código, especificam valores nominais de cisalhamento usados para estabelecer o valor de cisalhamento permitido em projeto para o caso de forças laterais devidas ao vento e forças sísmicas, respectivamente.

Tabela 2.1 - Valores nominais de cisalhamento para forças devidas ao vento para paredes de cisalhamento constituídas por perfis formados a frio.

Fonte: adaptado de Uniform Building Code, 1997.

Descrição da montagem	Espaçamento entre os meios de fixação				Espaçamento dos montantes de aço
	152,4 mm	101,6 mm	76,2 mm	50,8 mm	
	Valores nominais de cisalhamento para forças devidas ao vento para paredes de cisalhamento				
Revestimento de 11,91 mm (Painel de madeira compensada) de um lado	18,78 x 10 <sup>9</sup> Nmm	-	-	-	609,6 mm
Revestimento nominal de 11,11 mm (OSB) de um lado	10,01 x 10 <sup>9</sup> Nmm	20,59 Nmm	25,33 Nmm	27,89 Nmm	609,6 mm

Tabela 2.2 - Valores nominais de cisalhamento para forças sísmicas para paredes de cisalhamento constituídas por perfis formados a frio.

Fonte: adaptado de Uniform Building Code, 1997.

Descrição da montagem	Espaçamento entre os meios de fixação				Espaçamento dos montantes de aço
	152,4 mm	101,6 mm	76,2 mm	50,8 mm	
	Valores nominais de cisalhamento para forças sísmicas para paredes de cisalhamento				
Revestimento de 11,91 mm (Painel de madeira compensada) de um lado	11,388 Nmm	14,454 Nmm	21,39 Nmm	23,73 Nmm	609,6 mm
Revestimento nominal de 11,11 mm (OSB) de um lado	10,220 Nmm	13,359 Nmm	18,62 Nmm	23,73 Nmm	609,6 mm

O código também dita as especificações para os meios de fixação. Os fixadores ao longo das bordas dos painéis de cisalhamento devem ser colocados a uma distância mínima de 9,5 mm das bordas dos painéis e os parafusos devem ter comprimento suficiente para garantir a penetração no perfil de aço por pelo menos dois filetes de rosca de diâmetro completo após ultrapassar a chapa base.

Quanto aos revestimentos, observa-se que o código de construção *Uniform Building Code* (1997) já dispõe informação acerca da utilização do subsistema de reticulado de aço revestido com placas estruturais de madeira para resistir a forças horizontais do vento ou forças sísmicas. Neste caso, as forças de cisalhamento permitidas podem ser calculadas pelos princípios da mecânica, usando os valores de cisalhamento do painel estrutural com madeira especificados no código.

Após extensas pesquisas, testes e análises, ocorreu uma progressão substancial nas disposições de projeto para resistência lateral de estruturas com paredes constituídas por PFF. A evolução se reflete na norma americana AISI de 2004 (*American Iron and Steel Institute Standard for Cold-Formed Steel Framing - Lateral Design*). A norma prevê a utilização de revestimento em chapa de aço, placa estrutural de madeira e placa de gesso e diferencia dois tipos de parede de cisalhamento, especificando requisitos para cada uma delas:

- a) Parede de cisalhamento tipo I: parede projetada para resistir a forças laterais no plano totalmente revestida, e à qual só é permitido ter aberturas se houver detalhamento da

transferência de força em torno destas. A ancoragem é necessária em cada extremidade do segmento da parede;

- b) Parede de cisalhamento tipo II: parede projetada para resistir a forças laterais no plano revestida com placas estruturais de madeira ou chapa de aço que contenham aberturas, não projetadas e não detalhadas especificamente para transferência de força. A ancoragem é necessária apenas nas extremidades da parede.

Observa-se nas Tabs. 2.3 e 2.4 os valores nominais de cisalhamento usados para estabelecer o valor de cisalhamento permitido em projeto para parede de cisalhamento tipo I, para o caso de forças laterais devidas ao vento e forças sísmicas, respectivamente. Comparando com as Tabs. 2.1 e 2.2, é possível perceber a incorporação de valores nominais para outras descrições de montagem na norma. Para parede do tipo II, o valor nominal deve ser igual ao valor previsto nas Tabs. 2.3 ou 2.4, multiplicados pela soma das larguras ( $\Sigma L_i$ ) e pelos fatores de ajustes presentes na Tab. 2.5, que leva em consideração taxa de abertura, altura das paredes e a porcentagem de revestimento sobre a altura total.

Tabela 2.3 - Valores nominais de cisalhamento para forças devidas ao vento para paredes de cisalhamento constituídas por perfis formados a frio. Fonte: adaptado de AISI, 2004.

Descrição da montagem	Espaçamento entre os parafusos de fixação nas bordas dos painéis				Proporção máxima $\frac{h}{w}$
	152,4 mm	101,6 mm	76,2 mm	50,8 mm	
Revestimento de 11,91 mm (Madeira compensada) de um lado	1065	-	-	-	2:1
Revestimento nominal de 11,11 mm (OSB) de um lado	910	1410	1735	1910	2:1
Revestimento em chapa de aço de 0,457 mm de um lado	485	-	-	-	2:1
Revestimento em chapa de aço de 0,686 mm de um lado	-	1000	1085	1170	2:1

**Nota:**  $\frac{h}{w}$  se refere à proporção entre a altura da parede de cisalhamento e sua largura

Tabela 2.4 - Valores nominais de cisalhamento para forças sísmicas para paredes de cisalhamento constituídas por perfis formados a frio. Fonte: adaptado de AISI, 2004.

Descrição da montagem	Designação da espessura do montante e guia (mm)	Proporção máxima $\frac{h}{w}$	Espaçamento dos parafusos de fixação nas bordas dos painéis			
			152,4 mm	101,6 mm	76,2 mm	50,8 mm
Revestimento de 11,91 mm (Madeira compensada) de um lado	1,09 ou 1,37	2:1	890	1330	1775	2190
Revestimento nominal de 11,11 mm (OSB) de um lado	1,37	2:1	940	1410	1760	2350
	1,73	2:1	1232	1848	2310	3080
Revestimento em chapa de aço de 0,457 mm de um lado	0,84	2:1	390	-	-	-
Revestimento em chapa de aço de 0,686 mm de um lado	0,84	4:1	-	1000	1085	1170

**Nota:**  $\frac{h}{w}$  se refere à proporção entre a altura da parede de cisalhamento e sua largura

Tabela 2.5 - Fator de ajuste da resistência ao cisalhamento para paredes de cisalhamento tipo II. Fonte: adaptado de AISI, 2004.

Altura da parede (h)	Relação de altura de abertura máxima e altura				
	h/3	h/2	2h/3	5h/6	h
2440 mm	810 mm	1220 mm	1630 mm	2030 mm	2440 mm
3050 mm	1020 mm	1530 mm	2030 mm	2540 mm	3050 mm
Porcentagem de revestimento de altura total	Fator de ajuste de resistência ao cisalhamento				
10	1,00	0,69	0,53	0,43	0,36
20	1,00	0,71	0,56	0,45	0,38
30	1,00	0,74	0,59	0,49	0,42
40	1,00	0,77	0,63	0,53	0,45
50	1,00	0,80	0,67	0,57	0,50
60	1,00	0,83	0,71	0,63	0,56
70	1,00	0,87	0,77	0,69	0,63
80	1,00	0,91	0,83	0,77	0,71
90	1,00	0,95	0,91	0,87	0,83
100	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00



Atualmente, existem diversas normas que tratam do projeto à resistência lateral de paredes constituídas por PFF, citam-se: AISI-S213 (2007), AISI-S110 (2012), AISI-S202 (2015), AISI-S240 (2015), AISI-S400 (2015), AISI-S310 (2016), AISI-S100 (2016), AISI-S917 (2017) e AISI-S918 (2017), conforme mencionam Sharafi *et al.* (2018) menciona. Os conceitos mais recentes presentes nessas normas serão discutidos nos próximos capítulos. Apesar do avanço acerca do estudo da resistência lateral das paredes de cisalhamento, ainda não existe no escopo das normas nacionais e estrangeiras uma definição de parâmetros necessários para a especificação completa ou relevante acerca da contribuição das placas de fechamento em OSB nas paredes de cisalhamento.

## **2.2 Perfis formados a frio**

### **2.2.1 Desenvolvimento histórico do uso estrutural**

Historicamente, a ideia de que a chapa de aço poderia ser usada para fabricar PFF aplicáveis à construção de edifícios já existe há algum tempo. Don Allen (2006) resume a adoção e aplicação desses perfis no final do século XIX e na primeira metade do século XX. Seu uso começou nos Estados Unidos e Inglaterra, por volta do ano de 1850, porém amplamente experimental e limitado a algumas estruturas básicas. Nos anos de 1920 e 1930, a aceitação do perfil de aço formado a frio como material de construção ainda era limitada, pois não havia um padrão de projeto adequado e nenhuma informação sobre o uso do material nos códigos de construção. Após a Segunda Guerra Mundial, a era moderna foi impulsionada pela abundância da capacidade de produção de chapa de aço. As siderúrgicas nos Estados Unidos, por meio do *American Iron and Steel Institute* (AISI), investiram em pesquisas conduzidas na Universidade Cornell por George Winter para criar formalmente uma especificação para perfis estruturais de aço formados a frio. Esse esforço culminou na especificação AISI de 1946 para o projeto de perfis estruturais leves de aço (AISI 1946), que foi posteriormente adotada pelos códigos de construção. Por meio de suas várias alterações, tornou-se hoje o padrão governante para os PFF, o AISI S100-12.

Conforme Madsen *et al.* (2016) citam no Instituto Nacional de Normas e Tecnologia dos EUA, Winter passou por vários desafios quando iniciou o desenvolvimento das especificações de projeto para os PFF, dentre eles o desejo de usar chapas de aço e manter o material o mais fino possível. Esse desejo refletia as conveniências de produção e fabricação e os objetivos gerais

de economia e eficiência. No entanto, o comportamento das chapas finas usadas para formar os perfis era diferente das formas clássicas de perfis de aço laminados a quente. Embora as chapas finas se deformassem e se dobrassem localmente sob ação de forças, elas também eram capazes de suportar uma força pós-flambagem substancial devido a tensões transversais de membrana que se desenvolviam à medida que as placas se deformavam. O fenômeno de flambagem local e a capacidade pós-flambagem exigiram novas reflexões, juntamente com uma nova abordagem de projeto e experimentos para validá-las. Winter desenvolveu um método semi-empírico que forneceu um meio de prever a força resistente de barras individuais de PFF: o Método da Largura Efetiva (MLE). Esse método é atualmente utilizado na norma AISI S100-16, porém complementado por métodos que utilizam a capacidade computacional moderna. No tempo presente, o uso estrutural dos PFF é abordado na norma AISI S240-15 e os PFF em Sistema de Resistência à Força Sísmica (SRFS) na norma AISI S400-15. Esses padrões fornecem orientações diretas ao engenheiro sobre como usar a norma AISI S100-16 para o dimensionamento de estruturas em PFF e o complementam, quando apropriado. Assim, todos esses padrões permanecem dependentes da norma AISI S100-16.

## 2.2.2 Comportamento e flambagem

As pequenas espessuras dos elementos dos PFF's estão relacionadas ao processo de fabricação, que são obtidos por dobramento, em prensa dobradeira, de tiras cortadas de chapas ou bobinas; ou por conformação contínua em conjunto de matrizes rotativas, a partir de bobinas laminadas a frio ou a quente, sendo ambas as operações realizadas com o aço em temperatura ambiente. Segundo Rodrigues *et al.* (2016), a conformação a frio das chapas finas altera as propriedades mecânicas do aço, provocando uma elevação na resistência ao escoamento e redução da ductilidade do material, de forma concentrada nas regiões vizinhas aos cantos dobrados ou distribuídos ao longo dos elementos que constituem a seção transversal do perfil.

Retornando aos fenômenos de estabilidade, os elementos esbeltos podem flambar em níveis de tensões menores que aquele correspondente à resistência ao escoamento do material, quando sujeitos a esforços. Ao serem submetidos à compressão, por exemplo, os elementos que constituem a seção transversal ficam susceptíveis à flambagem local e flambagem distorcional. Além disso, as barras ficam susceptíveis aos modos globais, conforme apresentado na Fig. 2.1, que apresenta um gráfico relacionando o comprimento de um perfil U enrijecido e sua carga crítica. Nota-se que o primeiro ramo do gráfico é referente a flambagem local, o segundo

ramo corresponde ao modo distorcional, e por fim o terceiro ramo corresponde a flambagem global por flexão ou por flexo-torção.

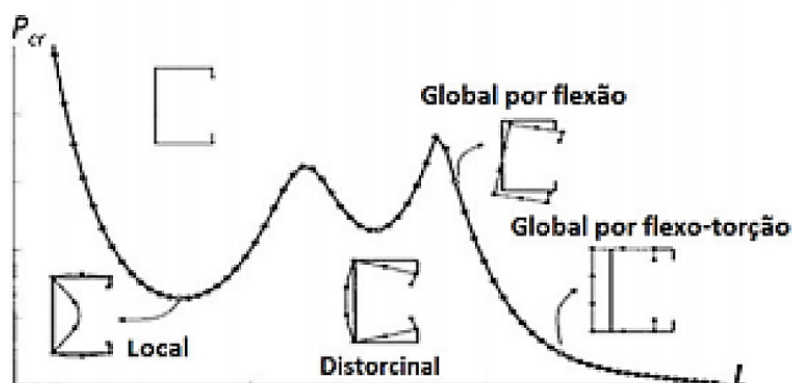


Figura 2.1 – Modos de flambagem local, distorcional e global. Fonte: Garcia (2016).

A flambagem local é caracterizada pela formação de sucessivas meias ondas senoidais de comprimentos iguais e a permanência dos ângulos nas arestas da seção. Ademais, pode haver a ocorrência do modo misto, que representa a interação da flambagem local e/ou distorcional com um dos modos globais.

Ainda de acordo com Rodrigues *et al.* (2016), a ocorrência da flambagem local acarreta redução gradativa da rigidez axial e de flexão. No entanto, ao atingir a flambagem local, o perfil não irá necessariamente entrar em colapso. Isto é, os elementos esbeltos apresentam comportamento pós-crítico estável antes da ocorrência do colapso, o que indica uma reserva de força resistente e que conduz a valores de força última superiores à força axial de flambagem local elástica. O estudo do comportamento pós-crítico estável é tratado por meio do Método da Largura Efetiva (MLE) ou do Método da Seção Efetiva (MSE). Segundo a ABNT NBR 14762 (2010), o Método da Seção Efetiva (MSE) permite a determinação da carga axial de compressão de flambagem local, assim como o momento fletor que provoca flambagem local de um perfil de aço, utilizando as propriedades geométricas efetivas da seção transversal da barra.

O estudo do comportamento pós crítico também pode ser analisado utilizando-se métodos computacionais como Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método das Faixas Finitas (MFF).

### 2.3 Parede de cisalhamento

O sistema estrutural de um edifício deve ser projetado para resistir a dois tipos de forças, de gravidade e forças laterais, que resultam da ação do vento e das forças sísmicas. Cada um

desses tipos de forças exige considerações diferentes no dimensionamento. As gravitacionais normalmente determinam as dimensões dos componentes estruturais, como vigas e colunas. Para absorver as forças laterais às quais uma estrutura é submetida, componentes resistivos devem ser incorporados à estrutura em conjunto com o sistema projetado para suportar as forças verticais. Tradicionalmente, três dos sistemas de resistência a força lateral são usados no projeto estrutural de um edifício, sendo eles:

- a) estruturas resistentes ao momento fletor e de torção,
- b) contraventamentos e
- c) paredes de cisalhamento

Na engenharia estrutural, parede de cisalhamento (*shear wall*) é um subsistema estrutural vertical cuja função é resistir às forças laterais ou sísmicas e fornecer resistência e rigidez adequadas para controlar os deslocamentos laterais.

Madsen *et al.* (2016) definem Sistema de Resistência à Força Lateral (SRFL) e Sistema de Resistência a Forças Sísmicas (SRFS). O primeiro termo representa os elementos estruturais e as conexões necessárias para resistir ao tombamento, devido às forças do vento, forças sísmicas ou outras forças predominantemente horizontais, ou combinações das mesmas. Já SRFS caracteriza a parte da estrutura que foi selecionada no projeto para fornecer dissipação de energia e a resistência necessária às forças sísmicas prescritas, como por exemplo as paredes de cisalhamento.

### 2.3.1 Comportamento sujeito a ações laterais

Segundo Madsen *et al.* (2016), a esbeltez de um elemento em aço formado a frio dificulta o fornecimento de rigidez significativa nos pontos de conexão. O resultado é que os subsistemas laterais para estruturas constituídas por PFF's seguem mais das tradições encontradas na construção em madeira do que na construção em perfis de aço laminado a quente.

Como ilustrado na Fig. 2.2, um painel de estrutura em aço sem fechamento tem pouca ou nenhuma resistência lateral. Dois subsistemas comumente utilizados para aumentar a resistência às forças laterais são paredes contraventadas e painéis revestidos. As paredes contraventadas empregam fita de aço na diagonal conectada em uma ou em ambas as faces do painel de parede e resistem à força lateral principalmente por ação de treliça (esforço axial de tração), conforme ilustrado na Fig. 2.2 (b). Os subsistemas de painéis revestidos incluem

estruturas de perfis de aço formados a frio revestidas com placas estruturais de madeira (Fig. 2.2-c), placas de gesso e chapas de aço. Sob forças laterais, a estrutura se deforma em cisalhamento enquanto o revestimento gira, o que cria demandas diferenciais em todos os locais de fixação, desenvolvendo assim o mecanismo primário de resistência às forças laterais, fator que desperta a contribuição estrutural de tais placas de fechamento.

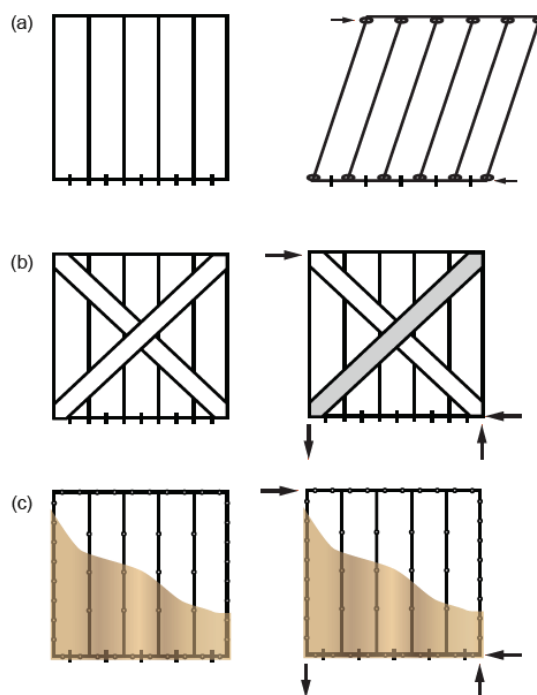


Figura 2.2 - Painéis de aço moldados a frio: (a) painel puro com pouca ou nenhuma resistência lateral, (b) painel com contraventamento e (c) painel revestido com resistência lateral desenvolvida nos locais de fixação painel. Fonte: Madsen *et al.* (2016).

Como menciona Vieira Junior (2011), George Winter em 1947, juntamente com seus alunos e colegas, formalizaram pioneiramente, o ganho da capacidade resistente em montantes de PFF's devido a sua ligação com placas de fechamento. O método de projeto é baseado em uma rigidez mínima entre perfis e placa de revestimento, determinada experimentalmente, e incorporado a um modelo simples de flambagem por flexão de um montante, como mostrado na Fig. 2.3 (VIEIRA JUNIOR, 2011).

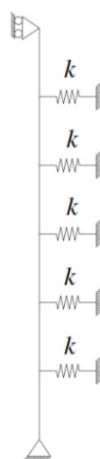


Figura 2.3 - Modelo esquemático com contraventamento do montante pela placa de fechamento. Fonte: adaptada de Vieira Junior (2011).

Tal abordagem é conhecida como método de Winter, ou o Método Local. Basicamente, consiste em assegurar que a rigidez das ligações e seu respectivo espaçamento consigam impedir a ocorrência da flambagem em torno do eixo de menor inércia, garantindo assim sua ocorrência em torno do eixo de maior inércia, devido ao contraventamento provido pela placa de fechamento. Como mencionado por Vieira Junior (2011) o método é limitado, pois abrange apenas ligações com revestimento conectado em ambos os lados e com o mesmo material de fechamento em ambos os lados. Além disso, os requisitos do método, mesmo que racionais, incluem verificações arbitrárias, como considerar o comprimento da flambagem igual ao dobro do espaçamento dos parafusos e se aplicam apenas à flambagem por flexão.

Atualmente, o comportamento lateral das paredes de cisalhamento é comumente representado por seu comportamento histerético obtido por testes experimentais. Normalmente, as paredes são testadas sob condições semelhantes às mostradas na Fig. 2.4, referente aos testes realizados por Liu *et al.* (2012). Os testes monotônicos (*pushover*) e cíclicos são conduzidos, normalmente de acordo com a ASTM E564 (2006) e ASTM E2126 (2011), respectivamente. O protocolo de carregamento cíclico evoluiu desde o final dos anos 90, quando os testes em paredes de cisalhamento com PFF's foram conduzidos primeiramente com o protocolo de Deslocamento de Fase Sequencial (DFS). A maioria dos testes agora segue o protocolo de carregamento CUREE (MADSEN *et al.*, 2016).

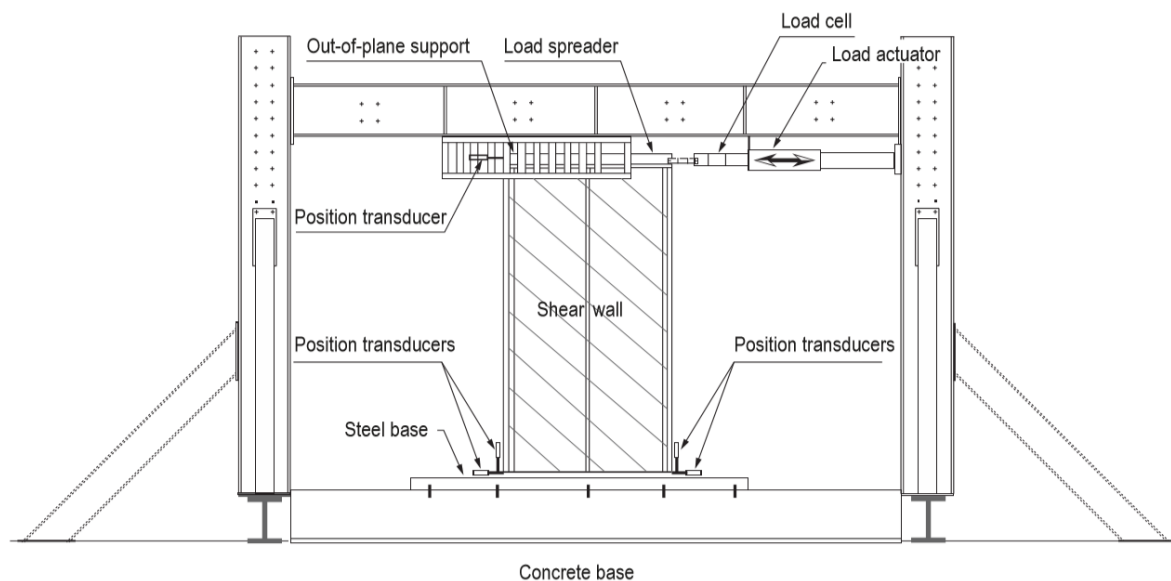


Figura 2.4 - Exemplo de equipamento de teste de parede de cisalhamento.

Fonte: adaptada de Liu *et al.* (2012).

Embora o comportamento das paredes de cisalhamento com diferentes tipos de fechamento e contraventamento seja bastante diferente, a resposta global de cisalhamento compartilha certas semelhanças. A Fig. 2.5 fornece resposta histerética típica para testes em paredes de cisalhamento com fechamentos em OSB, contraventada e com fechamento em chapa de aço, respectivamente. Para as paredes de cisalhamento com placas de OSB, o dano causado durante o teste é principalmente devido à folga deixada quando os parafusos giram de volta para o lado oposto quando se dá a reversão da força. Para a parede de cisalhamento com fechamento em chapa de aço, quando carregada em uma direção, um campo de tensão se forma na chapa, mas quando a parede é submetida à carregamento na direção oposta, uma deformação de compressão se forma no mesmo local. Finalmente, as paredes com contraventamento são muito semelhantes às paredes de cisalhamento de chapa de aço, mas com apenas um único campo de tensão.

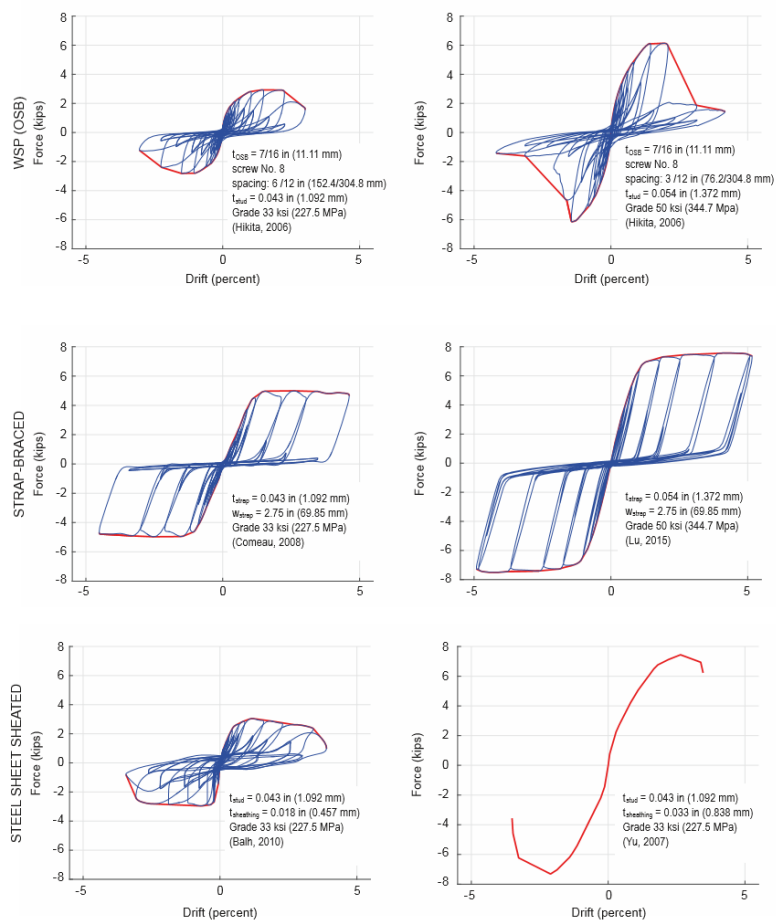


Figura 2.5 - Exemplo de resposta histerética registrada em testes típicos de parede de cisalhamento cíclico para: paredes com fechamento em OSB; contraventada; com fechamento em chapa de aço. Fonte: Madsen *al.* (2016).

### 2.3.2 Modos de falha

A falha de uma parede de cisalhamento sujeita a força lateral no plano ocorre quando o painel não possui resistência adicional para suportar às forças aplicadas. Conforme Xu *et al.* (2006), o modo de ruptura predominante está associado à falha das placas de revestimento. A falha é frequentemente iniciada nas conexões do revestimento, que é evidente devido à ruptura destas conexões e, em alguns casos, separação do revestimento e da estrutura em aço.

No caso de pequenas espessuras dos perfis de aço (por exemplo menores que 0,84 mm), a falha da parede de cisalhamento pode ser iniciada pela falha dos próprios perfis, mesmo que estes estejam contraventados pelo revestimento. A falha dos perfis também pode ocorrer quando o revestimento é aplicado em ambos os lados ou ao se dobrar a espessura do revestimento, o que aumenta a resistência lateral do painel, e consequentemente amplifica a força de compressão



nos perfis. Este aumento pode resultar em falha dos perfis por compressão, antes da falha do revestimento. Em resumo, a falha do revestimento é identificada pela falha associada às conexões entre o revestimento e a estrutura, e a falha dos perfis de aço é detectada quando a força axial aplicada às paredes de cisalhamento excede a resistência à compressão do perfil de aço.

#### 2.4 Estudo experimental de Datchoua (2018)

Datchoua (2018) realizou estudo experimental acerca do comportamento das ligações das placas de OSB aos perfis metálicos do sistema construtivo LSF. O estudo da interface perfil de aço e placa tem importância fundamental, pois é nesta região que atuam forças de cisalhamento, que são transmitidas, pelos parafusos de fixação, do reticulado metálico para as placas de vedação. Os parafusos de fixação são responsáveis por garantir a ação conjunta entre esses dois importantes componentes do subsistema de parede.

Para tanto, o autor realizou ensaios em 71 corpos de prova, por meio do método conhecido por “*Push-Test*”. Os corpos de prova foram confeccionados, considerando-se o reticulado do sistema LSF com placa de revestimento em OSB como parte integrante da estrutura. O autor estabeleceu 3 corpos de prova (CPs) para compor cada série, variando-se a posição do montante e o modo de aplicação do carregamento para a definição dos três tipos de modelos, conforme observa-se nas Figs. 2.6 a 2.8. As séries eram dependentes da espessura da placa de OSB, da espessura da chapa de aço do perfil e do espaçamento axial entre os parafusos. Os parâmetros utilizados foram:

- a) As placas dos corpos de prova foram retiradas de placas de OSB com as dimensões nominais de 9,5 mm e 11,1 mm de espessura, 1.200 mm de largura e 2.400 mm de comprimento;
- b) Os perfis foram formados a frio com seção  $U_e$ , com as dimensões nominais de  $b_w$  igual a 140 mm (largura da alma), de  $b_f$  igual a 40 mm (mesas) e de  $b_s$  igual a 10 mm (enrijecedores de borda);
- c) As bobinas (com espessuras nominais  $t_n$  iguais a 0,80 mm e 0,95 mm) utilizadas para a fabricação dos perfis foram galvanizadas por imersão a quente (GI), totalizando uma massa de revestimento com zinco de 110 g/m<sup>2</sup>. O processo de GI compreende na imersão do material em uma solução de zinco em temperatura extremamente elevada, o que garante proteção contra insalubridade.
- d) O aço utilizado apresenta resistência ao escoamento do aço no mínimo igual a 230 Mpa;

- e) Espaçamentos axiais entre os parafusos empregados na produção dos modelos são de 150 mm e 300 mm.

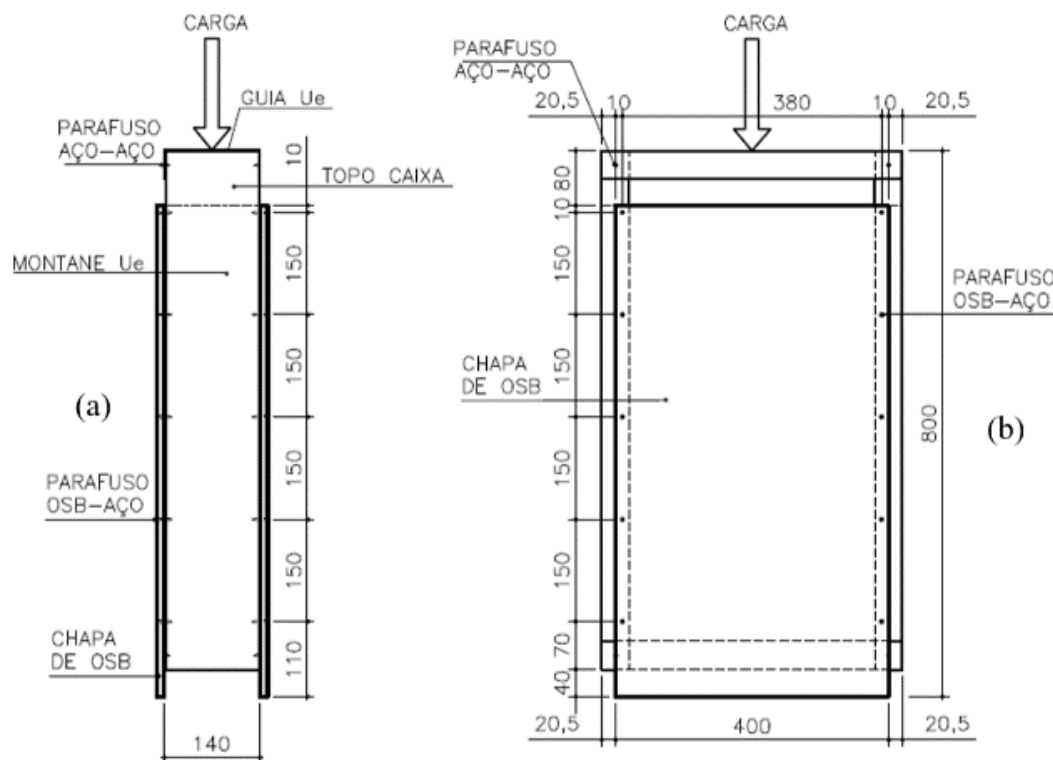


Figura 2.6 - Modelo M1 com espaçamento axial de 150 mm entre os parafusos: a) vista lateral e b) vista frontal.

Fonte: Datchoua (2018).

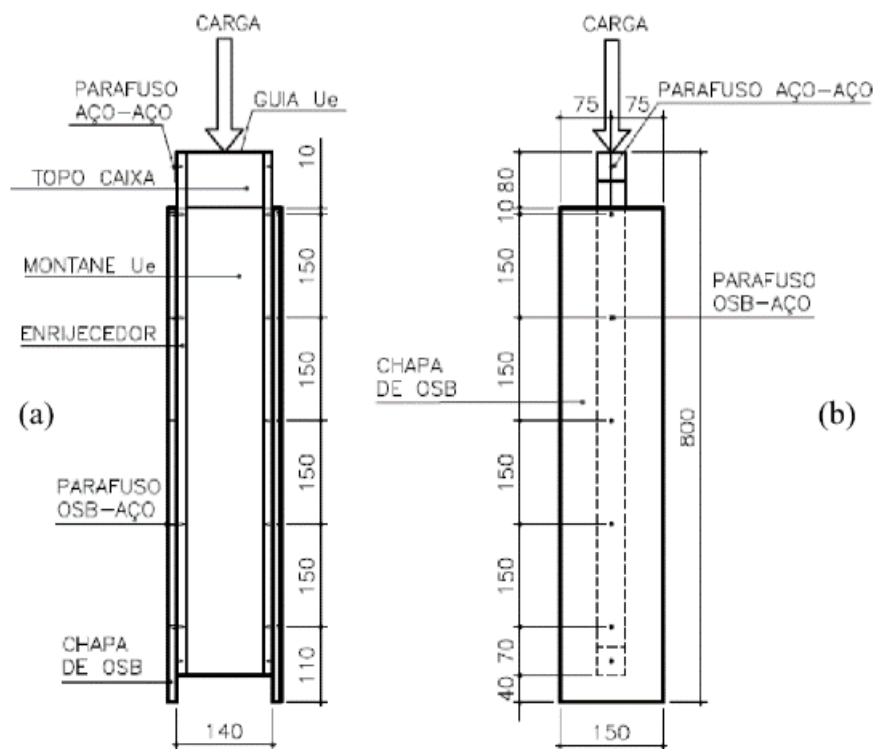


Figura 2.7 - Modelo M2 com espaçamento axial de 150 mm entre os parafusos: a) vista lateral e b) vista frontal.

Fonte: Datchoua (2018).

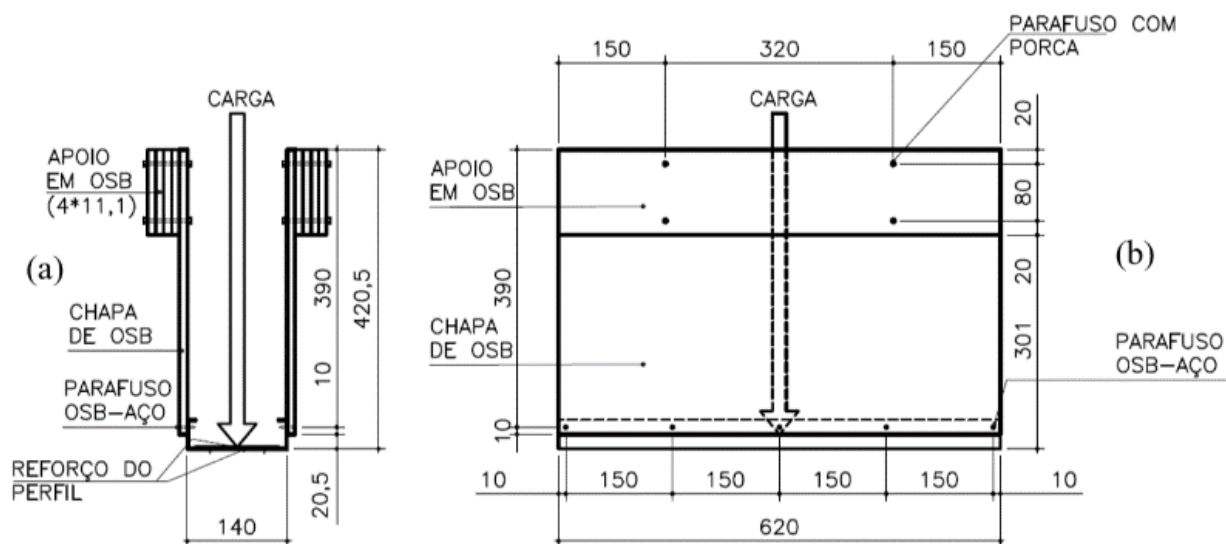


Figura 2.8 - Modelo M3 com espaçamento axial de 150 mm entre os parafusos: a) vista lateral e b) vista frontal. Fonte: Datchoua (2018).

As placas de OSB usadas para a fabricação dos modelos M1 (com 720 mm de comprimento e 400 mm de largura) e M2 (com 720 mm de comprimento e 150 mm de largura) foram extraídas

com seus respectivos comprimentos paralelos ao comprimento de 2.400 mm das placas originais de OSB. A força foi aplicada aos modelos de forma paralela às tiras superficiais das placas de OSB e aos montantes de aço.

O objetivo dos ensaios dos modelos M1 e do modelo M2 foi o de verificar o comportamento das ligações nas bordas da placa de OSB e da ligação na parte central desta, respectivamente, ambas sob carregamento longitudinal – ao longo dessas ligações.

As placas de OSB usadas para produzir o modelo M3 (com 620 mm de comprimento e 400 mm de largura) foram extraídas com seu comprimento paralelo ao comprimento de 2.400 mm das chapas originais de OSB. A força foi aplicada a esse modelo de forma perpendicular às tiras superficiais das placas de OSB e ao montante de aço.

O objetivo dos ensaios do modelo M3 foi o de verificar o comportamento das ligações localizadas na borda da placa de OSB sob carregamento transversal a essa ligação.

Datchoua (2018) determinou os valores por ligação da rigidez inicial ( $k_e$ ), da energia dissipada (A) e da ductilidade ( $\mu$ ), de cada CP, considerando os valores médios dos deslocamentos relativos obtidos em cada DT (transdutor de deslocamento); determinou também a força em cada parafuso e o respectivo gráfico força *versus* deslocamento da ligação. Ele observou que, na ligação, esses valores são diretamente influenciados pela espessura das placas de OSB e pelo espaçamento axial entre os parafusos ao longo do montante.

Os valores de rigidez das ligações encontrados pelo autor são de extrema importância para a realização de análise numérica de paredes do sistema LSF em escala real, pois permitem simular numericamente o comportamento real das ligações.

## **2.5 Estudo experimental de Vieira Junior (2011)**

Vieira Junior (2011) produziu estudo sobre o comportamento de paredes de perfis formados a frio confinados pelas placas de fechamento sujeitos à compressão, por meio de ensaios em escala real sem fechamento, com fechamento em placa de gesso, e com fechamento em placa OSB. Além disso, o autor também apresenta em sua pesquisa um estudo experimental sobre o comportamento das ligações entre as placas de fechamento e os perfis metálicos, por meio de ensaios realizados em pilares curtos.

Em continuidade aos testes experimentais, o autor realizou estudos numéricos e propôs a utilização de coeficientes de mola para a representação real das ligações e contenções laterais dos perfis no conjunto com as placas. A Fig. 2.9 apresenta as direções das molas no ponto da conexão entre os elementos e a Tab. 2.6 os valores de rigidez da mola adotados.

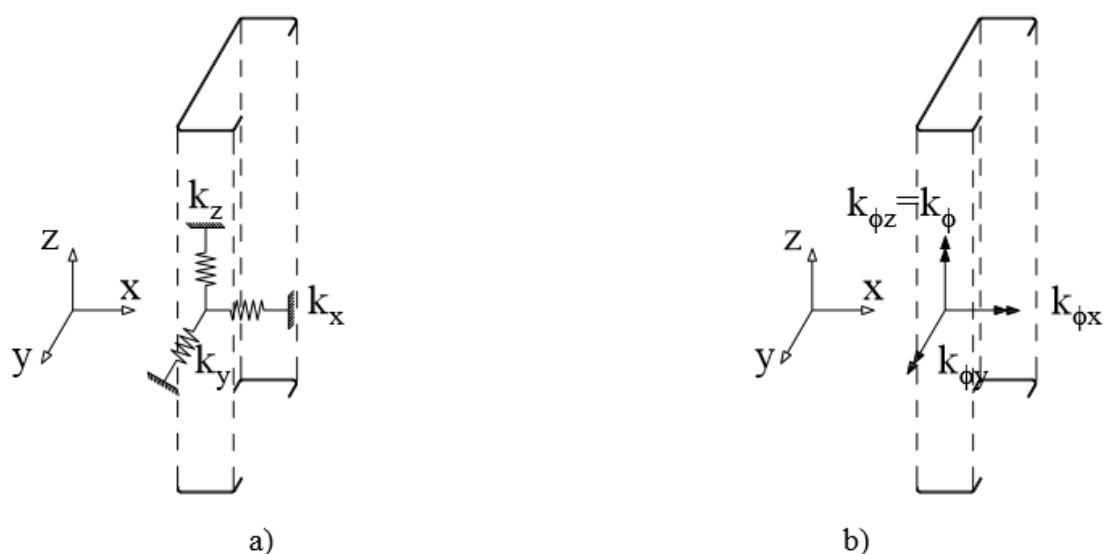


Figura 2.9 - Orientação das molas a) Molas de translação, b) Molas de rotação.

Fonte: Vieira Junior (2011).

Tabela 2.6 - Rigidez da mola usada nos modelos em elementos finitos.

Fonte: adaptado de Vieira Junior, 2011.

Material de revestimento	Mola	Com revestimento, molas idealizam ligações	Sem revestimento, molas idealizam ligações e revestimento
OSB	$k_x = k_x$ (N/mm)	1241,000	971,000
	$k_y$ (N/mm)	N/A	0,374
	$k_\phi = k_{\phi x}$ (Nmm/rad)	136660,000	95309,000

## 2.6 Estudo experimental de Peterman e Schafer (2013)

Peterman e Schafer (2013) realizaram trabalho como um complemento aos esforços norte-americanos para avançar no projeto sísmico baseado em desempenho das estruturas constituídas por PFF's. Para tanto, realizaram uma série de ensaios experimentais com o objetivo de caracterizar o comportamento das ligações entre perfil formado a frio e o revestimento do sistema LSF, quando sujeitos a forças laterais no plano. As conexões fornecem o principal comportamento de dissipação de energia nas paredes de cisalhamento revestidas com madeira e também oferecem suporte para os parafusos sob forças gravitacionais e fora do plano. Os tipos de revestimento (OSB e gesso), o espaçamento dos parafusos, a espessura do

aço e o tipo de parafuso foram variados para determinar o desempenho da conexão. O papel dominante do tipo de revestimento e da espessura dos parafusos é destacado nos resultados. Os resultados típicos de força *versus* deslocamento para duas amostras nominalmente idênticas sob força monotônica são fornecidos na Fig. 2.9. A rigidez inicial do sistema ( $k$ ) é determinada pela rigidez secante referente a  $0,4P_{max}$ , conforme ilustrado na Fig. 2.10.

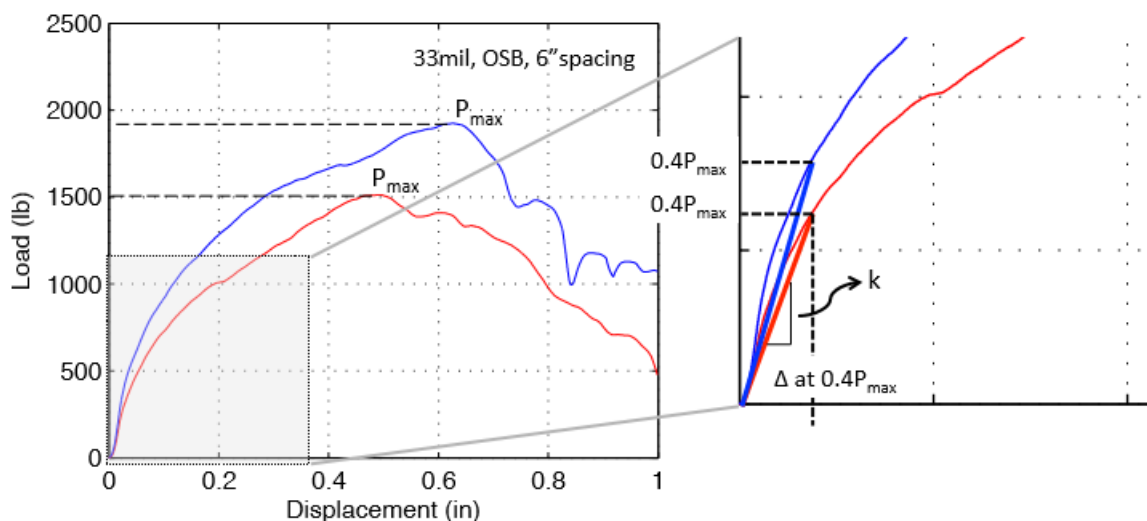


Figura 2.10 - Gráfico Força *versus* Deslocamento do procedimento para determinar a rigidez inicial do sistema para um teste monotônico de duas amostras nominalmente idênticas.

Fonte: Peterman e Schafer (2013).

Os principais resultados dos testes monotônicos e cíclicos realizados são fornecidos na Tab. 2.7 e 2.8, respectivamente. A espessura do aço não apenas afeta a resistência ao cisalhamento e a rigidez, mas também o modo de falha, variando de resposta altamente dúctil a cisalhamento do parafuso. O tipo de revestimento afeta de maneira semelhante o modo de falha: o *pull-through*, o qual se trata da ruptura da placa naquele local após a flexão do parafuso é dominante para o OSB, enquanto a inclinação dos parafusos sob grandes deformações é dominante para o gesso. Os autores fornecem parâmetros recomendados para resistência, rigidez e ductilidade, na Tab. 2.9. Os valores recomendados são incentivados para uso em modelos não lineares de paredes de cisalhamento construídas a partir de resultados básicos de ligações não lineares.

Tabela 2.7 - Resumo dos resultados dos testes monotônicos.

Fonte: Peterman e Schafer (2013).

sheathing	steel thickness	fastener spacing	peak load $P_{max}$ kips	stiffness $K$ kips/in.	disp. at peak $\Delta_{max}$ in.	ref. disp. $\Delta_m$ in.	single fastener values			Test Name
							$P_{max-i}$ kips	$\Delta_{max-i}$ in.	$k_i$ kips/in.	
OSB	33	6	1.51	8.48	0.50	0.74	0.38	0.25	4.24	m33o6-1
		6	1.93	10.90	0.63	0.73	0.48	0.31	5.45	m33o6-2
		12	1.78	10.00	0.54	0.75	0.45	0.27	5.00	m33o12-1
		12	1.86	9.39	0.73	0.90	0.47	0.37	4.70	m33o12-2
	54	6	1.77	19.64	0.48	0.60	0.44	0.24	9.82	m54o6-1
		6	2.06	15.20	0.59	0.71	0.51	0.29	7.60	m54o6-2
		12	2.25	18.94	0.59	0.70	0.56	0.29	9.47	m54o12-1
		12	1.72	15.87	0.49	0.61	0.43	0.24	7.94	m54o12-2
	97	6	1.41	23.90	0.18	0.30	0.35	0.09	11.95	m97o6-1
		6	1.43	22.71	0.14	0.25	0.36	0.07	11.36	m97o6-2
		12	1.64	19.40	0.22	0.29	0.41	0.11	9.70	m97o12-1
		12	1.34	20.67	0.26	0.31	0.33	0.13	10.34	m97o12-2
Gypsum	33	6	0.49	6.56	0.60	0.78	0.12	0.30	3.28	m33g6-1
		6	0.44	6.50	0.48	0.73	0.11	0.24	3.25	m33g6-2
		12	0.43	6.22	0.63	0.75	0.11	0.32	3.11	m33g12-1
		12	0.48	8.45	0.64	0.88	0.12	0.32	4.23	m33g12-2
	54	6	0.55	6.92	0.53	0.73	0.14	0.26	3.46	m54g6-1
		6	0.49	4.69	0.69	0.74	0.12	0.34	2.35	m54g6-2
		12	0.47	8.37	0.54	0.62	0.12	0.27	4.19	m54g12-1
		12	0.48	8.07	0.30	0.62	0.12	0.15	4.04	m54g12-2
	97	6	0.40	6.55	0.10	0.20	0.10	0.05	3.28	m97g6-1
		6	0.50	9.86	0.56	0.73	0.12	0.28	4.93	m97g6-2
		12	0.46	11.92	0.18	0.40	0.11	0.09	5.96	m97g12-1
		12	0.40	5.26	0.47	0.59	0.10	0.24	2.63	m97g12-2

Tabela 2.8 - Resumo dos resultados dos testes cíclicos.

Fonte: Peterman e Schafer (2013).

sheathing	steel thickness	fastener spacing	initial stiffness $K_o$ kips/in.	max + load		max - load		average max load		average max disp		Test name
				$P_+$ kips	$P_-$ kips	$\Delta_+$ in.	$\Delta_-$ in.	$P_{ave}$ kips	$\Delta_{ave}$ in.			
OSB	33	6	16.45	1.390	-1.564	0.429	-0.420	1.477	0.419	c33o6_1		
		6	19.82	1.587	-1.537	0.426	-0.419	1.562	0.406	c33o6_2		
		12	13.02	1.170	-1.245	0.337	-0.480	1.197	0.390	c33o12_1		
		12	18.56	1.459	-1.589	0.480	-0.482	1.524	0.471	c33o12_2		
	54	6	23.28	1.489	-1.779	0.384	-0.484	1.634	0.376	c54o6_1		
		6	27.45	1.827	-1.882	0.553	-0.558	1.854	0.526	c54o6_2		
		12	23.95	1.819	-1.794	0.435	-0.441	1.807	0.438	c54o12_1		
		12	22.95	1.687	-1.757	0.440	-0.435	1.709	0.432	c54o12_2		
	97	6	41.95	1.467	-1.512	0.158	-0.240	1.489	0.193	c97o6_1		
		6	39.52	1.709	-1.684	0.114	-0.160	1.697	0.111	c97o6_2		
		12	40.68	1.832	-1.882	0.113	-0.160	1.857	0.131	c97o12_1		
		12	41.45	1.902	-1.782	0.161	-0.159	1.832	0.130	c97o12_2		
Gypsum	33	6	6.85	0.370	-0.385	0.309	-0.304	0.377	0.303	c33g6_1		
		6	5.55	0.390	-0.320	0.444	-0.308	0.355	0.294	c33g6_2		
		12	9.84	0.435	-0.370	0.445	-0.681	0.402	0.496	c33g12_1		
		12	7.83	0.365	-0.440	0.321	-0.454	0.402	0.298	c33g12_2		
	54	6	12.04	0.515	-0.510	0.963	-1.274	0.512	0.921	c54g6_1		
		6	6.12	0.483	-0.567	0.736	-1.286	0.525	0.914	c54g6_2		
		12	15.28	0.512	-0.467	0.427	-1.028	0.477	0.458	c54g12_1		
		12	14.53	0.380	-0.500	0.436	-0.891	0.440	0.357	c54g12_2		
	97	6	18.80	0.560	-0.465	0.373	-0.772	0.502	0.410	c97g6_1		
		6	10.07	0.485	-0.490	0.676	-0.836	0.487	0.644	c97g6_2		
		12	12.26	0.430	-0.475	0.117	-0.203	0.452	0.138	c97g12_1		
		12	15.28	0.532	-0.442	0.348	-0.869	0.477	0.337	c97g12_2		

\* divide forces by 4 and displacements by 2 to convert to single fastener values ( $P_i$ ,  $\Delta_i$ )

Tabela 2.9 - Recomendações básicas de parâmetros de resposta (por valores de parafuso).

Fonte: Peterman e Schafer (2013).

sheathing	steel thickness		initital stiffness	peak load	peak disp
	mil		$k_{o-i}$ kips/in.	$P_{max-i}$ kips	$\Delta_{max-i}$ kips
OSB	33	mean	8.5	0.36	0.23
		CoV	18%	12%	8%
	54	mean	12.2	0.44	0.24
		CoV	25%	16%	8%
	97	mean	20.4	0.43	0.09
		CoV	5%	6%	32%
Gypsum	33	mean	3.8	0.10	0.22
		CoV	133%	35%	32%
	54	mean	6.0	0.12	0.56
		CoV	9%	34%	4%
	97	mean	7.1	0.12	0.33
		CoV	143%	178%	13%

## 2.7 Modelos numéricos e experimentais em paredes de cisalhamento e seus componentes

Pesquisas numéricas e experimentais de diferentes autores demonstraram que placas de OSB usadas como revestimento de parede podem aumentar a rigidez lateral e resistência ao cisalhamento das paredes, dentre elas as pesquisas de Henriques *et al.* (2017) e Wang *et al.* (2019). Outros autores, como Niari *et al.* (2015), estudaram a influência de outros tipos de fechamento no sistema LSF.

Segundo Usefi *et al.* (2019), a precisão da modelagem numérica de paredes de cisalhamento em LSF sob força lateral depende de muitos parâmetros, como geometria, propriedades do material, condições de contorno, interações entre componentes, conexões, sistemas de resolução e elementos utilizados. Tais parâmetros serão estudados e identificados em trabalhos presentes na bibliografia, a seguir.

### 2.7.1 Estudo de Niari *et al.* (2015)

Neste trabalho, Niari *et al.* (2015) propuseram validação de modelo numérico em LSF revestido em chapa aço, submetido a esforço sísmico. A análise experimental, cuja configuração está



presente na Fig. 2.11 e Tab. 2.10, considerou os seguintes parâmetros: espessura do painel de aço de fechamento e quantidade de camadas de revestimento.

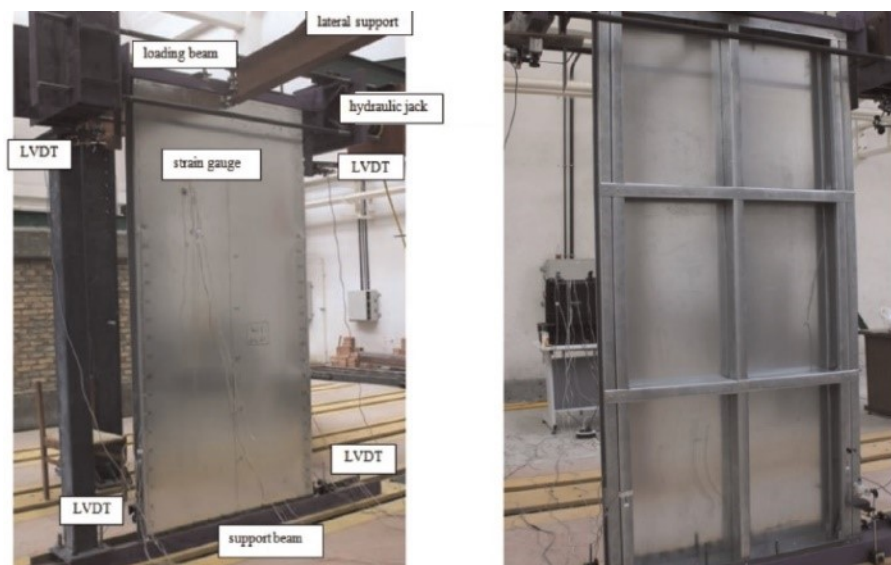


Figura 2.11 - Configuração dos ensaios experimentais.

Fonte: Niari *et al.* (2015).

Tabela 2.10 - Configuração dos ensaios experimentais.

Fonte: Niari *et al.* (2015).

Details of steel sheathed CFS shear walls.

Specimen	Wall length (mm)	Wall height (mm)	Sheathing thickness (mm)	Framing thickness (mm)	Screw spacing (mm)	Double sided sheathing
st1.2-sh1	1250	2500	1	1.2	100/300	No
st1.2-sh1.5	1250	2500	1.5	1.2	100/300	No
st1.2-sh1	1250	2500	1	1.2	100/300	Yes

De posse dos resultados experimentais, modelos numéricos foram desenvolvidos no *software* ABAQUS (Fig. 2.12), utilizando-se os seguintes parâmetros:

- Elementos tipo *shell* S4R;
- As conexões dos parafusos foram modeladas por malha independente, método utilizado para definir uma conexão ponto a ponto entre duas ou mais superfícies. O comportamento força *versus* deslocamento de cisalhamento foi obtido a partir de testes de conexão de cisalhamento realizados pelos autores;
- Utilização das tensões e deformações reais do material, na análise não linear;

- d) Os deslocamentos dos nós inferiores na posição de parafusos foram restringidos nas três direções e a guia superior foi submetida a restrição de deslocamento e rotação ao longo das direções vertical e fora do plano;
- e) O processo de carregamento foi controlado por deslocamento, aplicado nos nós superiores do modelo;
- f) Os aparelhos *hold-downs* foram modelados como elementos de mola uniaxiais com rigidez de 1000 N/mm somente na direção vertical. Além disso, foram restringidos os graus de liberdade horizontal e fora do plano, nos locais de *hold-downs*.

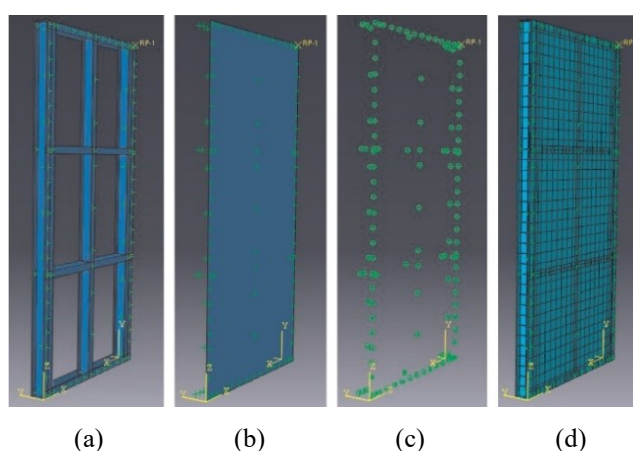


Figura 2.12 - Modelo em elementos finitos dos painéis. (a) Estrutura. (b) Revestimento. (c) Parafusos. (d) Malha. Fonte: Niari *et al.* (2015).

Para validação e calibração do modelo numérico, os autores utilizaram para comparação, resultados obtidos experimentalmente, em termos de resistência ao cisalhamento, rigidez e modos de falha. Os resultados mostraram que o modelo numérico é capaz de estimar o comportamento sísmico das paredes de cisalhamento. Na Fig. 2.13, é possível observar a comparação e semelhança existente entre as curvas Força *versus* Deslocamento do modelo numérico com o experimental, de um dos modelos considerados.

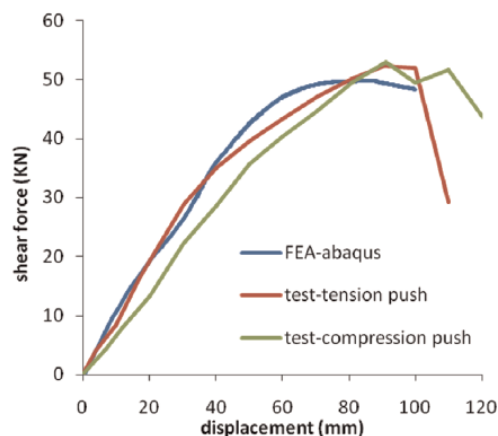


Figura 2.13 - Comparação dos resultados numérico e experimental do modelo st1.2-sh1.5.

Fonte: Niari *et al.* (2015).

### 2.7.2 Estudo de Henriques *et al.* (2017)

Neste trabalho, Henriques *et al.* (2017) avaliaram a resistência mecânica de painéis em LSF quando sujeitos a força lateral. Para tanto, foram ensaiados painéis não contraventados e contraventados com as próprias placas de OSB. Além disso, a configuração dos modelos buscou avaliar também a distância entre parafusos das ligações entre o OSB e o perfil de aço. A Tab. 2.11 apresenta um sumário do programa experimental. A força utilizada foi considerada estática monotônica e aplicada no topo do painel. A Fig. 2.14 apresenta detalhes do layout experimental utilizado.

Tabela 2.11 - Programa experimental em painéis LSF sujeitos a força lateral.

Fonte: adaptada de Henriques *et al.* (2017).

Teste	Estrutura	Variável
01	Não contraventada	Sem OSB
02		
03	Contraventada	Placas de OSB (ligação parafusada ao aço com distância de 300 mm)
04		
05		Placas de OSB (ligação parafusada ao aço com distância de 150 mm)
06		

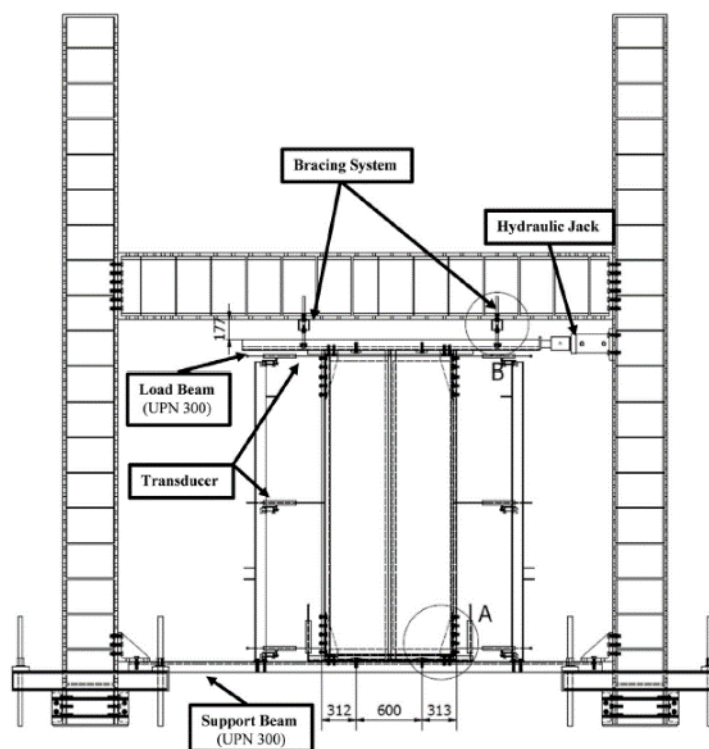


Figura 2.14 - Layout experimental.

Fonte: Henriques *et al.* (2017).

Os resultados experimentais em termos de força última ( $P_u$ ) e rigidez transversal ( $G$ ) são apresentados na Tab. 2.12. A rigidez transversal foi determinada com base em um valor de força de cerca de 33% da força última. Como pode ser observado na Tab. 2.12, a contribuição do OSB é evidente, ocasionando um aumento em torno de 920% na rigidez.

Tabela 2.12 - Programa experimental em painéis LSF sujeitos a força lateral.

Fonte: adaptada de Henriques *et al.* (2017).

Teste	Carga última [kN]	Carga última media [kN]	Rigidez ao esforço transversal, G [N/mm]	Rigidez média ao esforço transversal, G [N/mm]
01	3,91	3,99	79,00	90,68
02	4,06		102,35	
03	17,47	17,47	965,10	960,45
04	17,46		955,80	
05	24,40	25,85	904,00	900,50
06	27,30		897,00	

Dada a limitação dos testes experimentais e a fim de continuar a investigação acerca da contribuição do OSB nas paredes de cisalhamento, os autores realizaram simulações numéricas,

no *software* ABAQUS. Um primeiro modelo foi simulado com a finalidade de validar o modelo numérico, referente à estrutura de aço sem fechamento (Fig. 2.15).

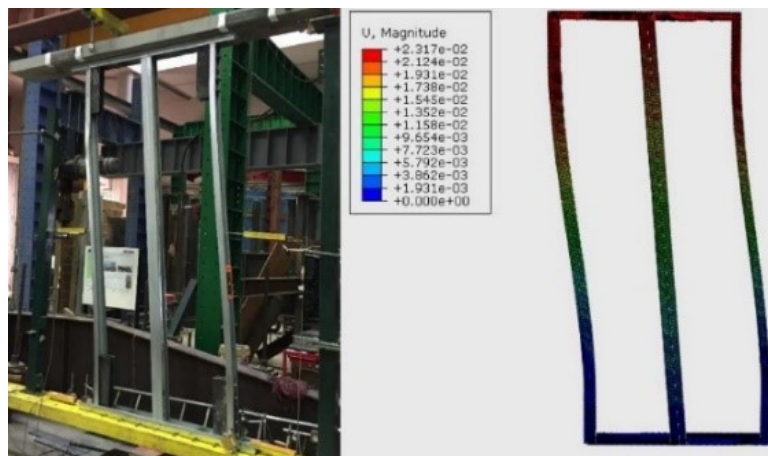


Figura 2.15 - Calibração do modelo numérico.

Fonte: Henriques *et al.* (2017).

Os perfis de aço foram simulados por meio de elementos de casca (S4R) e foram tomadas as seguintes considerações:

- a) Não foram consideradas imperfeições iniciais, locais e globais;
- b) As simulações consistiram em uma análise *push-over*, um método de análise estático-não linear no qual uma estrutura é submetida a um carregamento de gravidade e um padrão de carregamento lateral controlado por deslocamento monotônico que aumenta continuamente, que reproduz os testes experimentais. A força foi aplicada na parte superior do painel;
- c) A análise considerou não linearidades geométricas e dos materiais;
- d) O comportamento do material usado para os perfis de aço é elastoplástico perfeito;
- e) As conexões de parafuso usadas para montar os perfis formados a frio são consideradas totalmente rígidas (apenas na posição do parafuso);
- f) As conexões de parafuso usadas para conectar as fitas de aço das diagonais aos perfis formados a frio são considerados totalmente rígidas (o número de parafusos foi assumido para que a conexão não representasse uma limitação quanto aos estados limites últimos);
- g) A ancoragem do painel também foi assumida como rígida.

Um segundo modelo numérico foi desenvolvido por Henriques *et al.* (2017). O modelo, ilustrado na Fig. 2.16, consiste na modificação do modelo validado, por meio da inclusão de uma diagonal em fita de aço.

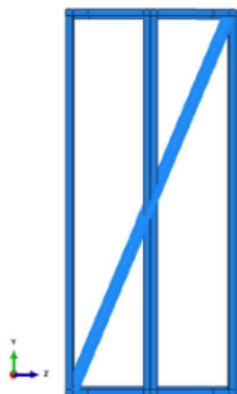


Figura 2.16 - Modelo com diagonal em aço.

Fonte: Henriques *et al.* (2017).

A Fig. 2.17 apresenta a curva de força *versus* deslocamento para ambos modelos numéricos (painel puro e painel com diagonal em fita de aço) e todos os testes experimentais descritos anteriormente. Como já apresentado na Tab. 2.11, os modelos Test 1 e 2 não apresentam fechamento por OSB, enquanto os modelos Test 3 a 6 apresentam fechamento pelas placas de OSB. Como esperado, os resultados mostraram que o painel LSF com diagonal em aço (modelo numérico) forneceu a maior rigidez. Porém, também é notável a contribuição das placas de OSB na rigidez lateral do painel.

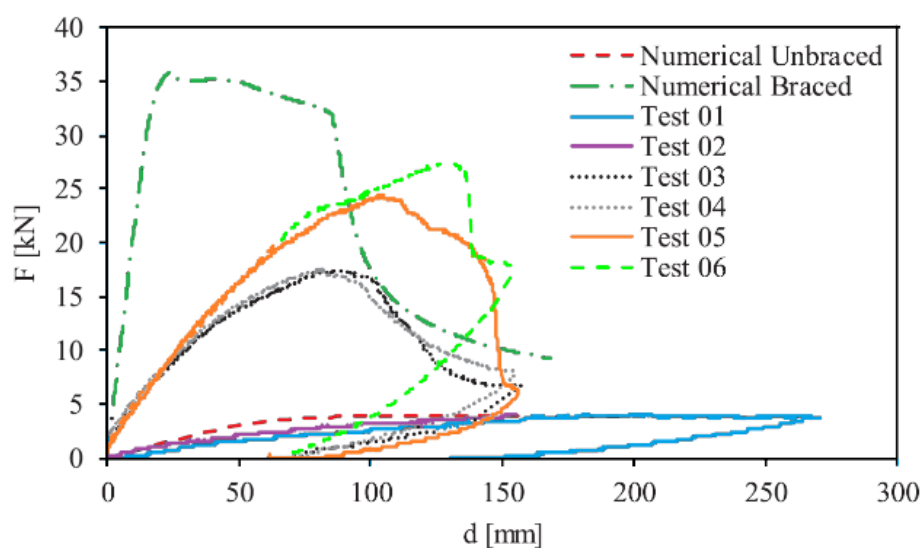


Figura 2.17 - Curva de força-deslocamento para modelos numéricos e testes experimentais.

Fonte: adaptada de Henriques *et al.* (2017).

### 2.7.3 Estudo de Wang *et al.* (2019)

Wang *et al.* (2019) realizaram uma série de ensaios cíclicos e análises numéricas para investigar a performance de paredes de cisalhamento. Foram ensaiados modelos em escala real, sendo cinco com fechamento em ambos os lados por placas de OSB e um modelo de parede sem fechamento, com diferentes áreas de aberturas para portas e janelas, com as especificações mostradas na Tabs. 2.13 e 2.14. Os testes foram realizados com carregamento constante de compressão, combinado com carregamento lateral cíclico, no aparato de ensaio mostrado na Fig. 2.18.

Tabela 2.13 - Descrição dos modelos ensaiados.

Fonte: adaptada de Wang *et al.* (2019).

Espécime	Abertura [mm x mm]		Taxa de abertura
	Porta	Janela	
CFSTT0	-	-	-
CFSTT1	-	-	-
CFSTT2	900 x 2100	-	13,8%
CFSTT3	-	1200 x 1560	13,9%
CFSTT4	900 x 2100	1200 x 1560	27,8%
CFSTT5	3000 x 2420	-	54,6%

Tabela 2.14 - Descrição dos modelos ensaiados.

Fonte: adaptada de Wang *et al.* (2019).

Espécime	Tipo de fechamento	Fechamento da parede
CFSTT0	-	-
CFSTT1	OSB	Ambos lados
CFSTT2	OSB	Ambos lados
CFSTT3	OSB	Ambos lados
CFSTT4	OSB	Ambos lados
CFSTT5	OSB	Ambos lados

Figura 2.18 - Configuração do ensaio em modelo real.

Fonte: Wang *et al.* (2019).

O padrão de falha, a força horizontal *versus* deslocamentos e a rigidez dos painéis foram analisados e avaliados. Os autores calcularam os valores do *Drift*, referente à relação entre o deslocamento no topo da parede ( $\Delta$ ) e a altura da parede ( $h$ ). Os dados experimentais mostraram que as paredes apresentaram bom comportamento quanto a estes fatores, sendo que paredes contraventadas com OSB apresentaram forças últimas e de falha em torno de 250% superiores, como pode ser observado na Tab. 2.15.

Tabela 2.15 - Resultados experimentais.

Fonte: adaptada de Wang *et al.* (2019).

Espécime	Peak point		Failure point	
	Drift (%)	$P_{m,t}$ (kN)	Drift (%)	$P_{f,t}$ (kN)
CFSTT0 (+)	2,20	24,56	2,99	20,88
CFSTT0 (-)	3,20	18,74	3,44	15,93
CFSTT1 (+)	1,01	74,22	1,32	63,09
CFSTT1 (-)	1,01	74,10	1,46	62,99
CFSTT2 (+)	1,36	54,80	1,59	46,58
CFSTT2 (-)	1,37	50,56	1,99	42,98
CFSTT3 (+)	2,10	53,21	2,72	45,23
CFSTT3 (-)	2,10	37,76	2,70	32,10
CFSTT4 (+)	1,77	54,12	2,75	46,00
CFSTT4 (-)	1,37	38,15	2,56	32,43
CFSTT5 (+)	3,19	23,90	4,12	20,31
CFSTT5 (-)	3,20	18,07	3,47	15,36



Prosseguindo nos estudos, os autores realizaram análise via elementos finitos (Fig. 2.19), por meio da verificação com os dados experimentais e por fim, conduziram estudos paramétricos para explorar efeitos do contraventamento em X, da espessura do OSB e tipo de revestimento. Devido à característica do painel OSB, os autores utilizaram elementos de casca S4R. Também foram realizados estudos de convergência de malha para obter uma densidade de malha razoável que proporcionou resultados confiáveis com menor tempo computacional. Não linearidades do material e imperfeições geométricas foram consideradas, utilizando-se o método de iteração de equilíbrio analítico e de Newton-Raphson. A conexão parafusada entre os componentes de aço e os painéis OSB foi considerada estabelecendo-se mola entre dois pontos, sendo cada parafuso representado por três elementos de mola, cuja rigidez foi determinada por ensaios experimentais. A interação da conexão parafusada entre os componentes de aço foi representada usando-se “Tie”. Quanto aos deslocamentos, na parte inferior das amostras, três deslocamentos e momentos ao longo do eixo x, y, z foram restringidos. A parte superior foi considerada sem deslocamento fora do plano. Para refletir a condição de força real, dois tipos de forças foram impostos em duas fases: pressão axial e deslocamento lateral. A força axial foi imposta na parte superior no primeiro passo e então, um deslocamento lateral e força axial foram impostos à parede de cisalhamento no segundo passo, simultaneamente.

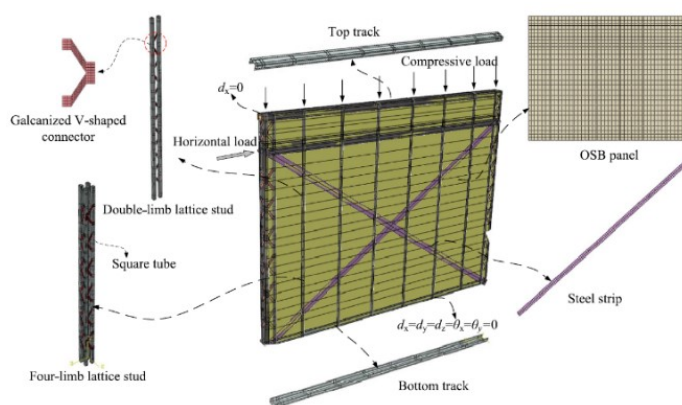


Figura 2.19 - Configuração dos modelos numéricos.

Fonte: Wang *et al.* (2019).

Nas análises paramétricas, os autores avaliaram diferentes espessuras do painel de OSB (6, 8, 15 e 20 mm). A Fig. 2.20 mostra as curvas de força *versus* deslocamento para cada espessura de placa de OSB. Ao se alterar a espessura de 6 mm para 8 mm, 15 mm e 20 mm, a rigidez elástica das paredes de cisalhamento foi aumentada em 30%, 47% e 89%. Este resultado demonstrou que a espessura do painel OSB teve uma influência significativa na rigidez.

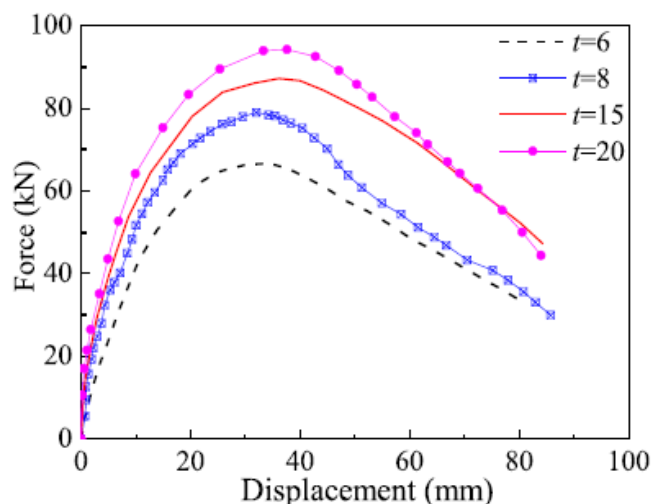


Figura 2.20 - Efeito da espessura do painel OSB nas relações P- $\Delta$  para paredes de cisalhamento.

Fonte: Wang *et al.* (2019).

Os autores também concluíram que a resistência máxima e a rigidez elástica das paredes de cisalhamento com painéis de OSB de ambos os lados melhoraram significativamente, se comparados com a parede sem revestimento.

#### 2.7.4 Estudo de Karabulut e Soyoz (2017)

Karabulut e Soyoz (2017) realizaram uma série de testes no Laboratório de Estruturas da Universidade Bogazici, na Turquia, a fim de observar a influência de parâmetros no comportamento de paredes de cisalhamento compostas por PFF's, como tipo de placa de revestimento, espessura do aço, espaçamento da fixação dos parafusos na placa de revestimento e magnitude das forças axiais. Os dados experimentais coletados na pesquisa também foram úteis para o Novo Código Turco de 2016. Após a obtenção dos dados experimentais, modelos analíticos que representassem o comportamento real de uma das paredes de cisalhamento ensaiadas foram desenvolvidos.

Para observar os efeitos do tipo de placa de revestimento, espessura do aço, espaçamento dos parafusos e forças axiais no desempenho estrutural das paredes de cisalhamento, os autores adotaram as configurações de modelos experimentais, conforme mostrado na Tab. 2.16 e Fig. 2.21. O tipo de fechamento denominado *Board Type 1*, refere-se ao gesso branco usado para interior de paredes, paredes divisórias, revestimentos de *drywall* e tetos falsos, enquanto *Board*

*Type 2* refere-se ao gesso utilizado para paredes externas com fibras do tipo feltro como ingrediente para melhorar a rigidez.

Tabela 2.16 - Modelos experimentais.

Fonte: Karabulut e Soyoz (2017).

Types of specimens	Steel thickness (mm)	Sheathing type	Screw spacing (external/internal) (mm)	Axial load (ton)	Number of tests
Type 1	0.9	Board Type 1	200/300	–	3
Type 2	0.9	Board Type 2	200/300	–	3
Type 3	1.5	Board Type 2	200/300	–	3
Type 4	0.9	Board Type 1	150/300	–	1
Type 5	0.9	Board Type 1	100/300	–	1
Type 6	0.9	Board Type 1	200/300	1.2	2
Type 7	0.9	Board Type 1	200/300	2.4	2
Type 8	0.9	Board Type 1	200/300	4.9	1



Figura 2.21 - Configuração dos ensaios experimentais.

Fonte: Karabulut e Soyoz (2017).

Prosseguindo na pesquisa, o processo de modelagem numérica foi realizado no *software* SAP2000, considerando primeiramente, a parede constituída por PFF's sem revestimento e depois com placa de revestimento do tipo 1.

O primeiro modelo, mostrado na Fig. 2.22, foi obtido por meio da atribuição de liberações de momento nos pontos de interseção dos componentes do painel. Nesses locais, o comportamento não linear resultante das ligações que conectam os perfis é simbolizado por elementos de ligação não lineares definidos no SAP2000.

O segundo modelo, mostrado na Fig. 2.23 foi elaborado utilizando comportamento não linear obtido experimentalmente por Fiorino *et al.* (2009). O modelo foi adquirido parametricamente

através de testes realizados em painéis de cisalhamento, que utilizam dois tipos diferentes de revestimento: placa de OSB de 9 mm de espessura e gesso cartonado padrão de 12,5 mm de espessura.

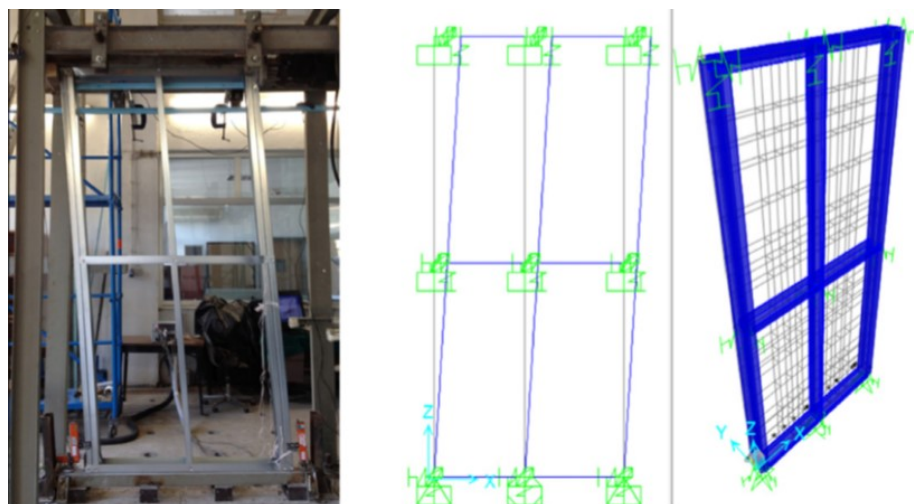


Figura 2.22 - Primeiro modelo analítico no *software* SAP2000, sem revestimento.

Fonte: Karabulut e Soyoz (2017).

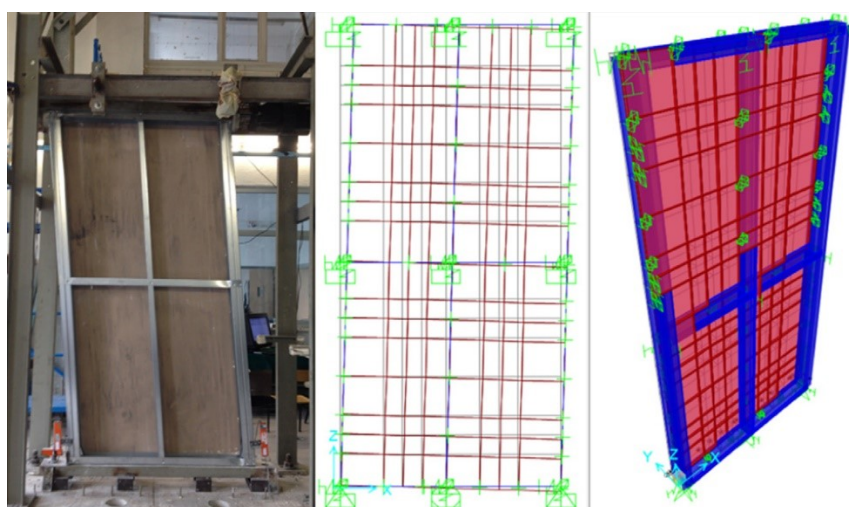


Figura 2.23 - Segundo modelo analítico no *software* SAP2000, com revestimento.

Fonte: Karabulut e Soyoz (2017).

A Fig. 2.24 apresenta a forma deformada da estrutura de um andar após a análise *push-over* no *software* SAP2000. O estudo analítico foi estendido e desenvolvido para ser aplicado em um andar típico representativo de um prédio residencial, com o objetivo final dos autores de garantir a capacidade das estruturas de aço formadas a frio de possuir desempenho eficiente em regiões propensas a terremotos, como a Turquia.

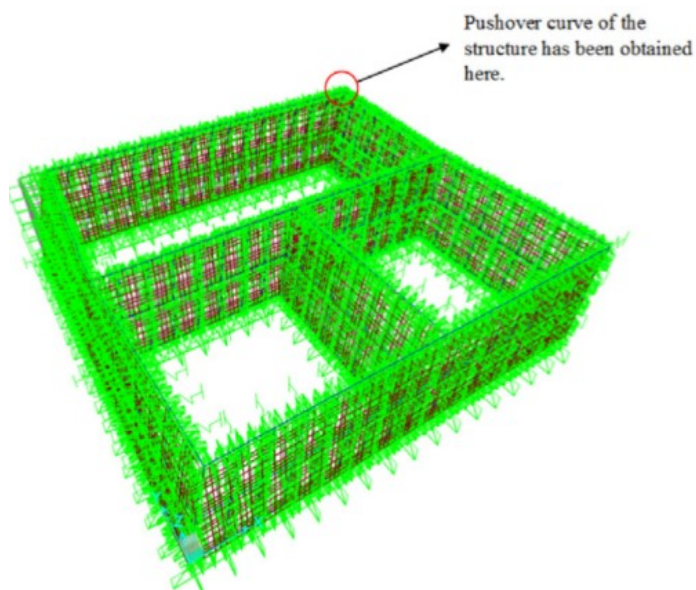


Figura 2.24 - Forma deformada da estrutura de um andar após análise de *pushover* no *software* SAP2000.

Fonte: Karabulut e Soyoz (2017).

Com base no estudo analítico realizado nas paredes de cisalhamento e na estrutura de um andar, os autores concluíram que os modelos analíticos convergiram satisfatoriamente com os experimentais e podem ser usados para análise estrutural 3D de estruturas constituídas por PFF's e para avaliação do desempenho dessas estruturas em relação à terremotos. Além disso, após as análises não lineares na estrutura de um andar, os autores concluíram que é explícito que construções constituídas por PFF's em regiões propensas a terremotos, são seguras desde que sejam feitas com engenharia, supervisão e aplicação adequada. Os resultados satisfatórios alcançados pela pesquisa de Karabulut e Soyoz (2017) podem incentivar o uso dessas estruturas em regiões sísmicas, onde edifícios residenciais de um ou dois andares são totalmente cobertos por alvenaria ou reforçadas com concreto armado.

### 2.7.5 Estudo de Leng *et al.* (2017)

Leng *et al.* (2017) realizaram estudo numérico em elementos finitos acerca da resposta sísmica de um edifício de dois andares constituído estruturalmente por PFF's e revestidos por placas de OSB. Modelos em elementos finitos foram desenvolvidos no *software* OpenSees, para várias fases de teste, considerando também os revestimentos internos de gesso e os respectivos comportamentos não lineares das ligações, previamente determinados por ensaios experimentais. Os autores realizaram validação numérica por meio de comparações entre a

resposta numérica dos modelos desenvolvidos e testes experimentais. Leng *et al.* (2017) concluíram que o modelo desenvolvido permite explorar de forma completa o comportamento de edifícios constituídos por PFF's, além de quantificar a contribuição do uso de sistemas de revestimento na resistência lateral dos painéis de parede.

### 2.7.6 Estudo de Bian *et al.* (2015)

Bian *et al.* (2015) desenvolveram modelos em elementos finitos no *software* OpenSees baseado em elemento mola e pórtico de uma parede de cisalhamento formada por PFF's com fechamento por placas de OSB. O estudo considerou o comportamento não linear das ligações presentes entre os perfis de o aço e as placas e avaliaram a influência do tipo de força lateral (monotônica e cíclica), força gravitacional e espessura das chapas de aço dos PFF's. Os autores exploraram o papel das forças gravitacionais no desempenho das paredes de cisalhamento e estudaram o comportamento em relação aos estados limites não lineares nos locais das ligações e de flambagem dos montantes. A parede de cisalhamento modelada no estudo apresenta dimensões de 1,22 m de largura e 2,74 m de altura e está apresentada na Fig. 2.25. Observa-se que na localização dos parafusos entre placas de OSB e perfis de aço os autores utilizaram molas com rigidez definida com base em aproximações do comportamento determinadas nos testes de Liu *et al.* (2012). O estudo compreendeu a utilização de duas espessuras para as chapas de aço: 0,80 mm e 1,40 mm.

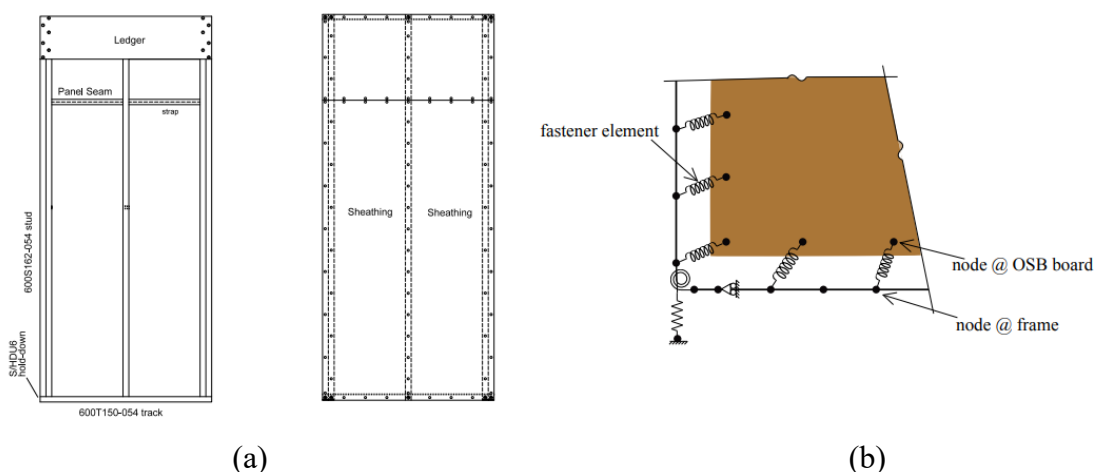


Figura 2.25 - Parede de cisalhamento modelada no software OpenSees: a) PFF's e fechamento por OSB e b) detalhes da ligação utilizada na modelagem.

Fonte: Bian *et al.* (2015).

Os autores observaram que o modelo desenvolvido forneceu uma aproximação razoável da resposta da parede ao comportamento lateral e, além disso, que a introdução da modelagem não linear nos montantes não influenciou os resultados para níveis baixos de força axial. O estudo também mostrou que ocorre um aumento significativo de rigidez inicial nas paredes de cisalhamento devido à força de gravidade sobreposta, que permite que ambos montantes permaneçam em compressão sob forças moderadas aplicadas.

### 2.7.7 Estudo de Attari *et al.* (2016)

Attari *et al.* (2016) estudaram experimentalmente seis paredes de cisalhamento constituídas por PFF's com chapas de aço em um e nos dois lados do painel, sob carregamento cíclico reverso. Também estudaram numericamente treze modelos utilizando o método de elementos finitos em comportamentos não lineares, sob carregamento monotônico. Os autores avaliaram os parâmetros: chapas de aço em um e nos dois lados da parede, espessura da chapa de aço, dimensões de outros elementos e as relações altura/espessura da parede de cisalhamento. A configuração dos testes experimentais está apresentada na Fig. 2.26 e os modelos numéricos simulados estão na Fig. 2.27.

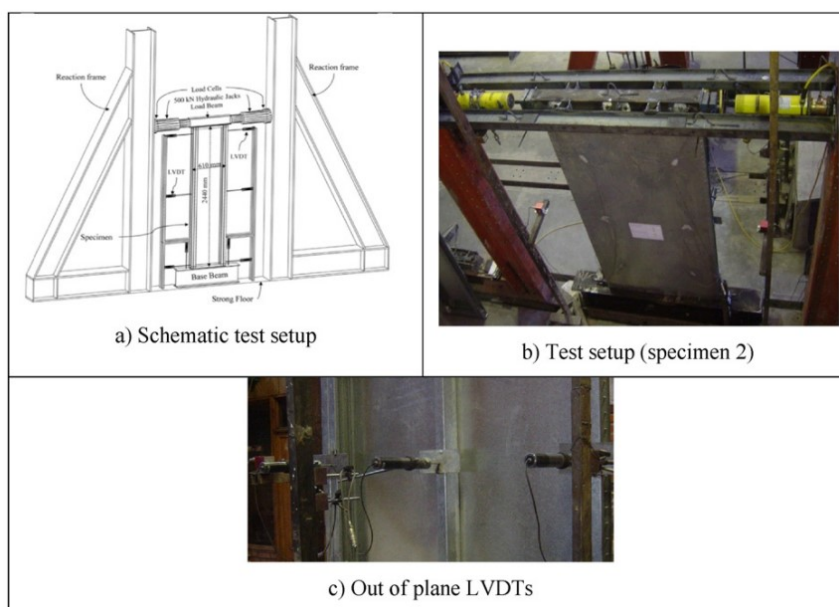


Figura 2.26 - Configuração dos ensaios experimentais.

Fonte: Attari *et al.* (2016).

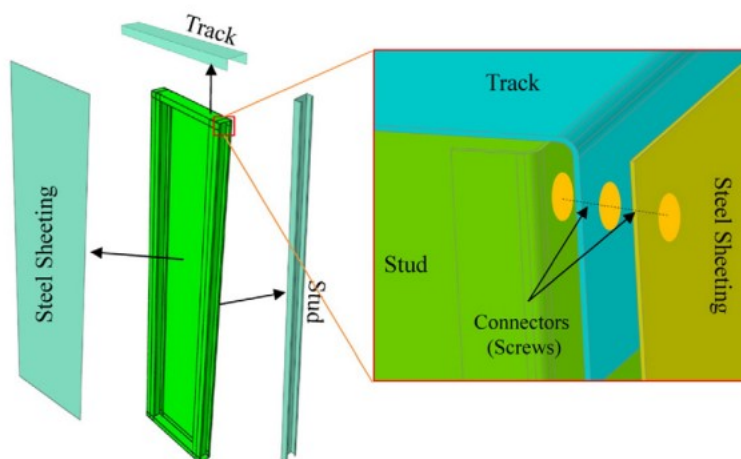


Figura 2.27 - Configuração dos modelos numéricos.

Fonte: Attari *et al.* (2016).

Os resultados do estudo experimental evidenciaram que a resistência lateral das paredes de cisalhamento com revestimento em ambos os lados por chapas de aço é mais que o dobro da resistência das paredes com chapa de aço de apenas um lado. Também foi possível concluir que o desempenho das paredes de cisalhamento é muito dependente da relação entre a espessura dos elementos que as compõem e da espessura da chapa de aço de revestimento. O estudo numérico mostrou que existe uma relação linear entre a espessura nominal das chapas de aço de revestimento e da proporção entre a resistência última e a espessura nominal das chapas de aço que compõem os PFF's.

### 2.7.8 Estudo de Fiorino *et al.* (2018)

Fiorino *et al.* (2018) desenvolveram modelos numéricos de paredes de cisalhamento com capacidade de simular seu comportamento lateral não linear, a fim de se atender aos objetivos do *Performance Based Seismic Design (PBSD)*. O cumprimento dos objetivos do PBSD requer um número de simulações de colapso de um edifício com determinado tipo de subsistema resistente à força sísmica. O estudo numérico dos autores, esquematizado na Fig. 2.28, foi baseado no projeto de pesquisa europeu denominado ELISSA, que tem o foco de compreender o comportamento sísmico de paredes de cisalhamento formadas por PFF's revestidas por placas à base de gesso.



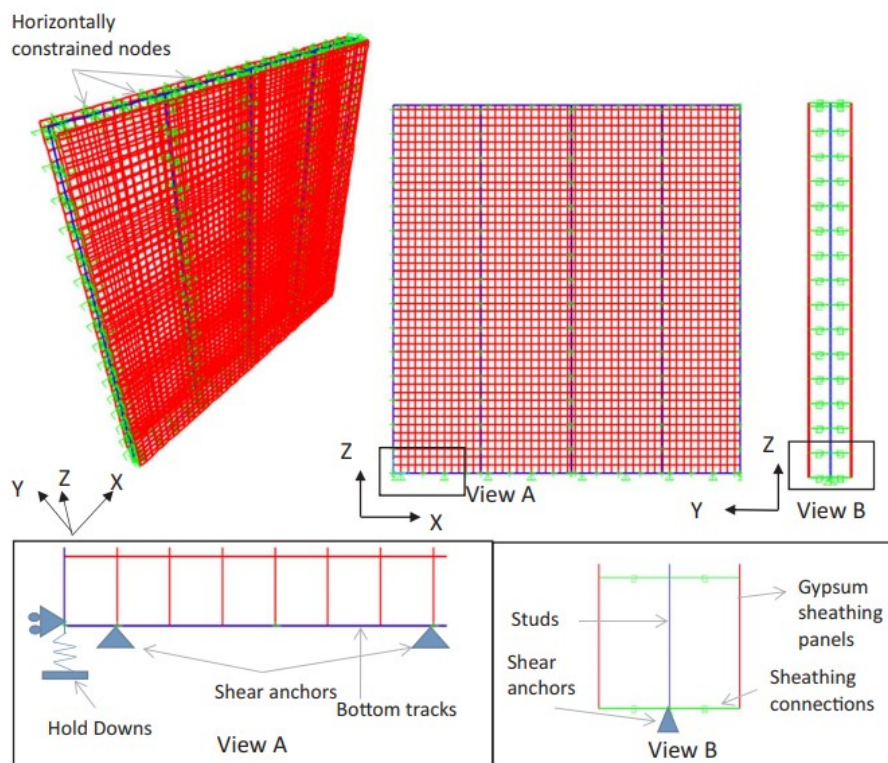


Figura 2.28 - Esquemática e detalhes do modelo de elemento finito desenvolvido.

Fonte: Fiorino *et al.* (2018).

Fiorino *et al.* (2018) desenvolveram três modelos numéricos de paredes de cisalhamento revestidas por placas de gesso, que foram testadas monotônica e ciclicamente. O primeiro modelo apresentou alto grau de detalhamento de elemento finito e requereu resultados experimentais de testes de conexão entre revestimento e chapas de aço como entrada principal. Os resultados mostraram que esse modelo foi capaz de prever a resposta não linear no plano das paredes de cisalhamento com boa precisão até a força máxima. Os autores demonstraram que esse modelo possibilitou estimar a resistência e rigidez da parede de cisalhamento simples, requerendo poucas evidências experimentais para o seu desenvolvimento, o que pode ser realizado com facilidade no dia a dia com *softwares* de análise estrutural comercial, como o SAP2000.

O segundo modelo refere-se a um modelo de treliça equivalente, o qual utilizou um par de elementos de treliça não linear para representar a resposta cíclica não linear das paredes. A simplicidade deste modelo permite que ele seja usado em modelos de construção para cumprir os objetivos do PBSO. Por fim, o terceiro modelo referente a uma treliça unificada em elemento finito, elimina a necessidade de testes cíclicos em paredes de cisalhamento para calibração. Os

parâmetros cíclicos usados são obtidos a partir de modelos de treliças que são calibrados com base em três experimentos.

### **2.7.9 Estudo de Hatami *et al.* (2014)**

Hatami *et al.* (2014) utilizaram o método dos elementos finitos para estudar o desempenho lateral no plano de paredes de cisalhamento constituídas por PFF's. Um modelo foi validado conforme estudos experimentais de outros pesquisadores e, posteriormente, estudo paramétrico foi conduzido a fim de se determinar a resistência lateral e o comportamento sísmico das paredes. Os autores concluíram com base nos resultados que a rigidez inicial e a resistência lateral última são fortemente afetadas pela espessura dos componentes da parede de cisalhamento, pelo tipo de material de revestimento, pelo espaçamento entre parafusos de borda de ligação e pela altura da parede. Concluíram que alguns parâmetros como espaçamento entre parafusos de centro têm um efeito menor na rigidez inicial e na resistência lateral última.

As referências bibliográficas apresentadas nesta dissertação abrangem uma ampla gama de autores renomados e estudos relevantes no campo de estudo de paredes de cisalhamento. A diversidade e a profundidade dessas fontes demonstram um esforço consciente em explorar diferentes perspectivas e abordagens, enriquecendo a compreensão do tema.

Em suma, as referências bibliográficas utilizadas nessa dissertação de mestrado foram criteriosamente selecionadas, demonstrando uma abordagem acadêmica sólida e fundamentada. A diversidade e a qualidade das fontes consultadas foram essenciais para enriquecer a pesquisa e fortalecer os argumentos apresentados.

### 3 MODELO NUMÉRICO

A modelagem numérica em elementos finitos foi realizada na presente pesquisa utilizando o *software* ABAQUS (2014) e compreendeu, primeiramente, na reprodução de dois modelos de dimensões reduzidas, a fim de estudar o comportamento não linear das ligações entre perfis de aço e placas de OSB e definir o tipo de curva a ser utilizada nas referidas localizações das ligações. Para tal, adotou-se como referência dois corpos de prova dos ensaios de Datchoua (2018), ambos do Modelo M1\_S3 (corpos de prova CP2 e CP3), representados na Fig. 3.1. A Fig. 3.2 apresenta o modelo numérico reproduzido.



Figura 3.1 - Modelo ensaiado M1 S3. Fonte: Datchoua (2018).

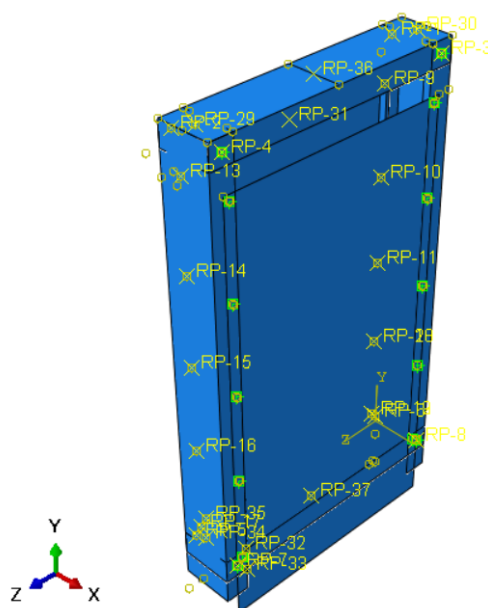


Figura 3.2 - Modelo numérico de dimensões reduzidas.

Posteriormente, um modelo principal de parede completa com fechamento em OSB (Fig. 3.3), utilizado para validação experimental foi reproduzido, constituindo-se pelos perfis formados a frio em aço, fechamento em um só lado com placas de OSB e ligações parafusadas entre perfis de aço (ligações aço-aço) e entre perfis de aço e as placas de OSB (ligações aço-OSB). Esse modelo reproduziu um ensaio monotônico de Faria (2023), apresentado na Fig. 3.4 e detalhado a seguir.

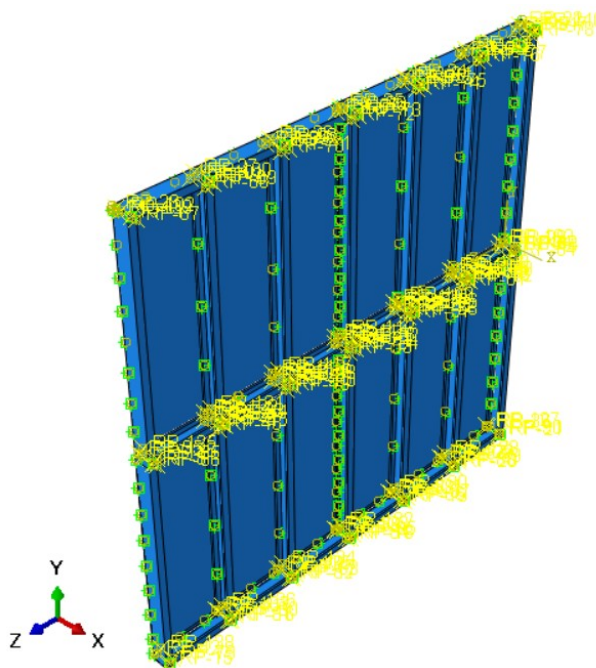


Figura 3.3 - Modelo numérico para validação experimental.

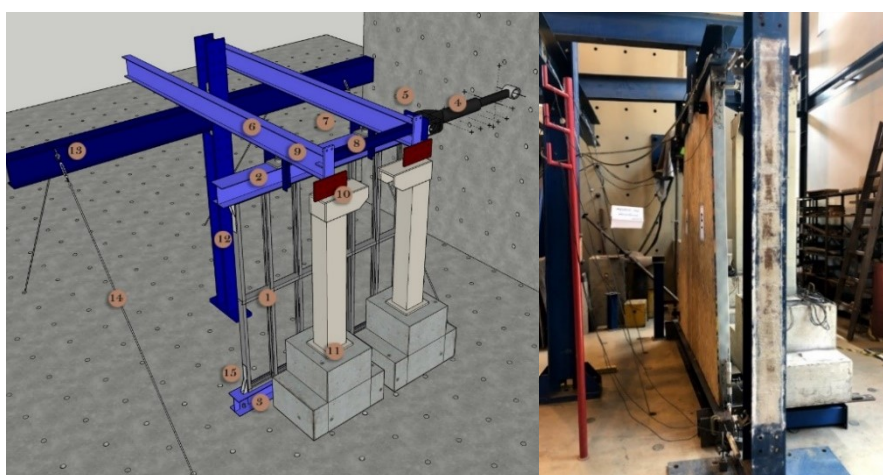


Figura 3.4 - Modelo experimental: a) esquematização do ensaio, b) modelo ensaiado.

Fonte: Faria (2023).

Na Fig. 3.4, é possível observar detalhes do ensaio experimental de Faria (2023):

1 – painel a ser ensaiado; 2 – viga de apoio superior (viga de aplicação de carga); 3 – viga de apoio inferior; 4 – atuador hidráulico para aplicação da força horizontal; 5 – ligação do atuador com o painel; 6 – vigas de sustentação das forças verticais (com valor fixo); 7 – rolamentos de apoio; 8 – barra de separação das vigas de sustentação; 9 – cantoneiras de contenção lateral do painel; 10 – placa de ligação das forças verticais à viga de sustentação; 11 – forças verticais (blocos de concreto); 12 – pilar da montagem; 13 – viga de apoio das vigas de sustentação das forças verticais; 14 – cabos de aço para contenção lateral do sistema de aplicação das forças verticais; 15 – *hold down* de ligação do painel com as vigas de apoios superiores e inferiores. Adiante, de posse de modelo devidamente validado e, portanto, calibrado, um estudo paramétrico foi conduzido, para avaliação das variações dos seguintes parâmetros das paredes de cisalhamento: espessura da chapa de aço, espessura da placa de OSB, fechamento duplo em OSB, espaçamento dos parafusos de ligação entre perfis de aço e OSB e painéis sem fechamento em OSB. A Tab. 3.1 contém um resumo de todos os modelos numéricos implementados na presente pesquisa e cada variação de característica estudada na etapa de estudo paramétrico.

Tabela 3.1 - Resumo dos modelos numéricos implementados na presente pesquisa.

Modelo numérico	Designação	Característica	Finalidade
Com dimensões reduzidas (reticulado metálico)	MOD_R	-	Estudo das ligações entre OSB-Aço
Principal (parede de cisalhamento completa)	MOD_C	Fechamento simples em OSB $t_{aço}=0.95$ mm $t_{OSB}=9.50$ mm $e_{ext}=150$ mm $e_{int}=300$ mm $d_{montantes}=400$ mm	Validação experimental
Paramétrico	PAR_ESP_AÇO	$t_{aço}=0.80$ mm	Estudo e avaliação da influência dos parâmetros na rigidez lateral
	PAR_ESP_OS	$t_{OSB}=11.10$ mm	
	PAR_QTDE_OS	Fechamento duplo em OSB	
	PAR_LIG1	$e_{ext}=150$ mm $e_{int}=150$ mm	
	PAR_LIG2	$e_{ext}=300$ mm $e_{int}=300$ mm	
	PAR_SEMOSB	Sem OSB	

Sendo:

 $t_{aço}$  e  $t_{OSB}$  → Espessura das chapas de aço e das placas de OSB, respectivamente. $e_{ext}$  e  $e_{int}$  → Espaçamento da ligação entre aço e OSB, externo e interno, respectivamente. $d_{montantes}$  → Distância entre montantes.

### 3.1 Geometria da modelagem

A parede de cisalhamento principal estudada nesse trabalho tem uma largura de 2400 mm e uma altura de 2400 mm, conforme ilustrado na Fig. 3.5. A estrutura é construída por 42 parafusos nas ligações entre perfis de aço e 96 parafusos entre perfis de aço e placas de OSB. Os detalhes da modelagem estão resumidos na Tab. 3.2. Finalmente, o subsistema de parede de cisalhamento foi submetido numericamente, a carregamento monotônico no topo da parede. A configuração da parede de cisalhamento aqui descrita é adotada para fins de comparação com o trabalho experimental de Faria (2023).

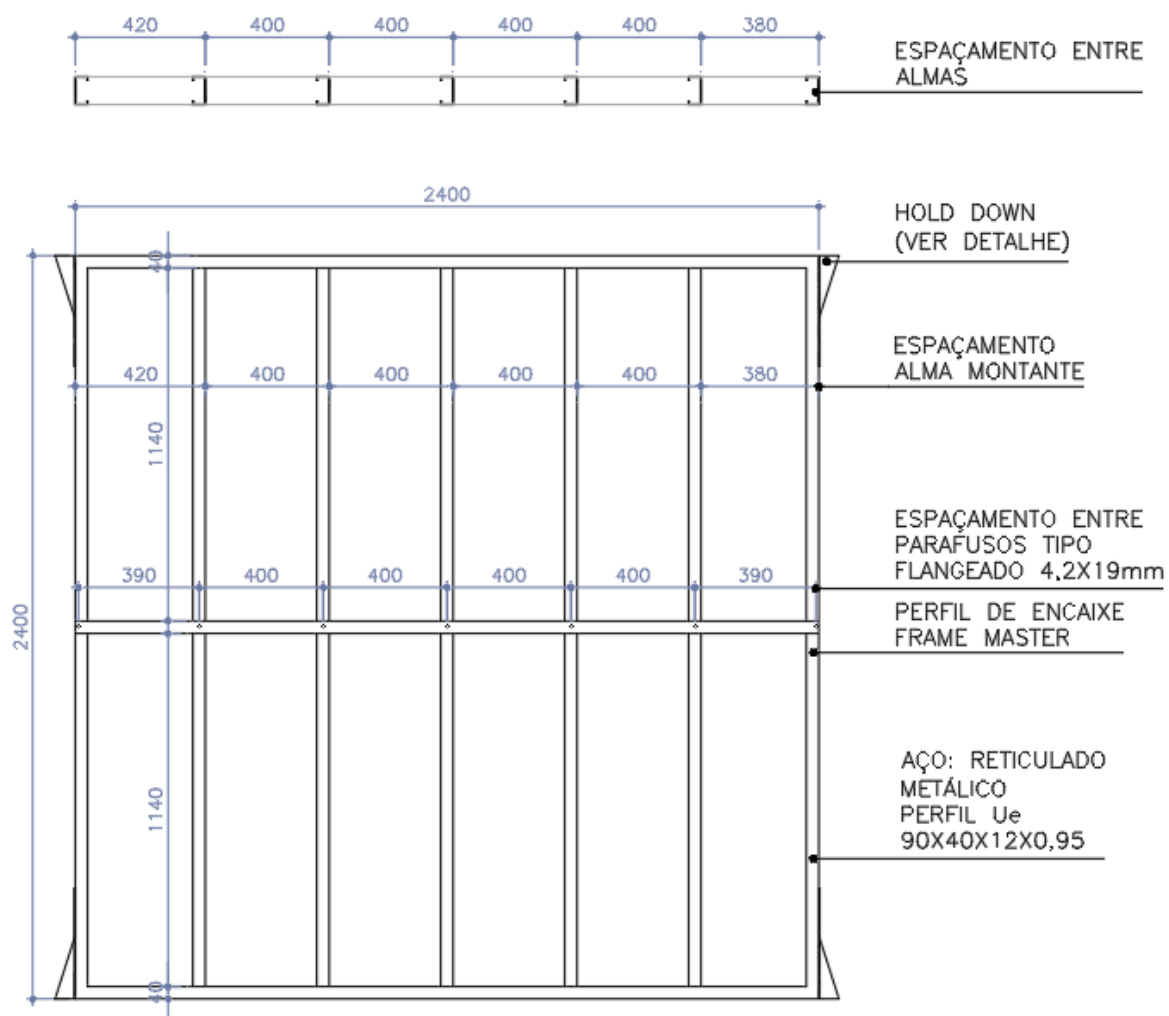
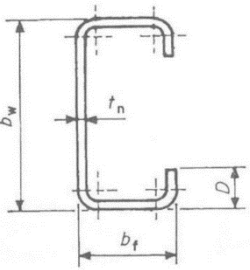
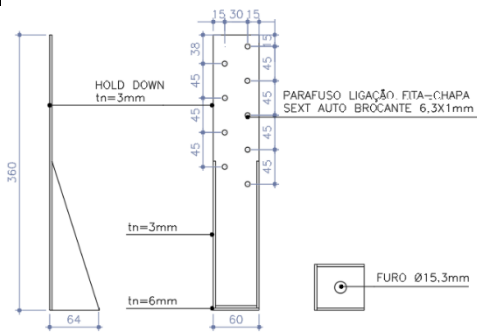


Figura 3.5 - Composição da geometria do modelo principal.

Tabela 3.2 - Resumo dos detalhes geométricos dos modelos numéricos desenvolvidos neste estudo.

Componente	Seção
Guias	 <p> <math>b_w=90</math> mm  <math>b_f=40</math> mm  <math>D=12</math> mm  <math>t_n=0.95</math> mm         </p>
Montantes	
OSB	<p>espessura= 9.50 mm;            placas originais de 2400 x 1200 mm</p>
Hold downs	

### 3.2 Propriedades dos materiais

Os perfis formados a frio de aço ZAR 280 Z 275 foram considerados no modelo implementado no ABAQUS (2014) com propriedades físicas equivalentes a um modelo elastoplástico. O módulo de elasticidade  $E=200$  GPa e o coeficiente de Poisson  $\nu=0,3$  foram considerados e o comportamento elastoplástico foi adotado, da forma descrita na Tab. 3.3 e exibida na Fig. 3.6.

Tabela 3.3 - Comportamento elastoplástico adotado para o aço.

Tensão Real [Mpa] ( $\sigma_{real}$ )	Deformação real ( $\epsilon_{real\ plastico}$ )
308.47432	0.000000
314.19080	0.0083794
388.41000	0.0657166
480.70000	0.1373584
0.00001	0.1500000



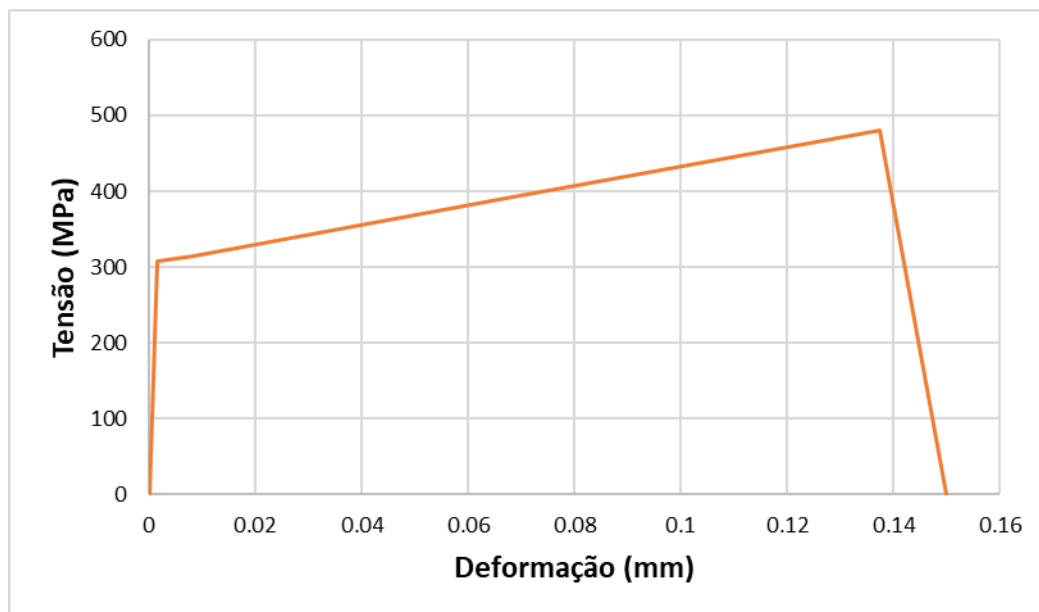


Figura 3.6 - Comportamento elastoplástico adotado para o aço.

As placas de revestimento em OSB foram modeladas como material ortotrópico e elástico, por meio do comando *Engineering Constants* no software ABAQUS (2014). As propriedades do material foram previamente determinadas por Datchoua (2018), que realizou ensaios de caracterização. O autor determinou de forma experimental a tensão de ruptura ( $S_b$ ) e o módulo de elasticidade longitudinal ( $E$ ) das placas de OSB, seguindo as prescrições da norma americana ASTM D3043-00 (Reapproved 2011), método A – Center-Point Flexure Test. A Tab. 3.4 apresenta um resumo dos resultados obtidos por Datchoua (2018).

Tabela 3.4 - Resumo dos resultados experimentais dos ensaios de caracterização do OSB.

Fonte: Adaptado de Datchoua (2018).

Caracterização	Designação do modelo	Módulo de Elasticidade (MPa)
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E)	M1- S3 - B - L - H	5606,38
	M1 - S4 - B - T- H	2369,15
	M1- S7 - B - L - V	3235,38
	M1 - S8 - B - T- V	1576,76
	M1- S1 - A - L - H	5160,01
	M1 - S2 - A - T- H	2704,99
	M1- S5 - A - L - V	3444,79
	M1 - S6 - A - T- V	1708,77

Segundo APA (2012, apud Derveni, 2019) a rigidez do painel através da espessura ( $G_w t_w$ ) pode ser considerada como 14,62 kN/mm. O módulo de elasticidade transversal ( $G_{12}$ ) pode ser calculado por meio da implementação de Schafer *et al.* (2007, apud Derveni, 2019), presente na Eq. 3.1.

$$G_{12} = \frac{(G_w t_w)}{t_w} \quad (3.1)$$

Sendo  $t_w$  a espessura da placa de OSB.

O coeficiente de Poisson igual  $\nu = 0.3$  foi determinado para as três direções, sendo a direção 1 referente ao eixo paralelo a aplicação da força, direção 2, referente ao eixo perpendicular a aplicação de força e direção 3, referente ao eixo normal ao plano da parede. A Fig. 3.7 ilustra o modelo numérico em questão, com a padronização de eixos adotada no estudo. O Módulo de Elasticidade na direção normal ao plano da parede foi assumido como  $E_3 = E_2$ . Em relação ao módulo de elasticidade transversal, foi assumido o valor equivalente a  $G_{12}$  para  $G_{13}$  e  $G_{23}$ , considerando que o deslocamento fora do plano não é significativo. Além disso, adotou-se o mesmo valor para o módulo de elasticidade transversal, independentemente da espessura da placa de OSB, para fins simplificação. A Tab. 3.5 apresenta os parâmetros de material OSB ortotrópico usados na simulação numérica.

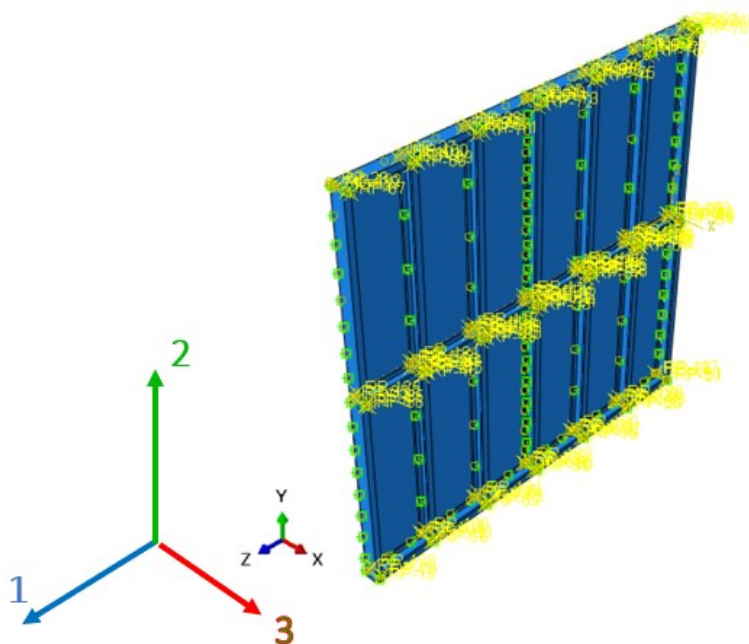


Figura 3.7 – Modelo numérico e numeração dos eixos.

Tabela 3.5 - Parâmetros de material OSB ortotrópico utilizados na simulação numérica.

Propriedade	Designação	Módulo de Elasticidade (MPa) [ $t_{OSB}=9,5$ mm]	Módulo de Elasticidade (MPa) [ $t_{OSB}=11,1$ mm]
Módulo de Elasticidade Longitudinal (E)	$E_1$ – eixo principal	5160,01	5606,38
	$E_2$ – eixo secundário	2704,99	2369,15
	$E_3$ – direção normal ao plano	2704,99	2369,15
Módulo de Elasticidade Transversal (G)	$G_{12}$	1315,93	1315,93
	$G_{13}$	1315,93	1315,93
	$G_{23}$	1315,93	1315,93
<b>Coeficiente de Poisson (<math>\nu</math>)</b>			
$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = 0,3$			

### 3.3 Elementos Finitos e Discretização da Malha

No que diz respeito à discretização da malha, os elementos *shell* S4R da biblioteca do ABAQUS (2014) foram adotados para os materiais aço e OSB, para os modelos de dimensões reduzidas, modelo principal e modelos do estudo paramétrico. Um estudo de convergência de malha foi realizado a fim de se adequar a escolha da malha mais representativa e para se obter uma densidade de malha apropriada, com resultados confiáveis e menor tempo computacional. A partir de então, para o modelo de dimensões reduzidas, apresentado na Fig. 3.8, as malhas de 6,5 mm e 20,0 mm foram adotadas para os perfis de aço e para as placas de OSB, respectivamente. Para o modelo principal a malha adotada é apresentada na Fig. 3.9: malha refinada de 12,0 mm para os perfis de aço e malha de 60,0 mm para as placas de OSB.

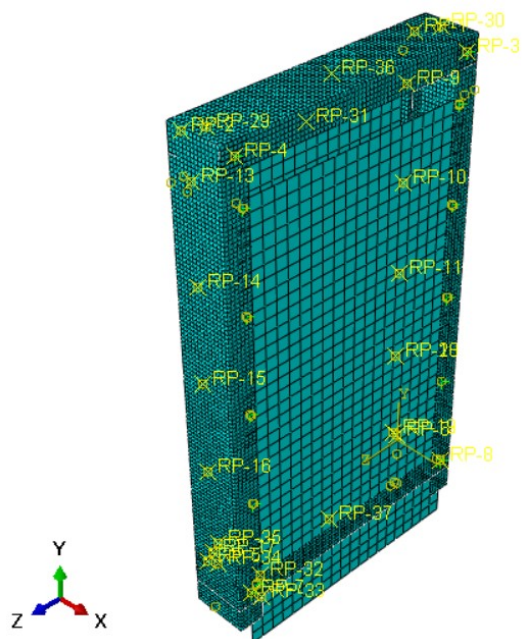


Figura 3.8 - Discretização da malha para modelo de dimensões reduzidas.

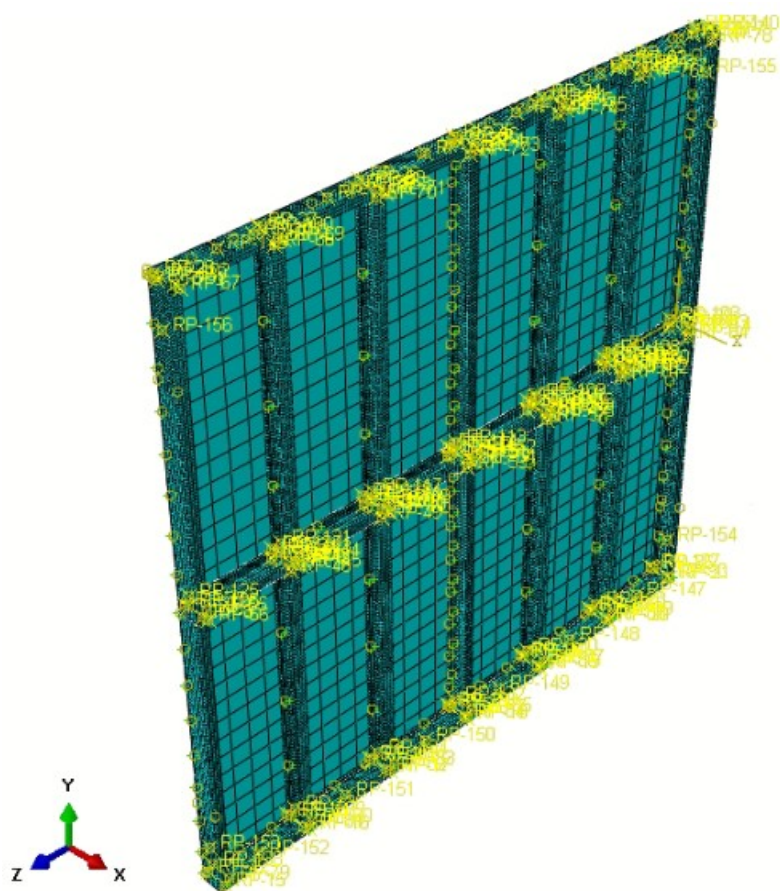


Figura 3.9 - Discretização da malha para modelo principal.

### 3.4 Conexões e modelagem dos *hold downs*

Procurando reproduzir os modelos experimentais, os modelos numéricos foram implementados utilizando-se dois tipos de ligação: ligação entre os perfis de aço, presente na união entre guias e montantes, e ligação entre perfis de aço e placas de OSB, presente ao longo da união das placas de OSB com os perfis de aço.

As ligações aço-aço foram modeladas por meio da ferramenta *Engineering Features* utilizando-se *Rigid MPC*, restringindo-se todos os graus de liberdade translacionais entre dois nós, mas deixando as rotações independentes. Conforme Abaqus/CAE User's Manual, as ligações assim representadas possuem menor custo computacional, se comparadas aos conectores e têm menor probabilidade de resultar em um modelo excessivamente restrito. A Fig. 3.10 apresenta em destaque as ligações entre perfis de aço da parede de cisalhamento.

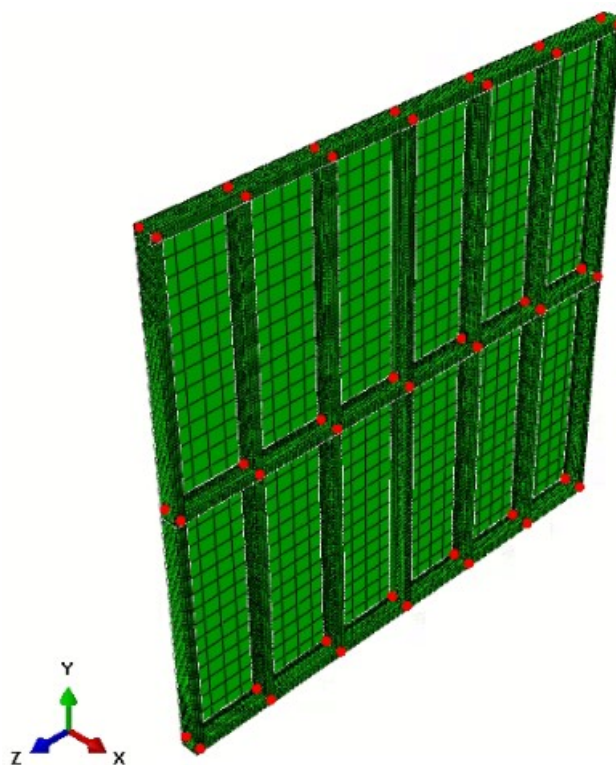


Figura 3.10 - Representação *Rigid MPC* das ligações aço-aço.

As ligações entre perfis de aço e placas de OSB foram modeladas como não lineares, com comportamento relativo à rigidez introduzido conforme resultado do estudo prévio, tendo sido validado a partir dos modelos experimentais de Datchoua (2018). Para tal, as ligações foram classificadas como ligações externas e internas, no contorno e no centro das placas de OSB,

respectivamente, de acordo com o estudo do autor, que concluiu que a posição das ligações apresenta grande influência nos valores da rigidez.

Sendo assim, considerando o comportamento experimental de força *versus* deslocamento determinado por Datchoua (2018), uma simplificação foi realizada, adotando-se os valores médios obtidos a partir dos seus ensaios. Essa simplificação também adotada por Pedrosa (2015), converte o comportamento translacional da ligação entre OSB e perfis metálicos, para um comportamento elementar, como na Fig. 3.11. De posse das curvas simplificadas, um estudo acerca da influência dos parâmetros espaçamento da ligação e localização das ligações (externas e internas) foi realizado para todos os modelos, a fim de verificar a possibilidade de adoção de uma mesma curva simplificada independentemente da posição das ligações. Na Fig. 3.11, referente ao estudo de Pedrosa (2015), é possível observar que o comportamento experimental da ligação foi simplificado por meio de retas, delimitadas pelos valores de 0,4 da força máxima, força máxima e os respectivos deslocamentos.

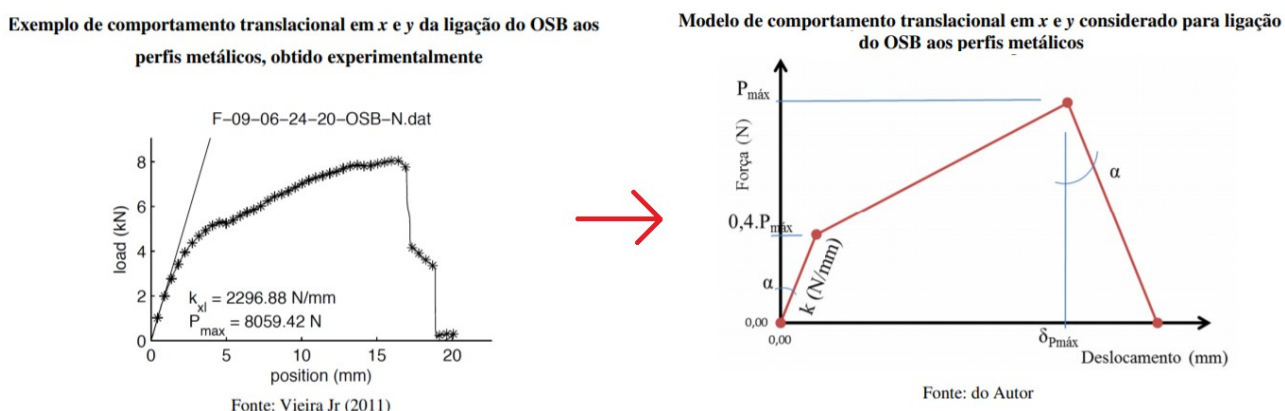


Figura 3.11 - Simplificação das curvas da ligação aço-OSB, obtidas experimentalmente. Fonte: Adaptado de Pedrosa (2015).

A Fig. 3.12 contém o gráfico com valores médios das ligações de dois ensaios de Datchoua (2018), que foram utilizados nas conexões do modelo numérico de dimensões reduzidas. Observa-se a curva média na cor vermelha e a simplificação adotada na cor verde, de maneira análoga ao estudo de Pedrosa (2015). Esse comportamento foi introduzido primeiramente nos modelos numéricos de dimensões reduzidas e, após validado, nos modelos de parede completa, por meio do *Engineering Features* utilizando-se *Point based* com conector do tipo *Cartesian*, conforme apresentado na Fig. 3.13.

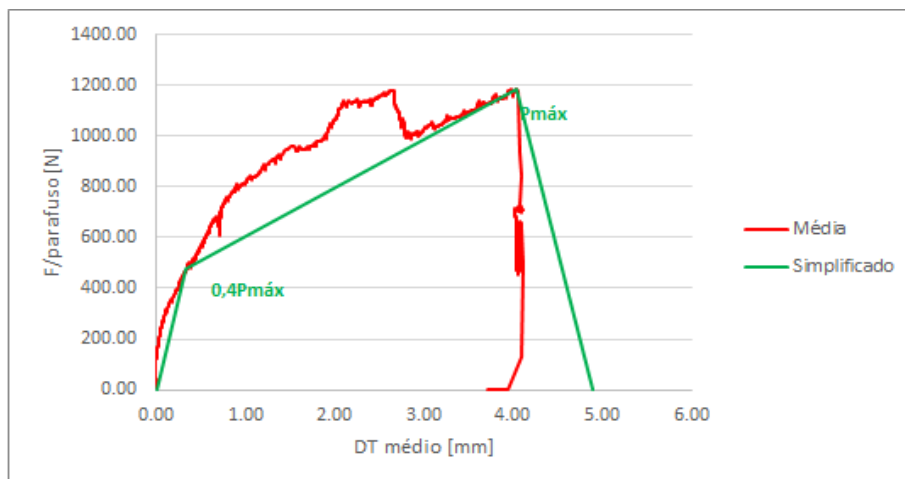


Figura 3.12 - Comportamento não linear das ligações entre aço e OSB: a) Média dos deslocamentos; b) Comportamento não linear adotado.

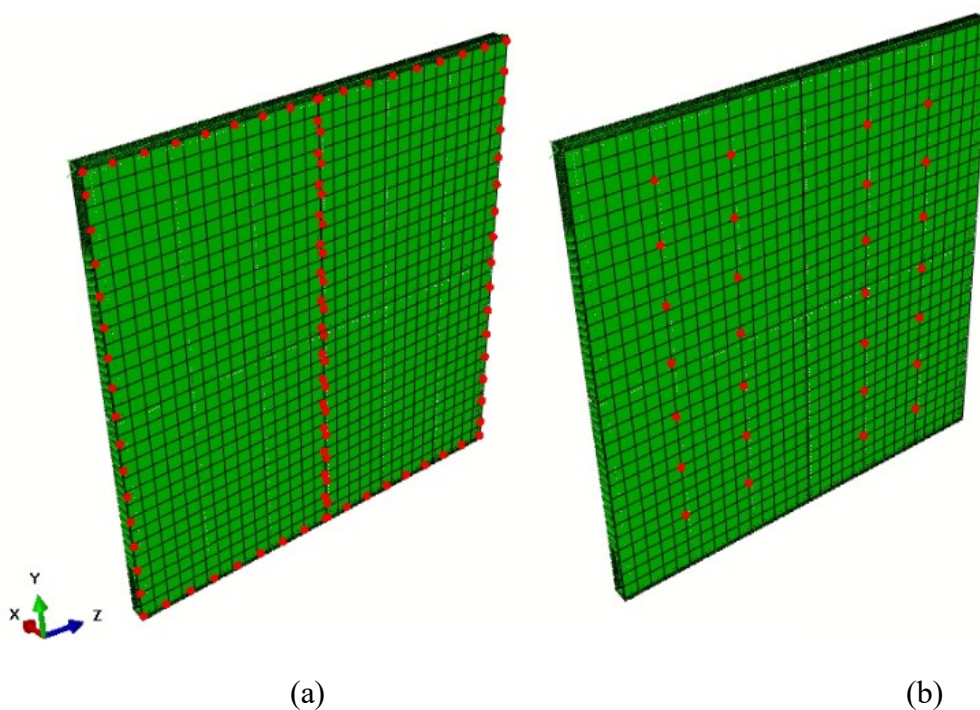


Figura 3.13 - Representação das ligações entre perfis de aço e placas de OSB: a) externas (nos contornos das placas) e b) internas (no interior das placas).

Os *hold-downs* foram modelados de modo a representar o ensaio de Faria (2023), como apresentado na Fig. 3.14, nos 4 cantos da parede de cisalhamento. Um nó de referência foi conectado à placa de reação por meio da ferramenta *Spring* presente no ABAQUS (2014), para evitar a elevação da parede nesses pontos. O nó de controle foi ligado à superfície pertencente ao *hold down* por meio do *Tie*, a fim de que não haja movimento relativo entre eles. A rigidez

para as molas foi adotada como uma simplificação, conforme Niari *et al.* (2015), como 1000 N/mm. Além disso, na localização dos dispositivos, o grau de liberdade fora do plano da parede foi restringido.

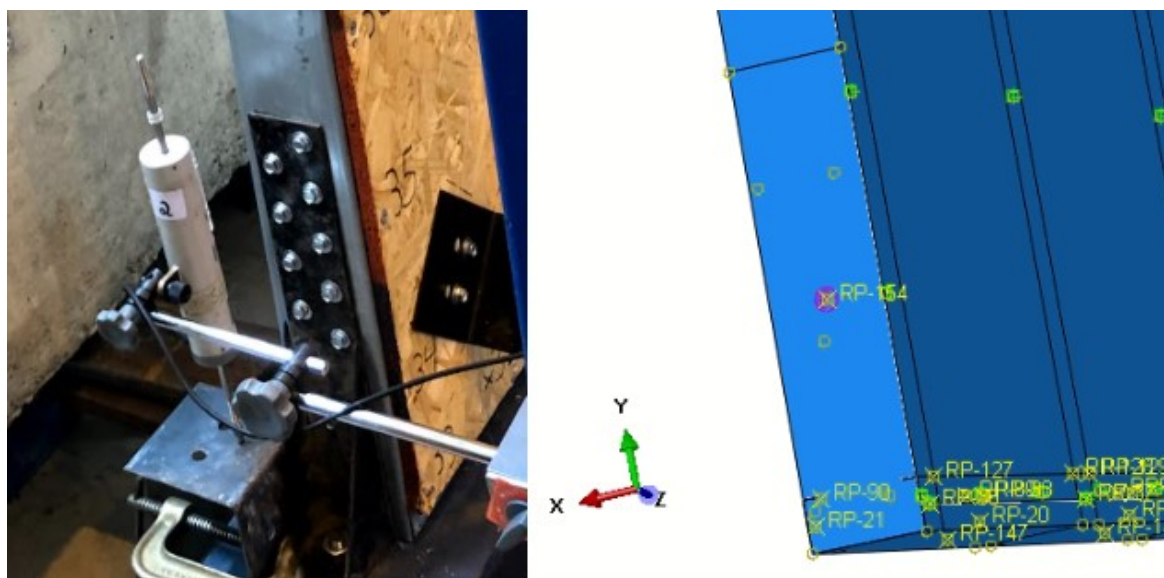


Figura 3.14 - Representação dos dispositivos *hold downs* nos ensaios e na modelagem numérica.

### 3.5 Condições de contorno e interações

As localizações dos parafusos entre a guia inferior e a viga de apoio foram modeladas restringindo todos os graus de liberdade translacionais e rotacionais. Quanto à guia superior, na localização dos parafusos com a respectiva viga de apoio e de carga foram restringidos o deslocamento fora do plano (eixo x) e as rotações em torno dos eixos z e y, para impedir a torção no plano da parede.

A fim de simular a interação entre aço e OSB, adotou-se o comportamento *Normal behavior* do tipo *Hard Contact* presente no ABAQUS (2014), assumindo assim que não há penetração entre os componentes de aço e material de fechamento.

### 3.6 Considerações sobre carregamento e tipo de análise

Os modelos receberam carregamento vertical na guia superior, referente aos dispositivos utilizados nos ensaios experimentais de Faria (2023), conforme Fig. 3.4. Esse carregamento, igual a 15 kN/m foi aplicado nos modelos experimentais de Faria (2023) a fim de simular a



força do painel do andar superior. O carregamento lateral foi introduzido de forma incremental, controlado por deslocamento por meio do Método de Riks. O deslocamento lateral foi imposto no topo da parede em um nó de referência, o qual foi vinculado à borda da guia superior por meio do *Constraint Rigid Body* do tipo *Tie*.

Imperfeições geométricas globais iniciais foram introduzidas ao modelo de parede de validação e modelos paramétricos por meio de uma análise prévia de flambagem elástica, de forma a obter diversos modos de flambagem e seus respectivos autovalores e autovetores. Parâmetros normativos foram estudados, a fim de se adotar a imperfeição mais desfavorável ao modelo. A norma ABNT NBR 8800:2008 indica a utilização de  $L/1000$ , sendo  $L$  o comprimento total da barra. Heva (2009) afirma que as medições das imperfeições globais reais apresentam valores menores que  $L/1000$ , recomendado pelas normas, de forma que sua utilização fornece resultados mais conservadores. Valores de imperfeições iguais a 80% de  $L/1000$ , a  $1^\circ$  por metro e  $L/1000$  foram testados no modelo principal e o caso mais conservador foi adotado, equivalente a 2,4 mm, ou seja,  $L/1000$ .

As tensões residuais foram consideradas nulas, por não apresentarem efeitos significativos nos perfis formados a frio, quando o efeito do encruamento do processo de fabricação não é considerado (Cruz Neto, 2015). Sendo assim, a resultante da tensão residual é considerada igual a zero na linha média da seção transversal.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Modelo de conexão com dimensões reduzidas

Os modelos em elementos finitos com menores dimensões foram capazes de capturar a resposta do sistema de conexões em comparação com o estudo experimental de Datchoua (2018), referente ao Corpo de Prova M1\_S3M2A0,95140400150CP3 e ao Corpo de Prova M1\_S3M2A0,95140400150CP2. Isso significa que a simplificação mostrada na Fig. 3.11 foi capaz de prever com boa aproximação o comportamento real dos corpos de prova, especificamente das ligações. As respostas dos dois modelos numéricos desenvolvidos estão representadas nas Figs. 4.1 e 4.2. A força equivale àquela aplicada verticalmente na guia superior do modelo, enquanto que o deslocamento refere-se a medida vertical relativa à diferença entre o deslocamento do aço e da placa de OSB. As curvas azuis referem-se aos dois resultados experimentais, enquanto as linhas em cor verde referem-se aos resultados do modelo de elemento finito, respectivamente.

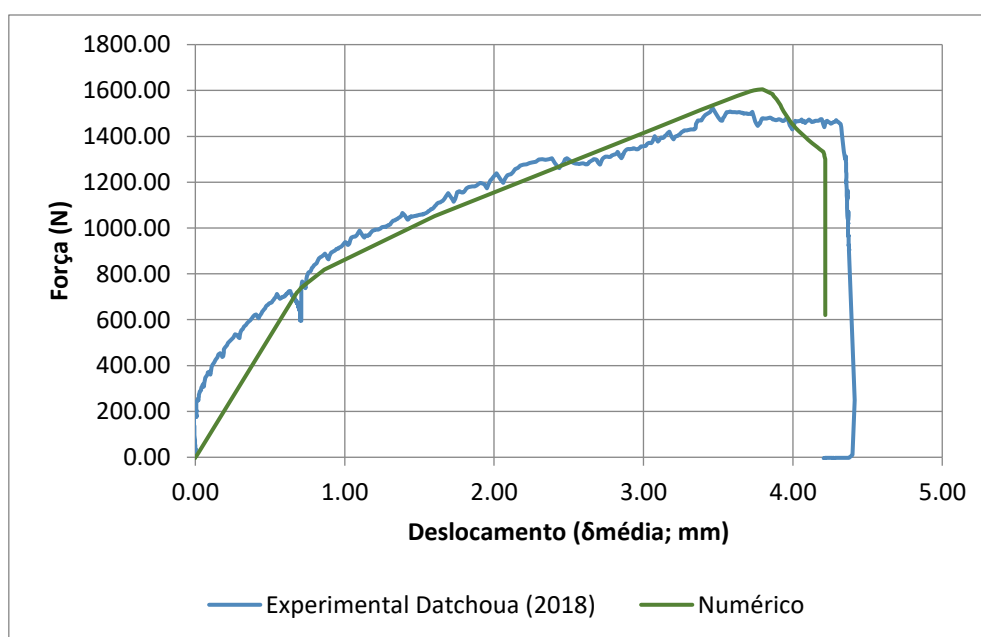


Figura 4.1 - Resultados do modelo numérico com dimensões reduzidas em comparação com os resultados experimentais (CP2).

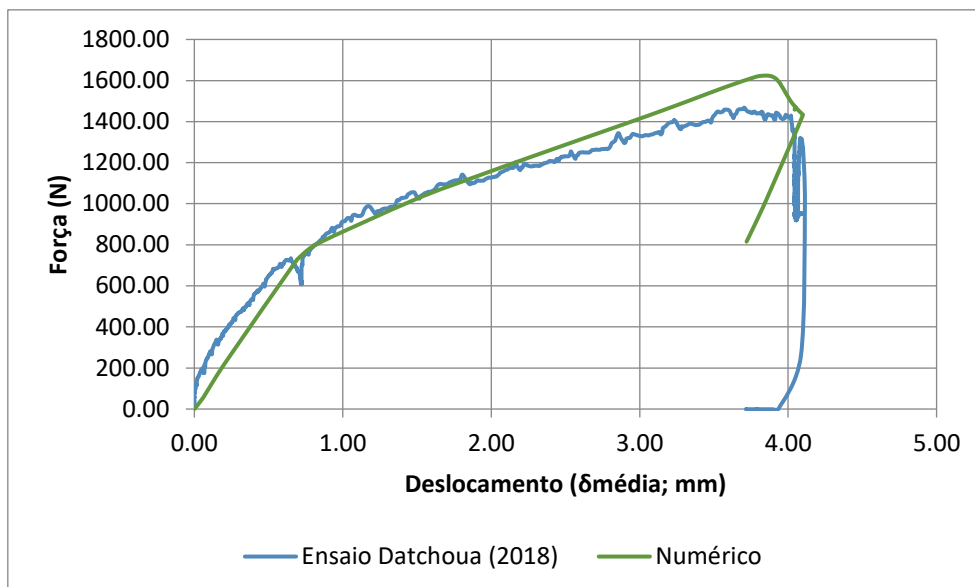


Figura 4.2 - Resultados do modelo numérico com dimensões reduzidas em comparação com os resultados experimentais (CP3).

Os mecanismos de falha dos modelos numéricos condizem com os resultados obtidos experimentalmente, tendo sido observado por Datchoua (2018) o afundamento das cabeças dos parafusos (*pull-over*) e a rotação dos mesmos. Ambos os comportamentos experimentais podem também ser observados nos resultados numéricos pela concentração de tensão na região dos parafusos, nos resultados numéricos, presente nas Figs. 4.3 e 4.4. Em ambas figuras a primeira imagem é relativa às tensões quando uma maior escala é fixada para tornar possível a análise da sua distribuição no material aço, enquanto que na segunda imagem uma menor escala foi fixada, a fim de observar sua distribuição nas placas de OSB.

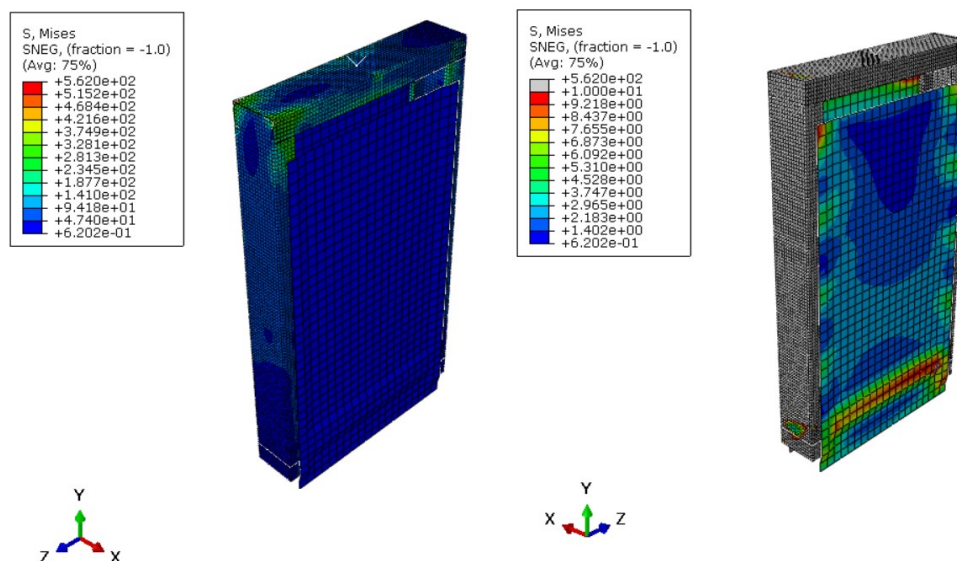


Figura 4.3 - Tensões resultantes no modelo numérico do corpo de prova com dimensões reduzidas (CP2).

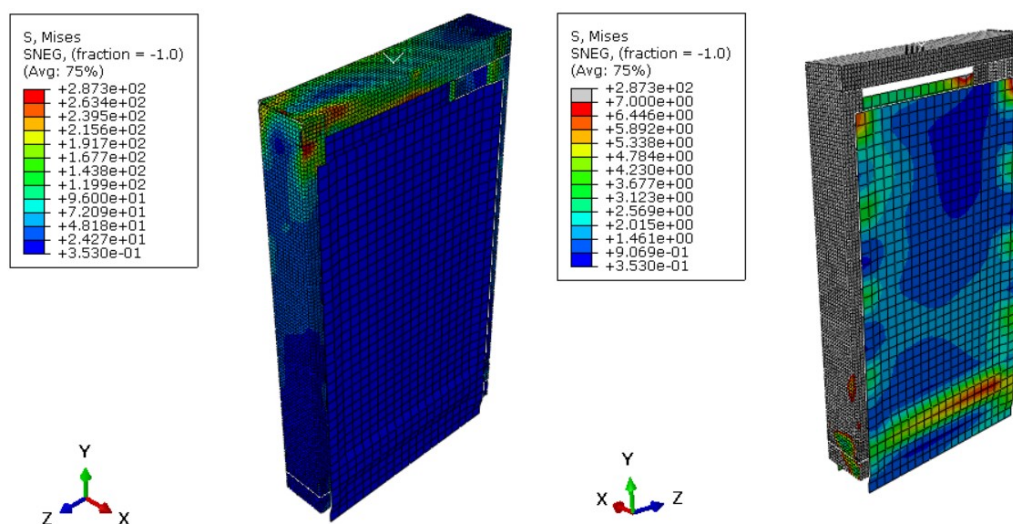


Figura 4.4 - Tensões resultantes no modelo numérico do corpo de prova com dimensões reduzidas (CP3).

## 4.2 Validação do modelo numérico principal

Uma análise acerca da influência da localização das ligações, bem como do espaçamento entre os parafusos foi realizada utilizando-se os gráficos obtidos no estudo de Datchoua (2018). As Figs. 4.5 e 4.6 apresentam as simplificações realizadas (curva azul e na cor laranja) a partir das curvas com valores médios geradas pelos ensaios do autor (curvas na cor rosa). Observa-se na Fig. 4.5 os gráficos referentes às ligações externas (nas bordas das placas de OSB) espaçadas em 150 mm e na Fig. 4.6 referentes às ligações internas das placas de OSB, espaçadas em 300

mm, ambas para placas de OSB com espessura de 9,5 mm e chapas de aço com espessura de 0,95 mm. Sendo assim, a Fig. 4.7 apresenta os gráficos dos comportamentos adotados para o modelo numérico principal, das ligações externas e internas.

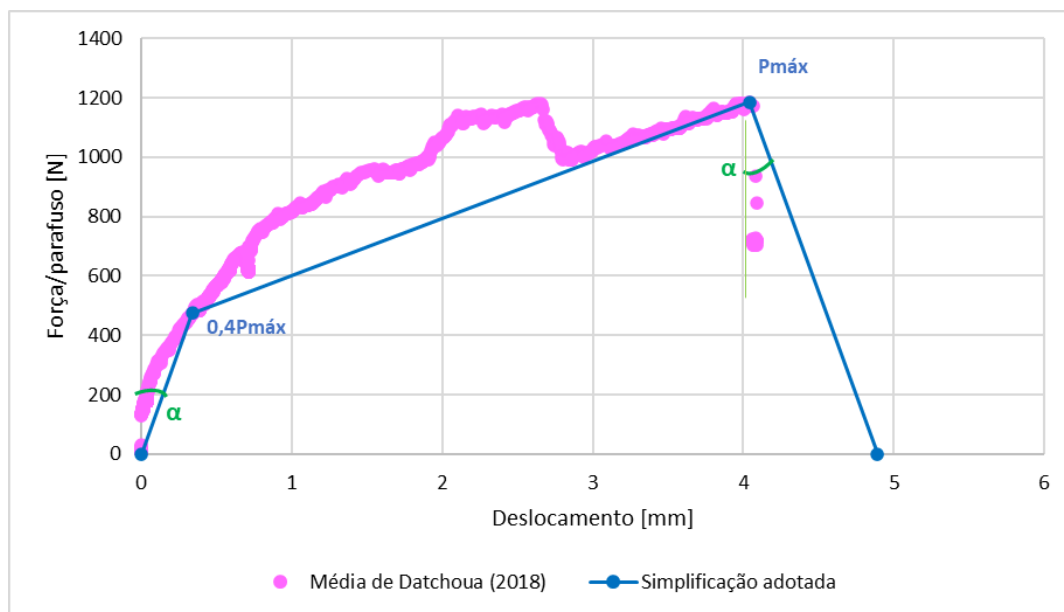


Figura 4.5 - Comportamento real e simplificado da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações externas espaçadas em 150 mm e espessura das chapas de aço de 0,95 mm e das placas de OSB de 9,5 mm.

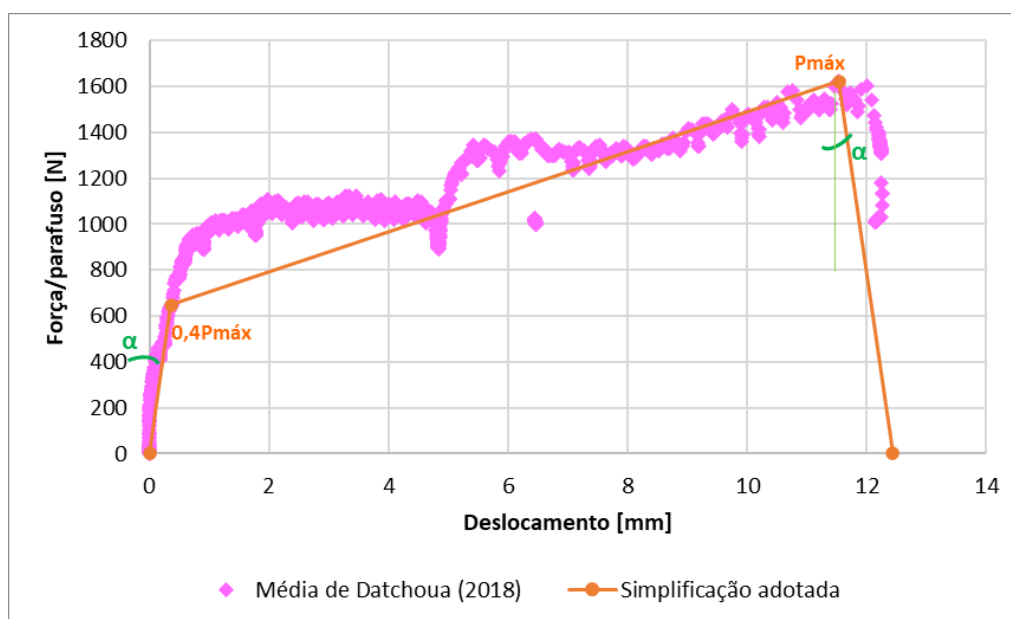


Figura 4.6 - Comportamento real e simplificado da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações internas espaçadas em 300 mm e espessura das chapas de aço de 0,95 mm e OSB de 9,5 mm.

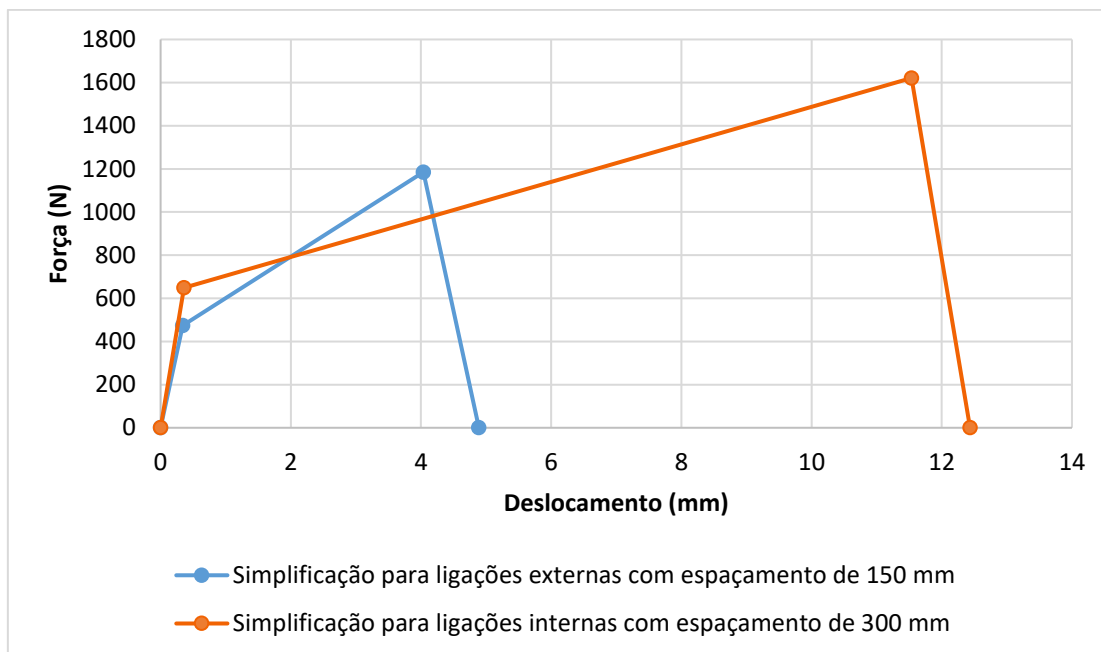


Figura 4.7 - Simplificação do comportamento da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações internas e externas, espessura das chapas de aço de 0,95 mm e de placas de OSB de 9,5 mm.

Os resultados numéricos do modelo principal em termos das falhas, resposta força *versus* deslocamento e deformações, foram comparados com os resultados experimentais de Faria (2023) e as equivalências existentes evidenciam a validação do modelo numérico.

Quanto à resposta força *versus* deslocamento lateral, ilustrada na Fig. 4.9, observa-se que o modelo numérico representa com precisão o comportamento, tanto na fase elástica, quanto na fase plástica. A Fig. 4.10 define os principais pontos de interesse da curva força *versus* deslocamento para este estudo e a Tab. 3.1 apresenta os valores encontrados para o modelo de validação em comparação ao modelo experimental. O valor da Força de Falha  $P_{f,t}$  foi determinado numericamente, observando os comportamentos deformados. O valor da Força de escoamento  $P_{y,t}$ , foi determinado conforme Zomorodian *et al.* (2011), utilizando a simplificação apresentada na Fig. 4.8 e seguindo os passos adiante:

- Considera-se a reta tangente a curva onde o valor da força é  $2/3$  da força máxima  $P_{m,t}$ ;
- Considera-se a reta referente à força máxima  $P_{m,t}$ ;
- Considera-se a reta referente a  $5/6$  da força máxima  $P_{m,t}$  (valor equivale ao ponto médio entre força máxima e  $2/3$  da força máxima);

- d) Determina-se o valor referente a interseção entre a inclinação do ponto de força máxima e a reta de  $5/6$  da força máxima. Nessa interseção, o ponto mais abaixo que corta a curva de força *versus* deslocamento equivale ao ponto de escoamento;
- e) Determina-se as forças e deslocamentos de escoamento  $\Delta_{y,t}$ .

O processo acima foi efetuado utilizando ferramenta Python. Essa ferramenta é importante, pois, para a implementação do algoritmo acima, é necessário realizar interpolação dos valores numéricos coletados. Sem a interpolação, não é possível acessar os valores exatos do algoritmo, pois estão sendo utilizados resultados numéricos que representam um conjunto finito e discreto de pontos. Com a interpolação, é possível contornar essa situação ao transformar os dados em um conjunto infinito e contínuo de pontos.

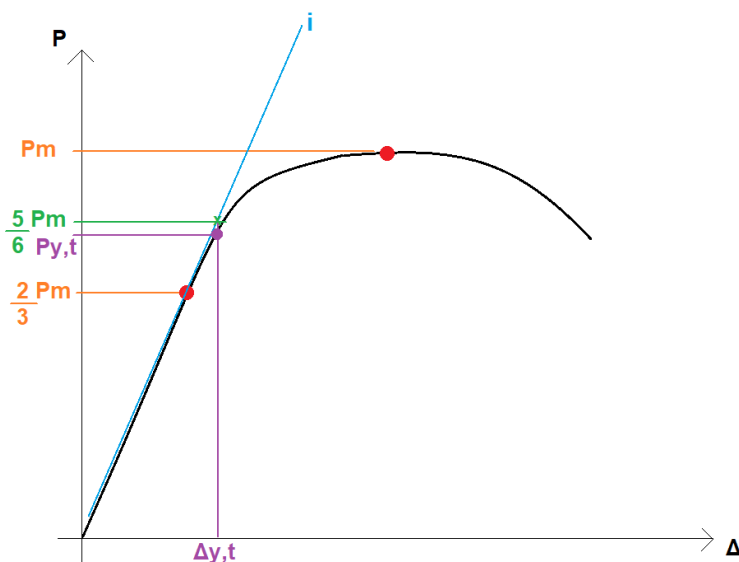


Figura 4.8 – Determinação do ponto de escoamento utilizando gráfico de força *versus* deslocamento.

Ademais, o fator de ductilidade de deslocamento ( $\mu$ ) foi adotado para avaliar a propriedade de ductilidade das paredes de cisalhamento e foi calculado conforme a Eq. (4.1), de acordo com Wang *et al.* (2019). A rigidez elástica foi determinada por meio da relação entre a Força de Escoamento ( $P_{y,t}$ ) e o respectivo deslocamento ( $\Delta_{y,t}$ ).

$$\mu = \Delta_{f,t} / \Delta_{y,t} \quad (4.1)$$

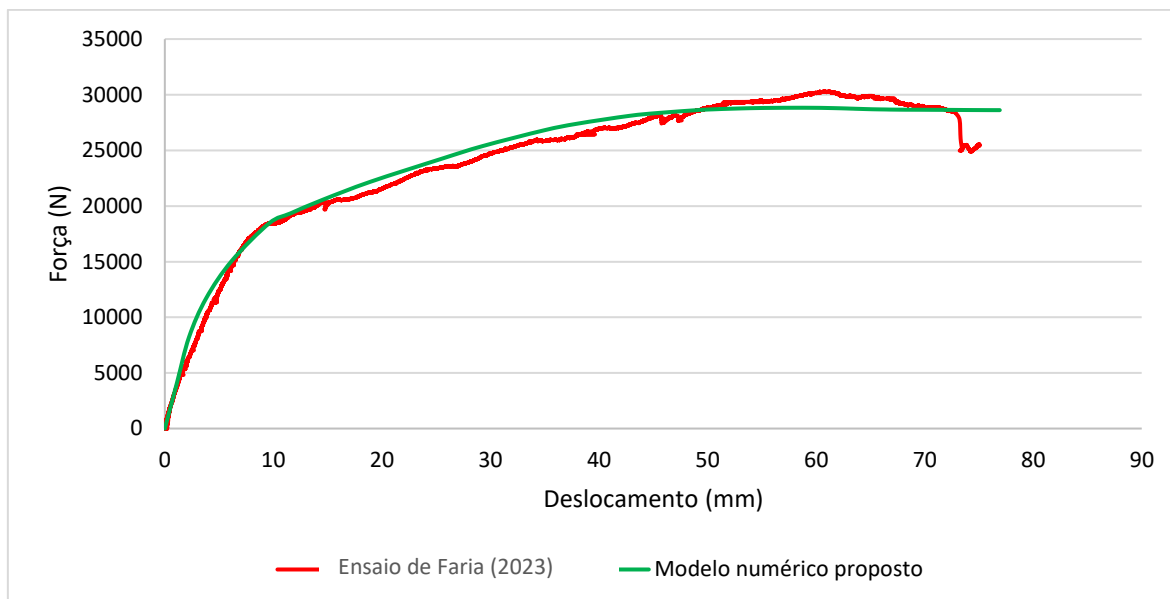


Figura 4.9 - Reposta força *versus* deslocamento lateral do modelo computacional e experimental.

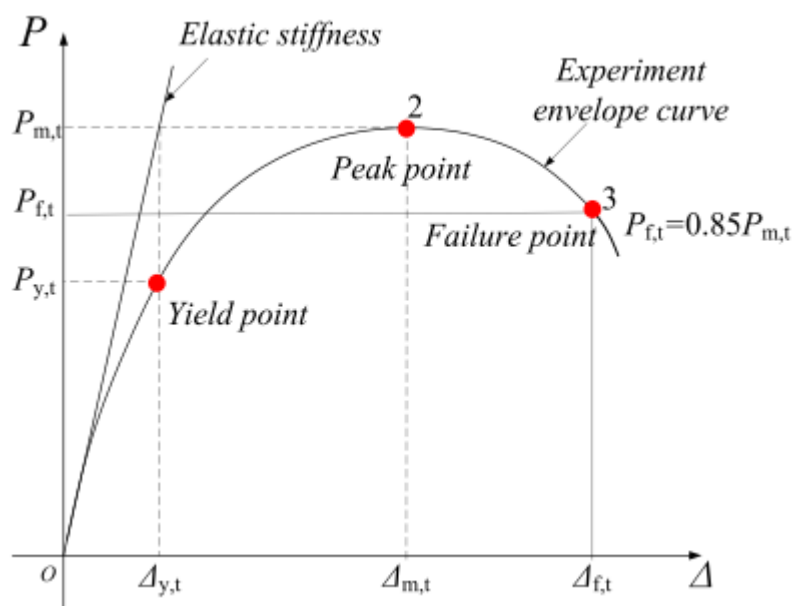


Figura 4.10 – Pontos da curva força *versus* deslocamento de interesse para o estudo.

Fonte: Wang *et al.* (2019).



Tabela 4.1 – Valores de força, deslocamento, fator de ductilidade e rigidez elástica para modelo numérico de validação e modelo experimental.

Fator	Modelo Experimental	Modelo Numérico	Diferença %
Força de escoamento $P_{y,t}$ (N)	23402,21	23707,38	1%
Deslocamento $\Delta_{y,t}$ (mm)	25,20	23,702	-6%
Força máxima $P_{m,t}$ (N)	30300,58	29912,30	-1%
Deslocamento $\Delta_{m,t}$ (mm)	60,80	58,79	-3%
Força de falha $P_{f,t}$ (N)	26151,93	28626,50	9%
Deslocamento $\Delta_{f,t}$ (mm)	73,30	75,24	3%
Fator de Ductilidade ( $\mu$ )	2,91	3,17	9%
Rigidez elástica $k_e$ (N/mm)	928,66	1000,23	8%

Observa-se grande semelhança entre os resultados do modelo numérico de validação e os resultados do modelo experimental, em termos de força de escoamento, força máxima e força de falha, diferindo-se em 1% para as duas primeiras e 9% para a última. Nota-se por meio da análise dos valores que, na fase elástica, o modelo numérico apresentou deslocamentos em geral menores que os do modelo experimental, considerando uma mesma força e, portanto, apresentou maior rigidez elástica. Quanto à fase plástica, o modelo numérico alcançou a falha com força 9% maior que o do modelo experimental, o que explica seu maior fator de ductilidade.

As Figs. 4.11 a 4.14 apresentam comparações entre as deformadas do modelo experimental de Faria (2023) e do modelo numérico desenvolvido. A Fig. 4.11 mostra a ocorrência de flambagem global por torção de um dos montantes da extremidade do painel. A Fig. 4.12 demonstra a deformada da parede de cisalhamento ao final do ensaio. As Figs. 4.13 e 4.14 apresentam os parafusos nos quais ocorreram os primeiros modos de falha de *pull-out* e *pull-over*.

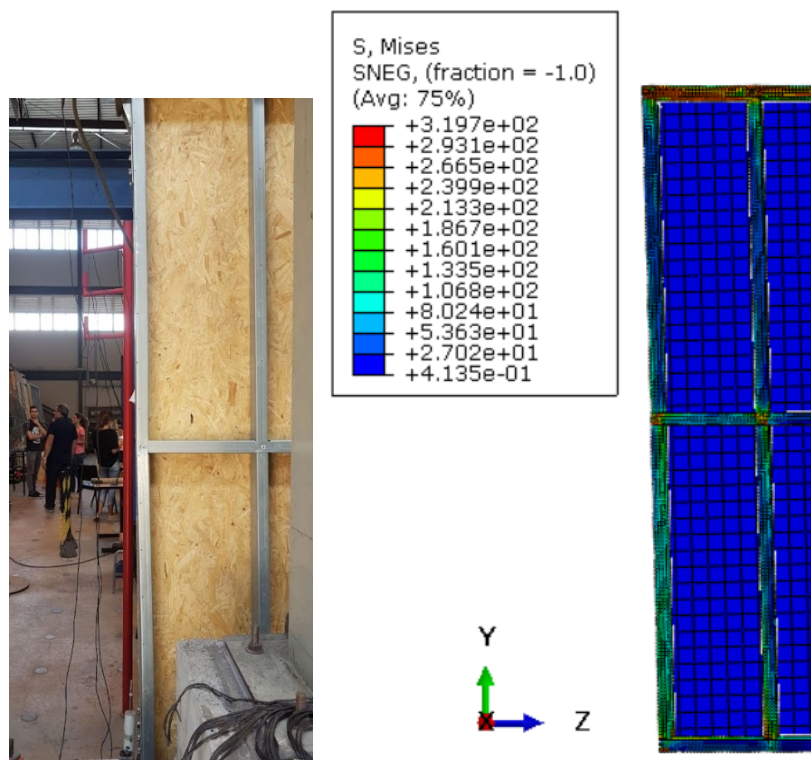


Figura 4.11 - Deformada do modelo experimental e tensões resultantes no modelo numérico.

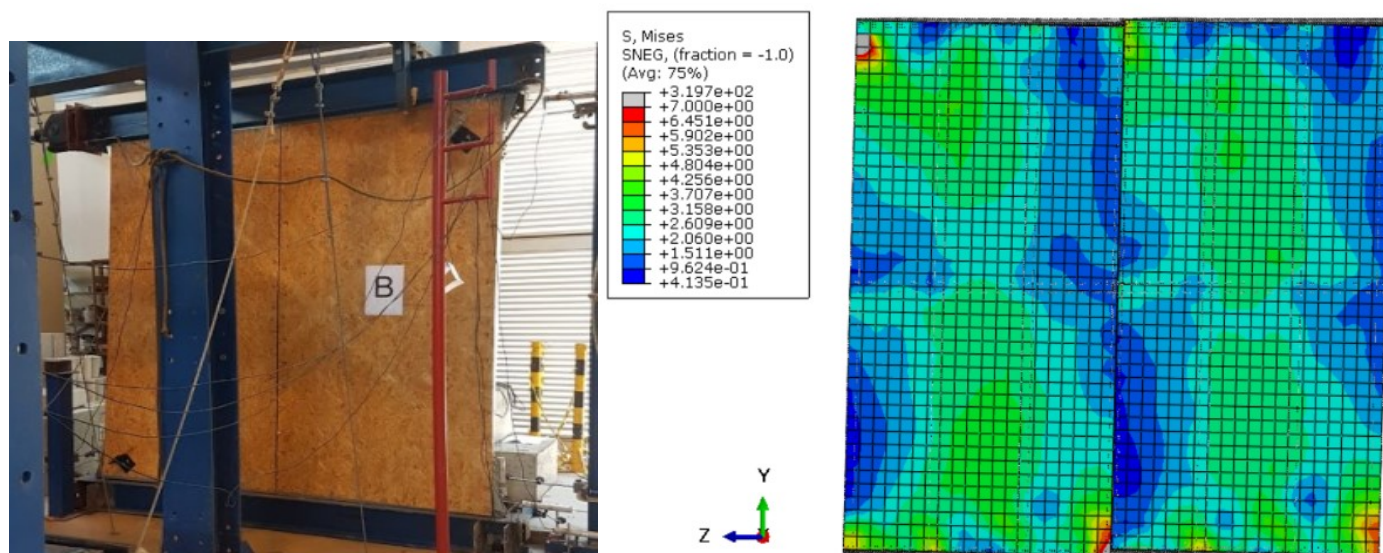


Figura 4.12 - Deformada do modelo experimental e tensões resultantes no modelo numérico.

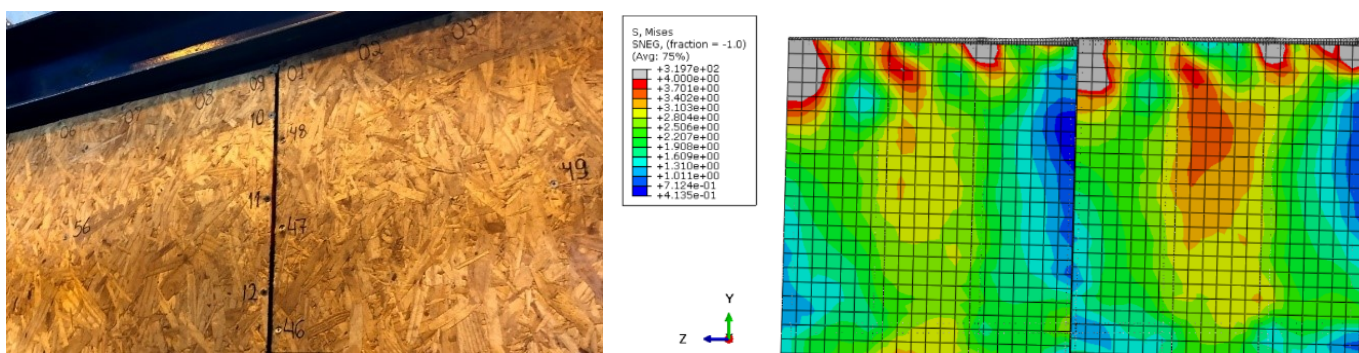


Figura 4.13 - Deformada do modelo experimental e tensões resultantes no modelo numérico.

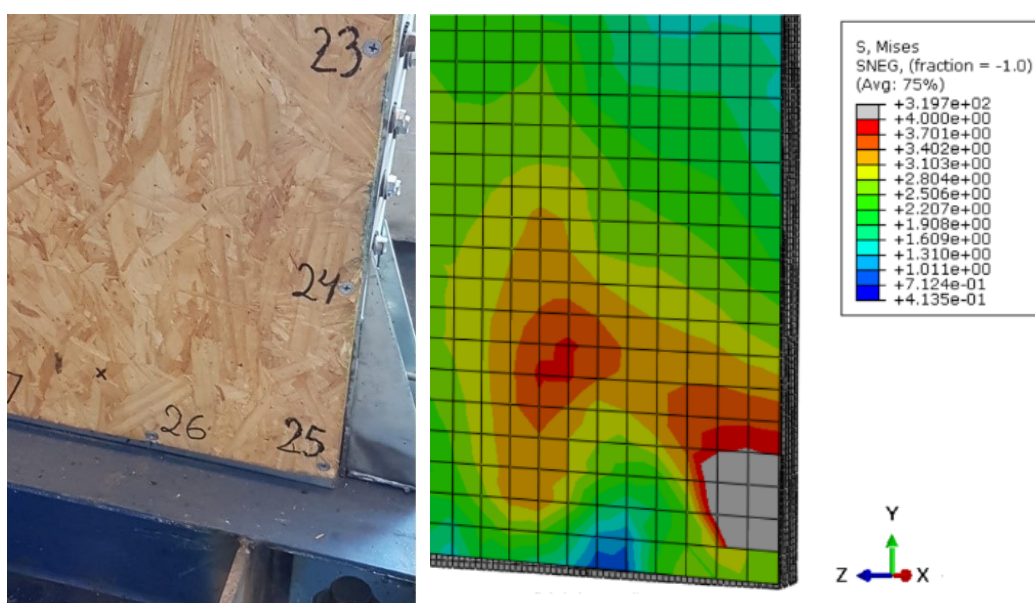


Figura 4.14 - Deformada do modelo experimental e tensões resultantes no modelo numérico.

### 4.3 Estudo paramétrico

Prosseguindo na análise numérica, um estudo paramétrico foi realizado utilizando o *software* ABAQUS (2014) para avaliar os efeitos de cinco parâmetros no desempenho das paredes de cisalhamento: a espessura das chapas de aço, a espessura das placas de OSB, o espaçamento das ligações entre aço e OSB, a utilização de fechamento em ambos os lados por placas de OSB e ausência das placas de OSB. Para tal, investigações paramétricas acerca dessas variações foram conduzidas, em termos de comportamento força *versus* deslocamento, capacidade

resistente e rigidez. Os cinco parâmetros foram comparados com o modelo experimental, utilizado para validação numérica.

A Tab. 3.1 contém as variações estudadas, bem como a nomenclatura utilizada para cada modelo numérico. Para cada novo parâmetro, novas curvas de rigidez das ligações entre perfis de aço e placas de OSB foram reproduzidas, a fim de representar os novos comportamentos, seguindo a metodologia de simplificação já mencionada nesse estudo. Essas simplificações foram implementadas nas curvas das ligações estabelecidas experimentalmente por Datchoua (2018). O autor determinou gráficos de força *versus* deslocamento para diversas características de reticulado metálico: para espessuras de placas de OSB iguais a 9,5 mm e 11,00 mm, para espessuras das chapas de aço iguais a 0,95 mm e 0,80 mm, para espaçamento das ligações entre perfis de aço e placas de OSB de 150 mm e 300 mm e para diferentes localizações dos parafusos, internos e externos (nas bordas das placas de OSB).

#### **4.3.1 Influência da espessura da chapa de aço**

Um modelo com espessura das chapas de aço de 0,80 mm foi reproduzido. Nessa etapa do estudo, o comportamento das ligações entre aço e OSB foi alterado para representar os parâmetros investigados no modelo. Uma análise acerca da influência da localização das ligações, bem como do espaçamento entre parafusos foi realizado utilizando-se os gráficos obtidos no estudo de Datchoua (2018). As Figs. 4.15 e 4.16 apresentam as simplificações realizadas (curva azul e curva na cor laranja) a partir das curvas com valores médios geradas pelos ensaios do autor (curvas na cor rosa). Observa-se na Fig. 4.15 os gráficos referentes às ligações externas espaçadas em 150 mm e na Fig. 4.17 referentes às ligações internas espaçadas em 300 mm, ambas para placas de OSB com espessura de 9,5 mm e chapas de aço com espessura de 0,80 mm.

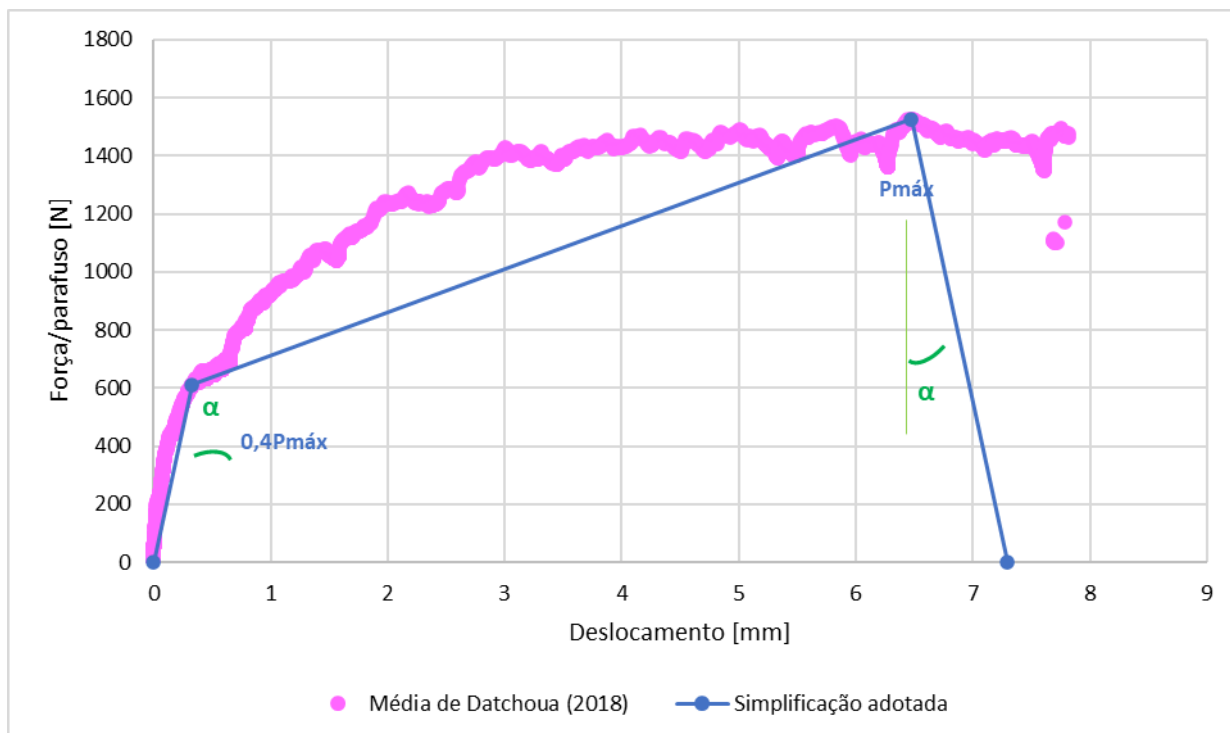


Figura 4.15 - Comportamentos real e simplificado da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações externas espaçadas em 150 mm e espessura das chapas de aço de 0,80 mm.

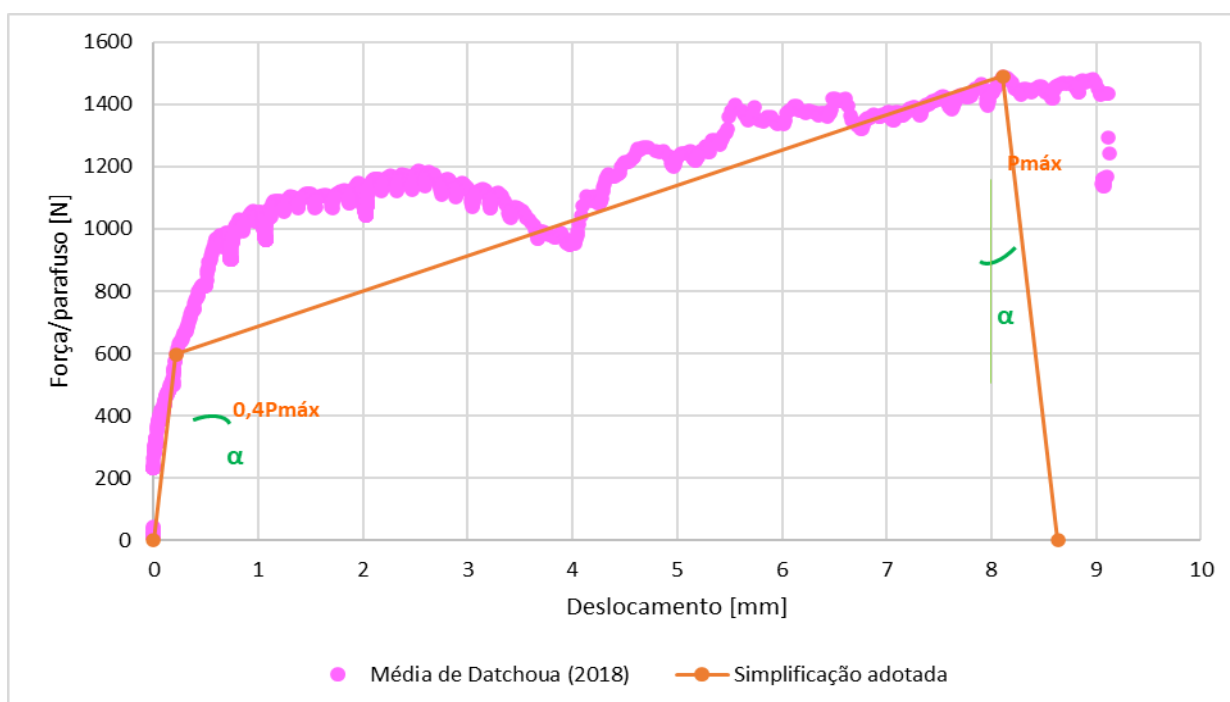


Figura 4.16: Comportamentos real e simplificado da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações internas espaçadas em 300 mm e espessura das chapas de aço de 0,80 mm.

Observa-se que as simplificações geradas para ligações externas e internas apresentam pequena diferença de valores de força e deslocamento, sendo que a maior diferença equivale a 15%. Dessa forma, para fins de simplificação da análise numérica, foi introduzida no modelo do ABAQUS (2014), a curva com valores médios (Fig. 4.17) para todas as ligações entre placas de OSB e chapas de aço.

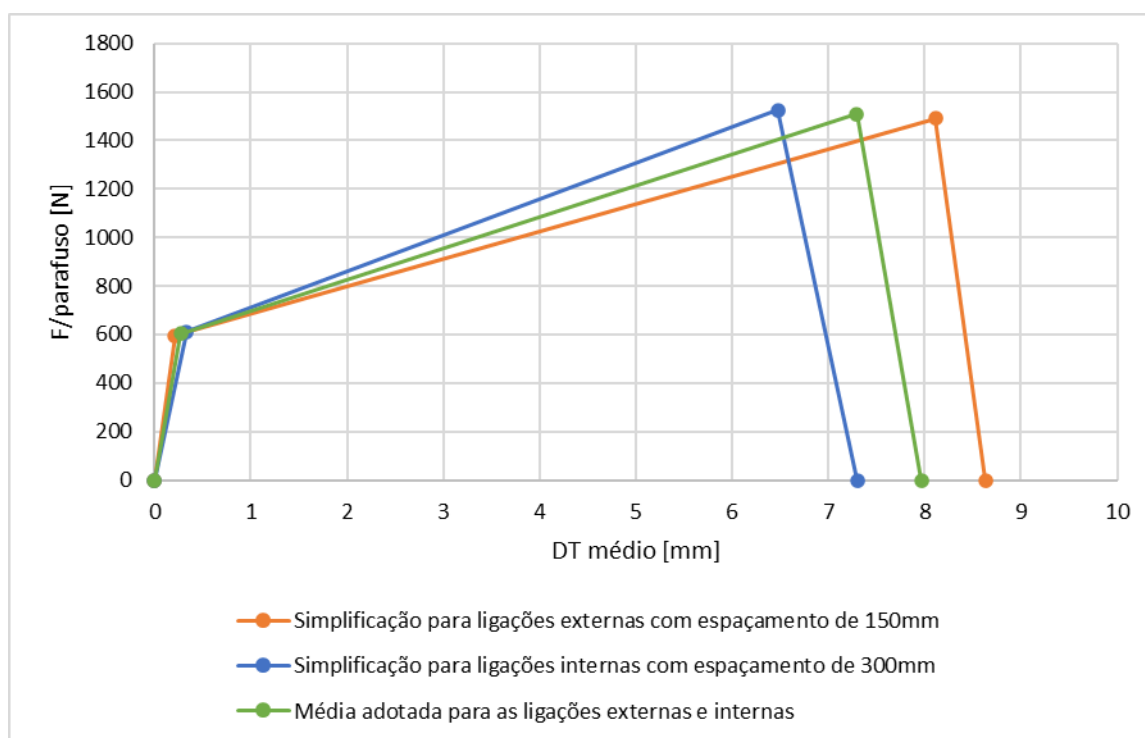


Figura 4.17: Simplificação do comportamento da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações externas e internas e espessura das chapas de aço de 0,80 mm.

A Fig. 4.18 apresenta o modelo paramétrico proposto e a Fig. 4.19 mostra a comparação entre os resultados do modelo principal de espessura 0,95 mm e do modelo paramétrico. Observa-se pela Tab. 3.2 que quando a espessura das chapas de aço diminui de 0,95 mm para 0,80 mm, a força de escoamento decresce em 14%, a força máxima em 13% e a força de falha apresenta pequeno acréscimo de 1%. Nota-se ainda um aumento de 97% do fator de ductilidade  $\mu$  e 52% da rigidez na fase elástica.

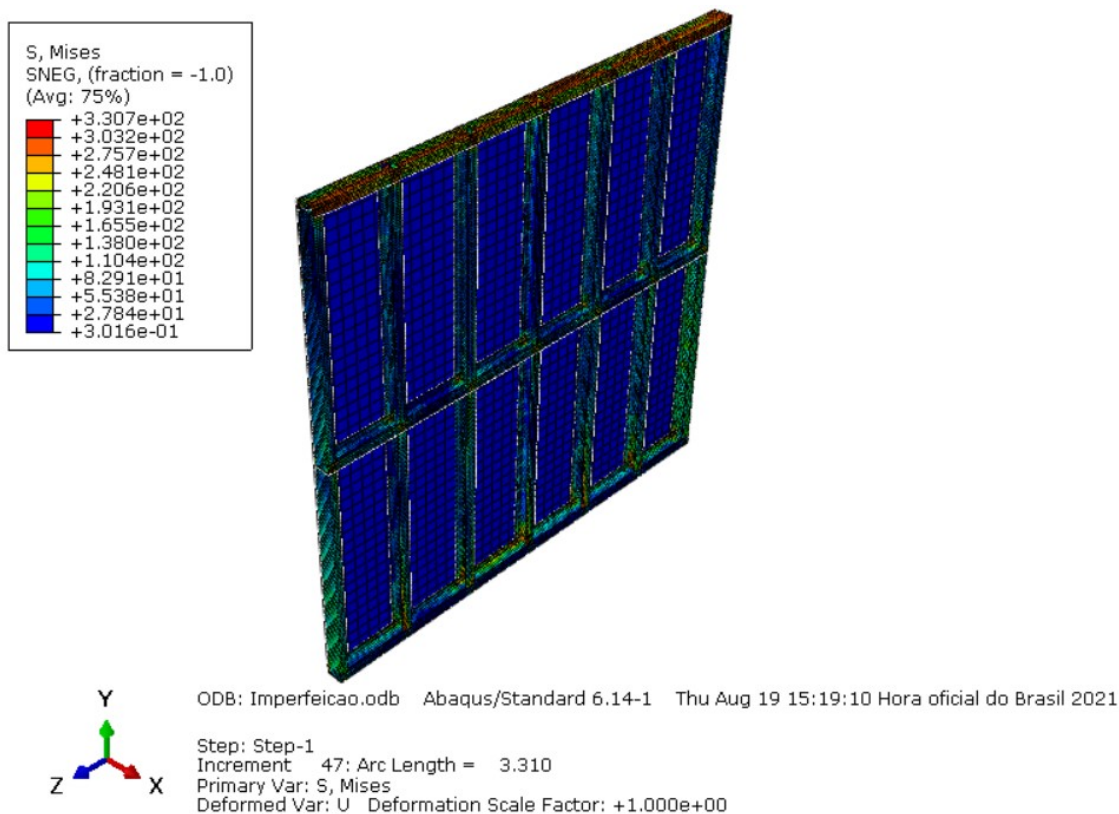


Figura 4.18 - Deformada do modelo paramétrico com espessura do aço igual a 0,80 mm.

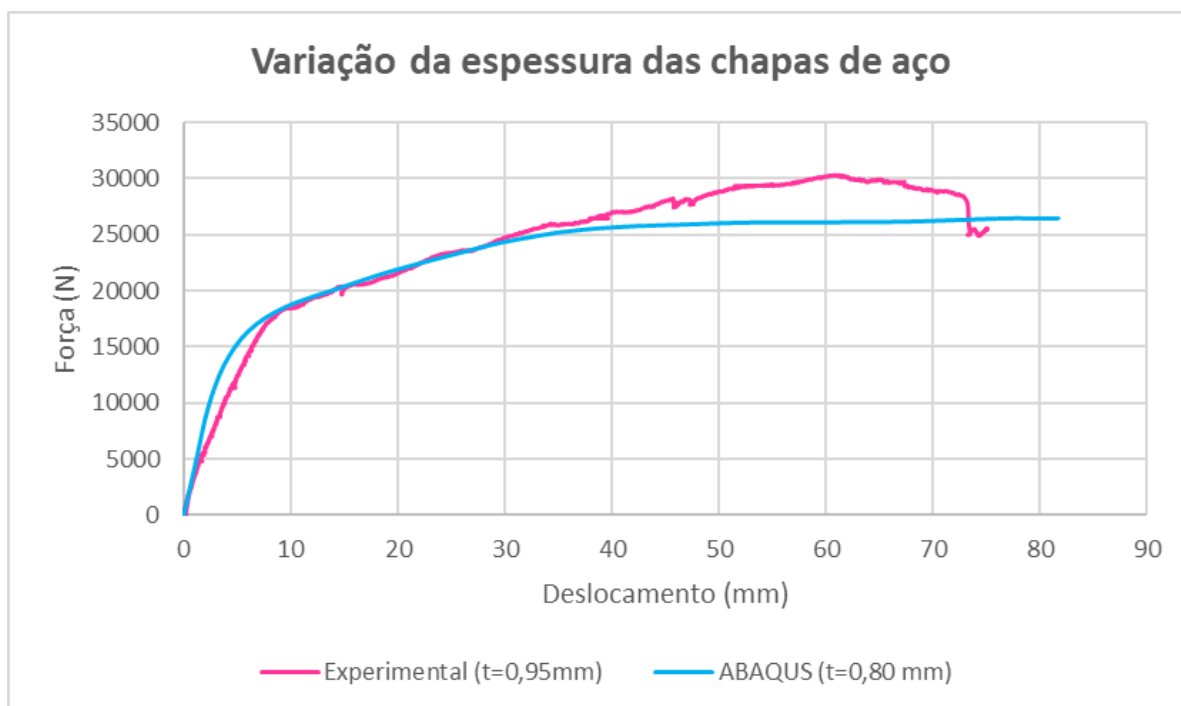


Figura 4.19 - Influência do parâmetro espessura das chapas de aço.

Tabela 4.2 – Valores de força, deslocamento, fator de ductilidade e rigidez elástica para modelo com espessura da chapa de aço igual a 0,80 mm e modelo experimental com espessura igual a 0,95 mm.

<b>Fator</b>	<b>Modelo Experimental (<math>t_{\text{aço}}=0,95</math> mm)</b>	<b>Modelo Paramétrico (<math>t_{\text{aço}}=0,80</math> mm)</b>	<b>Diferença %</b>
Força de escoamento $P_{y,t}$ (N)	23402,21	20154,61	-14%
Deslocamento $\Delta_{y,t}$ (mm)	25,20	14,25	-43%
Força máxima $P_{m,t}$ (N)	30300,58	26451,39	-13%
Deslocamento $\Delta_{m,t}$ (mm)	60,80	77,81	28%
Força de falha $P_{f,t}$ (N)	26151,93	26451,39	1%
Deslocamento $\Delta_{f,t}$ (mm)	73,30	81,60	11%
Fator de Ductilidade ( $\mu$ )	2,91	5,73	97%
Rigidez elástica $k_e$ (N/mm)	928,66	1414,86	52%

### 4.3.2 Influência da espessura da placa de OSB

Um modelo com espessura das placas de OSB de 11,1 mm foi reproduzido. Nessa etapa do estudo, o comportamento das ligações entre aço e OSB foi alterado para representar os parâmetros investigados no estudo. Uma análise acerca da influência da localização das ligações entre placas de OSB e perfis de aço, bem como do espaçamento entre os parafusos foi realizada utilizando-se os gráficos obtidos no estudo de Datchoua (2018). As Figs. 4.20 e 4.21 apresentam as simplificações realizadas (curva azul e curva na cor laranja) a partir das curvas com valores médios geradas pelos ensaios do autor (curvas na cor rosa). Observa-se na Fig. 4.20 os gráficos referentes às ligações externas espaçadas em 150 mm e na Figura 4.20 referentes às ligações internas espaçadas em 300 mm, ambas para placas de OSB com espessura de 11,1 mm e chapas de aço com espessura de 0,95 mm. Sendo assim, a Fig. 4.22 apresenta os gráficos dos comportamentos adotados para o modelo paramétrico em questão, das ligações externas e internas.



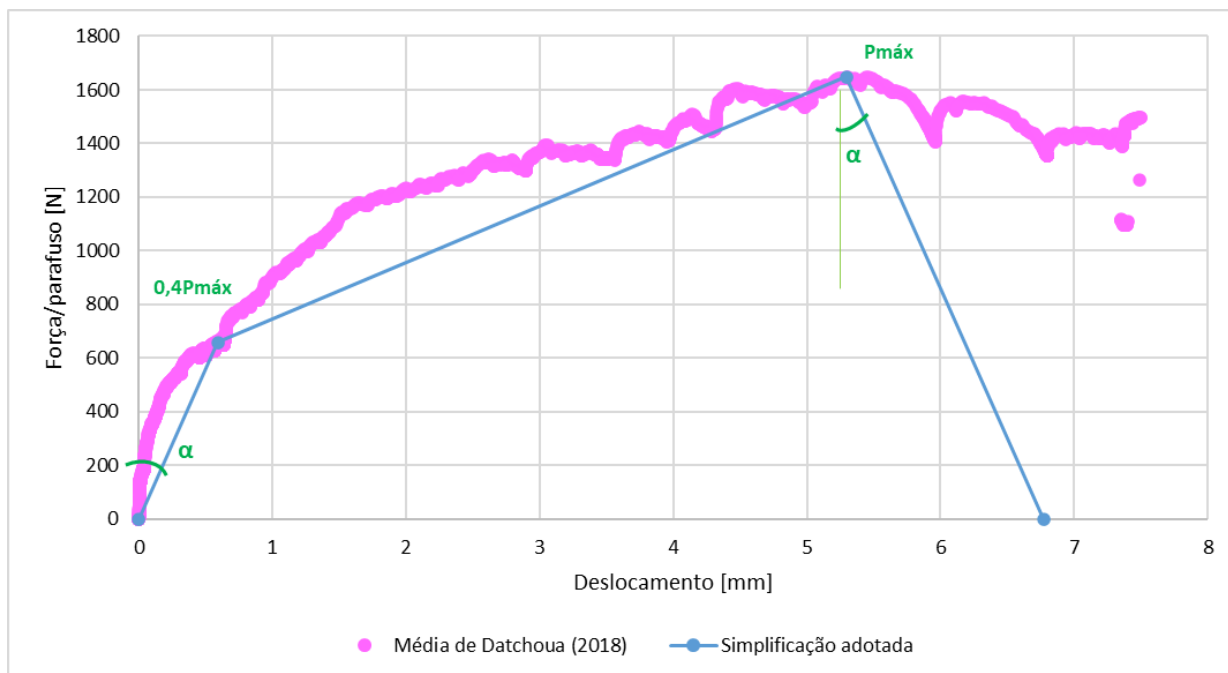


Figura 4.20 - Comportamentos real e simplificado da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações externas espaçadas em 150 mm e espessura das placas de OSB de 11,1 mm.

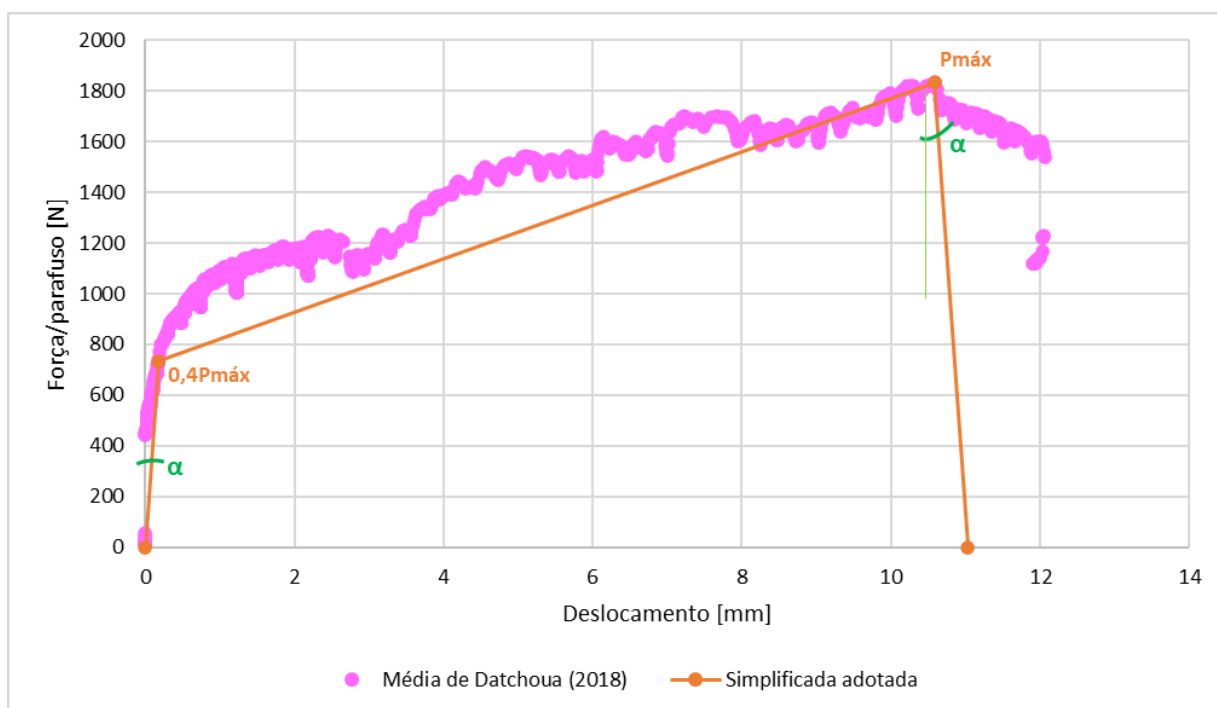


Figura 4.21 - Comportamentos real e simplificado da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações internas espaçadas de 300 mm e espessura das placas de OSB de 11,1 mm.

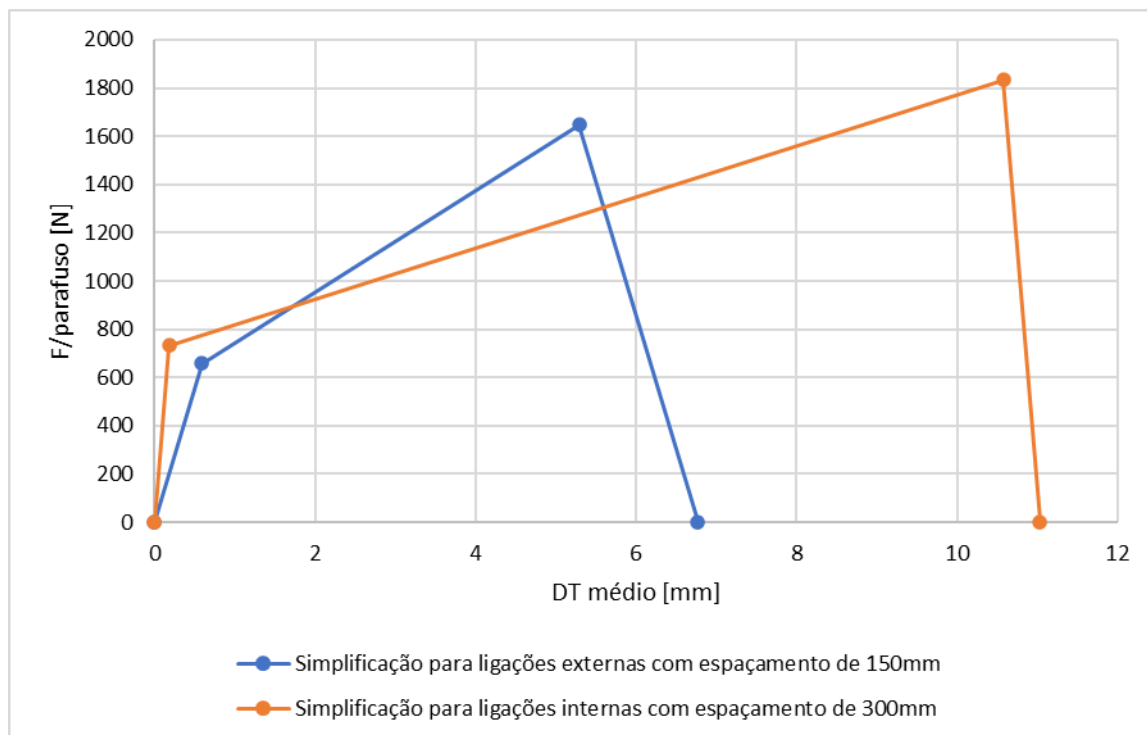


Figura 4.22 - Simplificação do comportamento da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações internas e externas e espessura das placas de OSB de 11,1 mm.

A Fig. 4.23 apresenta a deformada do modelo paramétrico proposto e a Fig. 4.24 mostra a comparação entre os resultados do modelo principal com placas de espessura 9,50 mm e modelo paramétrico com placas de espessura 11,1 mm.

Observa-se pela Tab. 3.3 que quando a espessura das placas de OSB aumenta de 9,5 mm para 11,1 mm, a força de escoamento não sofre grandes alterações, enquanto a força máxima apresentou pequena diminuição de 5% e a força de falha um acréscimo de 9%. Nota-se ainda um aumento de 27% do fator de ductilidade  $\mu$  e de 28% da rigidez na fase elástica.

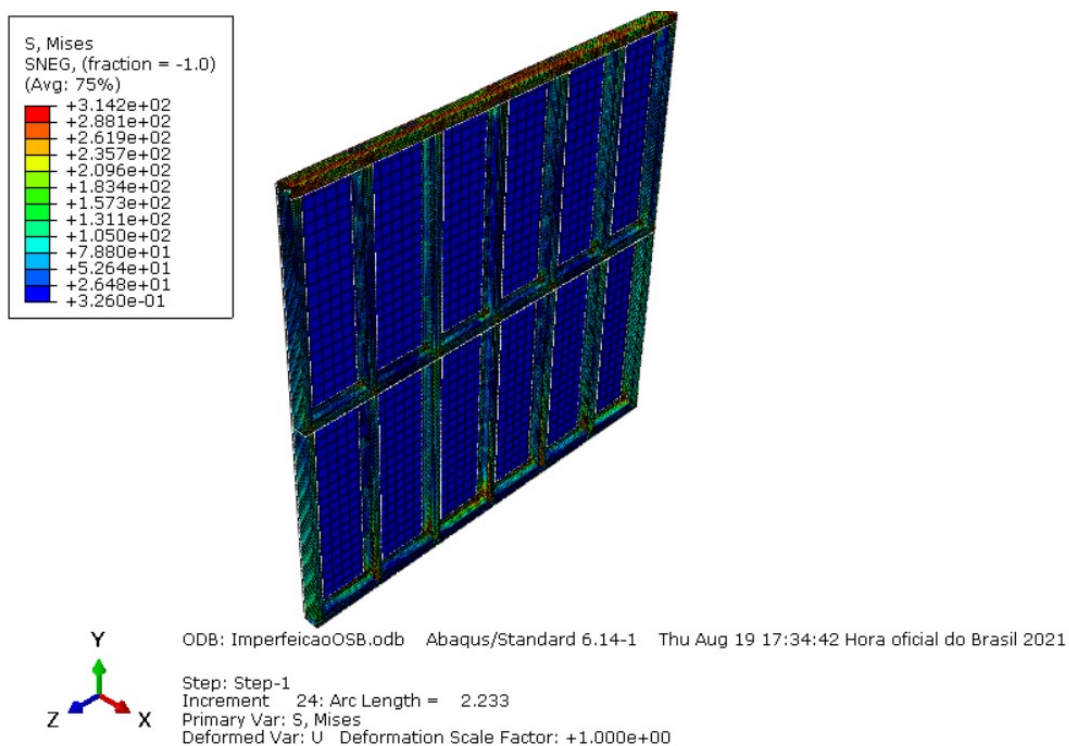


Figura 4.23 - Deformada do modelo paramétrico com espessura das placas de OSB igual a 11,10 mm.

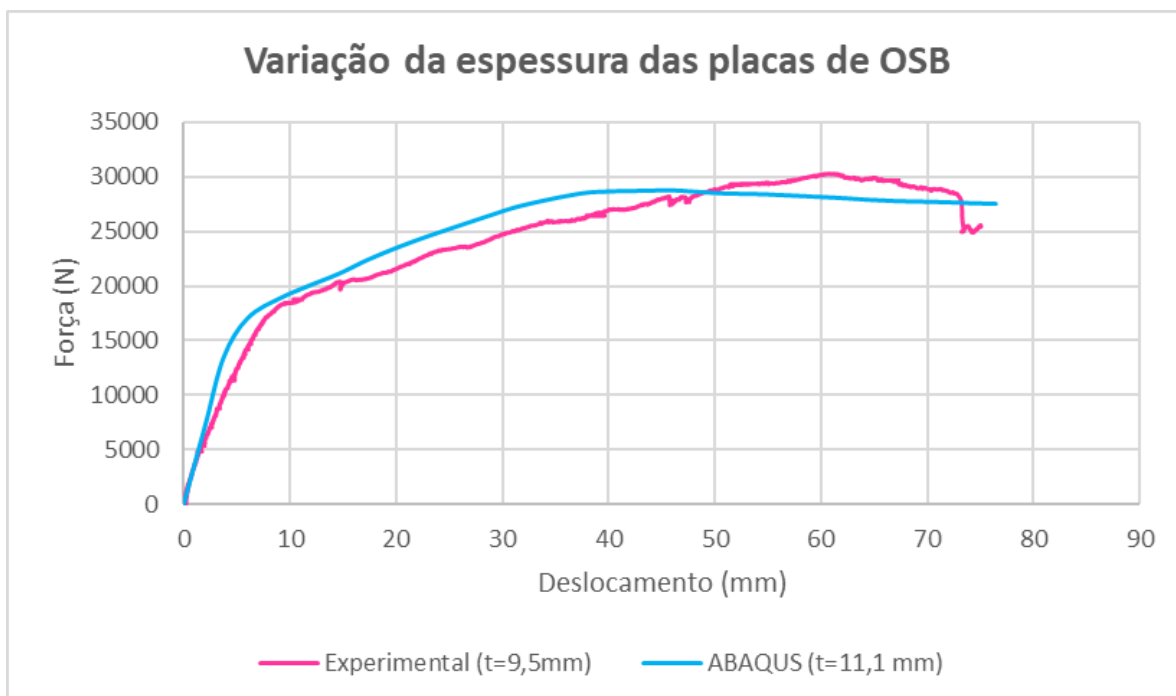


Figura 4.24 - Influência do parâmetro espessura das placas de OSB.

Tabela 4.3 – Valores de força, deslocamento, fator de ductilidade e rigidez elástica para modelo com espessura da placa de OSB igual a 11,1 mm e modelo experimental com espessura igual a 9,5 mm.

Fator	Modelo Experimental ( $t_{OSB}=9,5$ mm)	Modelo Paramétrico ( $t_{OSB}=11,1$ mm)	Diferença %
Força de escoamento $P_{y,t}$ (N)	23402,21	23330,50	0%
Deslocamento $\Delta_{y,t}$ (mm)	25,20	19,57	-22%
Força máxima $P_{m,t}$ (N)	30300,58	28759,90	-5%
Deslocamento $\Delta_{m,t}$ (mm)	60,80	46,12	-24%
Força de falha $P_{f,t}$ (N)	26151,93	28521,00	9%
Deslocamento $\Delta_{f,t}$ (mm)	73,30	72,10	-2%
Fator de Ductilidade ( $\mu$ )	2,91	3,68	27%
Rigidez elástica $k_e$ (N/mm)	928,66	1192,28	28%

### 4.3.3 Influência da quantidade de placas de OSB

O fechamento em ambos os lados com placas de OSB é realizado em casos especiais. O estudo da influência desse parâmetro objetivou avaliar a efetividade dessa forma de utilização, em termos de resistência lateral. Sendo assim, o modelo paramétrico com quatro placas de OSB (duas em cada lado da parede de cisalhamento, espaçadas entre si) foi testado, com a mesma configuração de ligação entre chapas de aço e placas de OSB utilizada no modelo principal de validação, apresentada na Fig. 4.7.

A Fig. 4.25 apresenta o modelo paramétrico proposto e a Fig. 4.26 mostra a comparação entre modelo principal de fechamento simples em OSB e modelo paramétrico com fechamento duplo. Observa-se pela Tab. 3.4 que ao se utilizar fechamento duplo por placas de OSB, a força de escoamento aumenta em 62% e a força máxima e de falha em 61% e 87%, respectivamente. Nota-se ainda uma diminuição de 46% do fator de ductilidade  $\mu$  e acréscimo de 416% da rigidez na fase elástica.

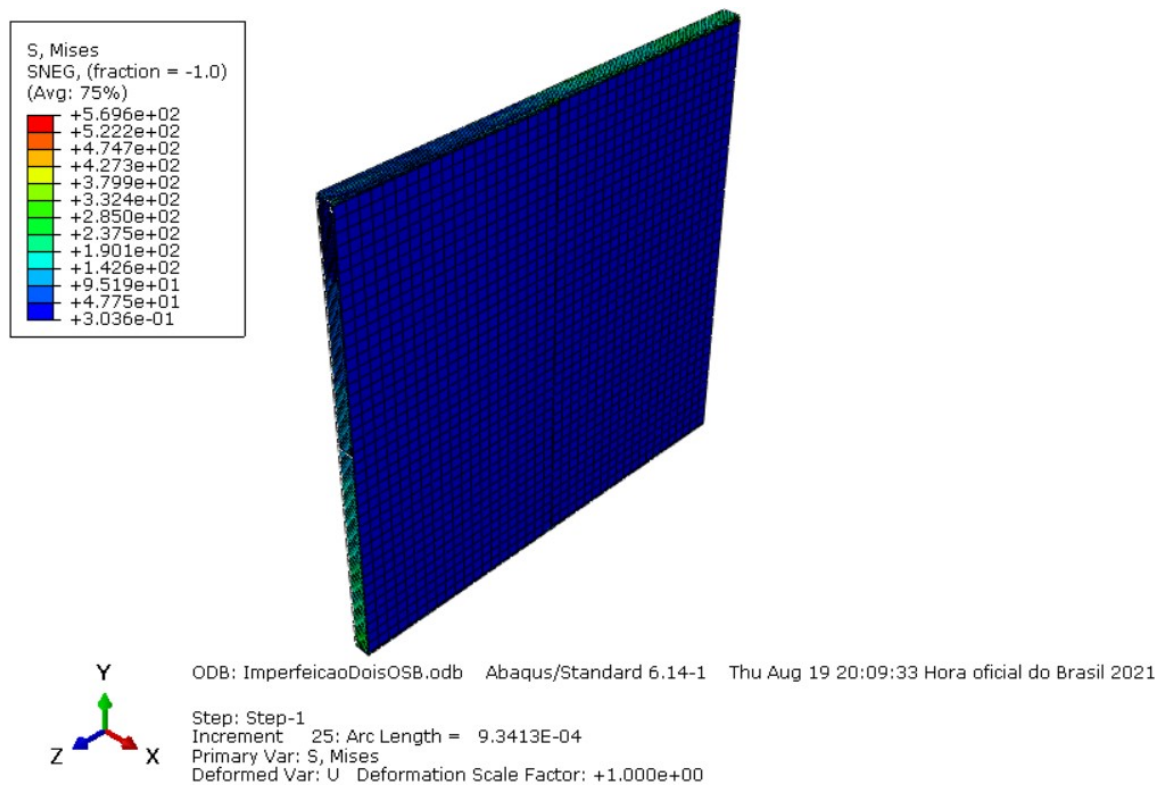


Figura 4.25 - Deformada do modelo paramétrico com fechamento em ambos os lados por placas de OSB.

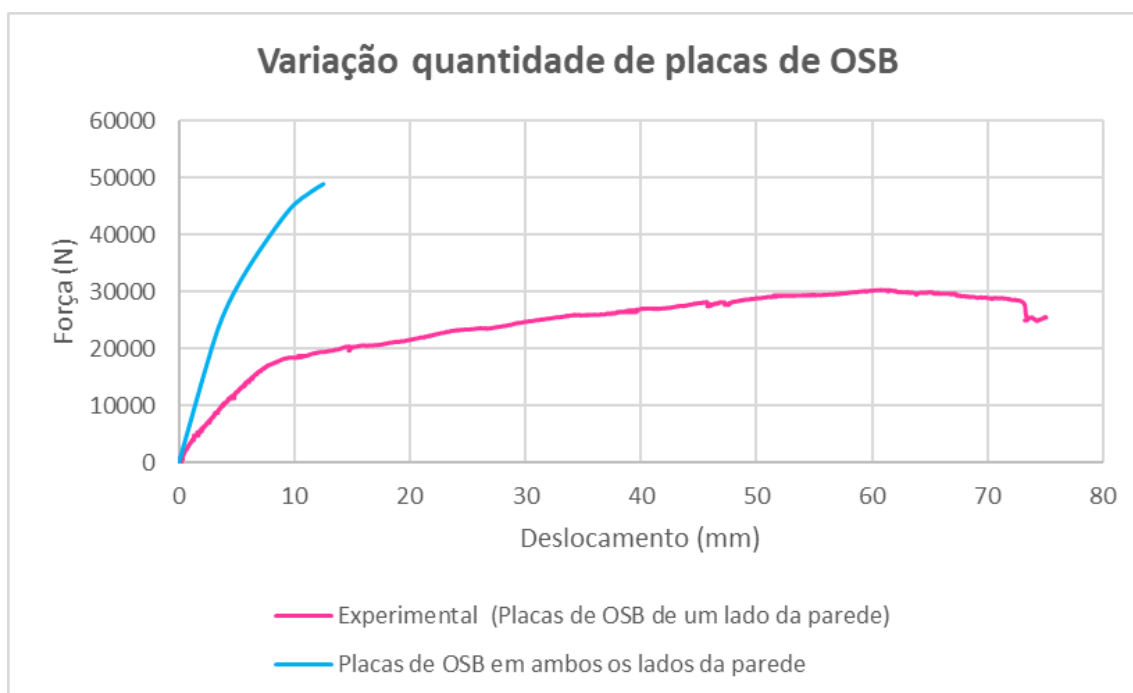


Figura 4.26 - Influência do parâmetro quantidade de placas de OSB.

Tabela 4.4 – Valores de força, deslocamento, fator de ductilidade e rigidez elástica para modelo o com fechamento duplo por OSB e modelo experimental com fechamento simples.

<b>Fator</b>	<b>Modelo Experimental (fechamento simples por OSB)</b>	<b>Modelo Paramétrico (fechamento duplo por OSB)</b>	<b>Diferença %</b>
Força de escoamento $P_{y,t}$ (N)	23402,21	37850,00	62%
Deslocamento $\Delta_{y,t}$ (mm)	25,20	7,90	-69%
Força máxima $P_{m,t}$ (N)	30300,58	48860,70	61%
Deslocamento $\Delta_{m,t}$ (mm)	60,80	12,52	-79%
Força de falha $P_{f,t}$ (N)	26151,93	48849,10	87%
Deslocamento $\Delta_{f,t}$ (mm)	73,30	12,50	-83%
Fator de Ductilidade ( $\mu$ )	2,91	1,58	-46%
Rigidez elástica $k_c$ (N/mm)	928,66	4791,14	416%

#### 4.3.4 Influência do espaçamento entre ligações aço-OSB

Dois modelos com espaçamentos diferentes entre ligações dos perfis de aço com as placas de OSB foram reproduzidos numericamente. Os modelos paramétricos apresentam ligações nas regiões internas e nos contornos das placas de OSB espaçadas do mesmo valor: um com espaçamento igual a 300 mm e outro com espaçamento igual a 150 mm. Nessa etapa do estudo, o comportamento das ligações entre aço e OSB foi alterado para representar os parâmetros investigados. Uma análise acerca da influência da localização das ligações foi realizada utilizando-se os gráficos obtidos no estudo de Datchoua (2018). As Figs. 4.27 e 4.28 apresentam as simplificações realizadas (curva azul e curva na cor laranja) a partir das curvas com valores médios geradas pelos ensaios do autor (curvas na cor rosa), para o caso do modelo paramétrico com ligações espaçadas em 300 mm.

Observa-se na Fig. 4.27 os gráficos referentes às ligações externas espaçadas de 300 mm e na Fig. 4.28 os gráficos referentes às ligações internas espaçadas em 300 mm. Sendo assim, a Fig. 4.29 apresenta os gráficos dos comportamentos adotados para o modelo paramétrico com ligações internas e externas espaçadas em 300 mm.

O mesmo raciocínio foi utilizado para o modelo paramétrico com ligações nas regiões internas e nos contornos das placas do modelo espaçadas em 150 mm. A Fig. 4.30 apresenta os gráficos adotados para prever o comportamento dessas ligações.

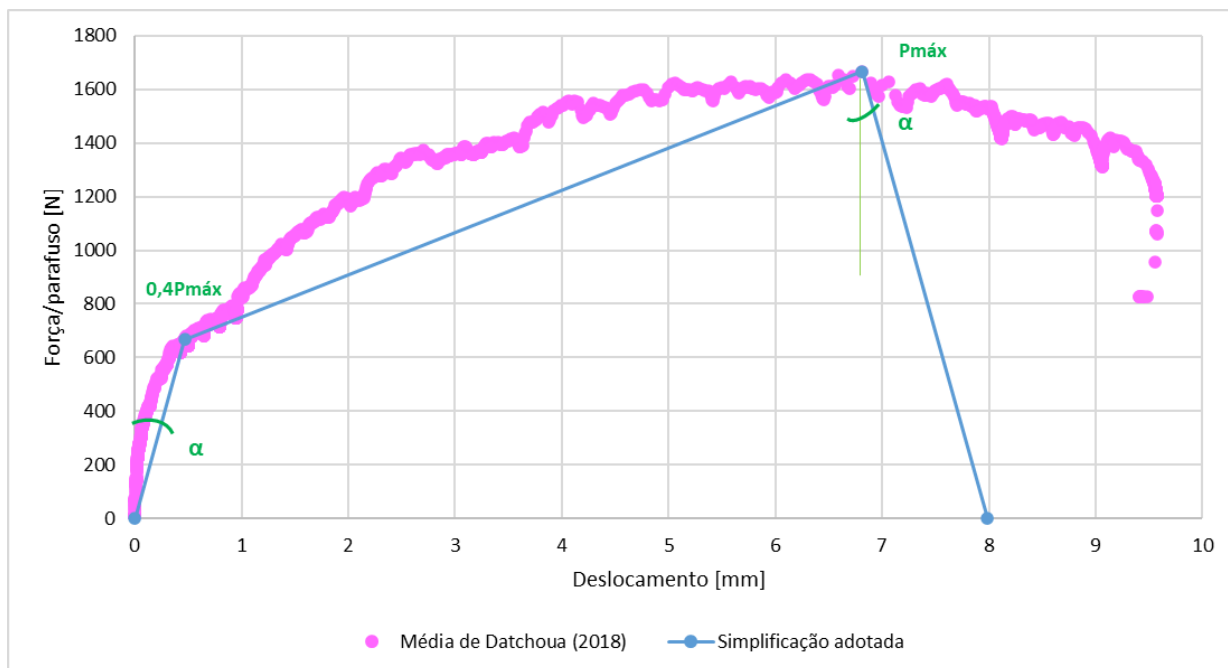


Figura 4.27: Comportamentos real e simplificado da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações externas espaçadas em 300 mm.

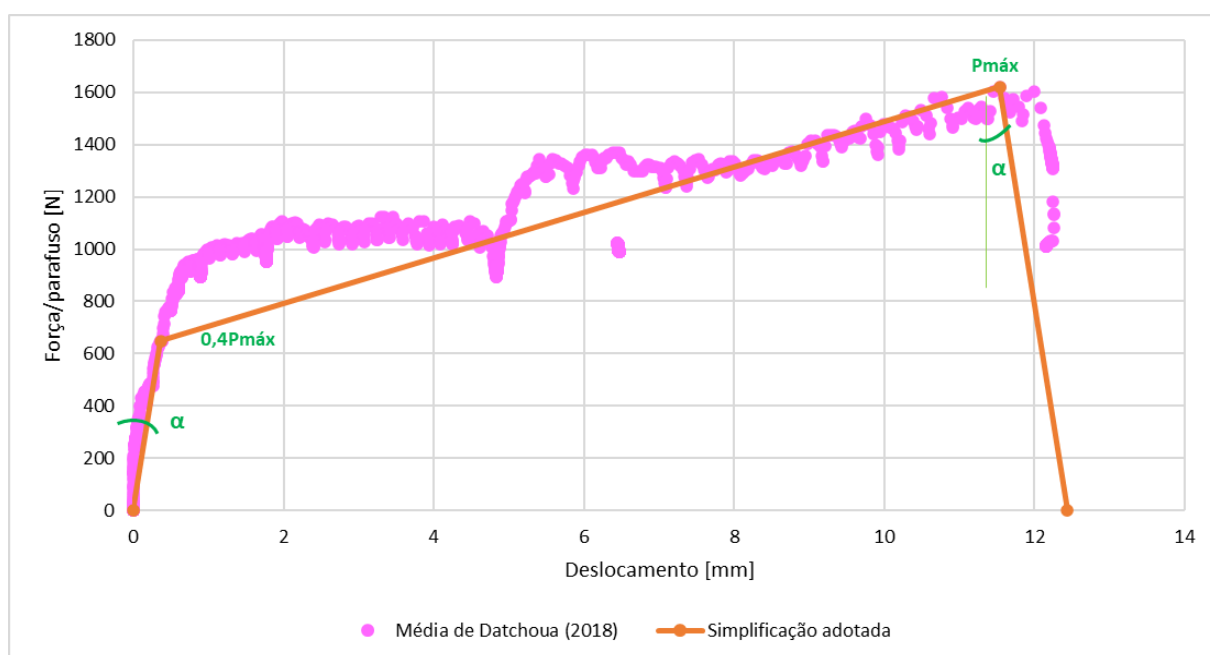


Figura 4.28: Comportamentos real e simplificado da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações internas espaçadas em 300 mm.

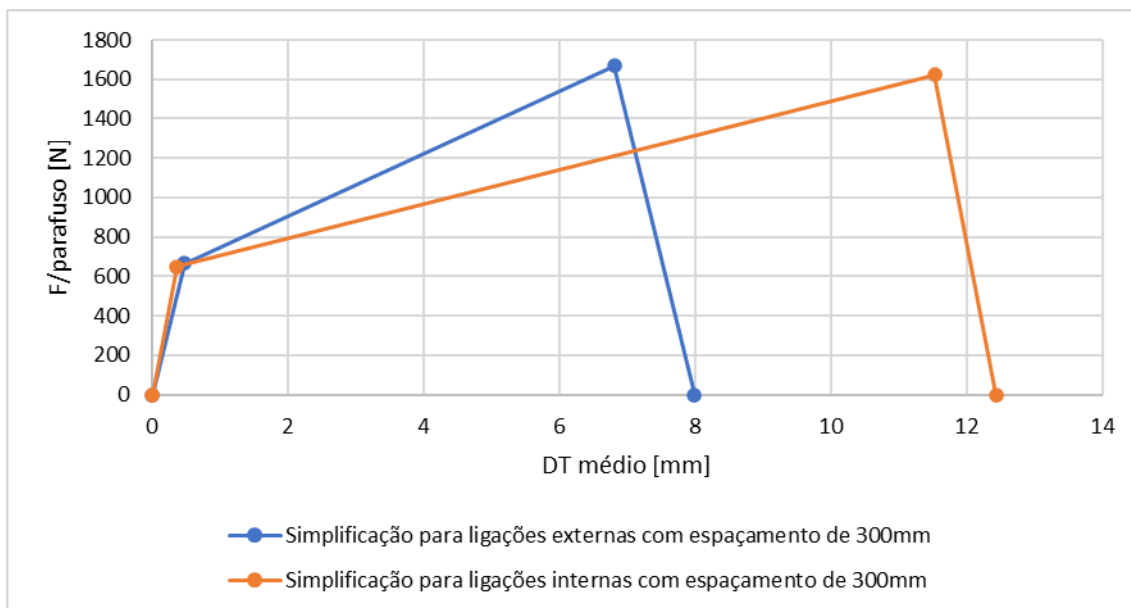


Figura 4.29: Simplificação do comportamento da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações internas e externas espaçadas em 300 mm.

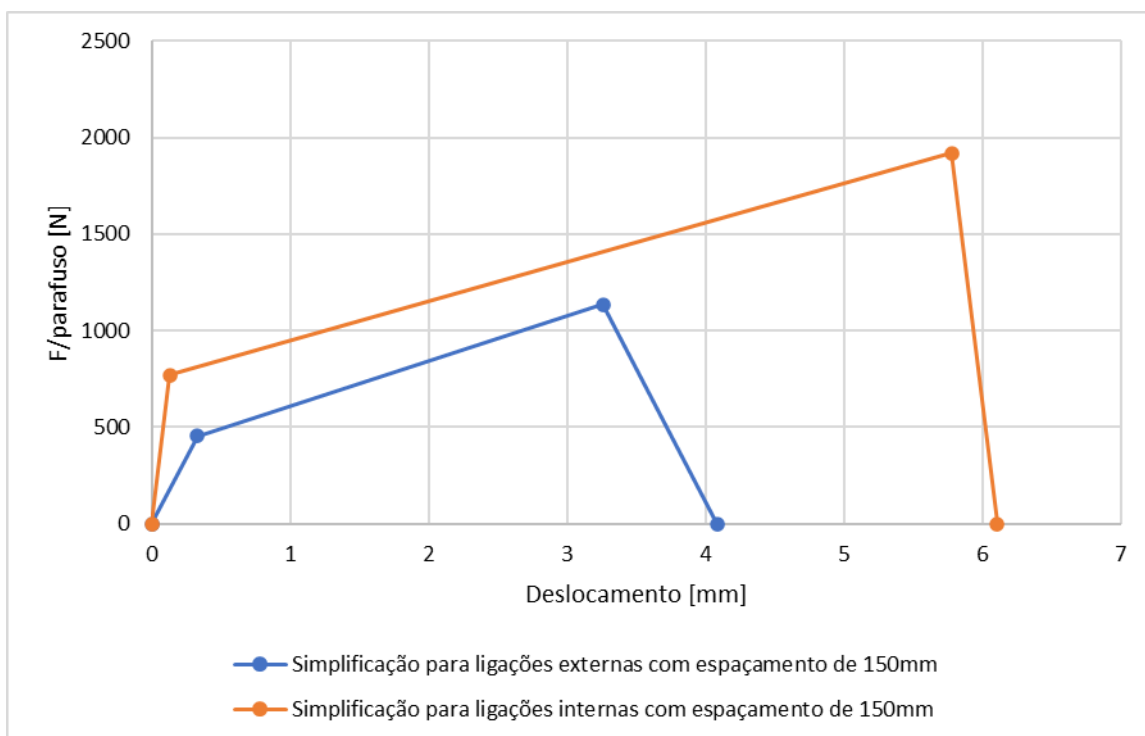


Figura 4.30: Simplificação do comportamento da ligação entre perfis de aço e placas de OSB para ligações internas e externas espaçadas em 150 mm.

As Figs. 4.31 e 4.32 apresentam os modelos paramétricos propostos e a Fig. 4.33 mostra a comparação entre os resultados do modelo principal com ligações externas espaçadas de 150



mm e internas espaçadas de 300 mm, e modelos paramétricos, o primeiro com espaçamento das ligações externas e internas de 150 mm e o segundo com espaçamento das ligações internas e externas de 300 mm.

Observa-se pela Tab. 3.5 que, ao se utilizar espaçamento das ligações externas e internas igual a 150 mm, a força de escoamento diminui 7%, a força máxima diminui 9% e a de falha 5%. Nota-se ainda um aumento acentuado de 202% do fator de ductilidade  $\mu$  e de 126% da rigidez na fase elástica.

Ao se utilizar espaçamento das ligações externas e internas igual a 300 mm a força de escoamento decresce em 47% e a força máxima e de falha decrescem 49% e 50%, respectivamente. Nota-se ainda um grande aumento do fator de ductilidade  $\mu$ , de 208%. Já a rigidez na fase elástica não sofreu grandes variações.

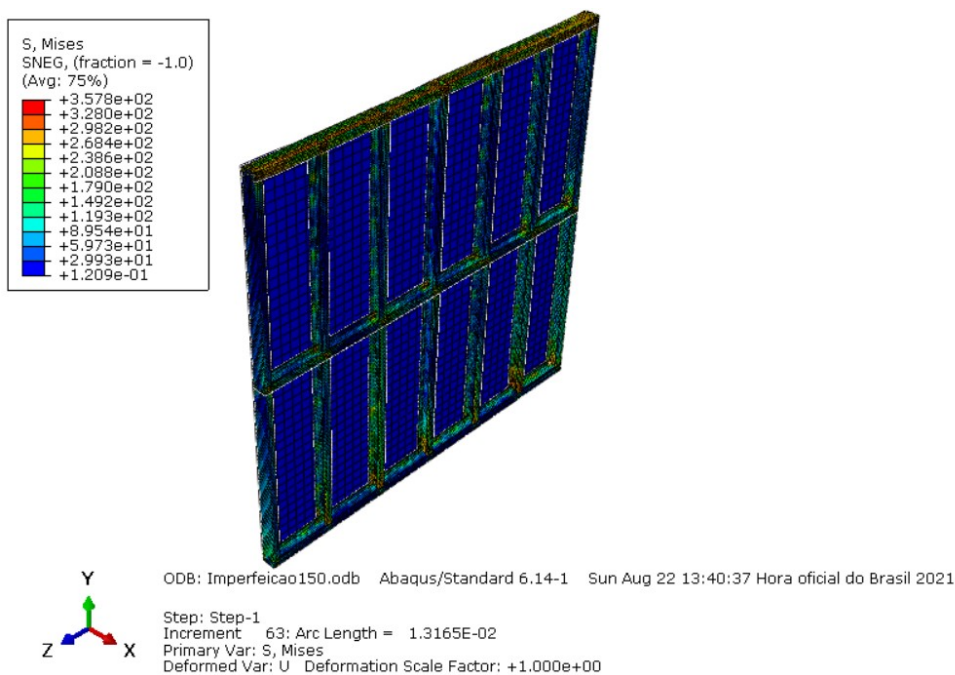


Figura 4.31 - Deformada do modelo paramétrico com ligações aço-OSB espaçadas em 150 mm.

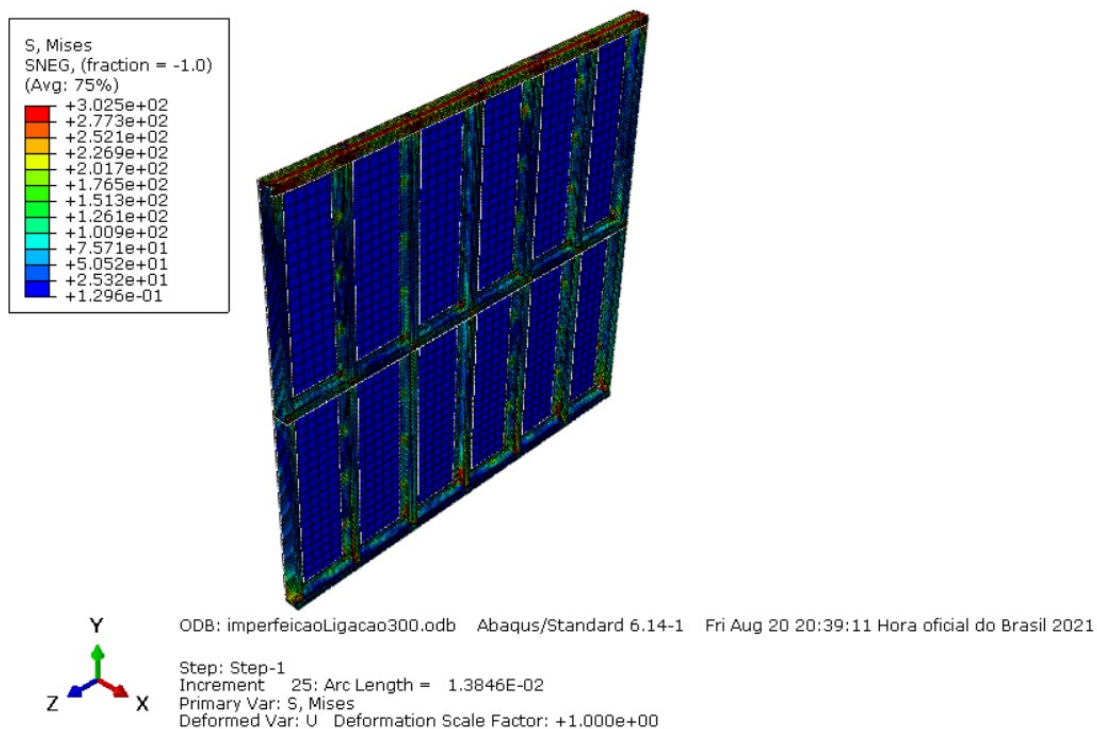


Figura 4.32 - Deformada do modelo paramétrico com ligações aço-OSB espaçadas em 300 mm.

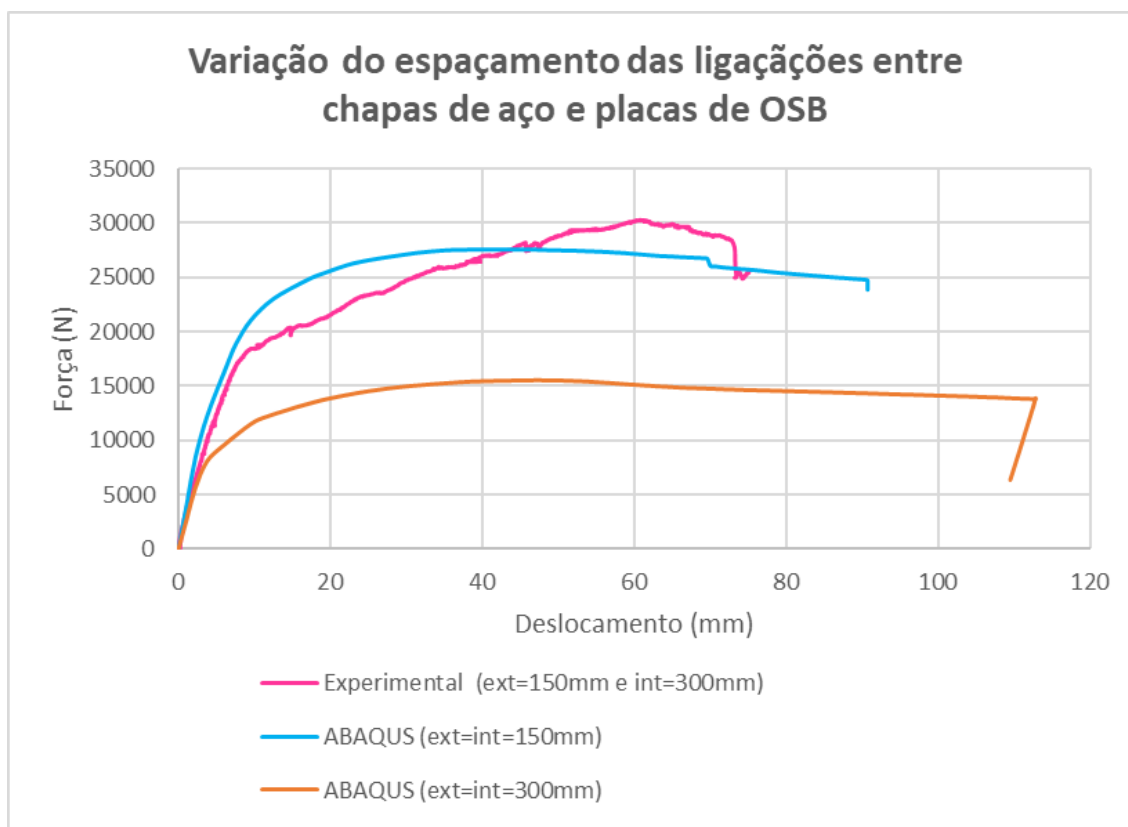


Figura 4.33 - Influência do parâmetro espaçamento ligação aço-OSB.

Tabela 4.5 – Valores de força, deslocamento, fator de ductilidade e rigidez elástica para modelos paramétricos do espaçamento das ligações entre aço e OSB.

Fator	Modelo Experimental ( $e_{ext}=150$ mm; $e_{int}=300$ mm)	Modelo Paramétrico ( $e_{ext}=150$ mm; $e_{int}=150$ mm)	Diferença %	Modelo Paramétrico ( $e_{ext}=300$ mm; $e_{int}=300$ mm)	Diferença %
Força de escoamento $P_{y,t}$ (N)	23402,21	21684,01	-7%	12400,38	-47%
Deslocamento $\Delta_{y,t}$ (mm)	25,20	10,31	-59%	12,566	-50%
Força máxima $P_{m,t}$ (N)	30300,58	27572,90	-9%	15530,60	-49%
Deslocamento $\Delta_{m,t}$ (mm)	60,80	40,28	-34%	46,74	-23%
Força de falha $P_{f,t}$ (N)	26151,93	24787,00	-5%	13041,10	-50%
Deslocamento $\Delta_{f,t}$ (mm)	73,30	90,55	24%	112,49	53%
Fator de Ductilidade ( $\mu$ )	2,91	8,78	202%	8,95	208%
Rigidez elástica $k_e$ (N/mm)	928,66	2103,20	126%	986,82	6%

#### 4.3.5 Influência do revestimento em OSB

Um modelo sem placas de revestimento em OSB foi reproduzido. A Fig. 4.34 apresenta o modelo paramétrico proposto e a Fig. 4.35 mostra a comparação entre modelo principal com OSB e o modelo paramétrico.

Observa-se pela Tab. 3.6 que o modelo sem fechamento por placas de OSB alcançou força de escoamento, força máxima e força de falha 92% menores do que as do modelo com fechamento. O fator de ductilidade  $\mu$  decresceu em 21% e a rigidez na fase elástica diminuiu 91%.

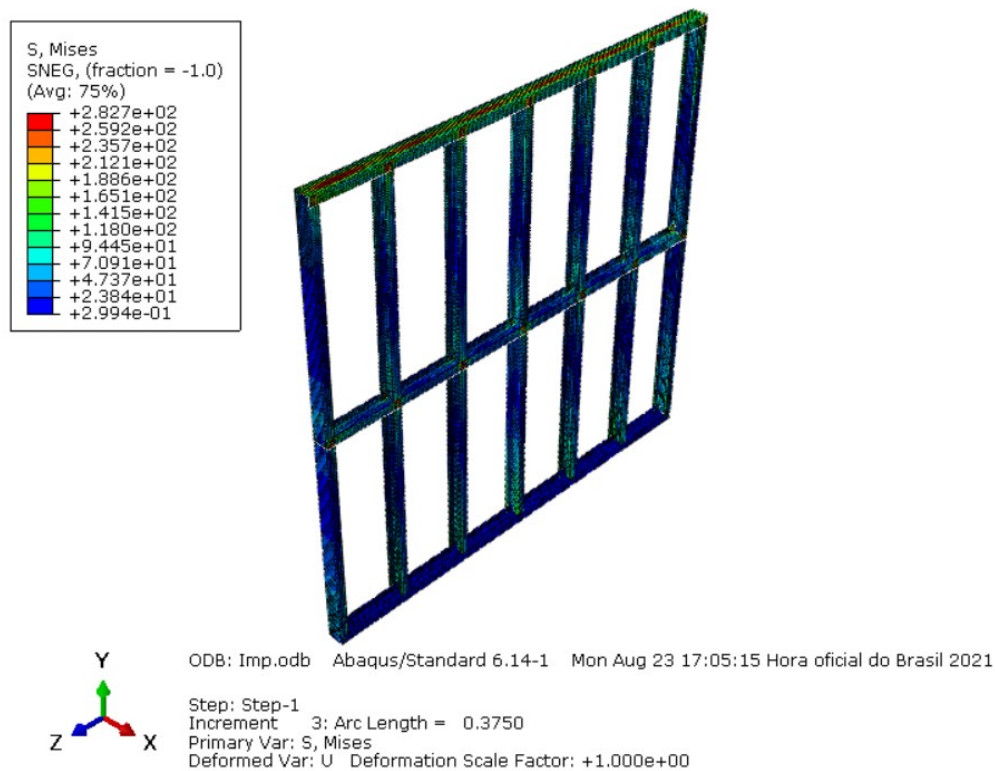


Figura 4.34 - Deformada modelo paramétrico sem placas de OSB.

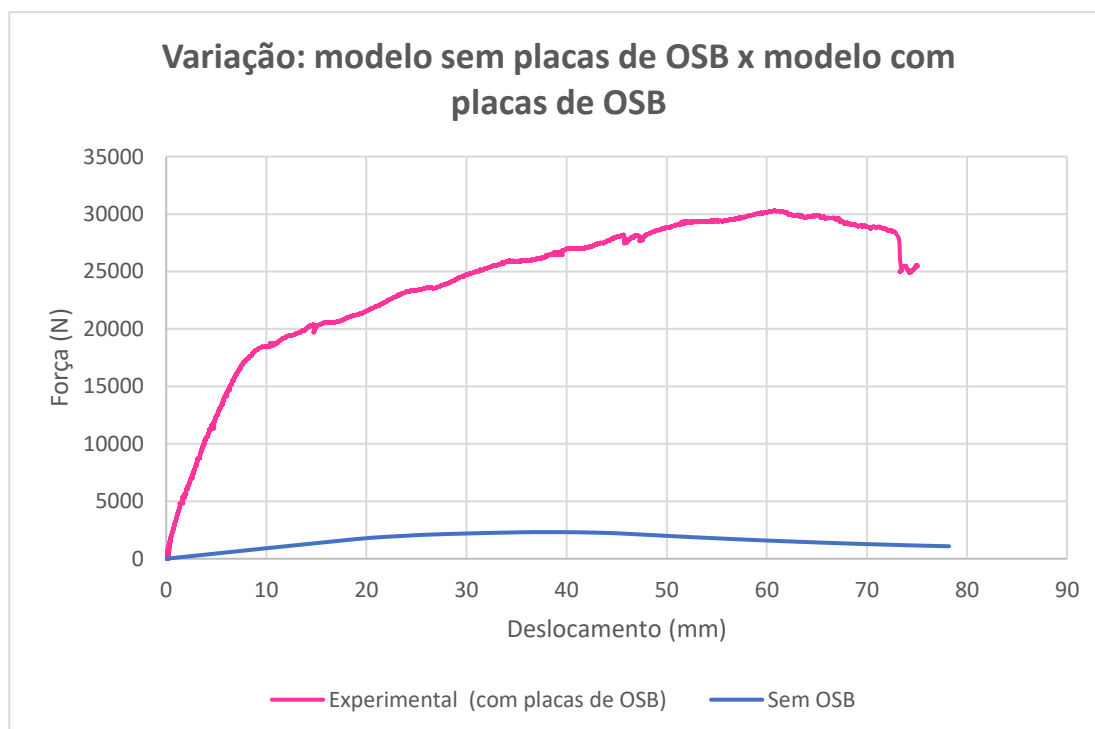


Figura 4.35 - Influência da presença das placas de OSB.

Tabela 4.6 – Valores de força, deslocamento, fator de ductilidade e rigidez elástica para modelo sem placas de OSB e modelo experimental com fechamento por OSB.

Fator	Modelo Experimental (contraventado por placas de OSB)	Modelo Paramétrico (sem OSB)	Diferença %
Força de escoamento $P_{y,t}$ (N)	23402,21	1904,78	-92%
Deslocamento $\Delta_{y,t}$ (mm)	25,20	22,09	-12%
Força máxima $P_{m,t}$ (N)	30300,58	2314,23	-92%
Deslocamento $\Delta_{m,t}$ (mm)	60,80	37,46	-38%
Força de falha $P_{f,t}$ (N)	26151,93	1967,09	-92%
Deslocamento $\Delta_{f,t}$ (mm)	73,30	50,54	-31%
Fator de Ductilidade ( $\mu$ )	2,91	2,29	-21%
Rigidez elástica $k_e$ (N/mm)	928,66	86,24	-91%

#### 4.3.6 Influência dos parâmetros estudados no fator de ductilidade $\mu$ e na rigidez elástica $k_e$

Os gráficos presentes nas Figs. 4.36 a 4.39 apresentam os parâmetros espessura das chapas de aço e espessura das placas de OSB, em função dos fatores de ductilidade  $\mu$  e da rigidez elástica  $k_e$ . Os gráficos apresentam dois pontos, relativos à duas espessuras estudadas nesse trabalho. Para trabalhos futuros, pretende-se aumentar a gama de parâmetros para tornar o gráfico e as equações mais abrangentes.

É possível observar que a espessura do aço é inversamente proporcional ao fator de ductilidade e a rigidez elástica. Nota-se também que a espessura das placas de OSB é diretamente proporcional à rigidez elástica ao fator de ductilidade. As Eq. (4.2) e (4.3) definem os fatores  $\mu$  e  $k_e$  em função da espessura das chapas de aço e as Eq. (4.4) e (4.5) em função da espessura das placas de OSB.

$$\mu = -0,0532t_{aço} + 1,1047 \quad (4.2)$$

$$k_e = -0,0003t_{aço} + 1,2365 \quad (4.3)$$

$$\mu = 2,0622t_{OSB} + 3,5015 \quad (4.4)$$

$$k_e = 0,0061t_{OSB} + 3,8636 \quad (4.5)$$

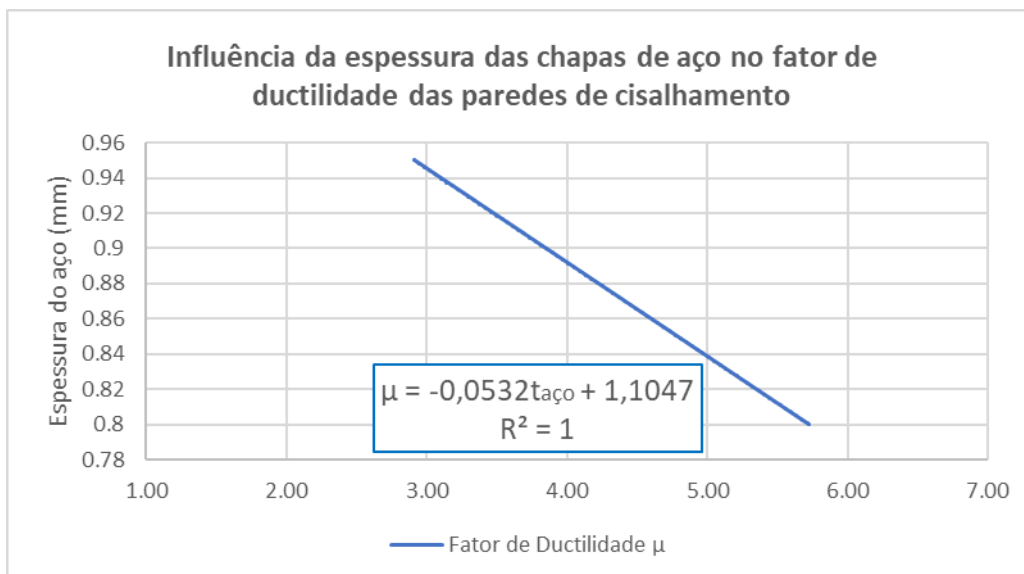


Figura 4.36 - Influência da espessura das chapas de aço no fator de ductilidade das paredes de cisalhamento.

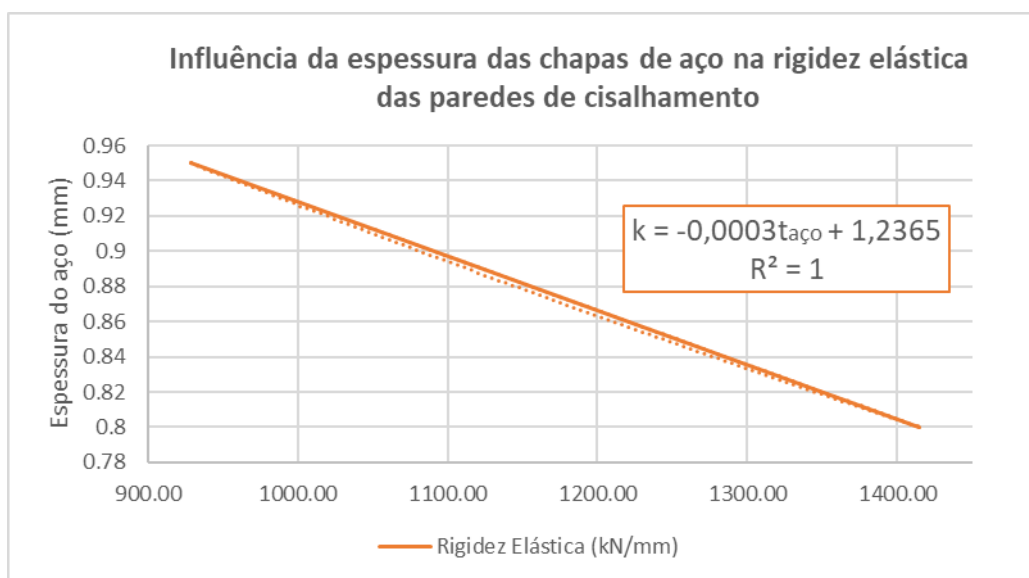


Figura 4.37 - Influência da espessura das chapas de aço na rigidez elástica das paredes de cisalhamento.

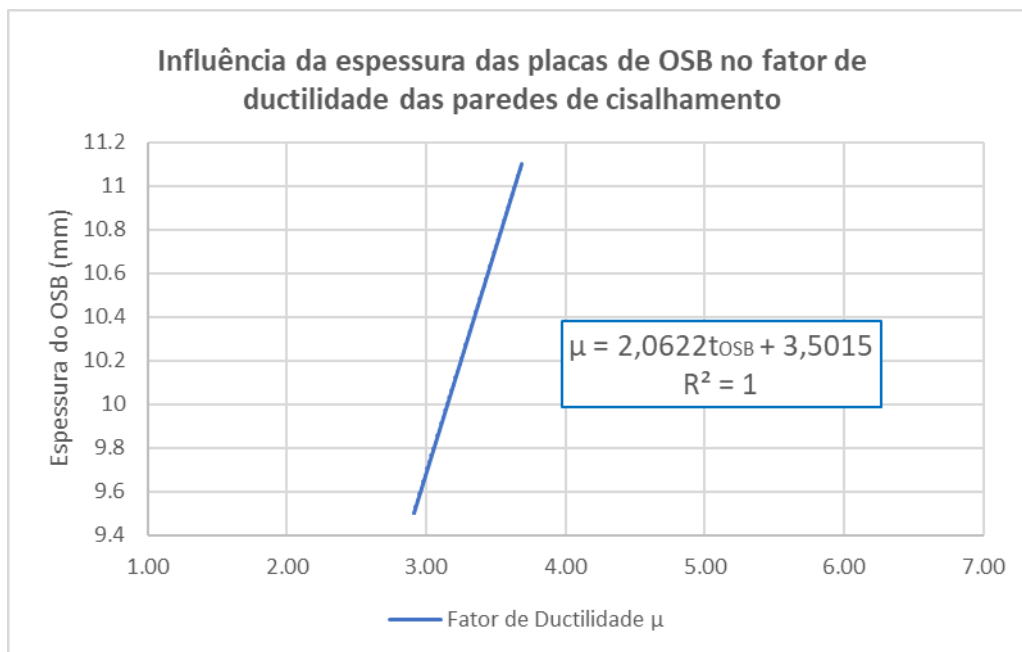


Figura 4.38 - Influência da espessura das placas de OSB no fator de ductilidade das paredes de cisalhamento.

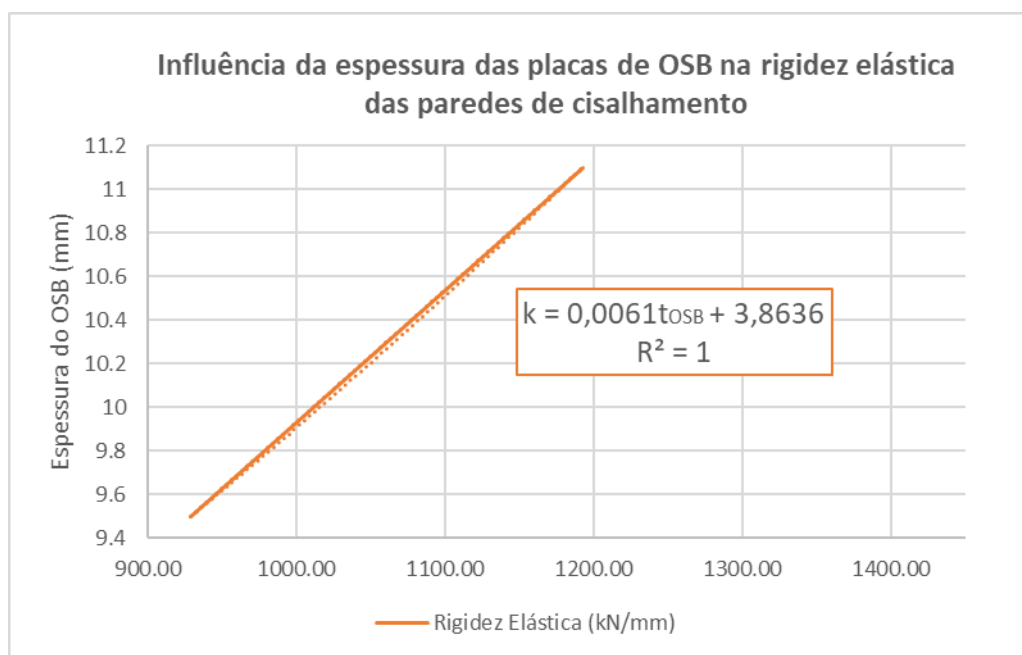


Figura 4.39 - Influência da espessura das placas de OSB na rigidez elástica das paredes de cisalhamento.

Os gráficos presentes nas Figs. 4.40 a 4.43 apresentam os parâmetros quantidade de placas de OSB utilizadas no fechamento das paredes e espaçamento das ligações entre aço e OSB, em função dos fatores de ductilidade de deslocamento  $\mu$  e da rigidez elástica  $k_e$ .

É possível observar que o fator de ductilidade sofre a maior alteração ao se modificar o espaçamento das ligações entre chapas de aço e placas de OSB para 150 mm e 300 mm, alcançando um valor significativamente maior para esses casos, em relação ao modelo principal, cujos espaçamentos externos e internos são, respectivamente 150 mm e 300 mm. Em relação a quantidade de placas de OSB, o fechamento simples por placas de OSB é o modelo que alcança maior fator de ductilidade.

A rigidez é subitamente alterada em função da quantidade de placas de OSB utilizada nas paredes de cisalhamento, sendo mínima para aquelas que não possuem o fechamento. Em relação ao espaçamento das ligações entre chapas de aço e placas de OSB, a rigidez é aproximadamente a mesma ao se utilizar o espaçamento maior para ligações externas e internas (300 mm) ou espaçamentos diferentes para externos e internos, de 150 mm e 300 mm, respectivamente. O menor valor de espaçamento entre ligações (150 mm), resultou na maior rigidez elástica.

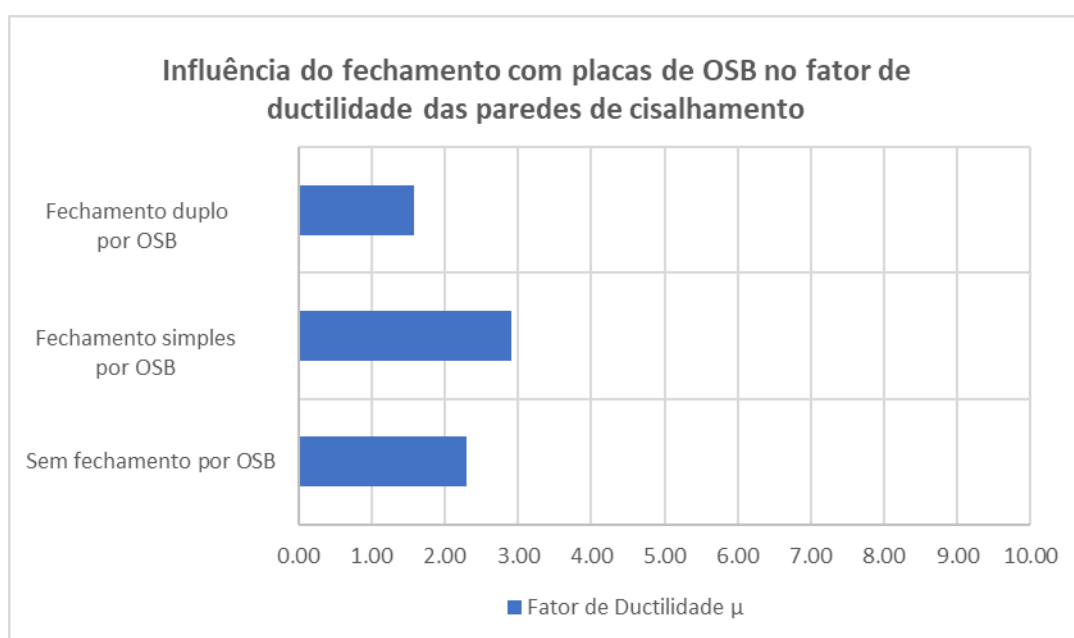


Figura 4.40 - Influência do fechamento por placas de OSB no fator de ductilidade das paredes de cisalhamento.



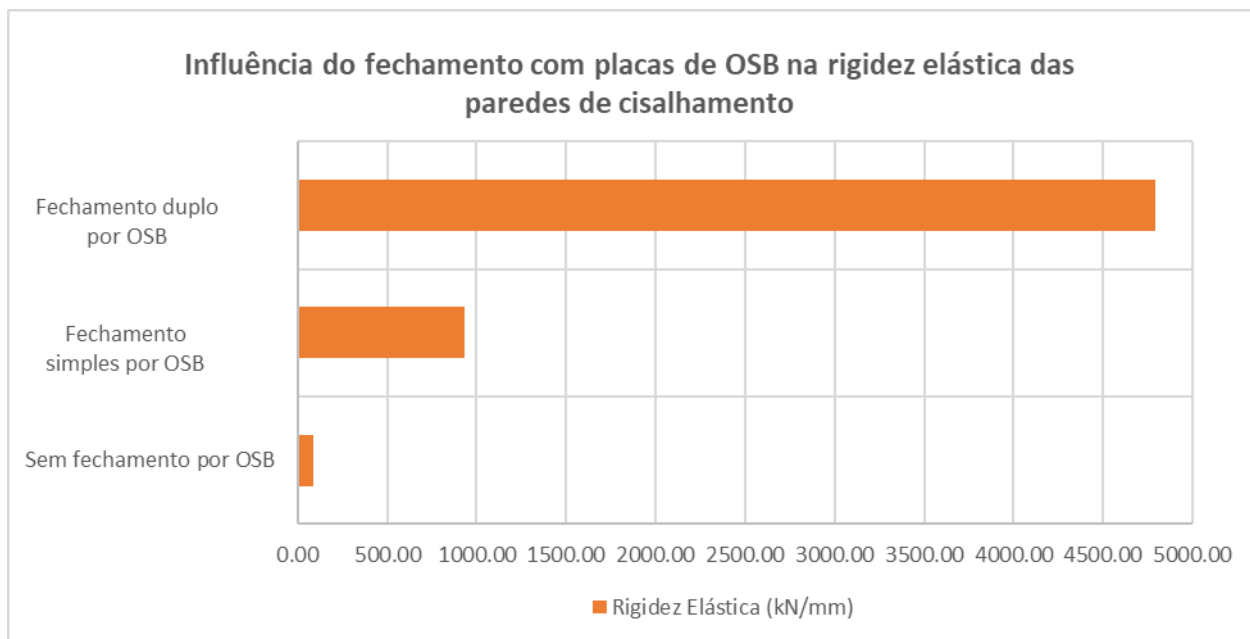


Figura 4.41 - Influência do fechamento por placas de OSB na rigidez elástica das paredes de cisalhamento.

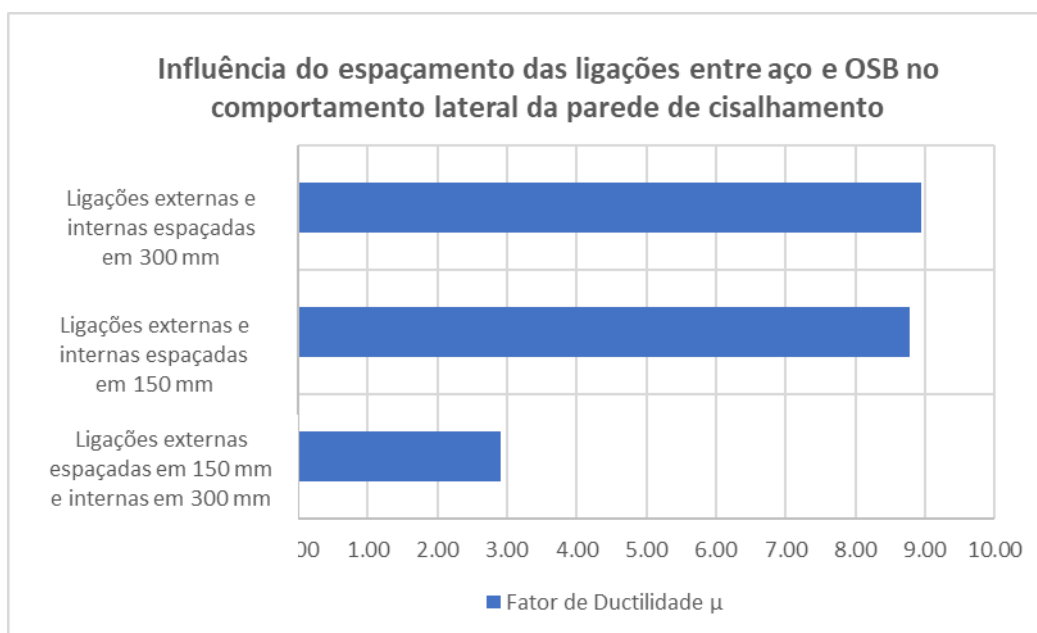


Figura 4.42 - Influência do espaçamento das ligações entre chapas de aço e placas de OSB no fator de ductilidade das paredes de cisalhamento.

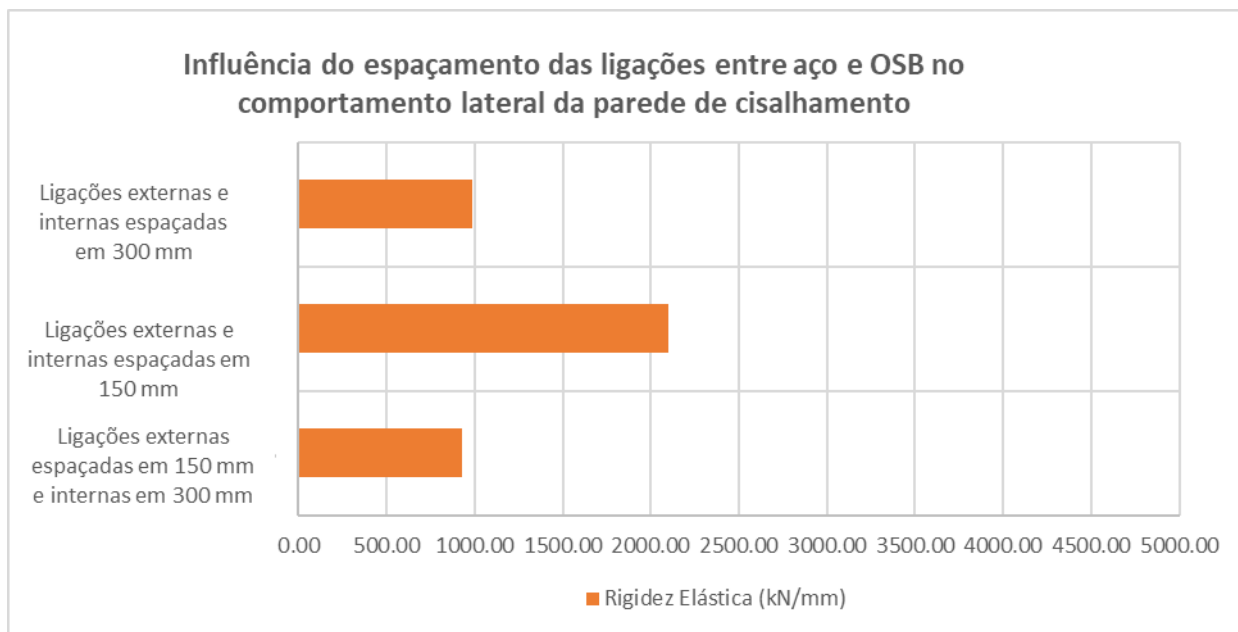


Figura 4.43 - Influência do espaçamento das ligações entre chapas de aço e placas de OSB na rigidez elástica das paredes de cisalhamento.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo avaliou o desempenho de paredes de cisalhamento do sistema LSF quanto à resistência lateral, por meio de simulações numéricas conduzidas primeiramente em um modelo calibrado por resultados experimentais e, em seguida, em seis modelos referentes à análise paramétrica.

O procedimento de simulação numérica conduzido alcançou resultados análogos aos resultados experimentais, o que indica boa calibração dos modelos numéricos, principalmente da resposta não linear adotada para as ligações entre placa de revestimento de OSB e perfis do reticulado de aço, comportamento esse que governa os deslocamentos originados por esforços provenientes do carregamento lateral da parede de cisalhamento. Sendo assim, é importante ressaltar que estudos prévios experimentais acerca do comportamento das ligações entre placa de revestimento e perfis formados a frio, como o conduzido por Datchoua (2018), são essenciais para a previsão correta do comportamento dessas ligações. Além disso, estudos experimentais em paredes de cisalhamento, como o realizado por Faria (2023), também são de extrema importância para pesquisas nessa área, na medida em que possibilitam uma modelagem numérica precisa, com comportamento muito próximo do real.

A análise paramétrica conduziu a resultados interessantes no que diz respeito à resistência lateral das paredes de cisalhamento. No que se refere às imperfeições geométricas adotadas, seu impacto nos resultados foi mínimo, configurando-se como um parâmetro que não exerce influência sobre o comportamento lateral das paredes de cisalhamento. Quanto à utilização de espessuras maiores de chapas dos perfis de aço, os resultados obtidos forneceram um comportamento força *versus* deslocamento com alcance de forças, em geral, maiores, porém menor fator de ductilidade e de rigidez elástica. O fato de se encontrar menor fator de ductilidade para a maior espessura de aço não era esperado, considerando a ductilidade como uma medida da capacidade do elemento estrutural de se deformar antes que a ruptura ocorra. Tal ocorrência se deve, provavelmente, da simplificação adotada, de se utilizar uma única curva de comportamento para ligações externas e internas (Fig. 4.17), para o caso paramétrico de espessura das chapas de aço igual a 0,80 mm. Sendo assim, como sugestão para trabalhos futuros e para uma melhor compreensão da influência da espessura do aço no comportamento

lateral das paredes de cisalhamento, uma maior gama de espessuras de chapas de aço deve ser estudada, a fim de se encontrar um padrão mais preciso de comportamento nesse aspecto.

O modelo com chapas de aço com maior espessura alcançou um valor menor de rigidez elástica, o que já era esperado, visto que, de acordo com as curvas simplificadas das ligações, os parafusos externos do modelo com a maior espessura de aço (0,95 mm), alcançou um comportamento menos rígido, atingindo deslocamentos maiores que o modelo com a espessura menor (0,80 mm), o que afetou diretamente a fase elástica do movimento da parede de cisalhamento.

A espessura maior de placa de OSB gerou uma maior capacidade de deformação da parede de cisalhamento, provocando um acréscimo na rigidez elástica e na ductilidade, o que reafirma a contribuição estrutural das placas de OSB no comportamento lateral das paredes de cisalhamento. Além disso, o fechamento duplo por placas de OSB se mostrou eficiente no que diz respeito ao enrijecimento lateral das paredes. Esse fator pode indicar que essas placas são responsáveis por evitar deslocamentos laterais excessivos e, assim, apresentar função de contraventamento efetivo do sistema. A contribuição das placas de OSB no enrijecimento lateral da parede ficou ainda mais evidente ao se comparar os resultados de um modelo com fechamento simples por placas de OSB com os resultados do modelo sem as placas. Apesar de o fator de ductilidade não ter sido muito afetado pela presença ou não das placas de OSB, o valor da rigidez elástica foi altamente modificado pela presença destas.

Quanto às ligações entre placa de revestimento de OSB e os perfis formados a frio, foi possível perceber que são parâmetros de grande influência no comportamento lateral das paredes de cisalhamento. Ao se utilizar espaçamentos externos e internos maiores, houve decréscimo de forças, mas grande acréscimo no fator de ductilidade, sem perda de rigidez elástica, o que indica a utilização dessa estratégia de ligações para determinados casos de projeto lateral. Por outro lado, a utilização de espaçamentos internos e externos menores, levou a um ganho de rigidez elástica, o que pode indicar uma grande contribuição estrutural na rigidez lateral das paredes de cisalhamento.

Sendo assim, os resultados do estudo paramétrico mostraram a grande contribuição estrutural das placas de OSB no contraventamento lateral das paredes de cisalhamento, seja pela sua espessura, pela quantidade de placas utilizadas ou pelo comportamento das ligações presentes entre as placas e as chapas de aço.

Nesse contexto, a pesquisa realizada pode servir de base para estudos futuros considerando outros materiais de revestimento, além das placas de OSB. Ademais, outras particularidades podem ser introduzidas no modelo numérico em trabalhos futuros, como: carregamento cíclico

dos modelos experimental e numérico; introdução de aberturas de portas e janelas nas placas de OSB; variação maior de detalhes construtivos no estudo paramétrico; e maior variação de espessuras de chapa dos perfis de aço e placas de OSB.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 6355. Perfis estruturais de aço formados a frio – Padronização. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.
- ABNT NBR 8800. Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- ABNT NBR 14762. Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.
- ABNT NBR 15253. Perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis estruturais reticulados em edificações — Requisitos gerais. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.
- AISI - American Iron and Steel Institute, "Standard for Cold-Formed Steel Framing- Lateral Design, 2004 Edition" (2005). AISI-Specifications for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. 146.
- AISI-S100, North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, The American Iron and Steel Institute, Washington, DC, 2016.
- AISI-S110-07/S1-09, AISI STANDARD Standard for Seismic Design of Cold-Formed Steel Structural Systems – Special Bolted Moment Frames with Supplement No. 1, The American Iron and Steel Institute, Washington, DC, 2012.
- AISI-S202, Code of Standard Practice for Cold-Formed Steel Structural Framing. The American Iron and Steel Institute, Washington, DC, 2015.
- AISI - American Iron and Steel Institute, A. S213-07/S1-09 - *North American Standard for Cold-Formed Steel Framing - Lateral Design 2007 Edition with Supplement No. 1*. Washington, 2012.
- AISI-S240, North American Standard for Cold-Formed Steel Structural Framing, The American Iron and Steel Institute, Washington, DC, 2015.
- AISI-S310, North American Standard for the Design of Profiled Steel Diaphragm Panels, The American Iron and Steel Institute, Washington, DC, 2016.
- AISI-S400, North American Standard for Seismic Design of Cold-Formed Steel Structural Systems, The American Iron and Steel Institute, Washington, DC, 2015.
- AISI-S917, Test Standard for Determining the Fastener-Sheathing Local Translational Stiffness of Sheathed Cold-Formed Steel Assemblies, The American Iron and Steel Institute, Washington, DC, 2017.
- AISI-S918, Test Standard for Determining the Fastener-Sheathing Rotational Stiffness of Sheathed Cold-Formed Steel Assemblies, The American Iron and Steel Institute, Washington, DC, 2017.
- APA (2012). Panel design specification.
- ASTM-D2719-19, Standard Test Methods for Wood Structural Panels in Shear Through-the-Thickness, 2019.
- ATTARI, N. K. A.; ALIZADEH, S.; HADIDI, S. Investigation of CFS shear walls with one and two-sided steel sheeting. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 122, 2016, Pages 292-307.
- BALDASSINO, N.; ACCORTI, M.; ZANDONINI, R.; SCAVAZZA, F.; ROGERS, C. A., "Lateral Loading Response of CFS Framed Shear Wall with Cement Board Panels" (2014). *International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*.
- BIAN, G.; PADILLA-LLANO, D. A.; BUONOPANE, S. G.; MOEN, C. D.; SCHAFFER, B. W. OpenSees modeling of wood sheathed cold-formed steel framed shear walls. *Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council Nashville, Tennessee, March 24-27, 2015*
- BRAGA, D. C. Avaliação de Métodos Numéricos de Análise Linear de Estabilidade para Perfis de Aço Formados a Frio. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

- BREDEL, D.H. Performance Capabilities of Light-Frame Shear Walls Sheathed With Long OSB Panels. Dissertação de Mestrado. 228p. Polytechnic Institute and State University, Virginia, Estados Unidos, 2003.
- BUONOPANE, S. G.; BIAN, G.; TUN T. H.; SCHAFER, B. W. Computationally efficient fastener-based models of cold-formed steel shear walls with wood sheathing. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 110, 2015, Pages 137-148.
- CICHINELLI, G. História do OSB. Masisa do Brasil, PR. 2005.
- CLOUTIER, A. Oriented strandboard (OSB): raw material, manufacturing process, properties and use. Seminário internacional sobre produtos sólidos de madeira de alta tecnologia, 1998, Belo Horizonte-MG. Anais Viçosa-MG: SIF/UFV/DEF, p. 173-185, 1998.
- CRUZ NETO, A. R. S. Estudo do Fator de Redução da Resistência ao Escoamento do Aço de Perfis U Enrijecido em Situação de Incêndio, Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2015.
- DATCHOUA, J. S. Estudo Teórico-Experimental do Comportamento da Ligação de Placas de OSB com Perfis do Reticulado Metálico do Sistema Construtivo Light Steel Framing sob Força Monotônica de Cisalhamento. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2018.
- DERVENI, F. Nonlinear Fastener-Based Modeling of Cold-Formed Steel Shear Walls Under Lateral Loads. Structural Engineering Masters Projects. University of Massachusetts Amherst, 2019.
- DON ALLEN, P. E. History of Cold Formed Steel. *Building Blocks: discussion and updates on structural materials*. Structure Magazine, November 2006.
- DOM ALENN. History of Cold Formed Steel. *STRUCTURE magazine*, 2006.
- FAHERTY, K.F.; WILLIAMSON, T.G. *Wood Engineering and Construction Handbook*. 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, 1997.
- FARIA, J. A. Análise experimental em paredes de cisalhamento do sistema Light Steel Framing. Relatório de Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2023.
- FIORINO, L.; SHAKEEL, S.; MACILLO, V.; LANDOLFO, R. Seismic response of CFS shear walls sheathed with nailed gypsum panels: Numerical modelling. *Thin-Walled Structures*, vol. 122, 2018, Pages 359-370.
- FULL ESTRUTURAS. O sistema construtivo Light Steel Framing [S. l.], 2016. Disponível em: <http://fullestruturas.com.br/o-sistema-construtivo-light-steel-framing/>. Acesso em: 14 maio 2021.
- GARCIA, R. A. S. Behaviour and DSM design of cold-formed steel web/flange stiffened lipped channel columns experiencing distortional failure. Tese – COOPE UFRJ, Instituto Iberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Rio de Janeiro, 2016.
- HATAMI, S.; RAHMANI, A.; PARVANEH, A.; RONAGH, H.; (2014). A Parametric Study On Seismic Characteristics of Cold-Formed Steel Shear Walls by Finite Element Modeling. *Advanced Steel Construction – an International Journal*, Hong Kong Institute of Steel Construction, Hong Kong, v. 10, p. 53-71. 2014.
- HENRIQUES, J.; ROSA, N.; GERVASIO, H.; SANTOS, P.; SIMÕES DA SILVA, L. Structural performance of light steel framing panels using screw connections subjected to lateral loading. *Thin-Walled Structures* 121 (2017) 67–88. Coimbra.
- HEVA, Y. B. Behaviour and Design of Cold-Formed Steel Compression Members at Elevated Temperatures. A thesis of requirements for the degree of doctor of philosophy. School of Urban Developments Queensland University of Technology. 2009.
- KARABULUT, B.; SOYOZ, S. Experimental and analytical studies on different configurations of cold-formed steel structures. *Journal of Constructional Steel Research* 133 (2017) 535-546. Istanbul, Turkey.
- LENG, J.; PETERMAN, K. D.; BIAN, G.; BUONOPANE, S. G.; SCHAFER, B. W. Modeling seismic response of a full-scale cold-formed steel-framed building. *Engineering Structures* 153 (2017) 146-165. Lewisburg, PA, USA.
- LIU, P.; PETERMAN, K. D.; SCHAFER, B. W. Test Report on Cold-Formed Steel Shear Walls. *Advancing Cold-Formed Steel Earthquake Engineering*. June, 2012.
- MADSEN, R.L; CASTLE, T.A; SCHAFER, B.W. Seismic Design of Cold-Formed Steel Lateral Load-Resisting Systems – A Guide for Practicing Engineers, National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD, USA, 2016.
- NAKAMURA, J. Casas pré-fabricadas: benefícios e vantagens. *Build in: construção e informação*, 2019.

- NIARI, S. E.; RAFI, B.; ABEDI, K. Seismic behavior of steel sheathed cold-formed steel shear wall: Experimental investigation and numerical modeling. *Thin-Walled Structures* 96 (2015) 337–347. Tabriz, Iran.
- PEDROSA, N. H. Estudo Da Resistência E Rigidez Lateral De Painéis De Cisalhamento Do Sistema Construtivo Light-Steel Framing. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá. Maringá, 2015.
- PETERMAN, K. D.; SCHAFER, B. W. Hysteretic shear response of fasteners connecting sheathing to cold-formed steel studs. *Advancing Cold-Formed Steel Earthquake Engineering*. January, 2013.
- REVISTA DA MADEIRA. OSB oferece resistência para múltiplos usos. Ed. n° 97, 2006.
- RODRIGUES, F.C.; CALDAS, R. B. *Steel Framing: Engenharia*. 2ª edição revisada. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia - Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2016. 224p.
- ROSA, N.; MARTINS, C.; HENRIQUES, J.; GERVASIO, H.; SANTOS, P.; SILVA, L. S. Resistência mecânica de painéis com estrutura leve em aço (LSF) sujeitos a cargas laterais. Conference: XI Congresso de Construção Metálica e Mista, Coimbra, 2017.
- SANTOS, R. R.; OLIVEIRA, C. S.; FERREIRA FILHO, J. O. RODRIGUES, F. C.; CARVALHO, H. Estudo numérico sobre o coeficiente de flambagem local de seção completa de perfis S enrijecidos: Proposta de formulação. CILAMCE 2019 Proceedings of the XL Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, ABMEC, Natal/RN, Brazil, November 11-14, 2019.
- SETUBAL, V. G. Avaliação e reciclagem de chapas osb utilizadas na construção civil. Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal. Seropédica, RJ, 2009.
- SCHAFER, B. W.; SANGREE, R.; GUAN, Y. Experiments on rotational restraint of sheathing. Report for American Iron and Steel Institute-Committee on Framing Standards. Baltimore, Maryland, 2007.
- SHARAFI, P.; MORTAZAVI, M.; USEFI, N.; KILDASHTI, K.; RONAGH, H.; SAMALI, B. Lateral force resisting systems in lightweight steel frames: Recent research advances. *Thin-Walled Structures*, NSW, Australia, v. 130, p. 231-253, 22 jun. 2022.
- SIMULIA. Abaqus/CAE User's Guide. 2014.
- UNIFORM BUILDING CODE. Structural Engineering Design Provisions. International Conference of Building Officials. Vol. 2. Abril de 1997. Whittier, California.
- VIEIRA JUNIOR, L. C. M. Behavior and Design of Sheathed Cold-formed Steel Stud Walls Under Compression. Dissertation in conformity with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Baltimore, Maryland, 2011.
- WANG, J.; WANG, W.; XIAO, Y.; YO, B. Cyclic test and numerical analytical assessment of cold-formed thin-walled steel shear walls using tube truss. *Thin-Walled Structures* 134 (2019) 442–459. Anhui Province, China.
- XU, L.; MARTINEZ, J. Strength and stiffness determination of shear wall panels in cold-formed steel framing. *Thin-Walled Structures*, Vol. 44, Issue 10, 2006, Pages 1084-1095.
- ZOMORODIAN, S. M. M.; GHODRATI AMIRI, G.; TAJIK, A. Seismic Vulnerability Assessment of a Skew Highway Bridge using fragility curves. The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC12), Hong Kong Special Administrative Region, China, 24-26 January 2011.