

**JEAN ANTÔNIO EMERICK**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE CONEXÕES PARAFUSADAS PARA  
VIGAS MISTAS DE AÇO E MADEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Gustavo de Souza Veríssimo

Coorientador: José Luiz Rangel Paes

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

E53a  
2022  
Emerick, Jean Antonio, 1996-  
Análise experimental de conexões parafusadas para vigas mistas de aço e madeira / Jean Antonio Emerick. – Viçosa, MG, 2022.

1 dissertação eletrônica (219 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Gustavo de Souza Veríssimo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, 2022.

Referências bibliográficas: f. 153-158.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.038>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Vigas de madeira. 2. Folheados de madeira. 3. Aço - Estruturas. I. Veríssimo, Gustavo de Souza, 1965-.  
II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.  
III. Título.

CDD 22. ed. 624.17723

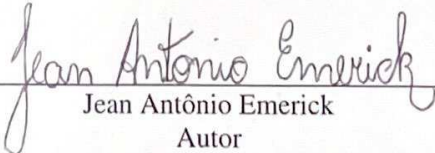
**JEAN ANTÔNIO EMERICK**

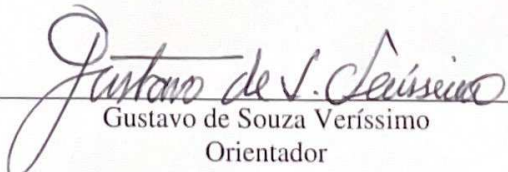
**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE CONEXÕES PARAFUSADAS PARA  
VIGAS MISTAS DE AÇO E MADEIRA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 17 de outubro de 2022.

Assentimento:

  
Jean Antônio Emerick  
Autor

  
Gustavo de Souza Veríssimo  
Orientador

*À memória da minha mãe, Rosângela,  
nossa "rosa angelical",  
com todo meu amor e gratidão.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo dom da vida e por me guiar até aqui.

À minha mãe, Rosângela (in memorian), e ao meu pai, José Antônio, por me educarem no caminho da bondade e da verdade.

Ao Prof. José Luiz Rangel Paes, pela orientação, pela amizade, pela confiança depositada em mim e pelas inestimáveis contribuições que inspiraram rumos neste trabalho e em minha vida pessoal.

Ao Prof. Gustavo de Souza Veríssimo, pela orientação, pela amizade e pelos brilhantes conselhos e contribuições, sem o seu apoio o programa experimental não teria sido desenvolvido.

Ao Prof. Humberto Varum pela participação na Banca Examinadora e pelas valiosas contribuições.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pelos ensinamentos e pelo apoio.

À minha namorada, Larissa, pela cumplicidade nos momentos mais difíceis, pelo incentivo, apoio, carinho e amor.

Ao meu irmão, Ruan, pela amizade e incentivo durante a minha jornada acadêmica.

Ao técnico do Laboratório das Engenharias, Robson, pela dedicação e pelo apoio na execução dos ensaios.

Aos colegas de Pós-graduação pelo apoio e pelo conhecimento compartilhado. Aos amigos de Manhumirim e de Viçosa, pelo fundamental companheirismo.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar este trabalho.

Ao Eng. Paulo Pimentel e à empresa Modular Sistemas Construtivos pela doação dos perfis de aço para realização do programa experimental.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

*“Se fosse ensinar a uma criança a beleza da música não começaria com partituras, notas e pautas. Ouviríamos juntos as melodias mais gostosas e lhe contaria sobre os instrumentos que fazem a música. Aí, encantada com a beleza da música, ela mesma me pediria que lhe ensinasse o mistério daquelas bolinhas pretas escritas sobre cinco linhas. Porque as bolinhas pretas e as cinco linhas são apenas ferramentas para a produção da beleza musical. A experiência da beleza tem de vir antes.”*

**Rubem Alves** – Ostra feliz não faz pérola

*“Não é curto o tempo que temos, mas dele muito perdemos. A vida é suficientemente longa e com generosidade nos foi dada, para a realização das maiores coisas, se a empregamos bem. Mas, quando ela se esvai no luxo e na indiferença, quando não a empregamos em nada de bom, então, finalmente constrangidos pela fatalidade, sentimos que ela já passou por nós sem que tivéssemos percebido.*

*O fato é o seguinte: não recebemos uma vida breve, mas a fazemos, nem somos dela carentes, mas esbanjadores.”*

**Sêneca** – Sobre a Brevidade da Vida.

## RESUMO

EMERICK, Jean Antônio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2022. **Análise experimental de conexões parafusadas para vigas mistas de aço e madeira.** Orientador: Gustavo de Souza Veríssimo. Coorientador: José Luiz Rangel Paes

Os sistemas de piso seco em *Light Steel Framing* (LSF) geralmente consistem em placas de madeira conectadas a perfis de aço formados a frio por parafusos autoatarraxantes. Para desenvolver o uso de sistemas de piso seco em LSF e tirar proveito de suas vantagens construtivas, é preciso avançar na compreensão do comportamento estrutural desses sistemas. Pesquisas anteriores mostraram que o comportamento misto entre perfis de aço formados a frio e placas de madeira pode ser obtido, reduzindo o consumo de aço e permitindo maiores vãos. Nesse contexto, esta dissertação trata da análise experimental de conexões parafusadas para vigas mistas de aço formado a frio e madeira. A presente pesquisa abrangeu o estudo do comportamento força/deslizamento das conexões a partir da realização de ensaios *push-out*, a avaliação da influência de parâmetros que afetam a capacidade resistente, o fluxo de cisalhamento longitudinal, a rigidez e a ductilidade da conexão, a avaliação dos modos de falha. Para isso, realizou-se um programa experimental composto por 30 ensaios *push-out*, divididos em 6 modelos experimentais. Em cada modelo variou-se o diâmetro dos parafusos e o espaçamento entre eles, e em uma amostra de cada modelo os parafusos foram instalados com arruelas de aço. Os resultados obtidos indicaram que o diâmetro do parafuso influencia a capacidade resistente da conexão. Os resultados indicaram também que o espaçamento entre parafusos influencia o fluxo de cisalhamento longitudinal da conexão, de modo que quanto maior o espaçamento entre parafusos menor o fluxo de cisalhamento longitudinal. As amostras com arruelas de aço não contribuíram no aumento da capacidade resistente e da rigidez dos modelos experimentais. O modo de falha observado para os modelos ensaiados decorreu do esmagamento da placa de *Oriented Stranded Board* (OSB) associado ao giro do parafuso autoatarraxante. Com base em expressões analíticas relacionadas aos modos de falha, um modelo semiempírico é proposto para prever a força resistente máxima da conexão entre perfis de aço formados a frio e placas de madeira.

Palavras-chave: Análise experimental. Conexão parafusada. Light Steel Framing. Madeira. Viga mista. Perfis formados a frio. Push-out.

## ABSTRACT

EMERICK, Jean Antônio, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2022.  
**Experimental analysis of screwed connections for steel and timber composite beams.**  
Adviser: Gustavo de Souza Veríssimo. Co-adviser: José Luiz Rangel Paes.

Light Steel Framing (LSF) dry floor systems generally consists of timber slabs connected to cold-formed steel profiles by self-tapping screws. In order to develop the use of LSF dry floor systems and take advantage of their constructional benefits, it is necessary to advance the understanding of the structural behavior of these systems. Previous research has shown that composite action between cold-formed steel profiles and timber slabs can be obtained, reducing steel consumption and allowing larger spans. In this context, this thesis is about the experimental analysis of screwed connections for cold-formed steel and timber composite beams. The present research included the study of the load/slip connections behavior by performing push-out tests, the evaluation of the influence of parameters that affect the resistant capacity, the longitudinal shear flow, the stiffness and ductility of the connection and the evaluation of failure modes. For this purpose, an experimental program was carried out consisting of 30 push-out tests, divided into 6 experimental models. In each model the screw diameter and the spacing between them were varied, and in one specimen of each model the screws were installed with steel washers. The results obtained indicated that the screw diameter influences the connection's resistant capacity. The results also indicated that the screw spacing influences the longitudinal shear flow of the connection, so that the greater the spacing between screws the lower the longitudinal shear flow. The specimens with steel washers did not contribute in increasing the resistant capacity and stiffness of the experimental models. The failure mode observed for the experimental models resulted from the Oriented Stranded Board (OSB) crushing associated with the self-tapping screw tilting. Based on analytical expressions related to failure modes, a semi-empirical model is proposed to predict the load-carrying capacity of the connection between cold-formed steel profiles and wood-based boards.

Keywords: Cold-formed steel profiles. Composite beam. Experimental analysis. Light Steel Framing. Push-out. Screwed connection. Timber.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1– Esquema geral do piso seco em LSF.....	24
Figura 1.2 – Aspecto de um sistema de piso seco durante a montagem .....	25
Figura 2.1 – Seções transversais do tipo U usadas para vigas de piso no sistema LSF.....	30
Figura 2.2 – Simbologia utilizada para designação de uma seção transversal tipo Ue.....	30
Figura 2.3 – Aspecto geral das placas de OSB .....	31
Figura 2.4– Sistema de piso seco em LSF com utilização de placas de OSB .....	32
Figura 2.5 – Detalhe da fixação de parafusos autoatarraxantes .....	34
Figura 2.6 – Tipos de ponta de parafusos autoatarraxantes .....	34
Figura 2.7 – Diferença entre comportamento isolado e comportamento misto .....	35
Figura 2.8 – Modelo bilinear de energia equivalente elastoplástica apresentado por Branston <i>et al.</i> (2006).....	38
Figura 2.9 – Aspecto geral dos ensaios <i>push-out</i> realizados por Northcutt (2012) .....	40
Figura 2.10 – Falha por <i>screw tilting</i> observada nos modelos ensaiados por Northcutt (2012) .....	41
Figura 2.11 – Aspecto geral dos ensaios <i>push-out</i> realizados por Martin (2014).....	42
Figura 2.12 – Falha por <i>screw tilting</i> observada nos modelos ensaiados por Martin (2014).....	43
Figura 2.13 – Detalhe dos modelos ensaiados por Zhou et al. (2014).....	45
Figura 2.14 – Resultados do ensaio de flexão estática .....	45
Figura 2.15 – Modos de falha observados nos ensaios de Zhou et al. (2014) .....	46
Figura 2.16 – Mecanismo de falha por <i>screw tilting</i> .....	48
Figura 2.17 – Aspecto geral dos ensaios <i>push-out</i> realizados por Villela (2016).....	49
Figura 2.18 – Configuração dos seis diferentes modelos .....	50
Figura 2.19 – Arranjos experimentais: a) configuração do ensaio <i>push-out</i> e transdutores de deslocamento; b) instalação das placas de aço respeitando a direção de carregamento.....	51
Figura 2.20– Modos de falha das amostras .....	51
Figura 2.21 – Curva força/deslizamento para a conexão com pinos de 12 mm para as direções paralela (a) e perpendicular (b) às fibras .....	52
Figura 2.22 – Curva força/deslizamento para a conexão com parafusos de 16 mm com e sem a utilização da placa de aço para ambas as direções paralela e perpendicular às fibras .....	52
Figura 2.23 – a) Curva força/deslizamento; b) Curvas de tensão / deslizamento para as conexões com adesivo estrutural .....	52
Figura 2.24 – Detalhes dos modelos utilizados no ensaio <i>push-out</i> .....	53
Figura 2.25 – Configuração geral de um ensaio <i>push-out</i> realizado por Kyvelou (2017) .....	54
Figura 2.26 – Curvas de força/deslizamento dos ensaios <i>push-out</i> realizados por Kyvelou (2017).....	55
Figura 2.27 – Modos de falha dos modelos <i>push-out</i> : a) giro do parafuso na placa de OSB; b) falha por flexão dos parafusos .....	55
Figura 2.28 – Detalhe dos modelos ensaiados por Liu (2018) .....	56
Figura 2.29 – Detalhes construtivos das conexões .....	58
Figura 2.30 – Esquemas dos modelos ensaiados (dimensões em mm).....	59
Figura 2.31 – Configuração geral de um ensaio <i>push-out</i> realizado por Yang et al. (2020) .....	59
Figura 2.32 – Curvas de força/deslizamento das amostras ensaiadas por Yang <i>et al.</i> (2020) .....	60

Figura 2.33 – Modos de falhas típicos observados para os vários grupos ensaiados.....	61
Figura 2.34 - Placas de madeira utilizadas nos modelos: a) OSB; b) compensado naval plastificado .....	62
Figura 2.35 – Geometria da seção transversal e imagem do perfil de aço formado a frio .....	62
Figura 2.36 – Parafusos autoatarraxantes autobrocantes com asas.....	63
Figura 2.37 – a) Vista esquemática frontal e lateral do ensaio de embutimento da madeira; b) aparato de ensaio .....	63
Figura 2.38 – Aspecto geral do ensaio <i>pull-through</i> .....	64
Figura 2.39 – Esquema geral do ensaio de retirada da rosca do parafuso .....	64
Figura 2.40 – Modelo utilizado para realização do ensaio <i>push-out</i> .....	65
Figura 2.41 – Curvas médias força/deslizamento para todos os modelos com OSB .....	65
Figura 2.42 – Curvas médias força/deslizamento para todas os modelos com compensado .....	66
Figura 2.43 – Mecanismo de falha dos modelos de Vella <i>et al.</i> (2020).....	66
Figura 3.1 – Simbologia adotada para identificação dos modelos.....	69
Figura 3.2 – Seção transversal do PFF e vista em planta dos modelos experimentais (dimensões em milímetros) .....	71
Figura 3.3 – Características geométricas dos modelos com espaçamento igual a 150 mm (dimensões em milímetros).....	71
Figura 3.4 – Características geométricas dos modelos com espaçamento igual a 200 mm (dimensões em milímetros).....	71
Figura 3.5 – Características geométricas dos modelos com espaçamento igual a 250 mm.....	72
Figura 3.6 – Amostras referentes ao modelo P-150-55 .....	74
Figura 3.7 – Amostras referentes ao modelo P-200-55 .....	74
Figura 3.8 – Amostras referentes ao modelo P-150-63 .....	75
Figura 3.9 – Amostras referentes ao modelo P-200-63 .....	75
Figura 3.10 – Amostras referentes ao modelo P-250-63 .....	76
Figura 3.11 – Amostras com arruelas de aço.....	76
Figura 3.12 – Placa de base utilizada para os modelos <i>push-out</i> .....	77
Figura 3.13 – Instrumentação do “Lado Aberto - LA” da amostra.....	79
Figura 3.14 – Instrumentação do “Lado Fechado - LF” da amostra.....	79
Figura 3.15 – Posição dos elementos na EMIC DL-60000 para execução dos ensaios <i>push-out</i> (dimensões em mm).....	80
Figura 3.16 – Posicionamento do modelo na máquina universal de ensaios para execução do ensaio <i>push-out</i> ..	81
Figura 3.17 - Procedimento de carregamento padrão utilizados para os ensaios <i>push-out</i> .....	82
Figura 4.1 – Curvas força/deslizamento para o modelo P-150-55.....	84
Figura 4.2 - Curvas força/deslizamento para o modelo P-200-55 .....	85
Figura 4.3 - Curvas força/deslizamento para o modelo P-250-55 .....	87
Figura 4.4 - Curvas força/deslizamento para o modelo P-150-63 .....	88
Figura 4.5 - Curvas força/deslizamento para o modelo P-200-63 .....	89
Figura 4.6 - Curvas força/deslizamento para o modelo P-250-63 .....	91
Figura 4.7- Curvas de força/deslizamento dos modelos experimentais.....	93
Figura 4.8- Curvas de tensão de compressão na placa de madeira/deslizamento dos modelos experimentais.....	94

Figura 4.9- Curvas de fluxo de cisalhamento longitudinal/deslizamento dos modelos experimentais .....	94
Figura 4.10 – Curvas fluxo de cisalhamento longitudinal/deslizamento médias para os modelos com parafusos de diâmetro igual a 5,5 mm.....	95
Figura 4.11 – Forças resistentes dos modelos com parafusos com diâmetro igual a 5,5 mm.....	96
Figura 4.12 – Tensão resistente máxima da madeira para os modelos com parafusos com diâmetro igual a 5,5 mm.....	96
Figura 4.13 – Fluxo de cisalhamento longitudinal máximo dos modelos com parafusos com diâmetro igual a 5,5 mm.....	97
Figura 4.14 - Módulos de deslizamento dos modelos com parafusos com diâmetro igual a 5,5 mm.....	97
Figura 4.15 - Curvas fluxo de cisalhamento longitudinal/deslizamento médias para os modelos com parafusos de diâmetro igual a 6,3 mm .....	98
Figura 4.16 - Forças resistentes dos modelos com parafusos com diâmetro de 6,3 mm .....	99
Figura 4.17 – Tensão resistente máxima da madeira para os modelos com parafusos com diâmetro igual a 6,3 mm .....	100
Figura 4.18 – Fluxo de cisalhamento longitudinal máximo dos modelos com parafusos com diâmetro igual a 6,3 mm.....	100
Figura 4.19 - Módulos de deslizamento dos modelos com parafusos com diâmetro de 6,3 mm.....	101
Figura 4.20 – Curvas médias de tensão/deslizamento para os modelos com espaçamento entre parafusos de 150 mm .....	102
Figura 4.21 - Forças resistentes dos modelos com espaçamento de 150 mm entre parafusos .....	102
Figura 4.22 – Tensão resistente máxima da madeira para os modelos com espaçamento entre parafusos igual a 150 mm .....	103
Figura 4.23 – Fluxo de cisalhamento longitudinal máximo dos modelos com espaçamento entre parafusos igual a 150 mm .....	104
Figura 4.24 - Módulos de deslizamento dos modelos com espaçamento de 150 mm entre parafusos .....	104
Figura 4.25 - Curvas médias de tensão/deslizamento para os modelos com espaçamento entre parafusos de 200 mm.....	105
Figura 4.26 - Forças resistentes dos modelos com espaçamento de 200 mm entre parafusos .....	106
Figura 4.27 – Tensão resistente máxima da madeira para os modelos com espaçamento entre parafusos igual a 200 mm .....	106
Figura 4.28 – Fluxo de cisalhamento longitudinal máximo dos modelos com espaçamento entre parafusos igual a 200 mm .....	107
Figura 4.29 - Módulos de deslizamento dos modelos com espaçamento de 200 mm entre parafusos .....	107
Figura 4.30 - Curvas médias de tensão/deslizamento para os modelos com espaçamento entre parafusos de 250 mm .....	108
Figura 4.31 - Forças resistentes dos modelos com espaçamento de 250 mm entre parafusos.....	109
Figura 4.32 – Tensão resistente máxima da madeira para os modelos com espaçamento entre parafusos igual a 250 mm.....	109
Figura 4.33 – Fluxo de cisalhamento longitudinal máximo dos modelos com espaçamento entre parafusos igual a 250 mm .....	110
Figura 4.34 - Módulos de deslizamento dos modelos com espaçamento de 250 mm entre parafusos .....	110
Figura 4.35 –Fatores de ductilidade dos modelos experimentais .....	111
Figura 4.36 – Curva de força/deslizamento da amostra P-150-55-A em comparação com as curvas média, de limite superior e de limite inferior, relativas ao modelo P-150-55 .....	112
Figura 4.37 - Forças resistentes da amostra P-150-55-A e do modelo P-150-55 .....	113

Figura 4.38 - Módulos de deslizamento da amostra P-150-55-A e do modelo P-150-55.....	113
Figura 4.39 - Curva de força/deslizamento da amostra P-200-55-A em comparação com as curvas média, de limite superior e de limite inferior, relativas ao modelo P-200-55 .....	114
Figura 4.40 - Forças resistentes da amostra P-200-55-A e do modelo P-200-55 .....	115
Figura 4.41 - Módulos de deslizamento da amostra P-200-55-A e do modelo P-200-55.....	115
Figura 4.42 - Curva de força/deslizamento da amostra P-250-55-A em comparação com as curvas média, de limite superior e de limite inferior, relativas ao modelo P-250-55 .....	116
Figura 4.43 - Força resistente da amostra P-250-55-A e do modelo P-250-55.....	116
Figura 4.44 - Módulos de deslizamento da amostra P-250-55-A e do modelo P-250-55.....	117
Figura 4.45 - Curva de força/deslizamento da amostra P-150-63-A em comparação com as curvas média, de limite superior e de limite inferior, relativas ao modelo P-150-63 .....	118
Figura 4.46 - Forças resistentes da amostra P-150-63-A e do modelo P-150-63 .....	118
Figura 4.47 - Módulos de deslizamento da amostra P-150-63-A e do modelo P-150-63.....	119
Figura 4.48 - Curva de força/deslizamento da amostra P-200-63-A em comparação com as curvas média, de limite superior e de limite inferior, relativas ao modelo P-200-63 .....	120
Figura 4.49 - Forças resistentes da amostra P-200-63-A e do modelo P-200-63 .....	120
Figura 4.50 - Módulos de deslizamento da amostra P-200-63-A e do modelo P-200-63.....	121
Figura 4.51 - Curva de força/deslizamento da amostra P-250-63-A em comparação com as curvas média, de limite superior e de limite inferior, relativas ao modelo P-250-63 .....	122
Figura 4.52 - Forças resistentes da amostra P-250-63-A e do modelo P-250-63 .....	122
Figura 4.53 - Módulos de deslizamento da amostra P-250-63-A e do modelo P-250-63.....	123
Figura 4.54 – Diagrama força/deslizamento simplificado para conexões entre perfis de aço e placas de madeira. ....	124
Figura 4.55 – Aspecto geral da amostra P-150-55-1 após a falha .....	125
Figura 4.56 – Vistas laterais da amostra P-200-55-2 após a falha.....	125
Figura 4.57 – Detalhe da região dos parafusos superiores da amostra P-250-55-0 após a falha .....	126
Figura 4.58 – Aspecto geral da amostra P-150-63-0 após a falha .....	126
Figura 4.59 – Detalhe da região dos parafusos da amostra P-150-63-0 após a falha .....	127
Figura 4.60 – Vistas laterais da amostra P-200-63-2 após a falha.....	127
Figura 4.61 – Esmagamento da placa de OSB na região de ligação da amostra P-200-63-2 após a falha .....	128
Figura 4.62 – Zonas afetadas pelo esmagamento nas placas de OSB para a amostra P-200-63-2 após a falha .	128
Figura 4.63 – Aspecto geral da amostra P-250-63-2 após a falha .....	129
Figura 4.64 – Detalhe da região de ligação dos parafusos superiores da amostra P-250-63-2 após a falha.....	129
Figura 4.65 – Aspecto geral da amostra P-250-55-A após a falha .....	130
Figura 4.66 – Detalhe da região de ligação para a amostra P-250-55-A após a falha .....	130
Figura 4.67 – Rasgamento do perfil de aço na região de ligação após a falha da amostra P-200-55-A.....	131
Figura 4.68 – Parafuso e arruela após a falha da amostra P-200-63-A.....	131
Figura 4.69 – Mecanismo de falha observado nos modelos ensaiados.....	132
Figura 4.70 – Carta de controle para o modelo proposto.....	136
Figura 4.71 - Força longitudinal transferida pela conector de cisalhamento para uma viga mista com interação completa.....	140

Figura 4.72 - Variação do momento fletor resistente de vigas mistas convencionais com grau de interação ( $\eta_d$ ) de acordo com a EN 1994-1-1 (2004).....	141
Figura 4.73 - Variação do momento fletor resistente de vigas mistas convencionais com grau de interação ( $\eta_d$ ) de acordo com o método proposto por Kyvelou (2017).....	143
Figura 4.74 – Esquema geral da viga mista de aço e madeira .....	144
Figura 4.75 – Seção transversal Ue 140x36x14x1,25 .....	145
Figura 4.76 – Parafuso autoatarraxante com diâmetro nominal de 5,5 mm .....	146
Figura A.1 – Curvas força / deslizamento para a amostra P-150-55-0.....	159
Figura A.2 - Curva EEEP para a amostra P-150-55-0.....	161
Figura A.3 - Curvas de força / deslizamento para a amostra P-150-55-1.....	162
Figura A.4 - Curva EEEP para a amostra P-150-55-1.....	163
Figura A.5 - Curvas de força / deslizamento para a amostra P-150-55-2.....	164
Figura A.6 - Curva EEEP para a amostra P-150-55-2.....	165
Figura A.7 - Curvas força / deslizamento para a amostra P-150-55-3.....	166
Figura A.8 - Curva EEEP para a amostra P-150-55-3.....	167
Figura A.9 - Curvas força / deslizamento para a amostra P-150-55-A.....	168
Figura A.10 - Curva EEEP para a amostra P-150-55-A.....	169
Figura A.11 - Curvas força / deslizamento para a amostra P-200-55-0.....	170
Figura A.12 - Curva EEEP para a amostra P-200-55-0.....	171
Figura A.13 - Curvas força / deslizamento para a amostra P-200-55-1.....	171
Figura A.14 - Curva EEEP para a amostra P-200-55-1.....	172
Figura A.15 - Curvas força / deslizamento para a amostra P-200-55-2.....	173
Figura A.16 - Curva EEEP para a amostra P-200-55-2.....	174
Figura A.17 - Curvas força / deslizamento para a amostra P-200-55-3.....	174
Figura A.18 - Curva EEEP para a amostra P-200-55-3.....	175
Figura A.19 - Curvas de força / deslizamento para a amostra P-200-55-A.....	176
Figura A.20 - Curva EEEP para a amostra P-200-55-A.....	177
Figura A.21 - Curvas de força / deslizamento para a amostra P-250-55-0.....	177
Figura A.22 - Curva EEEP para a amostra P-250-55-0.....	178
Figura A.23 - Curvas de força / deslizamento para a amostra P-250-55-1.....	179
Figura A.24 - Curva EEEP para a amostra P-250-55-1.....	180
Figura A.25 - Curvas de força / deslizamento para amostra P-250-55-2.....	180
Figura A.26 - Curva EEEP para a amostra P-250-55-2.....	181
Figura A.27 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-250-55-3.....	182
Figura A.28 - Curva EEEP para a amostra P-250-55-3.....	183
Figura A.29 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-250-55-A.....	183
Figura A.30 - Curva EEEP para a amostra P-250-55-A.....	184
Figura A.31 - Curvas de força / deslizamento para a amostra P-150-63-0.....	185
Figura A.32 - Curva EEEP para a amostra P-150-63-0.....	186
Figura A.33 - Curvas de força / deslizamento para a amostra P-150-63-1.....	186

Figura A.34 - Curva EEEP para a amostra P-150-63-1.....	187
Figura A.35 - Curvas de força / deslizamento para a amostra P-150-63-2.....	188
Figura A.36 - Curva EEEP para a amostra P-150-63-2.....	189
Figura A.37 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-150-63-3.....	189
Figura A.38 - Curva EEEP para a amostra P-150-63-3.....	190
Figura A.39 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-150-63-A.....	191
Figura A.40 - Curva EEEP para a amostra P-150-63-A.....	192
Figura A.41 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-200-63-0.....	192
Figura A.42 - Curva EEEP para a amostra P-200-63-0.....	193
Figura A.43 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-200-63-1.....	194
Figura A.44 - Curva EEEP para a amostra P-200-63-1.....	195
Figura A.45 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-200-63-2.....	195
Figura A.46 - Curva EEEP para a amostra P-200-63-2.....	196
Figura A.47 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-200-63-3.....	197
Figura A.48 - Curva EEEP para a amostra P-200-63-3.....	198
Figura A.49 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-200-63-A.....	198
Figura A.50 - Curva EEEP para a amostra P-200-63-A.....	199
Figura A.51 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-250-63-0.....	200
Figura A.52 - Curva EEEP para a amostra P-250-63-0.....	201
Figura A.53 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-250-63-1.....	201
Figura A.54 - Curva EEEP para a amostra P-250-63-1.....	202
Figura A.55 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-250-63-2.....	203
Figura A.56 - Curva EEEP para a amostra P-250-63-2.....	204
Figura A.57 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-250-63-3.....	204
Figura A.58 - Curva EEEP para a amostra P-250-63-3.....	205
Figura A.59 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-250-63-A.....	206
Figura A.60 - Curva EEEP para a amostra P-250-63-A.....	207

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas dos aços ZAR .....	31
Tabela 2.2 – Diâmetros dos parafusos autoatarraxantes por bitola.....	33
Tabela 2.3 – Comprimentos dos parafusos autoatarraxantes por bitola .....	33
Tabela 2.4 – Resultados dos ensaios realizados por Northcutt (2012). .....	41
Tabela 2.5 – Resultados dos ensaios realizados por Martin (2014).....	44
Tabela 2.6 – Resultados do estudo de variação de parâmetros realizado por Zhou <i>et al.</i> (2014) para investigar a influência do espaçamento entre parafusos e da altura dos perfis.....	46
Tabela 2.7 - Resultados do estudo realizado por Zhou <i>et al.</i> (2014) para investigar a influência da relação comprimento/largura do sistema de piso sobre o comportamento estrutural .....	47
Tabela 2.8 – Resultados dos ensaios realizados por Loehr (2016) .....	48
Tabela 2.9 – Características dos modelos utilizados nos ensaios <i>push-out</i> .....	54
Tabela 2.10 – Resultados dos ensaios realizados por Liu (2018) .....	57
Tabela 2.11 – Parâmetros-chave das amostras pertencentes aos oito grupos considerados no estudo .....	58
Tabela 2.12 – Resultados obtidos por outros autores (parte 1/2).....	67
Tabela 3.1 – Identificação dos modelos .....	70
Tabela 3.2 – Materiais utilizados na produção dos modelos experimentais .....	73
Tabela 3.3 - Equipamentos utilizados no ensaio <i>push-out</i> (parte 1/2).....	77
Tabela 4.1 – Simbologia utilizada para identificação das amostras .....	83
Tabela 4.2 – Síntese dos resultados para o modelo P-150-55.....	85
Tabela 4.3 – Síntese dos resultados para o modelo P-200-55.....	86
Tabela 4.4 – Síntese dos resultados para o modelo P-250-55.....	87
Tabela 4.5 – Síntese dos resultados para o modelo P-150-63.....	89
Tabela 4.6 – Síntese dos resultados para o modelo P-200-63.....	90
Tabela 4.7 – Síntese dos resultados para o modelo P-250-63.....	91
Tabela 4.8 – Forças resistentes, fluxo de cisalhamento longitudinal e tensão de compressão máxima na placa de madeira para os ensaios <i>push-out</i> .....	92
Tabela 4.9 – Módulos de deslizamento, deslizamentos e fator de ductilidade dos modelos obtidos nos ensaios <i>push-out</i> .....	93
Tabela 4.10 – Resultados da análise de regressão múltipla. ....	135
Tabela A.1 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-55-0 .....	170
Tabela A.2 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-55-1 .....	172
Tabela A.3 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-55-2 .....	173
Tabela A.4 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-55-3 .....	175
Tabela A.5 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-55-A .....	176
Tabela A.6 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-55-0 .....	178
Tabela A.7 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-55-1 .....	179
Tabela A.8 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-55-2 .....	181
Tabela A.9 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-55-3 .....	182

Tabela A.10 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-55-A. ....	184
Tabela A.11 – Módulos de deslizamento para a amostra P-150-63-0. ....	185
Tabela A.12 – Módulos de deslizamento para a amostra P-150-63-1. ....	187
Tabela A.13 – Módulos de deslizamento para a amostra P-150-63-2. ....	188
Tabela A.14 – Módulos de deslizamento para a amostra P-150-63-3. ....	190
Tabela A.15 – Módulos de deslizamento para a amostra P-150-63-A. ....	191
Tabela A.16 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-63-0. ....	193
Tabela A.17 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-63-1. ....	194
Tabela A.18 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-63-2. ....	196
Tabela A.19 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-63-3. ....	197
Tabela A.20 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-63-A. ....	199
Tabela A.21 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-63-0. ....	200
Tabela A.22 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-63-1. ....	202
Tabela A.23 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-63-2. ....	203
Tabela A.24 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-63-3. ....	205
Tabela A.25 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-63-A. ....	206
Tabela B.1 - Dados experimentais utilizados nas análises de regressão linear e resultados obtidos (parte 1/12). .....	208

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Ensaios e Materiais)
BS	<i>British Standard</i> (Norma Britânica)
CLT	<i>Cross-Laminated Timber</i> (Madeira Laminada Cruzada)
DT	<i>Displacement Transducer</i> (Transdutor de deslocamento)
EEEP	Energia Equivalente Elastoplástica
EN	<i>European Standard</i> (Norma Europeia)
LA	Lado Aberto
LF	Lado Fechado
LSF	<i>Light Steel Framing</i> (Estrutura em Aço Leve)
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i> (Fibra de Madeira de Média Densidade)
NBR	Norma Brasileira
OSB	<i>Oriented Stranded Board</i> (Placa de Tiras de Madeira Orientadas)
PFF	Perfil Formado a Frio
PVC	<i>Polyvinil Chloride</i> (Policloreto de Vinila)
SAD	Sistema de Aquisição de Dados
TPO	<i>Thermoplastic Polyolefins</i> (Poliiolefinas Termoplásticas)
XPS	<i>Extruded Polystyrene</i> (Poliestireno Extrudido)
ZAR	Zincado de Alta Resistência

## LISTA DE SÍMBOLOS

$b_w$	largura da alma da seção transversal Ue
$b_{ef}$	largura efetiva da placa de madeira
$b_f$	largura das mesas da seção transversal Ue
$d_b$	diâmetro nominal do parafuso autoatarraxante
$e$	espaçamento entre parafusos autoatarraxantes
$f_{ax,R}$	tensão resistente da madeira relacionada ao desprendimento do parafuso
$f_{c0,k}$	resistência característica à compressão da madeira
$f_{c, mad}$	tensão de compressão na placa de madeira
$f_e$	tensão resistente da madeira à pressão de contato
$f_{t0,k}$	resistência característica à tração da madeira
$f_u$	resistência última do aço
$f_y$	resistência ao escoamento do perfil de aço
$f_{yp}$	resistência ao escoamento do parafuso
$k_{mod}$	coeficiente de modificação da madeira
$k_s$	módulo de deslizamento
$k_{s,04}$	módulo de deslizamento a 40% de $F_{m\acute{a}x}$
$k_{s,06}$	módulo de deslizamento a 60% de $F_{m\acute{a}x}$
$k_{s,08}$	módulo de deslizamento a 80% de $F_{m\acute{a}x}$
$l_{ef}$	comprimento de penetração da parte roscada do parafuso autoatarraxante
$n$	número de parafusos autoatarraxantes
$n_f$	número de parafusos autoatarraxantes necessários para interação completa
$q_l$	fluxo de cisalhamento longitudinal
$q_{l,m\acute{a}x}$	fluxo de cisalhamento longitudinal máximo
$t_{mad}$	espessura da placa de madeira
$t_w$	espessura da seção transversal Ue
$y_c$	posição do centroide da área comprimida do perfil de aço
$y_t$	posição do centroide da área tracionada do perfil de aço
$x$	posição da linha neutra

$A$	área da curva de força/deslizamento da amostra obtida em ensaio <i>push-out</i>
$A_a$	área da seção transversal do perfil de aço
$A_{a,c}$	área comprimida da seção transversal do perfil de aço
$A_{a,t}$	área tracionada da seção transversal do perfil de aço
$A_{mad}$	área da seção transversal da placa de madeira
$A_{mad,c}$	área comprimida da seção transversal da placa de madeira
$A_{mad,t}$	área tracionada da seção transversal da placa de madeira
$A_{EEEP}$	área da curva de energia equivalente elastoplástica
$C_a$	força resultante de compressão no perfil de aço
$C_{mad}$	força resultante de compressão na madeira
$D$	fator de ductilidade
$E_{co,m}$	módulo de elasticidade médio à compressão da madeira
$EI_{eff}$	rigidez à flexão efetiva da viga mista
$F_{ax,R}$	força resistente ao desprendimento do parafuso do perfil de aço
$F_{máx}$	força resistente máxima, obtida em ensaios <i>push-out</i>
$F_{ref}$	força última da amostra de referência n° 0
$F_u$	força resistente última da amostra, obtida em ensaios <i>push-out</i>
$F_{u,m}$	força última resistente média do modelo experimental
$F_{u,k}$	força última resistente característica do modelo experimental
$F_y$	força resistente ao escoamento da amostra
$F_{y,m}$	força resistente ao escoamento média do modelo experimental
$F_R$	força resistente máxima da conexão entre perfis de aço e placas de madeira
$F_{Rd}$	força resistente máxima de cálculo da conexão entre perfis de aço e placas de madeira
$L$	comprimento total da viga mista
$M_a$	momento fletor resistente do perfil de aço
$M_{pl}$	momento fletor resistente plástico do parafuso autoatarraxante
$M_{pl,a}$	momento fletor resistente plástico do perfil de aço
$M_{pl,comp}$	momento fletor resistente plástico da viga mista com interação completa
$M_{pl,Rd}$	momento fletor resistente plástico da viga mista com interação parcial
$M_{Rd}$	momento fletor resistente de cálculo da viga mista de aço e madeira
$T_a$	força resultante de tração no perfil de aço
$W$	módulo resistente elástico
$Z$	módulo resistente plástico

$\gamma$	módulo de cisalhamento
$\gamma_M$	coeficiente de ponderação das resistências dos materiais
$\eta_i$	grau de conexão da viga mista de aço e madeira
$\nu$	deslizamento relativo
$\nu_{0,4}$	deslizamento correspondente a 40% de $F_{m\acute{a}x}$
$\nu_{0,6}$	deslizamento correspondente a 60% de $F_{m\acute{a}x}$
$\nu_{0,8}$	deslizamento correspondente a 80% de $F_{m\acute{a}x}$
$\nu_u$	deslizamento último da amostra, correspondente a $F_u$
$\nu_{u,m}$	deslizamento último médio do modelo experimental
$\nu_{u,k}$	deslizamento último característico do modelo experimental
$\nu_y$	deslizamento no escoamento da amostra, correspondente a $F_y$
$\nu_{y,m}$	deslizamento no escoamento médio do modelo experimental
$\rho_{mad}$	densidade da placa de madeira

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>23</b>
1.1. Contextualização .....	23
1.2. Objetivos .....	26
1.3. Justificativa e relevância do tema.....	26
1.4. Estrutura da Dissertação .....	28
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>29</b>
2.1. Considerações gerais .....	29
2.2. Componentes do sistema de piso seco .....	29
2.2.1. Perfis de aço formados a frio.....	29
2.2.2. Placas de OSB.....	31
2.2.3. Parafusos autoatarraxantes.....	33
2.3. Fundamentos do comportamento misto .....	35
2.3.1. Princípios básicos .....	35
2.3.2. Influência da interface .....	36
2.3.3. Módulo de deslizamento.....	36
2.3.4. Energia equivalente elastoplástica.....	37
2.4. Estudos relacionados ao comportamento misto aço-madeira.....	39
2.4.1 Northcutt (2012) .....	39
2.4.2. Martin (2014).....	42
2.4.3. Zhou et al. (2014) .....	44
2.4.4. Loehr (2016).....	47
2.4.5. Villela (2016).....	49
2.4.6. Hassanieh et al. (2016) .....	50
2.4.7. Kyvelou (2017).....	53
2.4.8. Liu (2018).....	56
2.4.9. Yang et al. (2020) .....	57
2.4.10. Vella et al. (2020) .....	62
2.4.11. Síntese dos resultados obtidos por outros autores .....	67
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>69</b>
3.1. Considerações gerais .....	69
3.2. Características dos modelos experimentais .....	69
3.3. Produção dos modelos experimentais .....	74

3.4. Ensaio <i>push-out</i> .....	77
3.3.1. Equipamento utilizados .....	77
3.3.2. Instrumentação.....	78
3.3.3. Procedimento de ensaio .....	79
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>83</b>
4.1. Considerações gerais .....	83
4.2. Resultados dos ensaios <i>push-out</i> .....	84
4.2.1. Modelo 1: P-150-55 .....	84
4.2.2. Modelo 2: P-200-55 .....	85
4.2.3. Modelo 3: P-250-55 .....	86
4.2.4. Modelo 4: P-150-63 .....	88
4.2.5. Modelo 5: P-200-63 .....	89
4.2.6. Modelo 6: P-250-63 .....	90
4.2.7. Síntese dos resultados .....	92
4.3. Avaliação da influência das variáveis consideradas nos ensaios .....	95
4.3.1. Espaçamento entre os parafusos autoatarraxantes .....	95
4.3.2. Diâmetro dos parafusos .....	101
4.3.3. Uso de arruelas de aço nos parafusos autoatarraxantes .....	111
4.4. Avaliação dos modos de falha da conexão.....	123
4.5. Modelo semiempírico para estimar a força resistente máxima da conexão aço-madeira .....	133
4.6. Estudo exploratório sobre o momento fletor resistente para vigas mistas de aço e madeira .....	137
4.6.1. Procedimento de cálculo.....	137
4.6.2. Exemplo de cálculo .....	144
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>150</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>153</b>
<b>APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS <i>PUSH-OUT</i> .....</b>	<b>159</b>
A.1. Modelo 1: P-150-55.....	159
A.1.1. Amostra P-150-55-0 .....	159
A.1.2. Amostra P-150-55-1 .....	161
A.1.3. Amostra P-150-55-2 .....	163
A.1.4. Amostra P-150-55-3 .....	165

A.1.5. Amostra P-150-55-A.....	167
A.2. Modelo 2: P-200-55.....	169
A.2.1. Amostra P-200-55-0 .....	169
A.2.2. Amostra P-200-55-1 .....	171
A.2.3. Amostra P-200-55-2 .....	172
A.2.4. Amostra P-200-55-3 .....	174
A.2.5. Amostra P-200-55-A.....	175
A.3. Modelo 3: P-250-55.....	177
A.3.1. Amostra P-250-55-0 .....	177
A.3.2. Amostra P-250-55-1 .....	178
A.3.3. Amostra P-250-55-2 .....	180
A.3.4. Amostra P-250-55-3 .....	181
A.3.5. Amostra P-250-55-A.....	183
A.4. Modelo 4: P-150-63.....	184
A.4.1. Amostra P-150-63-0 .....	184
A.4.2. Amostra P-150-63-1 .....	186
A.4.3. Amostra P-150-63-2 .....	187
A.4.4. Amostra P-150-63-3 .....	189
A.4.5. Amostra P-150-63-A.....	190
A.5. Modelo 5: P-200-63.....	192
A.5.1. Amostra P-200-63-0 .....	192
A.5.2. Amostra P-200-63-1 .....	193
A.5.3. Amostra P-200-63-2 .....	195
A.5.4. Amostra P-200-63-3 .....	196
A.5.5. Amostra P-200-63-A.....	198
A.6. Modelo 6: P-250-63.....	199
A.6.1. Amostra P-250-63-0 .....	199
A.6.2. Amostra P-250-63-1 .....	201
A.6.3. Amostra P-250-63-2 .....	202
A.6.4. Amostra P-250-63-3 .....	204
A.6.5. Amostra P-250-63-A.....	205

<b>APÊNDICE B – DADOS EXPERIMENTAIS UTILIZADOS NO AJUSTE DO MODELO SEMIEMPÍRICO .....</b>	<b>208</b>
---	------------

# 1

---

## INTRODUÇÃO

### 1.1. Contextualização

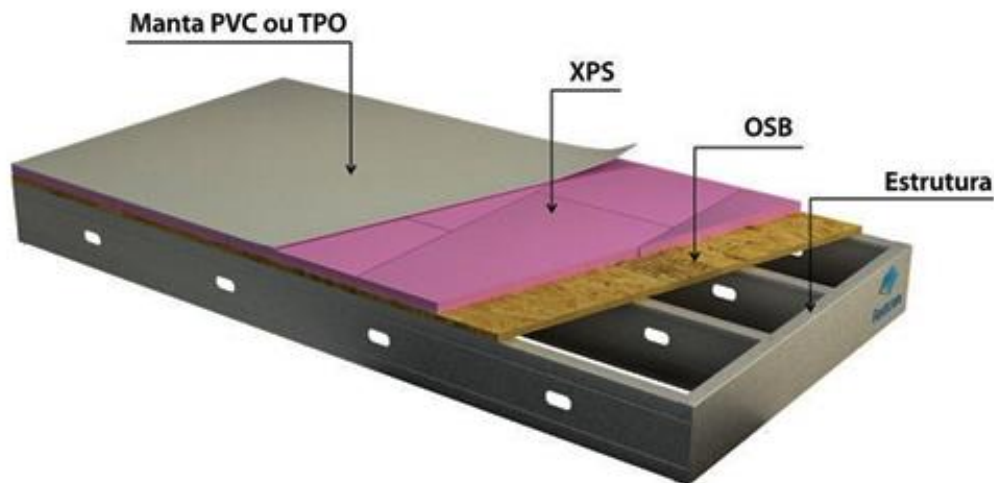
No Brasil os sistemas construtivos tradicionais continuam sendo amplamente empregados, apesar de suas limitações. Como resultado do uso desses sistemas construtivos, muitas construções são caracterizadas pela falta de planejamento e de controle, contribuindo para o desperdício de recursos, de tempo e de trabalho. Por isso, o setor da construção civil está sempre em busca de sistemas construtivos racionalizados e industrializados, que possam contribuir com a racionalização da construção e garantia da qualidade, atentando-se sempre para a viabilidade econômica das soluções.

Ao longo das últimas décadas, o sistema construtivo *Light Steel Framing* (LSF) tem despertado grande interesse da construção civil no Brasil. A expressão *Light Steel Framing* significa estrutura de aço leve e, nesse sistema construtivo, a estrutura é composta por perfis de aço formados a frio. Como característica fundamental, o LSF adota princípios da industrialização da construção, incluindo racionalização, padronização, coordenação modular e transformação do canteiro de obras em uma linha de montagem (Rodrigues *et al.*, 2016).

Uma edificação em LSF é composta por um conjunto de subsistemas: fundação, estrutura, vedação interna e externa, isolamento termoacústico, instalações hidrossanitárias e instalações elétricas. O subsistema estrutural é formado por elementos como painéis, pisos, coberturas e escadas. Os sistemas de piso utilizados em LSF podem ser do tipo seco ou úmido. Os sistemas de piso seco são formados por placas de piso de madeira ou placas cimentícias, aparafusadas sobre perfis de aço galvanizado formados a frio. Nos sistemas de piso úmido se utiliza o concreto moldado *in loco* para formação da laje.

Na Figura 1.1 mostra-se o esquema geral de um sistema de piso seco, composto por placas de *Oriented Stranded Board* (OSB) aparafusadas sobre vigas de aço compostas por perfis formados a frio. Em pisos secos são comumente utilizados materiais isolantes como poliestireno extrudado (XPS) e impermeabilizantes como mantas à base de policloreto de vinila (PVC) ou à base de poliolefinas termoplásticas (TPO).

Figura 1.1– Esquema geral do piso seco em LSF



Fonte: Rodrigues *et al.* (2016)

Segundo Kyvelou (2017), os pisos secos podem ser instalados rapidamente e permitem diferentes tipos de acabamentos. As placas de OSB possuem boa resistência mecânica e podem ser utilizadas como lajes com função estrutural, desde que sejam devidamente conectadas às vigas de piso. Na Figura 1.2 é mostrada a a estrutura de um sistema de piso seco durante a montagem.

Figura 1.2 – Aspecto de um sistema de piso seco durante a montagem



Fonte: Kyvelou (2017)

Normalmente não se considera o comportamento misto de vigas de piso compostas por perfis de aço formado a frio e placas de OSB, que formam a laje. Outra abordagem é verificar a segurança de pisos secos como vigas mistas de aço formado a frio e madeira. Nos últimos anos, Northcutt (2012), Martin (2014), Loehr (2016), Kyvelou (2017), Liu (2018) e Vella *et al.* (2020) desenvolveram trabalhos de pesquisa que apontam o potencial de se tirar proveito do comportamento misto de vigas compostas por perfis de aço formados a frio e placas de madeira, que formam a laje.

Os elementos estruturais mistos apresentam diversas vantagens em relação aos elementos isolados, como redução da seção transversal, redução da taxa de consumo de aço e a possibilidade de se alcançar maiores vãos.

Para obter um comportamento misto entre dois materiais ou dois elementos de materiais diferentes é preciso conectá-los entre si, de forma que possam trabalhar de maneira solidária. As forças longitudinais de cisalhamento que surgem na interface entre os materiais devem ser transmitidas de um material para o outro.

Um aspecto fundamental para se conseguir o comportamento misto de um elemento estrutural é a conexão entre os materiais que o compõem. Normalmente, essa conexão é viabilizada por meio de conectores de cisalhamento. Os conectores de cisalhamento devem transmitir as forças longitudinais de cisalhamento que surgem na interface entre os elementos e resistir às forças que tendem a causar a separação dos materiais na interface dos elementos. Nos elementos estruturais mistos compostos por perfis de aço formado a frio e madeira, de modo geral são utilizados conectores do tipo parafusos autoatarraxantes.

Segundo Veríssimo (2007), a ductilidade e a resistência última da conexão são propriedades que devem ser observadas ao avaliar o desempenho de conectores de cisalhamento. Essas propriedades podem ser obtidas a partir da relação força/deslizamento, que é a relação entre a força de cisalhamento transmitida e o deslizamento relativo entre as superfícies de contato dos elementos da viga mista. Essa relação é representada por uma curva obtida por ensaios em vigas em escala real ou, mais comumente, por ensaios de cisalhamento direto em modelos de escala reduzida, também conhecidos como ensaios *push-out* na literatura internacional.

Nesse contexto, este trabalho trata da análise experimental do comportamento de conexões parafusadas para vigas mistas compostas por perfis de aço formado a frio e madeira.

## 1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o comportamento estrutural de conexões parafusadas para vigas mistas de aço formado a frio e madeira.

Os objetivos específicos são:

- avaliar o comportamento força/deslizamento de conexões parafusadas para ações estáticas e determinar a resistência última, a rigidez e a ductilidade da conexão;
- avaliar a influência de parâmetros que afetam a capacidade resistente, a rigidez e a ductilidade da conexão, como o espaçamento entre os parafusos autoatarraxantes, o diâmetro dos mesmos e o uso de arruelas de aço;
- identificar e analisar os principais modos de falha das conexões parafusadas;
- propor um modelo analítico para estimar a capacidade resistente da conexão;
- desenvolver um procedimento para cálculo do momento fletor resistente da viga mista de aço e madeira.

### 1.3. Justificativa e relevância do tema

Para desenvolver o uso de sistemas de piso seco em LSF e tirar proveito de suas vantagens construtivas, é preciso avançar na compreensão do comportamento estrutural desses sistemas. O estudo da interação entre perfis de aço e placas de madeira tem como objetivo principal avaliar as reais possibilidades de obter um comportamento misto entre os dois materiais, buscando-se quantificar a influência sobre a capacidade resistente e rigidez dos elementos.

Os parafusos autoatarraxantes são os principais dispositivos utilizados para conectar os elementos que compõem os pisos secos. Se os parafusos forem suficientemente resistentes para transmitir as forças de interação entre os materiais e para combater a separação vertical entre os elementos, o comportamento misto pode ser obtido e os componentes de piso podem ser dimensionados usando métodos de cálculo para vigas mistas.

A utilização de vigas mistas de aço e madeira permite aproveitar melhor o desempenho dos materiais, reduzir a seção transversal e alcançar vãos maiores. Para tanto, o comportamento estrutural da conexão entre perfis de aço formados a frio e madeira por meio de parafusos autoatarraxantes deve ser investigado, o que realça o interesse pela realização de novos trabalhos de pesquisa sobre esse tema.

Recentemente, diversos estudos foram realizados com o objetivo de avaliar a interação entre placas de piso de madeira e vigas de aço, como o estudo realizado por NAHBRC (1999), Northcutt (2012), Martin (2014), Zhou *et al.* (2014), Chatterjee *et al.* (2014), Loehr (2016), Villela (2016), Hassanieh *et al.* (2016), Kyvelou (2017), Loss *et al.* (2017), Liu (2018), Chiniforush *et al.* (2019) Yang *et al.* (2020), Vella *et al.* (2020), dentre outros.

Tendo em vista os estudos recentes sobre o comportamento estrutural de sistemas mistos com perfis de aço formado a frio e placas de madeira, percebe-se que o meio de conexão é o fator determinante do desempenho do sistema. No entanto, nos trabalhos realizados no âmbito internacional não se consideram os materiais típicos utilizados no Brasil em sistemas de piso seco. Portanto, neste trabalho considera-se o comportamento de conexões parafusadas para sistemas de piso seco comumente utilizadas em sistemas de *Light Steel Framing* no Brasil.

#### 1.4. Estrutura da Dissertação

Este documento está dividido em cinco capítulos. Em cada um, estão agrupadas as informações relacionadas a cada etapa do estudo realizado.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão de literatura sobre aspectos importantes relacionados às conexões parafusadas para vigas mistas de aço e madeira. Primeiramente, são descritos os elementos que compõem pisos secos no sistema LSF. Em seguida, são abordados os fundamentos do comportamento misto. São também apresentadas definições de parâmetros importantes para o estudo, como o módulo de deslizamento e a curva elastoplástica de energia equivalente. Por fim, são apresentadas pesquisas anteriores recentes sobre o tema estudado.

No Capítulo 3, descreve-se o programa experimental realizado. São apresentadas as características dos modelos experimentais e os materiais utilizados. Em seguida, apresenta-se a produção dos modelos e, ao final, os equipamentos e métodos usados na realização dos ensaios *push-out*.

No Capítulo 4, os resultados obtidos no programa experimental são apresentados e discutidos. Inicialmente, a relação força/deslizamento para todas as amostras ensaiadas é amplamente discutida. São também apresentados e discutidos os resultados de capacidade resistente, de módulo de deslizamento e de ductilidade, bem como a influência das variáveis sobre esses parâmetros. A identificação e a análise do modo de falha predominante para as amostras também são abordadas nesse capítulo. Ao final do capítulo, propõe-se um modelo semiempírico para estimar a força resistente máxima da conexão e apresenta-se um procedimento e um exemplo para cálculo do momento fletor resistente da viga mista composta por perfil de aço formado a frio e placa de madeira.

Por fim, no Capítulo 5, as conclusões sobre os resultados obtidos no programa experimental são apresentadas. Além disso, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

# 2

---

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Considerações gerais

Neste capítulo, apresenta-se o estado atual do conhecimento sobre vigas mistas de aço e madeira. Primeiramente, são descritos os componentes do piso seco utilizados no sistema *Light Steel Framing* (LSF). Em seguida, apresentam-se os fundamentos do comportamento misto, conceito explorado ao longo do trabalho. São também descritos parâmetros importantes para este estudo, como o módulo de deslizamento e a curva elastoplástica de energia equivalente. No final do capítulo, são apresentados estudos relacionados ao comportamento misto entre elementos estruturais de aço e madeira realizados por outros autores no contexto nacional e internacional, com destaque para os resultados obtidos.

### 2.2. Componentes do sistema de piso seco

#### 2.2.1. Perfis de aço formados a frio

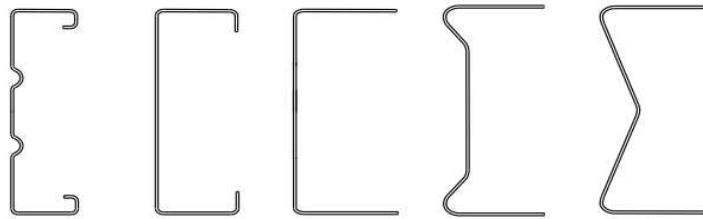
Segundo a ABNT NBR 6355:2012, o perfil estrutural de aço formado a frio (PFF) é obtido por dobramento de tiras cortadas de chapas ou bobinas, ou por conformação contínua em conjunto de matrizes rotativas. As séries comerciais mais usuais para perfis estruturais formados a frio são: cantoneira de abas iguais, cantoneira de abas desiguais, U simples, U enrijecido, Z enrijecido a 90°, Z enrijecido a 45° e cartola.

De acordo com a ABNT NBR 15523:2014, para a fabricação dos perfis estruturais formados a frio para o sistema LSF, devem ser empregadas chapas de aço revestidas com zinco ou com liga alumínio-zinco pelo processo contínuo de imersão a quente. O aço deve ter qualidade estrutural com resistência mínima de 230 MPa.

Kyvelou (2017) relata que para pisos secos no sistema LSF, os PFF são os elementos mais utilizados para constituir as vigas de piso, devido à sua alta relação resistência/peso, facilidade de pré-fabricação, produção em larga escala e montagem rápida no local. Embora inicialmente o seu uso tenha se limitado à construção de mezaninos para edifícios industriais, as estruturas de piso com vigas de PFF são cada vez mais usadas em edifícios comerciais e residenciais.

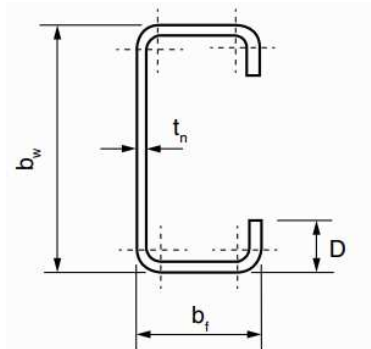
As seções transversais do tipo U, com ou sem enrijecedores nas bordas (denominadas Ue e U respectivamente) ou na alma do perfil, são as seções mais comuns para PFF no sistema LSF. Na Figura 2.1 são apresentadas algumas seções do tipo U usadas para vigas de piso. Na Figura 2.2 são indicados os símbolos das dimensões que caracterizam a seção transversal tipo Ue, de acordo com a ABNT NBR 6355:2012. A simbologia para designação de uma seção tipo Ue é dada por: Ue  $b_w \times b_f \times D \times t_n$ , sendo as dimensões expressas em milímetros.

Figura 2.1 – Seções transversais do tipo U usadas para vigas de piso no sistema LSF



Fonte: Kyvelou (2017)

Figura 2.2 – Simbologia utilizada para designação de uma seção transversal tipo Ue



Fonte: ABNT NBR 6355:2012

Os PFF são comumente fabricados com aço ZAR, um aço com revestimento zincado que possui qualidade estrutural, de acordo com a ABNT NBR 7008:2003. Na Tabela 2.1 são apresentadas algumas propriedades mecânicas dos aços ZAR.

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas dos aços ZAR

GRAU	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	Alongamento mínimo (%)
ZAR 230	230	310	22
ZAR 250	250	360	18
ZAR 280	280	380	16
ZAR 320	320	390	14
ZAR 345	345	430	12
ZAR 400	400	450	10
ZAR 550	550	570	-

Fonte: ABNT NBR 7008:2012

### 2.2.2. Placas de OSB

Segundo Villela (2016), o material denominado internacionalmente de *Oriented Stranded Board* (OSB) foi concebido inicialmente na região dos grandes lagos do Canadá, que é conhecida pela abundância em madeiras *aspen* e *pinus*. De acordo com Cabral *et al.* (2006), as placas de OSB começaram a ser produzidas no Brasil no ano de 2002, utilizando-se madeira *pinus*. Com a demanda crescente por madeira *pinus* para produção de placas de OSB, outras espécies, como o eucalipto, têm sido utilizadas pela indústria. Na Figura 2.3 é apresentado o aspecto geral de uma placa de OSB.

Figura 2.3 – Aspecto geral das placas de OSB



Fonte: Catálogo de placas de OSB da empresa LP Brasil

O OSB é uma placa composta por tiras de madeira finas e longas, parcialmente orientadas, com adição de cola impermeável e fixadas com resina por meio de calor e de pressão. As

propriedades mecânicas do OSB são semelhantes às da madeira maciça, pois o OSB não utiliza resíduos de serraria. Devido ao seu método de produção, o OSB apresenta excelente resistência e rigidez à flexão, viabilizando seu uso em sistemas de piso (CABRAL *et al.*, 2006).

Zenid (2009) relata que as placas de OSB foram idealizadas para atender aos requisitos de resistência mecânica exigidos para uso estrutural, não encontrada tanto na madeira aglomerada tradicional, quanto nas placas de MDF.

De acordo com Santiago *et al.* (2012), no sistema LSF as placas de OSB são utilizadas para sistemas de pisos, de cobertura e de vedação de paredes internas e externas. As placas de OSB são produzidas numa ampla faixa de espessuras, sendo a espessura mínima padrão de 6 mm, e a máxima de 38 mm. No sistema LSF, as espessuras de placas de OSB mais comuns são 9,5 mm, 11 mm e 12 mm para sistemas de vedação, 15,1 mm para sistemas de cobertura e 18,3 mm para sistemas de pisos. Na Figura 2.4 mostra-se um exemplo do uso de placas de OSB em um sistema de piso seco em LSF.

Figura 2.4– Sistema de piso seco em LSF com utilização de placas de OSB



Fonte: Santiago *et al.* (2012)

Os fabricantes de placas de OSB costumam apresentar valores médios e característicos das propriedades mecânicas das placas de OSB, obtidas por meio de ensaios de flexão estática paralela às fibras de acordo com os requisitos da ABNT NBR 7190:1997. De acordo com o catálogo técnico da empresa LP Brasil (2022), pode-se utilizar os seguintes valores como referência para as propriedades mecânicas do OSB:

- módulo de elasticidade médio à compressão,  $E_{co,m} = 5180,5 \text{ MPa}$ ;
- resistência característica à tração,  $f_{to,k} = 19,6 \text{ MPa}$ ;
- resistência característica à compressão,  $f_{co,k} = 13,7 \text{ MPa}$ .

### 2.2.3. Parafusos autoatarraxantes

Segundo Santiago *et al.* (2012), os parafusos autoatarraxantes são os principais dispositivos usados para conectar os perfis de aço formados a frio às placas de OSB. Os parafusos autoatarraxantes são fabricados em aço-carbono, tratados termicamente e revestidos por uma camada de proteção eletrolítica galvanizada para evitar a corrosão do material.

A ABNT NBR 14762:2012 recomenda o uso de parafusos de aço com qualificação estrutural, comuns ou de alta resistência. A utilização de parafusos de aço sem qualificação estrutural é tolerada desde que não seja adotado no projeto valor superior a 300 MPa para a resistência à ruptura do parafuso à tração.

De acordo com Rodrigues *et al.* (2016), no Brasil os parafusos autoatarraxantes normalmente são caracterizados por suas bitolas (#8, #10, #12 e #14). Na Tabela 2.2 são indicados os diâmetros correspondentes a cada bitola de parafuso autoatarraxante e na Tabela 2.3 são apresentados os comprimentos dos parafusos disponíveis para cada bitola.

Tabela 2.2 – Diâmetros dos parafusos autoatarraxantes por bitola

Bitola	Diâmetro (mm)
#8	4,2
#10	4,8
#12	5,5
#14	6,3

Fonte: Rodrigues *et al.*, 2016

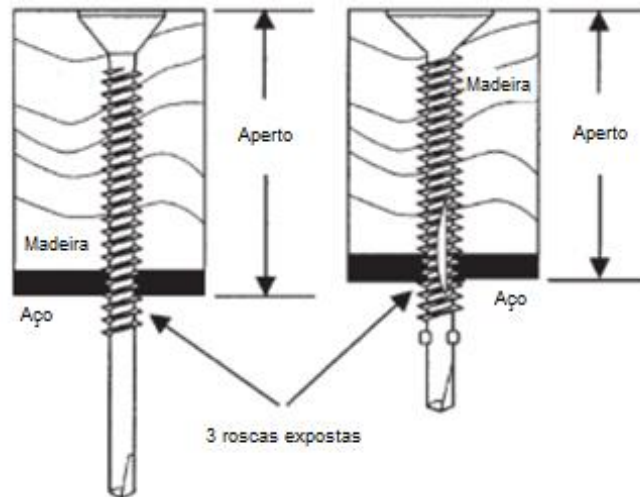
Tabela 2.3 – Comprimentos dos parafusos autoatarraxantes por bitola

Bitola	Comprimento (mm)
#8	12,7 a 25,4
#10 e #12	12,7 a 38,1

Fonte: Rodrigues *et al.*, 2016

O comprimento do parafuso depende do tipo de aplicação, pois quando utilizado para fixação de elementos de aço, o mesmo deve ultrapassar o perfil de aço em, no mínimo, três passos de rosca, conforme mostrado na Figura 2.5. Ao conectar placas de madeira a perfis de aço formado a frio, o parafuso deve fixar todas as camadas e se estender por pelo menos 10 mm além da mesa do perfil (RODRIGUES *et al.*, 2016).

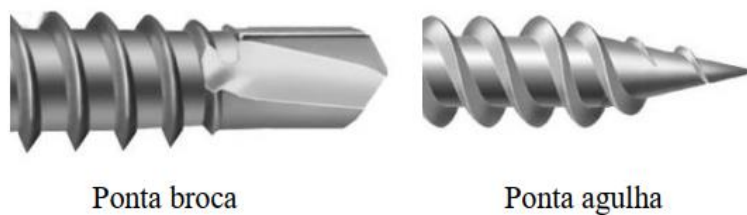
Figura 2.5 – Detalhe da fixação de parafusos autoatarraxantes



Fonte: Rodrigues *et al.* (2016)

Segundo Villela (2016), existem dois tipos de pontas típicas utilizadas em parafusos autoatarraxantes: ponta-broca ou autobrocante e ponta-agulha, conforme ilustrado na Figura 2.6. Para sistemas de piso seco, normalmente são utilizados parafusos com ponta-broca.

Figura 2.6 – Tipos de ponta de parafusos autoatarraxantes



Fonte: Catálogo de parafusos da empresa Rebipar

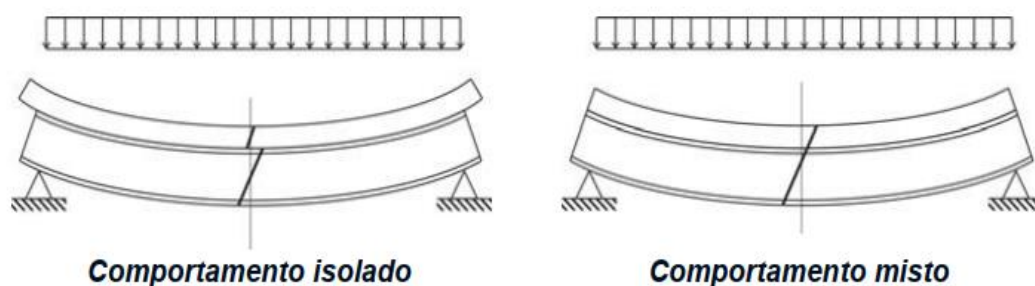
## 2.3. Fundamentos do comportamento misto

### 2.3.1. Princípios básicos

Segundo Calado e Santos (2014), “estrutura mista é aquela onde estão presentes elementos estruturais com seção mista, isto é, seções resistentes, nas quais dois ou mais materiais estão ligados entre si e trabalham solidariamente, obtendo-se assim elementos estruturais com comportamento diferente dos materiais individuais”.

Para se obter o comportamento misto entre dois materiais ou dois elementos de materiais diferentes, deve-se conectá-los entre si, de maneira a fazer com que eles se deformem solidariamente na presença de ações externas. A força de cisalhamento longitudinal que surge na interface entre os materiais deve ser transferida entre os elementos. Se isto não ocorrer, o comportamento misto não é promovido e prevalece o comportamento isolado entre os materiais, conforme ilustrado na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Diferença entre comportamento isolado e comportamento misto



Fonte: Paes, 2020

Segundo Liu (2018), o comportamento misto é obtido quando dois elementos de materiais diferentes são unidos de maneira a se comportarem como uma peça única. Dessa forma, a união de dois materiais pode associar a boa resistência de um material, com a deficiência de resistência do outro. Esse conceito tem sido amplamente estudado e explorado para estruturas mistas de aço e concreto e, até o momento, poucos estudos investigaram o comportamento misto em sistemas de aço e madeira.

### **2.3.2. Influência da interface**

O trabalho solidário entre o aço e a madeira depende da eficiência da conexão para garantir a resistência e a rigidez do sistema. Os dois principais aspectos para se avaliar a eficiência de uma conexão de cisalhamento são o tipo de interação e o grau de conexão.

A interação é considerada total ou completa se não houver movimento relativo na interface, ou seja, nenhum deslizamento relativo longitudinal nem separação transversal. A interação é considerada parcial ou incompleta se houver algum deslizamento relativo longitudinal, ou separação transversal entre as superfícies dos materiais. Vigas mistas com interação parcial apresentam maiores deslocamentos do que vigas mistas semelhantes com interação total (PAES e MIRAMBELL, 2004).

Segundo Paes e Mirambell (2004), em relação ao grau de conexão, quando a capacidade resistente da seção transversal não depende da resistência da conexão, caracteriza-se a conexão total. Neste caso, a capacidade resistente é determinada em função da falha das seções parciais dos materiais conectados e não do meio de conexão. Quando a capacidade resistente da seção depende da resistência da conexão, tem-se a situação denominada de conexão parcial.

Segundo a EN-1994-1-1:2004, quando há conexão total pode-se admitir a ocorrência de conexão total, pois neste caso a influência do deslizamento relativo sobre a deformabilidade do elemento estrutural misto é desprezível.

### **2.3.3. Módulo de deslizamento**

O módulo de deslizamento ( $k_s$ ) é definido pela relação força/deslizamento e expressa a quantidade de deslizamento que ocorre quando uma determinada quantidade de força é aplicada na conexão. De acordo com Northcutt (2012), o módulo de deslizamento ( $k_s$ ) reflete a rigidez de conexões parafusadas para vigas mistas de aço e madeira e pode ser obtido experimentalmente por meio de ensaios de cisalhamento de direto.

Segundo Kyvelou (2017), a partir do módulo de deslizamento pode-se calcular o módulo de cisalhamento ( $\gamma$ ) e a rigidez efetiva da seção mista ( $EI_{eff}$ ), que são fundamentais para o cálculo de deslocamentos de vigas mistas de perfis de aço formados a frio e madeira.

Segundo a EN 26981:1991 e a EN 12512:2006, os módulos de deslizamento a 40% de  $F_{máx}$  ou inicial ( $k_{s,0,4}$ ), a 60% de  $F_{máx}$  ou pré-pico ( $k_{s,0,6}$ ) e a 80% de  $F_{máx}$  ( $k_{s,0,8}$ ) são definidos como:

$$k_{s0,4} = \frac{0,4 F_{m\acute{a}x}}{v_{0,4}} \quad [2.1]$$

$$k_{s0,6} = \frac{0,6 F_{m\acute{a}x}}{v_{0,6}} \quad [2.2]$$

$$k_{s0,8} = \frac{0,8 F_{m\acute{a}x}}{v_{0,8}} \quad [2.3]$$

onde:

$F_{m\acute{a}x}$  é a força máxima da conexão, obtida em ensaios *push-out*;

$v_{0,4}$  é o deslizamento correspondente a 40% de  $F_{m\acute{a}x}$ ;

$v_{0,6}$  é o deslizamento correspondente a 60% de  $F_{m\acute{a}x}$ ;

$v_{0,8}$  é o deslizamento correspondente a 80% de  $F_{m\acute{a}x}$ .

#### **2.3.4. Energia equivalente elastoplástica**

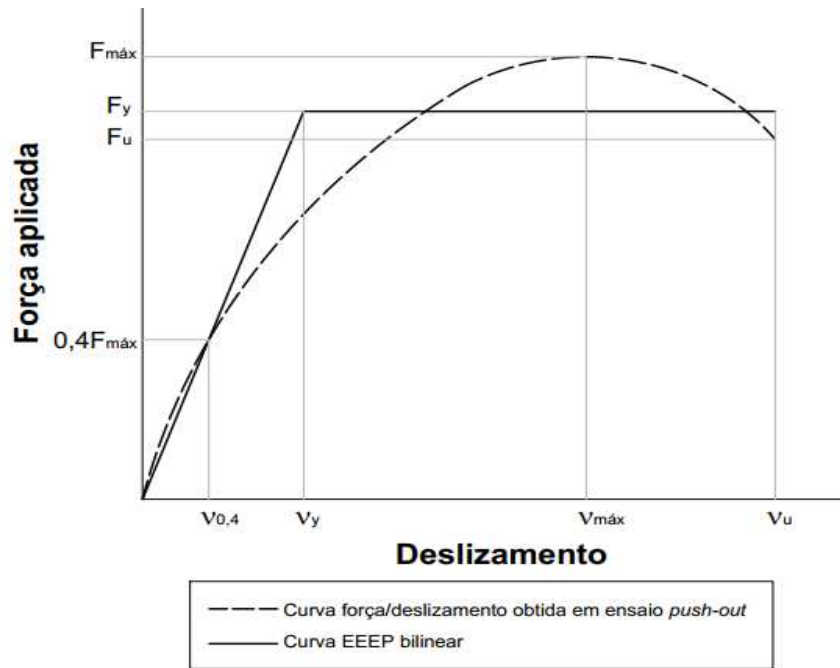
O conceito de energia equivalente foi proposto pela primeira vez por Park (1989), apresentado de uma forma modificada por Foliente (1996), e aplicado à interpretação de dados de ensaios em um extenso programa de pesquisa sobre paredes de cisalhamento para estruturas de aço e madeira no Virginia Polytechnic Institute por vários pesquisadores (Dolan e Johnson 1996a, 1996b; Johnson e Dolan 1996; Dolan e Heine 1997a, 1997b, 1997c; Heine 1997; Johnson 1997; Salenikovich 2000). Na norma ASTM E2126:2005 é apresentado um método de cálculo utilizando o conceito de energia elastoplástica equivalente (EEEP) para obter parâmetros de projeto de paredes de cisalhamento para estruturas leves de aço (BRANSTON *et al.*, 2006).

Segundo Datchoua (2018), a curva de energia equivalente elastoplástica (EEEP) representa o comportamento força/deslizamento elastoplástico ideal que se desenvolve e dissipa uma quantidade equivalente de energia em relação à amostra ensaiada.

Branston *et al.* (2006) apresentam uma curva EEEP bilinear, visando uma simplificação da representação do comportamento força/deslizamento, que contém um trecho perfeitamente elástico até o escoamento e um outro trecho perfeitamente plástico, até alcançar a falha. Essa curva representa satisfatoriamente o comportamento de conexões de aço e madeira que normalmente tendem a falhar de maneira dúctil, mantendo um bom nível de resistência na

região inelástica da curva força/deslizamento, ou seja, em geral não apresentam um comportamento frágil. Na Figura 2.8 mostra-se o modelo bilinear de energia equivalente elastoplástica obtido a partir da curva de força/deslizamento de um ensaio *push-out*.

Figura 2.8 – Modelo bilinear de energia equivalente elastoplástica apresentado por Branston *et al.* (2006)



Adaptado de Branston *et al.* (2006)

De acordo com Datchoua (2016), a curva EEEP é definida de tal forma que a área sob a mesma ( $A_{EEEEP}$ ) e a área sob a curva força/deslizamento do modelo *push-out* ( $A$ ) sejam iguais. A área ( $A$ ) deve ser determinada considerando-se a variação das forças correspondentes ao trecho que vai de zero até o deslizamento último ( $v_u$ ). O trecho elástico da curva EEEP apresenta uma inclinação igual ao valor do módulo de deslizamento elástico ( $k_{s0,4}$ ). Por outro lado, o trecho plástico dessa curva é representado por uma linha horizontal situada no nível da força resistente ao escoamento ( $F_y$ ). A energia dissipada equivale à área sob a curva do modelo *push-out* ( $A$ ), para uma faixa de deslizamentos que vai de zero até o deslizamento último ( $v_u$ ).

A área sob a curva EEEP ( $A_{EEEEP}$ ) é dada por:

$$A_{EEEEP} = \frac{v_y \times F_y}{2} + F_y (v_u - v_y) \quad [2.4]$$

Admitindo-se  $v_y = \frac{F_y}{k_{s0,4}}$  e igualando-se a expressão 2.4 à área sob a curva do modelo *push-out*

(A), tem-se:

$$-\frac{F_y^2}{2k_{s0,4}} + (v_u \times F_y) - A = 0 \quad [2.5]$$

Resolvendo-se a equação (2.5), do tipo  $ax^2 + bx + c = 0$ , para  $x = F_y$ , com  $a = -\frac{1}{2k_{s0,4}}$ ;  $b = v_u$

e  $c = -A$ , pode-se obter o valor da força resistente ao escoamento ( $F_y$ ):

$$F_y = \frac{-v_u \pm \left( \sqrt{v_u^2 - \frac{2A}{k_{s0,4}}} \right)}{\frac{-1}{k_{s0,4}}} \quad [2.6]$$

onde  $v_u$  é o deslizamento último do modelo *push-out*,  $A$  é a área sob a curva do modelo *push-out* e  $k_{s0,4}$  é o módulo de deslizamento elástico.

Com o valor de  $F_y$  determinado, pode-se obter o valor correspondente a  $v_y$ . Com esses dois valores é possível montar a curva EEEP e obter o fator de ductilidade ( $D$ ) da conexão, conforme apresentado na EN 12512:2001, que é dado pela expressão 2.7:

$$D = \frac{v_u}{v_y} \quad [2.7]$$

## 2.4. Estudos relacionados ao comportamento misto aço-madeira

### 2.4.1 Northcutt (2012)

Northcutt (2012) conduziu 12 ensaios *push-out* para determinar os valores do módulo de deslizamento ( $k_s$ ) entre perfis de aço formados a frio e placas de madeira compensada. Para tanto, os ensaios *push-out* foram realizados variando-se a espessura dos perfis de aço (0,84 mm, 1,37 mm, 1,73 mm e 2,46 mm) e da placa de madeira compensada (12,7 mm e 18,3 mm). Foram utilizados parafusos autoatarraxantes autobrocantes com diâmetro de 4,8 mm como conectores de cisalhamento. O espaçamento entre parafusos foi de 304,8 mm. Os modelos experimentais

consistiam em duas placas de madeira compensada com dimensões de 150 mm × 610 mm, posicionadas de cada lado de um perfil de aço formado a frio, com 610 mm de comprimento. Foram instalados medidores de deslocamento do tipo *string pot* ao lado de cada placa de madeira para medir o deslizamento relativo entre os materiais. Na Figura 2.9 está apresentado o aspecto geral dos ensaios *push-out* realizados.

Figura 2.9 – Aspecto geral dos ensaios *push-out* realizados por Northcutt (2012)



Fonte: Northcutt (2012)

Os resultados mostraram que o aumento da espessura dos perfis de aço proporcionou um aumento na resistência das amostras. Exceto nos ensaios com perfil de aço formado a frio de 2,46 mm de espessura, em que aconteceu falha por cisalhamento do parafuso, o modo de falha predominante foi o *screw tilting*, que consiste no giro do parafuso com a sua cabeça penetrando na placa de madeira, conforme mostrado na Figura 2.10. Na Tabela 2.4 são apresentados os resultados dos ensaios *push-out* realizados por Northcutt (2012).

Figura 2.10 – Falha por *screw tilting* observada nos modelos ensaiados por Northcutt (2012)

Fonte: Northcutt (2012)

Tabela 2.4 – Resultados dos ensaios realizados por Northcutt (2012)

Série de teste	Espessura do perfil de aço (mm)	Espessura da madeira (mm)	Força última (kN)	Deslizamento máximo (kN)	Módulo de deslizamento $k_{s0,4}$ (kN/mm)	Modo de falha
1	0,838	12,7	8,83	11,75	1,15	<i>screw tilting</i>
	0,838	12,7	9,13	15,26	1,81	<i>screw tilting</i>
	0,838	12,7	7,60	15,38	1,47	<i>screw tilting</i>
2	1,372	12,7	11,06	15,29	5,39	<i>screw tilting</i>
	1,372	12,7	11,82	12,95	4,96	<i>screw tilting</i>
	1,372	12,7	11,43	15,26	7,33	<i>screw tilting</i>
3	1,727	12,7	11,04	15,37	2,44	<i>screw tilting</i>
	1,727	12,7	12,74	15,34	4,25	<i>screw tilting</i>
	1,727	12,7	13,21	15,36	5,47	<i>screw tilting</i>
4	2,464	18,3	15,09	5,36	7,36	cisalhamento do parafuso
	2,464	18,3	17,50	10,11	7,32	cisalhamento do parafuso
	2,464	18,3	14,65	12,66	5,12	cisalhamento do parafuso

Fonte: Northcutt (2012)

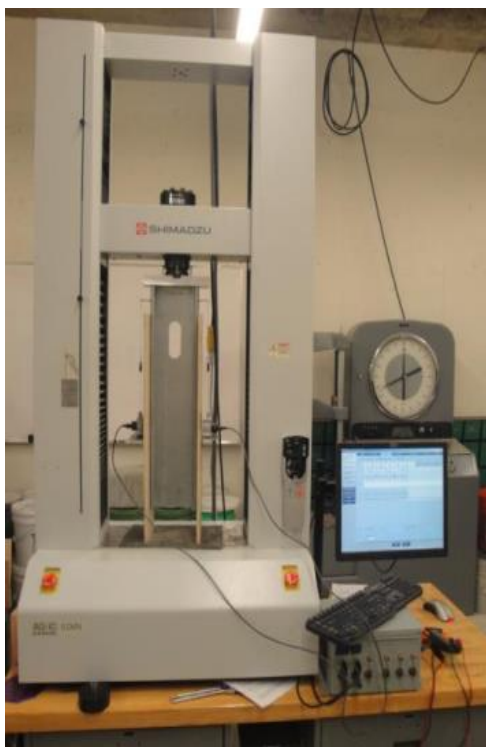
A partir dos resultados obtidos, Northcutt (2012) propôs um método de cálculo que considera o aumento de resistência e de rigidez proporcionado pela interação parcial entre o aço e a madeira compensada.

### 2.4.2. Martin (2014)

Martin (2014) expandiu o programa experimental de Northcutt (2012) acrescentando duas novas séries de testes. Na primeira série mantiveram-se constantes o espaçamento entre parafusos (304,8 mm) e a espessura da madeira compensada (12,7 mm), variando-se a espessura do perfil de aço formado a frio (1,10 mm, 1,37 mm, 2,46 mm). Na segunda série manteve-se constante a espessura do perfil formado a frio (1,10 mm), variando-se o espaçamento entre parafusos de 152,4 mm, 203,2 mm, 254 mm e 304,8 mm, de forma a avaliar o efeito espaçamento sobre o módulo de deslizamento ( $k_s$ ).

Os modelos experimentais de Martin (2014) foram semelhantes aos de Northcutt (2012), consistindo em duas placas de madeira compensada com dimensões de 150 mm × 610 mm, posicionadas de cada lado de um perfil de aço formado a frio, com 610 mm de comprimento. Foram utilizados parafusos autoatarraxantes autobrocantes com diâmetro de 4,8 mm como conectores de cisalhamento. Na Figura 2.11 está apresentado o aspecto geral dos ensaios *push-out* realizados.

Figura 2.11 – Aspecto geral dos ensaios *push-out* realizados por Martin (2014)



Fonte: Martin (2014)

O modo de falha predominante nos ensaios foi o *screw tilting*. Nos ensaios com menor espaçamento entre os parafusos (150 mm e 200 mm), a falha ocorreu na placa de madeira compensada, que sofreu colapso próximo ao apoio antes de atingir a falha por *screw tilting*, conforme apresentado na Figura 2.12. Na Tabela 2.5 são apresentados os resultados dos ensaios realizados por Martin (2014).

Figura 2.12 – Falha por *screw tilting* observada nos modelos ensaiados por Martin (2014)



Fonte: Martin (2014)

Tabela 2.5 – Resultados dos ensaios realizados por Martin (2014)

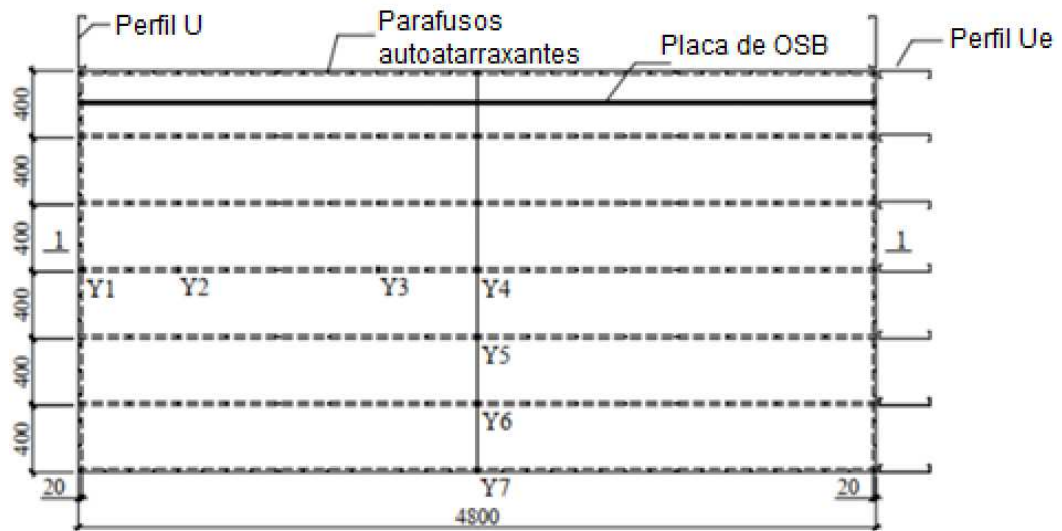
Série de teste	Espessura do perfil de aço (mm)	Espaçamento entre parafusos (mm)	Força última (kN)	Deslizamento máximo (kN)	Módulo de deslizamento $k_{s0,4}$ (kN/mm)	Modo de falha
T43	1,092	304,8	14,35	16,41	4,98	<i>screw tilting</i>
	1,092	304,8	14,53	15,72	2,73	<i>screw tilting</i>
	1,092	304,8	14,41	13,74	2,73	<i>screw tilting</i>
T54	1,372	304,8	14,16	17,68	2,82	<i>screw tilting</i>
	1,372	304,8	15,07	12,9	2,54	<i>screw tilting</i>
	1,372	304,8	15,36	16,26	3,92	<i>screw tilting</i>
T97	2,464	304,8	15,02	17,42	4,73	<i>screw tilting</i>
	2,464	304,8	12,34	6,73	6,09	<i>screw tilting</i>
	2,464	304,8	14,58	13,13	6,24	<i>screw tilting</i>
TF6	1,092	152,4	14,76	5,77	4,38	flambagem da placa de madeira
	1,092	152,4	16,27	6,27	6,67	flambagem da placa de madeira
	1,092	152,4	20,57	13,26	3,84	flambagem da placa de madeira
TF8	1,092	203,2	20,49	10,06	5,57	flambagem da placa de madeira
	1,092	203,2	20,69	16,51	4,19	flambagem da placa de madeira
	1,092	203,2	22,29	16,76	3,86	flambagem da placa de madeira
TF10	1,092	254,0	16,07	20,22	2,82	<i>screw tilting</i>
	1,092	254,0	14,11	18,36	3,56	<i>screw tilting</i>
	1,092	254,0	13,82	18,24	2,05	<i>screw tilting</i>
TF12	1,092	304,8	14,35	16,41	4,98	<i>screw tilting</i>
	1,092	304,8	14,53	15,72	2,73	<i>screw tilting</i>
	1,092	304,8	15,21	13,74	4,08	<i>screw tilting</i>

Fonte: Martin (2014)

### 2.4.3. Zhou et al. (2014)

Zhou et al. (2014) investigaram a resistência à flexão do sistema de piso seco composto por perfis formados a frio e placas de OSB, considerando o comportamento misto entre aço e madeira. Para isso, realizaram ensaios de flexão estática em dois modelos idênticos de piso seco em escala real, denominadas de FL-1 e FL-2, conforme mostrado na Figura 2.13.

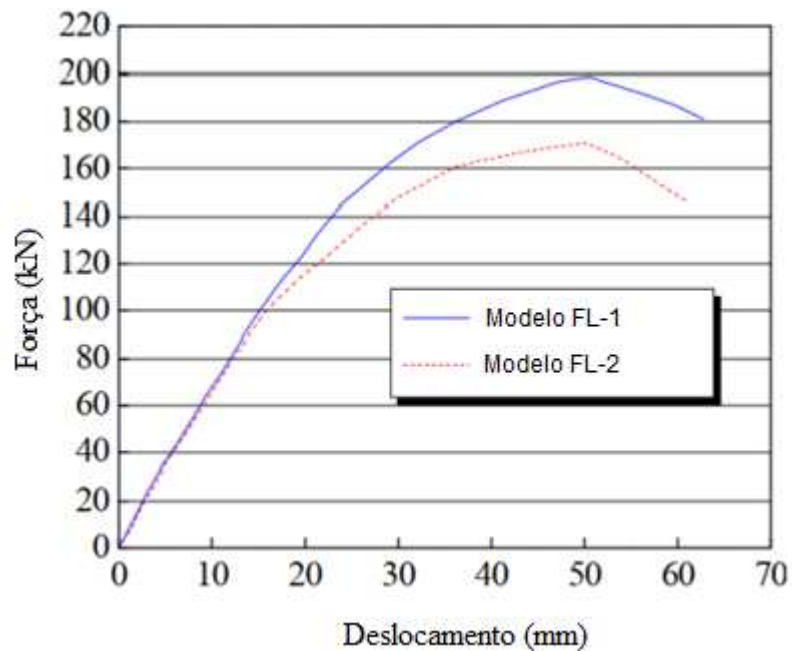
Figura 2.13 – Detalhe dos modelos ensaiados por Zhou et al. (2014)



Fonte: Zhou et al. (2014)

As curvas de força / deslocamento vertical para os dois modelos ensaiados são apresentadas na Figura 2.14. Os modos de falha identificados são apresentados na Figura 2.15.

Figura 2.14 – Resultados do ensaio de flexão estática



Fonte: Zhou et al. (2014)

Figura 2.15 – Modos de falha observados nos ensaios de Zhou et al. (2014)



a) flambagem local da alma.

b) a placa de OSB não apresentou deformações relevantes

c) falha dos perfis de aço do modelo FL-2.

Fonte: Zhou *et al.* (2014)

Posteriormente, Zhou *et al.* (2014) realizaram simulações numéricas dos experimentos, utilizando modelos de elementos finitos. Além disso, realizaram também um estudo de variação de parâmetros, no qual foram investigadas a influência do espaçamento de parafusos sobre a resistência (Tabela 2.6) e a influência da relação comprimento / largura do sistema de piso sobre o comportamento estrutural (Tabela 2.7).

Tabela 2.6 – Resultados do estudo de variação de parâmetros realizado por Zhou *et al.* (2014) para investigar a influência do espaçamento entre parafusos e da altura dos perfis

Esquema do ensaio	Dimensões da estrutura de aço	Espaçamento entre parafusos (mm)	Força última (kN)
Dimensões do modelo: 4,8 x 2,4 m (comprimento x largura) - espaçamento entre vigas: 400 mm - espessura da placa de OSB: 18,3mm	Vigas centrais: Ue305x41x14x1,6  Vigas laterais: Ue305x35x1,6	300/300	196,68
		150/300	206,45
		100/300	210,38
		150/600	196,05
		150/300	206,45
		150/150	255,20
	Vigas centrais: Ue255x41x14x1,6  Vigas laterais: Ue255x35x1,6	150/100	269,81
		300/300	164,31
		150/300	171,23
		100/300	175,21
		150/600	159,79
		150/300	171,44
		150/150	202,00
		150/100	215,55

Fonte: Zhou *et al.* (2014)

Tabela 2.7 - Resultados do estudo realizado por Zhou *et al.* (2014) para investigar a influência da relação comprimento/largura do sistema de piso sobre o comportamento estrutural

Descrição da montagem	Comprimento x Largura (mm)	Razão C/L	Número de vigas centrais	Força última (kN)
. Vigas centrais: Ue305x41x14x1,6 . Vigas laterais: U305x35x1,6 . Placa de OSB de 18,3 mm . Espaçamento entre parafusos: 150/300	4,8 x 1,2	4	4	116,05
	4,8 x 1,6	3	5	145,51
	4,8 x 2,0	2,4	6	177,36
	4,8 x 2,4	2	7	206,45
	4,8 x 2,8	1,72	8	238,77
	4,8 x 3,2	1,5	9	268,75

Fonte: Zhou *et al.* (2014)

Por fim, os autores propuseram um método simplificado de projeto para determinação da resistência do piso, através da introdução de um coeficiente de combinação de efeitos ( $\eta$ ), que depende do espaçamento entre vigas, do espaçamento entre parafusos, da espessura do OSB e da altura do perfil de aço.

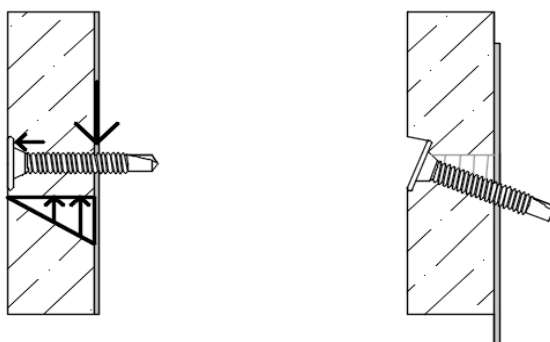
#### 2.4.4. Loehr (2016)

Loehr (2016) deu continuidade à linha de pesquisa conduzida por Northcutt (2012) e Martin (2014), aprimorando o procedimento do ensaio realizado anteriormente. Os objetivos do estudo foram avaliar o efeito do espaçamento dos parafusos sobre o módulo de deslizamento ( $k_s$ ), minimizar os erros nos resultados encontrados em trabalhos anteriores e melhorar o nível de confiança dos resultados.

Nos ensaios *push-out*, foram utilizados espaçamentos entre parafusos de 152,4 mm, 203,2 mm, 254 mm e 304,8 mm, mantendo-se as outras variáveis constantes. A espessura das placas de OSB foi de 15 mm e foi utilizada uma seção Ue 150x41x12x1,10 para o perfil de aço formado a frio. Foram utilizados parafusos autoatarraxantes autobrocantes com diâmetro de 4,8 mm como conectores de cisalhamento.

Por meio de uma análise estatística dos estudos anteriores, determinou-se que seriam necessários quinze testes para cada espaçamento entre parafusos, a fim de se obter resultados representativos, com intervalo de confiança adequado.

O modo de falha de todas as amostras ensaiadas por Liu (2018) consistiu no giro do parafuso autoatarraxantes associado ao embutimento da madeira. Esse modo de falha é denominado como *screw tilting* e está apresentado na Figura 2.16.

Figura 2.16 – Mecanismo de falha por *screw tilting*

Fonte: Loehr (2016)

Com base nos ensaios realizados, Loehr (2016) destaca que quanto maior o espaçamento entre os parafusos, maior o deslizamento entre o perfil de aço formado a frio e a placa OSB e, conseqüentemente, menor o módulo de deslizamento ( $k_s$ ). Na Tabela 2.8 são apresentados os resultados dos ensaios realizados por Loehr (2016).

Tabela 2.8 – Resultados dos ensaios realizados por Loehr (2016)

Espaçamento entre parafusos (mm)	Estatística	Força última (kN)	Deslizamento máximo (kN)	Módulo de deslizamento $k_{s0,4}$ (kN/mm)
152,4	Média	21,50	10,82	28,7
	Desvio padrão	1,65	0,51	6,36
	C.O.V.	8%	4%	34%
	Máximo	23,60	12,91	52,89
	Mínimo	17,47	11,04	18,96
203,2	Média	21,15	11,33	26,44
	Desvio padrão	1,41	0,73	7,41
	C.O.V.	7%	6%	26%
	Máximo	23,41	12,24	39,18
	Mínimo	18,91	9,31	20,48
254,0	Média	21,1	11,86	20,39
	Desvio padrão	1,74	0,77	3,37
	C.O.V.	8%	6%	52%
	Máximo	23,90	13,20	66,61
	Mínimo	17,76	10,19	10,2
304,8	Média	20,41	11,45	21,15
	Desvio padrão	1,14	0,56	2,61
	C.O.V.	8%	5%	32%
	Máximo	22,07	12,56	30,9
	Mínimo	17,27	10,55	9,37

Fonte: Loehr (2016)

Embora seja difícil comparar os resultados obtidos por Loehr (2016) com estudos anteriores, uma vez que se alterou a placa de madeira (de compensado para OSB), o autor afirma que a precisão dos resultados melhorou devido às alterações no procedimento de ensaio.

#### **2.4.5. Villela (2016)**

Villela (2016) realizou 12 ensaios *push-out*, divididos em 4 séries. As séries consistiram em uma combinação entre perfis formados a frio tipo Ue 90×41×12×0,95 mm e Ue 200×41×12×0,95 mm, espaçamentos entre perfis de 400 mm e 600 mm, e espaçamento entre parafusos de 150 mm e 300 mm. O objetivo dos ensaios foi avaliar a utilização de placas de OSB como elemento de contraventamento no sistema LSF. Foram testadas placas de OSB com espessuras de 9,5 mm e 11,0 mm, comumente utilizadas em sistemas de parede. Na Figura 2.17 está apresentado o aspecto geral dos ensaios *push-out* realizados por Villela (2016).

Figura 2.17 – Aspecto geral dos ensaios *push-out* realizados por Villela (2016)



Fonte: Villela (2016)

Os resultados obtidos por Villela (2016) nos ensaios *push-out* mostraram que a associação de parafusos autoatarraxantes com placas de OSB e perfis de aço formados a frio apresenta um comportamento dúctil, com valores de deslizamento característicos superiores a 6,0 mm.

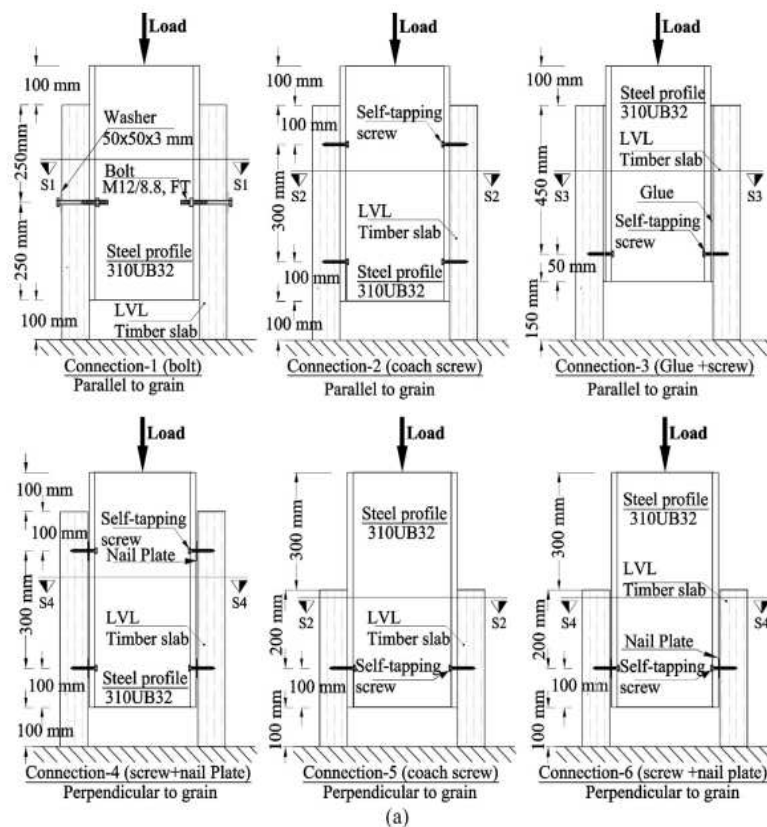
A autora também observou que a resistência da conexão aumentou com a espessura da placa de OSB. Quanto maior a espessura da placa, maior sua capacidade de resistir ao esmagamento e ao rasgamento, e também maior o deslizamento suportado pela conexão entre os elementos de

aço e madeira. A espessura da placa de OSB foi a variável do sistema que teve maior impacto na resistência da ligação. A resistência da conexão com a placa de 11,0 mm foi cerca de 71% maior do que com a placa de 9,0 mm.

#### 2.4.6. Hassanieh et al. (2016)

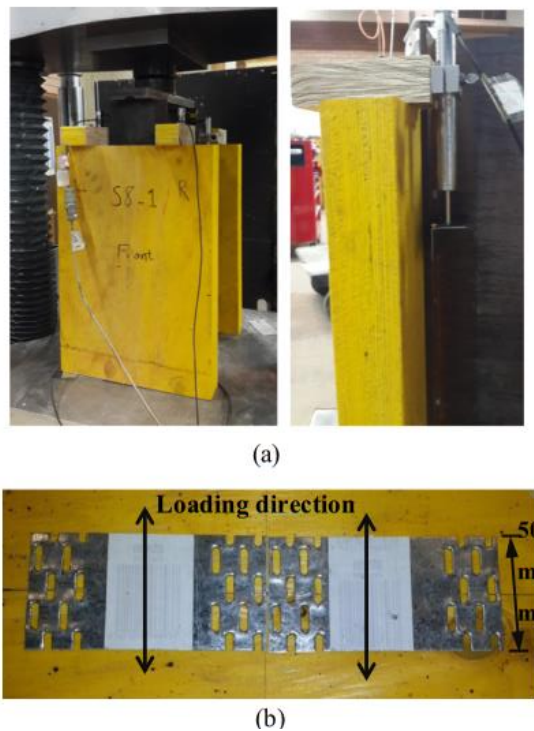
Hassanieh et al. (2016) estudaram o comportamento força/deslizamento de conexões para sistemas mistos de aço e madeira. Foram realizados ensaios *push-out* com forças aplicadas nas direções paralela e perpendicular às fibras da madeira, a fim de avaliar o comportamento de pinos de alta resistência, parafusos, uma combinação de adesivo estrutural e parafusos e uma junção entre parafusos com uma placa de aço. Na Figura 2.18 são mostrados detalhes dos seis modelos ensaiados e na Figura 2.19 os arranjos experimentais dos ensaios *push-out*.

Figura 2.18 – Configuração dos seis diferentes modelos



Fonte: Hassanieh et al. (2016)

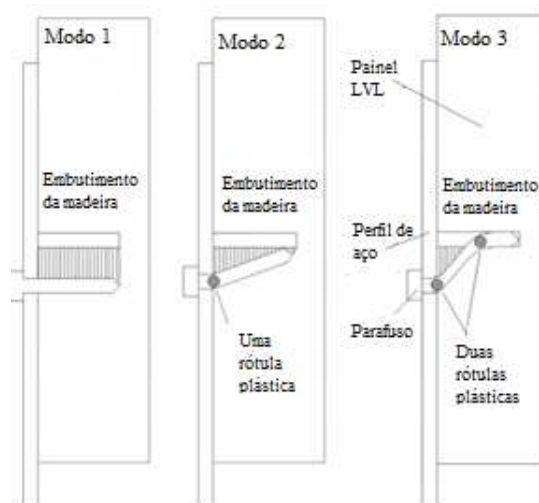
Figura 2.19 – Arranjos experimentais: a) configuração do ensaio *push-out* e transdutores de deslocamento; b) instalação das placas de aço respeitando a direção de carregamento



Fonte: Hassanieh *et al.*, 2016

Os modos de falha identificados para os ensaios *push-out* são ilustrados na Figura 2.20. O Modo 1 representa o esmagamento da seção transversal de madeira, o Modo 2 o esmagamento da madeira em conjunto com o aparecimento de uma rótula plástica no parafuso e o Modo 3 o esmagamento da madeira com o desenvolvimento de duas rótulas plásticas no parafuso.

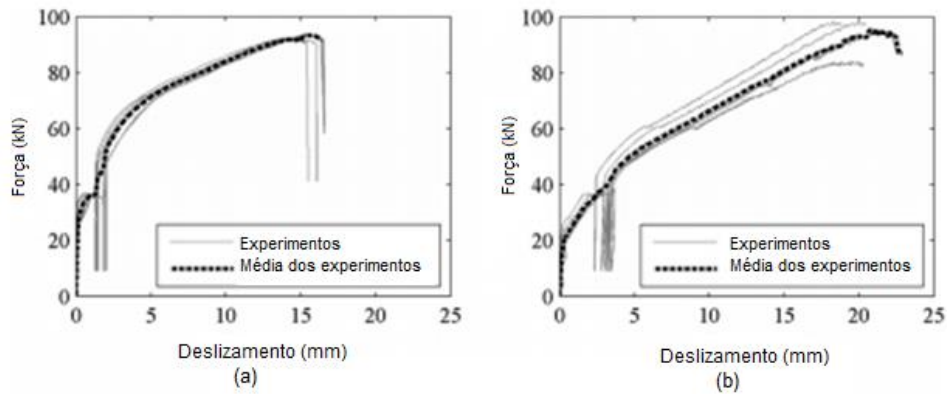
Figura 2.20– Modos de falha das amostras



Fonte: Hassanieh *et al.* (2016)

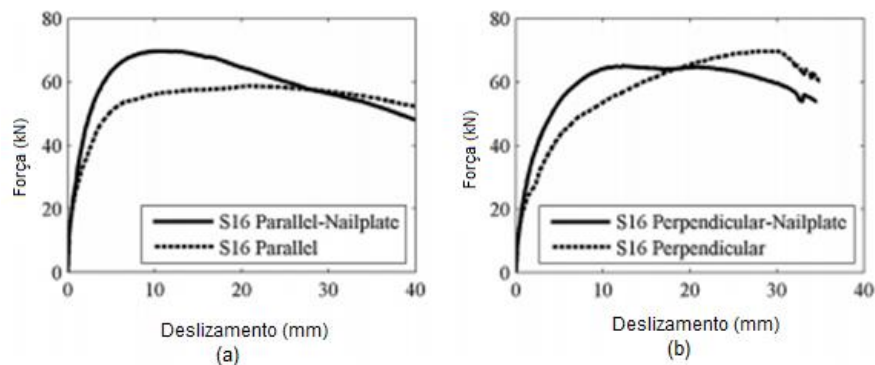
As curvas força/deslizamento obtidas nos ensaios *push-out* para os modelos de Hassanieh *et al.* (2016) são apresentadas na Figura 2.21, na Figura 2.22 e na Figura 2.23.

Figura 2.21 – Curva força/deslizamento para a conexão com pinos de 12 mm para as direções paralela (a) e perpendicular (b) às fibras



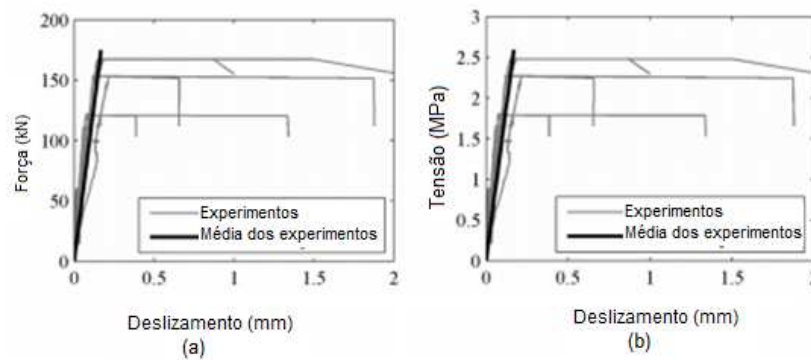
Fonte: Hassanieh *et al.* (2016)

Figura 2.22 – Curva força/deslizamento para a conexão com parafusos de 16 mm com e sem a utilização da placa de aço para ambas as direções paralela e perpendicular às fibras



Fonte: Hassanieh *et al.* (2016)

Figura 2.23 – a) Curva força/deslizamento; b) Curvas de tensão / deslizamento para as conexões com adesivo estrutural



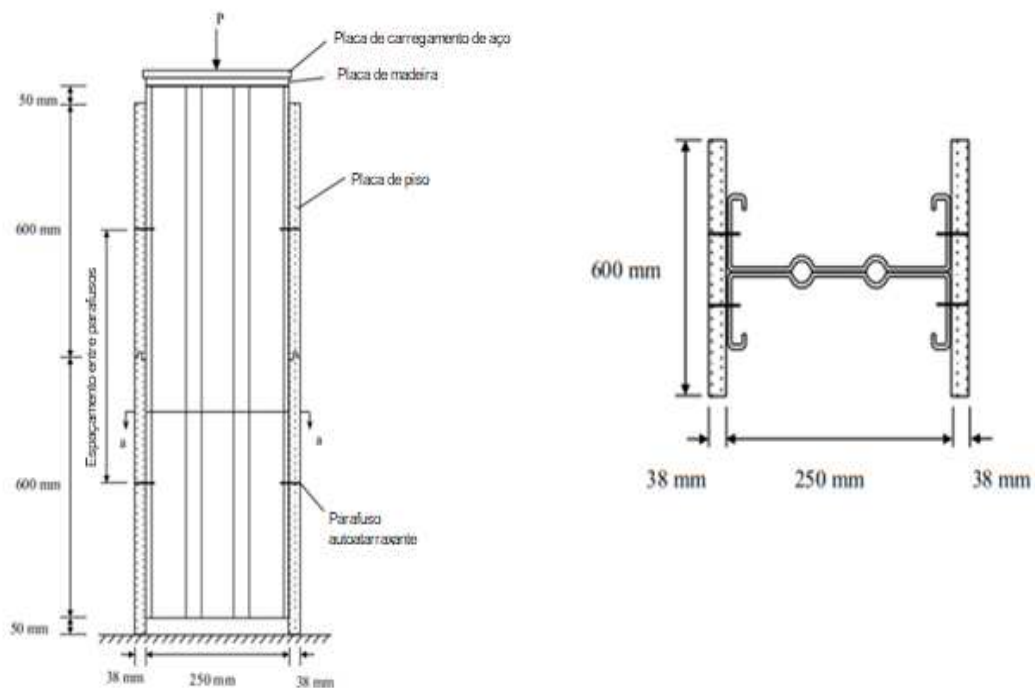
Fonte: Hassanieh *et al.* (2016)

### 2.4.7. Kyvelou (2017)

Kyvelou (2017) realizou 9 ensaios *push-out* em modelos de vigas mistas de aço compostas por perfis formados a frio e placas de madeira, a fim de avaliar a influência de diferentes dispositivos de conexão no comportamento misto entre esses elementos. Os dispositivos de conexão investigados foram parafusos autoatarraxantes e adesivos estruturais. A espessura do perfil de aço formado a frio e o espaçamento entre parafusos também foram investigados no programa experimental.

Os modelos experimentais consistiram em duas placas de OSB com espessura de 38 mm, conectadas a um perfil de aço formado a frio, composto por duas seções Ue soldadas entre si pela alma dos perfis. A representação dos modelos é mostrada na Figura 2.24 e a configuração geral dos ensaios *push-out* na Figura 2.25.

Figura 2.24 – Detalhes dos modelos utilizados no ensaio *push-out*



Fonte: Kyvelou (2017)

Figura 2.25 – Configuração geral de um ensaio *push-out* realizado por Kyvelou (2017)



Fonte: Kyvelou (2017)

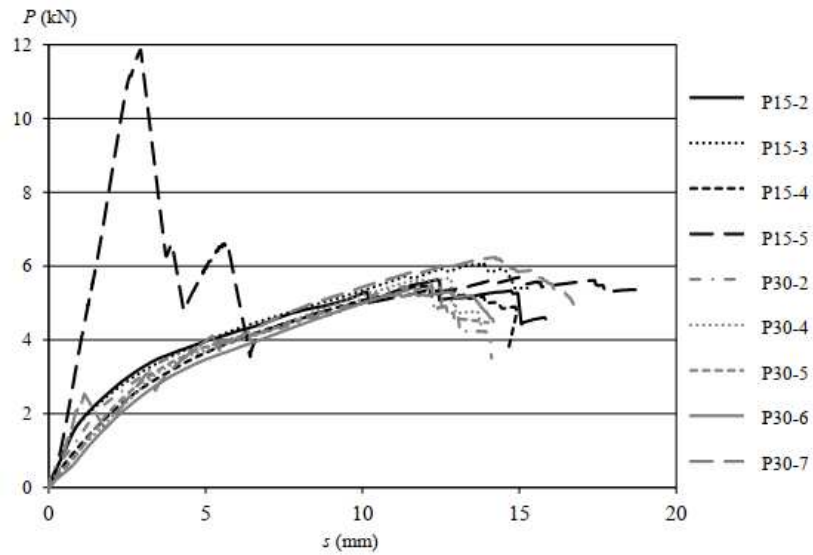
Na Tabela 2.9 apresentam-se as características dos modelos ensaiados e na Figura 2.26 as curvas de força/deslizamento obtidas nos ensaios *push-out*.

Tabela 2.9 – Características dos modelos utilizados nos ensaios *push-out*

Modelo	Espessura do perfil de aço (mm)	Espaçamento entre parafusos (mm)	Adesivo na madeira	Resina epóxi
P15-2	1,5	600	Não	Não
P15-3	1,5	150	Não	Não
P15-4	1,5	150	Sim	Não
P15-5	1,5	100	Sim	Sim
P30-2	3,0	600	Não	Não
P30-4	3,0	300	Não	Não
P30-5	3,0	150	Não	Não
P30-6	3,0	75	Não	Não
P30-7	3,0	75	Sim	Sim

Fonte: Kyvelou (2017)

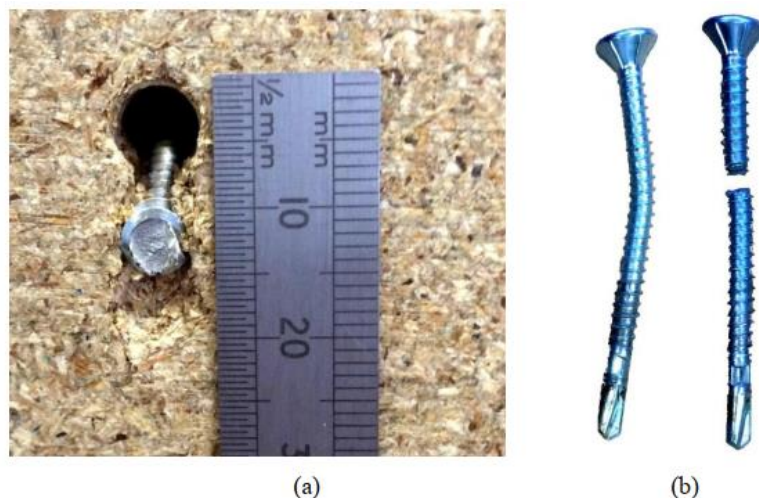
Figura 2.26 – Curvas de força/deslizamento dos ensaios *push-out* realizados por Kyvelou (2017)



Fonte: Kyvelou (2017)

O modo de falha principal observado nos modelos de Kyvelou (2017) consistiu na formação de uma rótula plástica no parafuso devido a efeitos de flexão. Também foi observado um giro dos parafusos penetrando na placa de madeira em conjunto com a flexão dos mesmos, como mostrado na Figura 2.27.a. Na Figura 2.27.b mostra-se o aspecto geral de parafusos que sofreram falha por flexão.

Figura 2.27 – Modos de falha dos modelos *push-out*: a) giro do parafuso na placa de OSB; b) falha por flexão dos parafusos



Fonte: Kyvelou (2017)

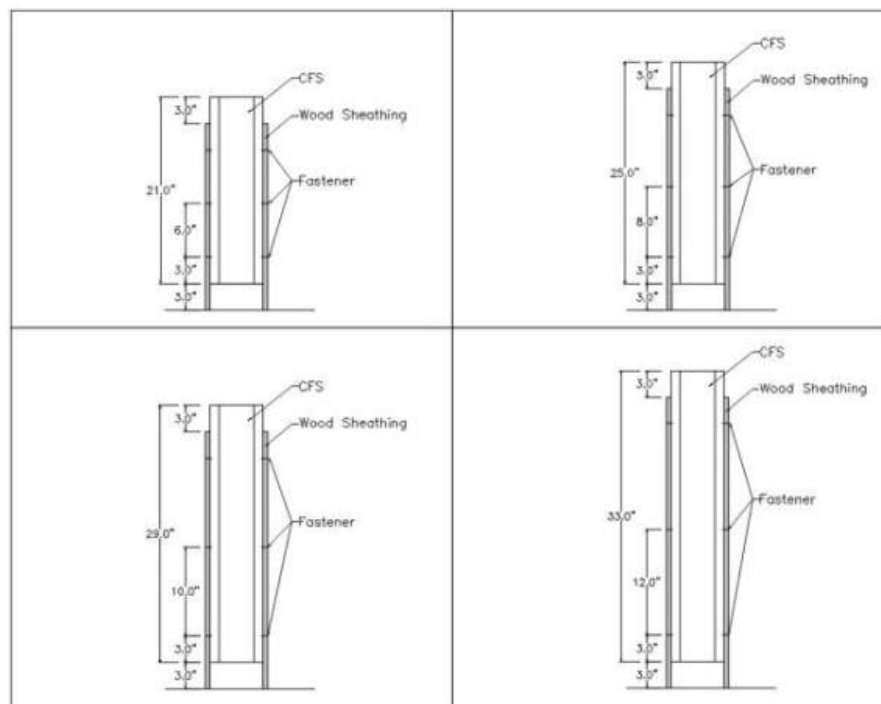
Os modelos *push-out* apresentaram um comportamento dúctil até à plastificação do parafuso. Foi observado também um rasgamento na parte superior da placa de OSB devido ao giro dos

parafusos até próximo da falha por plastificação do parafuso. Nos ensaios com adesivo epóxi, a conexão apresentou um comportamento inicial rígido, levando a uma ruptura frágil na interface aço-madeira. Kyvelou (2017) propôs também um modelo de cálculo para a relação força/deslizamento para sistemas de piso misto de aço e madeira com parafusos autoatarraxantes.

#### 2.4.8. Liu (2018)

Liu (2018) realizou experimentos semelhantes aos de Loehr (2016), usando o mesmo número de ensaios e os mesmos materiais, a fim de corrigir erros de montagem dos modelos experimentais e no procedimento de ensaio dos estudos anteriores. Na Figura 2.28 estão apresentados os detalhes dos quatro modelos ensaiados.

Figura 2.28 – Detalhe dos modelos ensaiados por Liu (2018)



Fonte: Liu (2018)

O principal objetivo de Liu (2018) foi determinar o módulo de deslizamento com base na variação dos espaçamentos entre parafusos e compará-lo com os resultados obtidos por Loehr (2016). Na Tabela 2.10 são apresentados os resultados dos ensaios realizados por Liu (2018).

Tabela 2.10 – Resultados dos ensaios realizados por Liu (2018)

Espaçamento entre parafusos (mm)	Estatística	Força última (kN)	Deslizamento máximo (kN)	Módulo de deslizamento $k_{s0,4}$ (kN/mm)
152,4	Média	21,22	8,25	29,84
	Desvio padrão	0,48	1,01	2,03
	C.O.V.	2%	12%	15%
	Máximo	21,96	10,89	60,33
	Mínimo	19,92	7,14	18,02
203,2	Média	20,87	8,40	28,09
	Desvio padrão	0,58	1,07	2,94
	C.O.V.	3%	13%	24%
	Máximo	22,15	9,75	46,53
	Mínimo	20,03	6,33	19,27
254,0	Média	20,55	8,51	19,38
	Desvio padrão	1,35	2,00	2,52
	C.O.V.	7%	27%	52%
	Máximo	22,19	8,43	62,73
	Mínimo	17,74	0,99	9,65
304,8	Média	20,47	8,56	23,2
	Desvio padrão	0,96	0,77	4,35
	C.O.V.	5%	9%	27%
	Máximo	22,07	10,18	35,08
	Mínimo	18,27	7,38	18,29

Fonte: Liu (2018)

#### 2.4.9. Yang et al. (2020)

O estudo realizado por Yang *et al.* (2020) consistiu em uma investigação experimental de um sistema misto de aço e madeira, composto por vigas laminadas de seção H e placas de madeira laminada colada. Foram realizados ensaios *push-out* para investigar o comportamento força/deslizamento e os modos de falha dos meios de conexão. Na Tabela 2.11 são apresentadas as características dos modelos ensaiados e na Figura 2.29 mostram-se os detalhes das conexões de pinos e parafusos autoatarraxantes utilizados. Na Figura 2.30 mostram-se os esquemas dos modelos utilizados nos ensaios *push-out* e na Figura 2.31 a configuração geral dos ensaios.

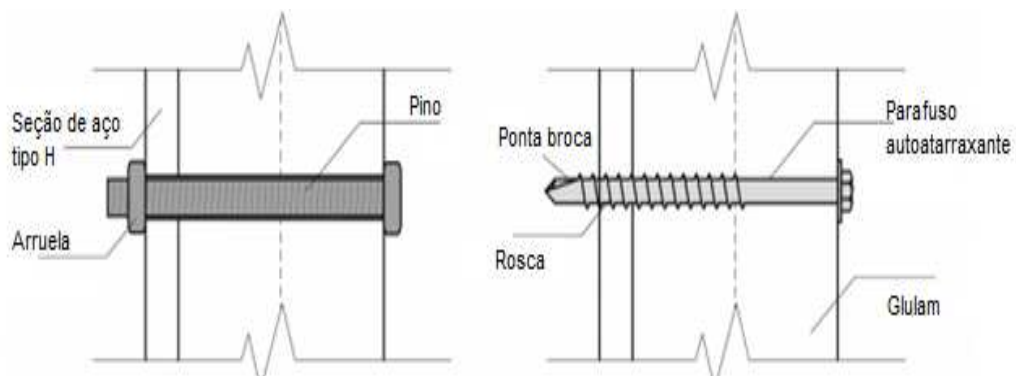
Tabela 2.11 – Parâmetros-chave das amostras pertencentes aos oito grupos considerados no estudo

Modelo	t (mm)	Tipo de conector	d (mm)	a <sub>1</sub> (mm)	l (mm)	Número de amostras
Grupo A	50	Pino	6	100	340	6
Grupo B	50	Pino	8	100	340	6
Grupo C	50	Parafuso autoatarraxante	5,5	100	340	6
Grupo D	50	Pino	6	150	390	6
Grupo E	50	Pino	6	200	440	6
Grupo F	30	Pino	6	100	340	6
Grupo G	40	Pino	6	100	340	6
Grupo H	60	Pino	6	100	340	6

Nota: Na tabela,  $t$  é a espessura da placa de madeira (mm);  $d$  é o diâmetro nominal do conector (mm);  $a_1$  é o espaçamento entre conectores;  $l$  é o comprimento da seção de aço e madeira (mm).

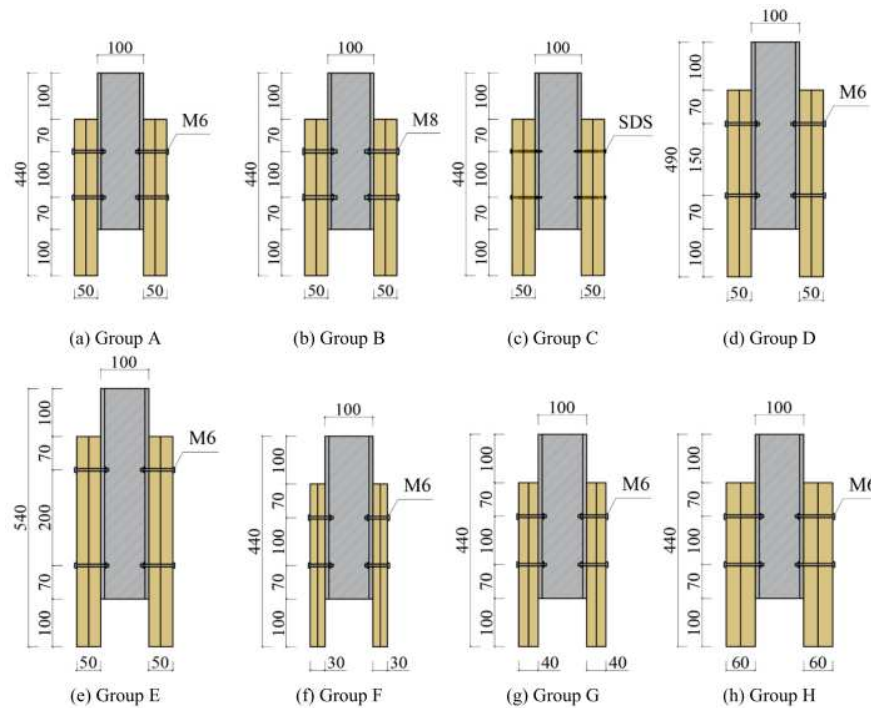
Fonte: Yang *et al.* (2020)

Figura 2.29 – Detalhes construtivos das conexões



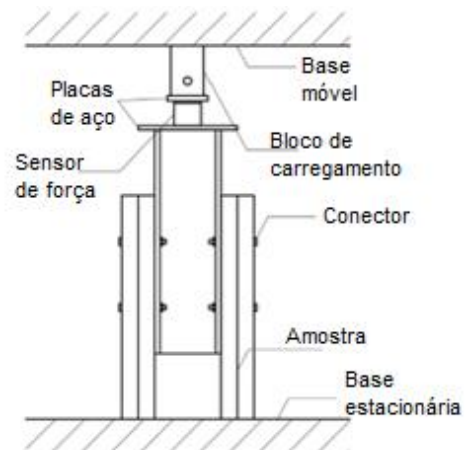
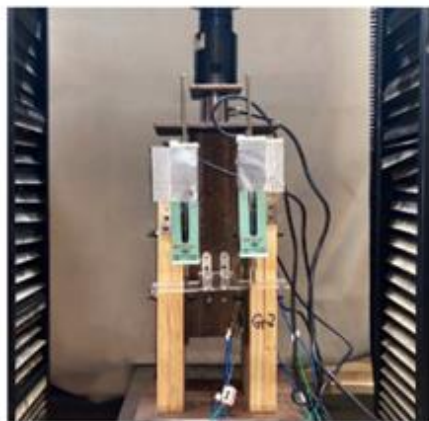
Fonte: Yang *et al.* (2020)

Figura 2.30 – Esquemas dos modelos ensaiados (dimensões em mm)



Fonte: Yang et al. (2020)

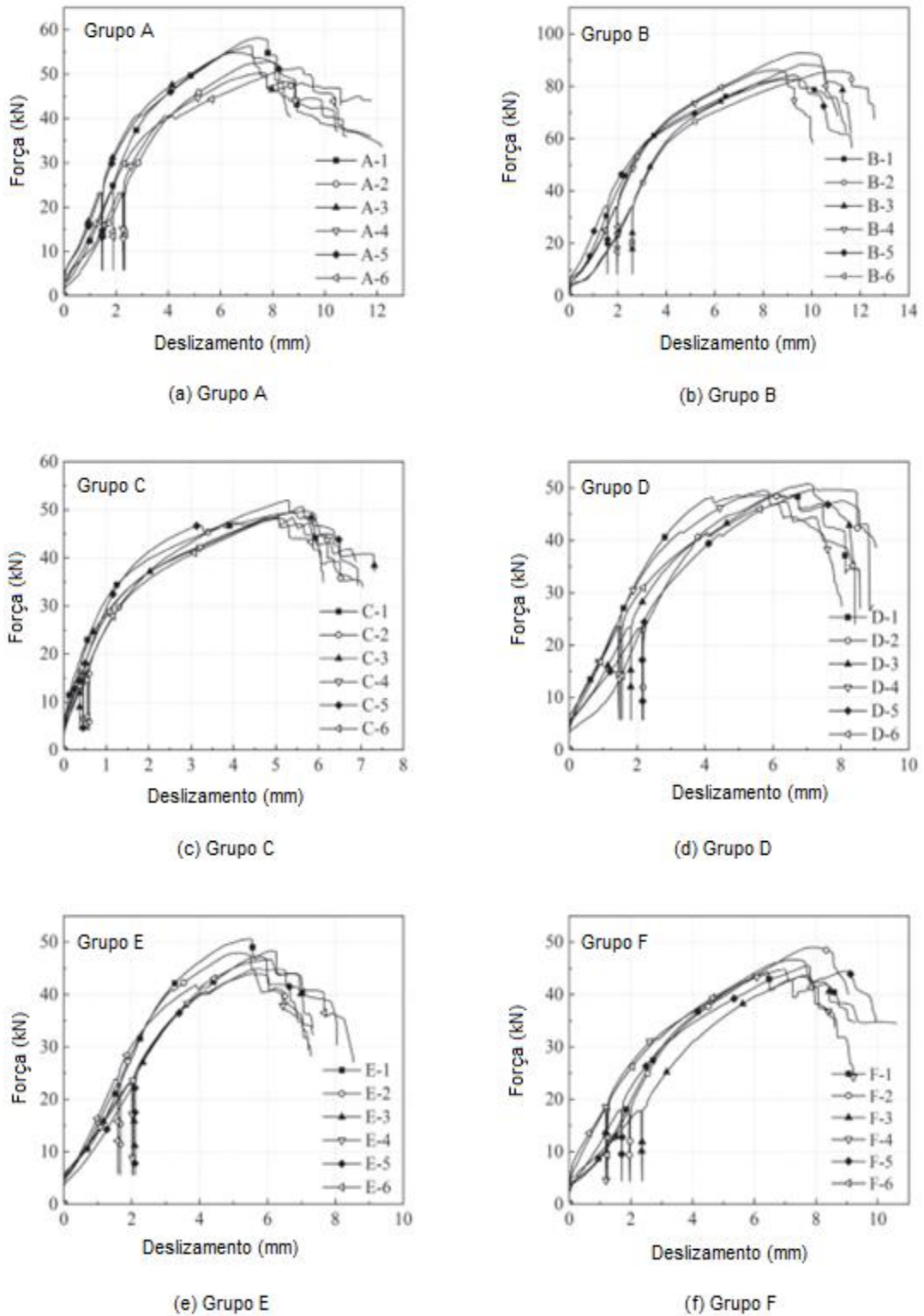
Figura 2.31 – Configuração geral de um ensaio push-out realizado por Yang et al. (2020)



Fonte: Yang et al. (2020)

Na Figura 2.32, são apresentadas as curvas força/deslizamento obtidas a partir dos ensaios *push-out* para os modelos os diferentes grupos indicados na Tabela 2.11. Na Figura 2.33, são mostrados os modos de falha observados para as amostras ensaiadas. Neste caso, a falha típica consistiu no desenvolvimento de duas rótulas plásticas nos pinos e nos parafusos.

Figura 2.32 – Curvas de força/deslizamento das amostras ensaiadas por Yang et al. (2020)



Fonte: Yang et al. (2020)

Figura 2.32 - Curvas de força/deslizamento das amostras ensaiadas por Yang *et al.* (2020) (continuação)

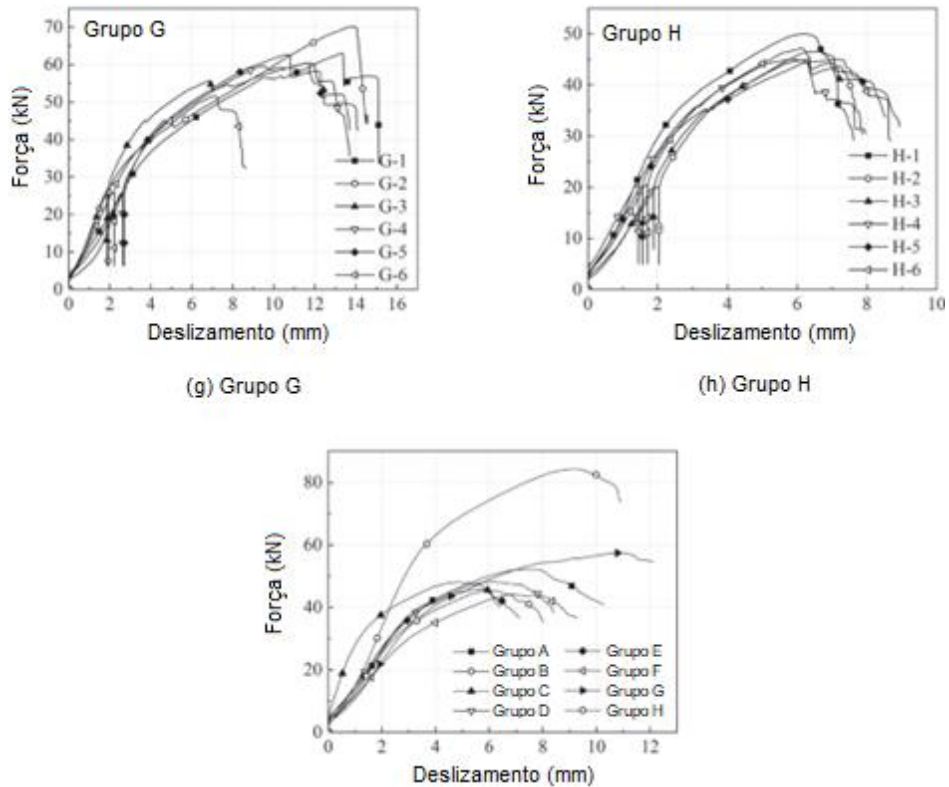
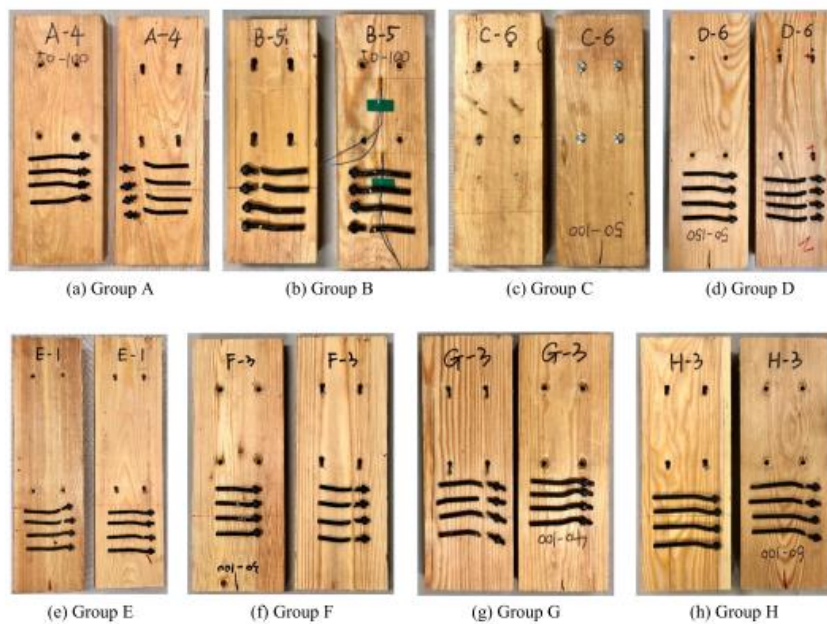


Figura 2.33 – Modos de falhas típicos observados para os vários grupos ensaiados

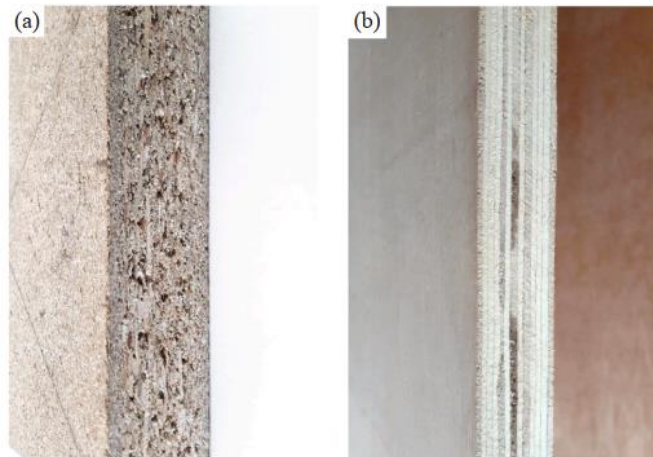


Fonte: Yang et al. (2020)

#### 2.4.10. Vella *et al.* (2020)

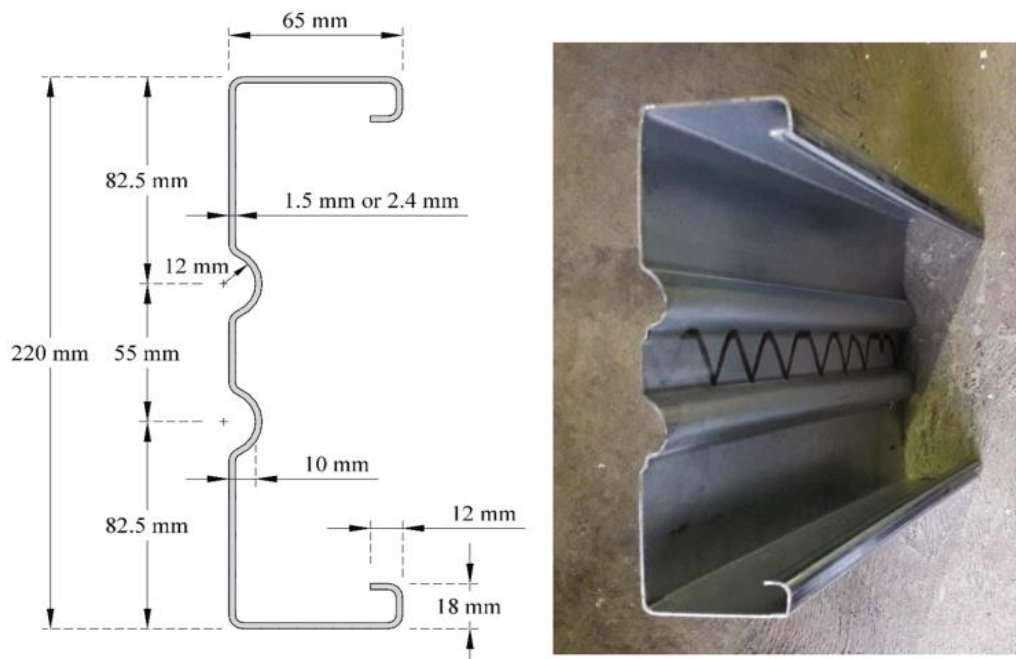
Vella *et al.* (2020) apresentaram uma investigação experimental sobre o comportamento da conexão entre perfis de aço formados a frio e placas de madeira, utilizando parafusos inclinados a 0° e 45°. Para isso, foram utilizadas placas de OSB e de compensado naval plastificado (Figura 2.34), perfis de aço formados a frio com altura de 220 mm (Figura 2.35) e parafusos autoatarraxantes autobrocantes com e sem asas (Figura 2.36).

Figura 2.34 - Placas de madeira utilizadas nos modelos: a) OSB; b) compensado naval plastificado



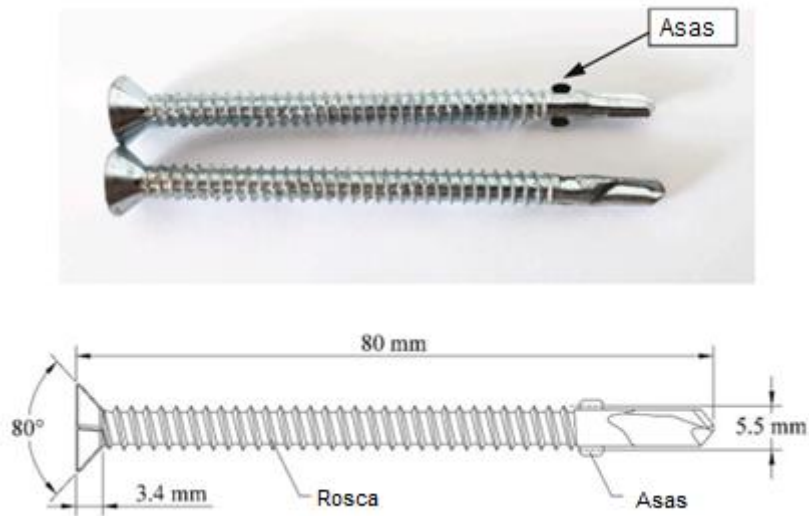
Fonte: Vella *et al.* (2020)

Figura 2.35 – Geometria da seção transversal e imagem do perfil de aço formado a frio



Fonte: Vella *et al.* (2020)

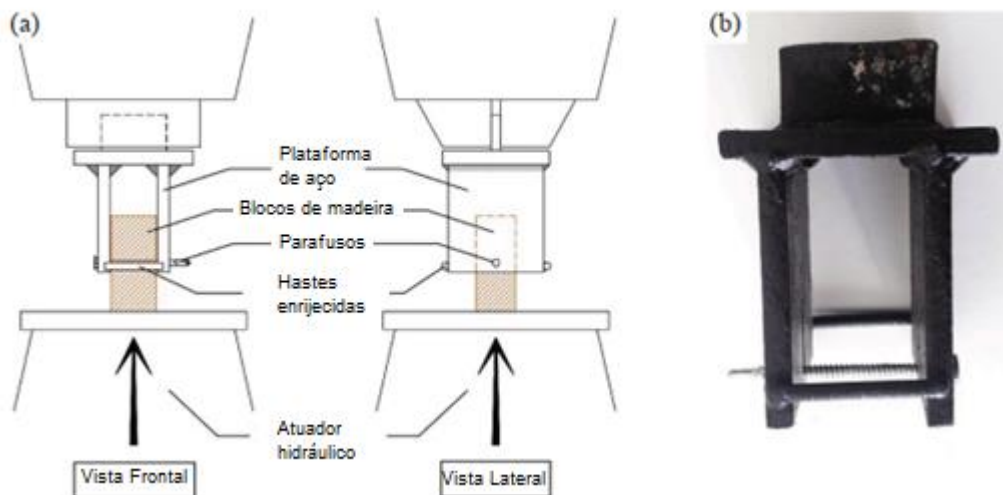
Figura 2.36 – Parafusos autoatarraxantes autobrocantes com asas



Fonte: Vella *et al.* (2020)

Uma série de ensaios de materiais foi realizada inicialmente para avaliar o comportamento de cada componente do sistema. Em seguida, foram feitos três tipos de ensaio de interação: embutimento na madeira (Figura 2.37), *pull-through* no parafuso (Figura 2.38) e retirada da rosca do parafuso (Figura 2.39), todos com o objetivo de desenvolver uma melhor compreensão do comportamento dos diferentes componentes da conexão.

Figura 2.37 – a) Vista esquemática frontal e lateral do ensaio de embutimento da madeira; b) aparato de ensaio



Fonte: Vella *et al.* (2020)

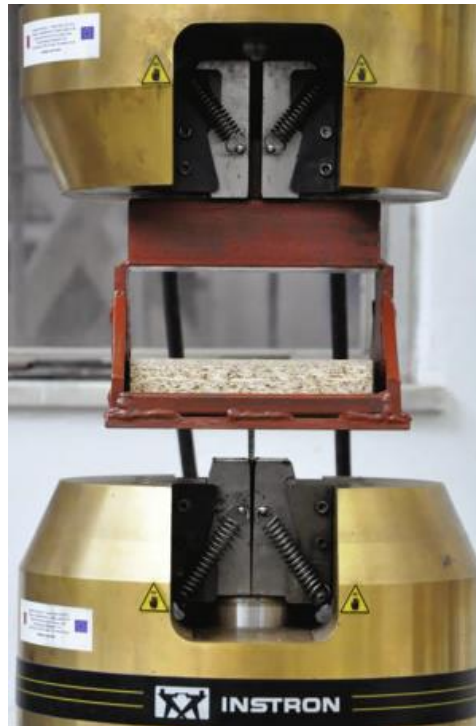
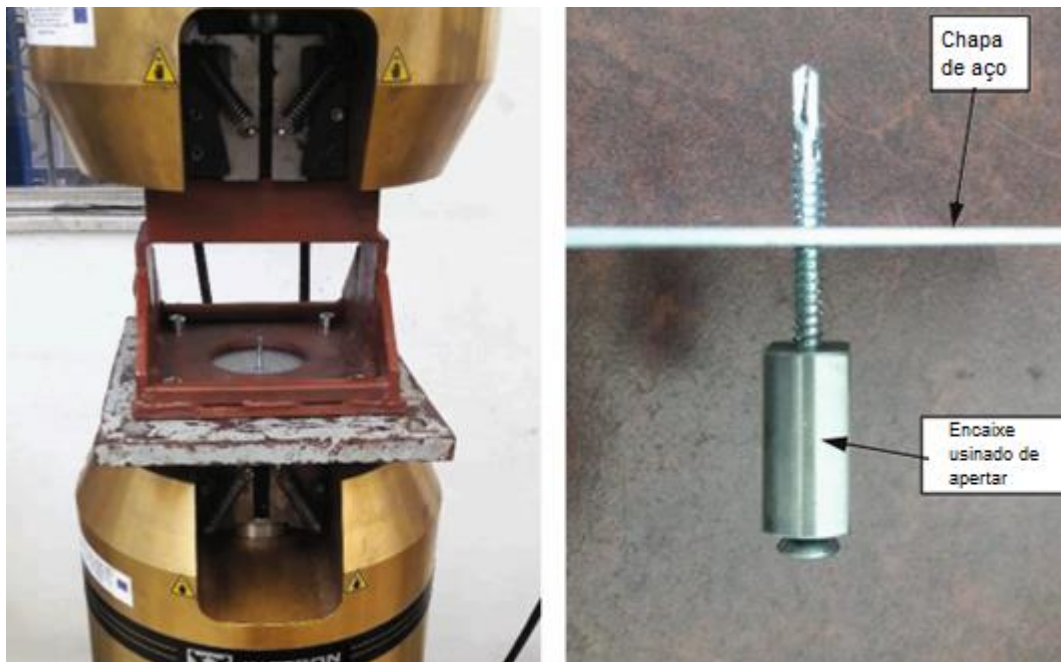
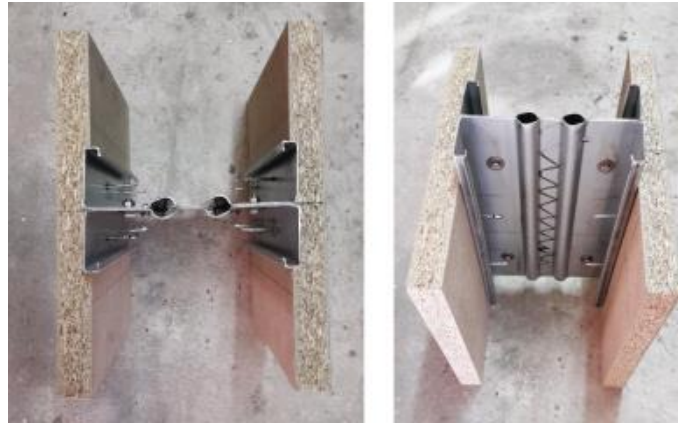
Figura 2.38 – Aspecto geral do ensaio *pull-through*Fonte: Vella *et al.* (2020)

Figura 2.39 – Esquema geral do ensaio de retirada da rosca do parafuso

Fonte: Vella *et al.* (2020)

O módulo de deslizamento e a resistência última dos 12 modelos de conexão foram determinados por meio de uma série de ensaios *push-out*. A configuração típica dos modelos utilizados nos ensaios *push-out* é mostrada na Figura 2.40.

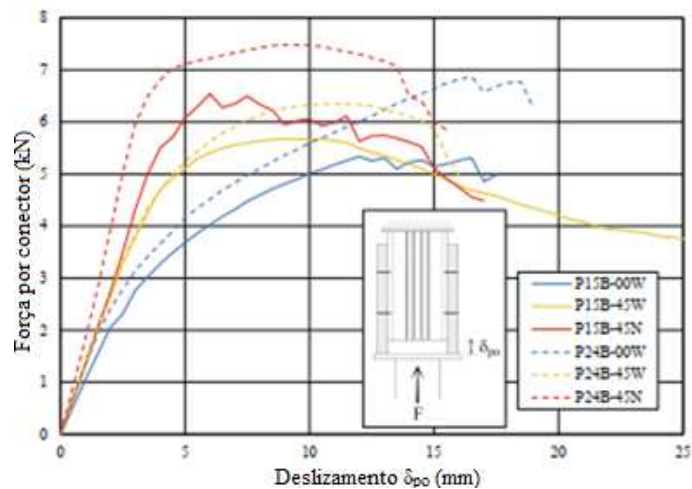
Figura 2.40 – Modelo utilizado para realização do ensaio *push-out*



Fonte: Vella *et al.* (2020)

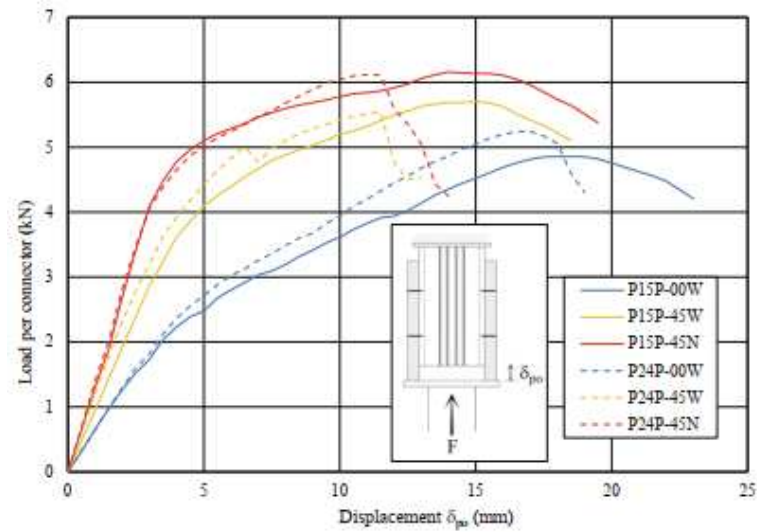
Os resultados obtidos nos ensaios de modelos com parafusos inclinados a  $45^\circ$  foram comparados com aqueles obtidos nos modelos com parafusos a  $0^\circ$ , nos quais os parafusos foram instalados perpendicularmente à interface aço-madeira. Nesses modelos foram consideradas as seguintes variações: o tipo de madeira (OSB e compensado), a espessura do perfil de aço (1,5 mm e 2,4 mm), a inclinação dos parafusos ( $0^\circ$  e  $45^\circ$ ) e a presença ou não de asas nos parafusos. Na Figura 2.41 são apresentadas as curvas força/deslizamento para os modelos com OSB e na Figura 2.42 as curvas força/deslizamento para os modelos com compensado.

Figura 2.41 – Curvas médias força/deslizamento para todos os modelos com OSB



Fonte: Vella *et al.* (2020)

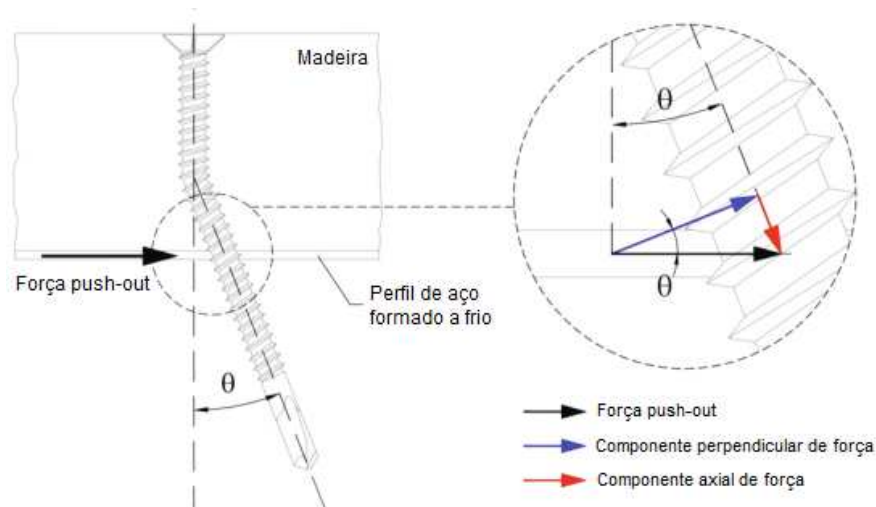
Figura 2.42 – Curvas médias força/deslizamento para todas os modelos com compensado



Fonte: Vella *et al.* (2020)

O principal modo de falha identificado nos modelos de Vella *et al.* (2020) consistiu na plastificação do parafuso por meio da ação combinada entre flexão e tração. De acordo com Vella *et al.* (2020), uma vez que a cabeça do parafuso foi efetivamente restringida ao giro, formou-se uma rótula plástica no parafuso dentro da placa de OSB. Quando o parafuso começa a sofrer plastificação, a componente de força *push-out* se decompõe nas componentes perpendicular e axial no parafuso conforme mostrado na Figura 2.43, de modo que a componentes perpendicular de força gera flexão do parafuso e a o componente axial de força geral tração do parafuso de modo a causar a retirada do parafuso através da placa de madeira.

Figura 2.43 – Mecanismo de falha dos modelos de Vella *et al.* (2020)



Fonte: Vella *et al.* (2020)

Os resultados mostraram que os parafusos sem asas inclinados a  $45^\circ$  proporcionaram um aumento de cerca de 30% da resistência última e um aumento de cerca de 140% do módulo de deslizamento em comparação com o modelo de referência.

#### 2.4.11. Síntese dos resultados obtidos por outros autores

Na Tabela 2.12 apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos por outros autores. Nessa tabela, para cada modelo, são apresentados a quantidade de parafusos ( $n$ ), o espaçamento entre parafusos ( $e$ ), o diâmetro dos parafusos ( $d_b$ ), a espessura da placa de madeira ( $t_{mad}$ ), a força máxima resistente ( $F_{máx}$ ), a tensão de compressão resistente da placa de madeira ( $f_{c,mad}$ ), o fluxo de cisalhamento longitudinal máximo ( $q_{l,máx}$ ) e o módulo de deslizamento inicial ( $k_{s,0,4}$ ).

Tabela 2.12 – Resultados obtidos por outros autores (parte 1/2)

Referência	Modelo	$n$	$e$ (mm)	$d_b$ (mm)	$t_{mad}$ (mm)	$F_{máx}$ (kN)	$f_{c,mad}$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$q_{l,máx}$ (kN/cm)	$k_{s,0,4}$ (kN/mm)
Northcutt (2012)	1	4	304,8	4,8	12,7	8,88	3,64	0,29	1,47
	2	4	304,8	4,8	12,7	11,44	4,69	0,38	5,80
	3	4	304,8	4,8	12,7	12,33	5,06	0,40	3,99
	4	4	304,8	4,8	18,3	15,75	4,48	0,52	6,60
Martin (2014)	TF43	4	304,8	4,8	12,7	14,43	5,92	0,47	3,93
	TF54	4	304,8	4,8	12,7	14,86	6,09	0,49	3,09
	TF97	4	304,8	4,8	12,7	13,98	5,73	0,46	5,68
	TF6	6	152,4	4,8	12,7	17,20	4,70	1,13	4,96
	TF8	6	203,2	4,8	12,7	21,16	5,79	1,04	4,54
	TF10	4	254,0	4,8	12,7	14,67	6,02	0,58	2,81
	TF12	4	304,8	4,8	12,7	14,70	6,03	0,48	3,93
Loehr (2016)	6"	6	152,4	4,8	15,1	21,50	4,94	1,41	28,69
	8"	6	203,2	4,8	15,1	21,15	4,86	1,04	26,44
	10"	6	254	4,8	15,1	21,10	4,85	0,83	20,39
	12	6	304,8	4,8	15,1	20,41	4,69	0,67	21,15
Liu (2018)	6"	6	152,4	4,8	15,1	21,22	4,88	1,39	29,84
	8"	6	203,2	4,8	15,1	20,87	4,80	1,03	28,09
	10"	6	254	4,8	15,1	20,55	4,73	0,81	19,38
	12	6	304,8	4,8	15,1	20,47	4,71	0,67	23,20

Tabela 2.12 – Resultados obtidos por outros autores (parte 1/2)

Referência	Modelo	<i>n</i>	<i>e</i> (mm)	<i>d<sub>b</sub></i> (mm)	<i>t<sub>mad</sub></i> (mm)	<i>F<sub>máx</sub></i> (kN)	<i>f<sub>c, mad</sub></i> (kN/cm <sup>2</sup> )	<i>q<sub>l, máx</sub></i> (kN/cm)	<i>k<sub>s, 04</sub></i> (kN/mm)
Kyvelou <i>et al.</i> (2017)	P15-2	1	600	5,5	38,1	5,60	2,67	0,09	-
	P15-3	1	150	5,5	38,1	6,10	2,91	0,41	-
	P15-4	1	150	5,5	38,1	5,40	2,58	0,36	-
	P30-2	1	600	5,5	38,1	5,50	2,62	0,09	-
	P30-4	1	300	5,5	38,1	5,60	2,67	0,19	-
	P30-5	1	150	5,5	38,1	5,40	2,58	0,36	-
	P30-6	1	75	5,5	38,1	5,30	2,53	0,71	-
Vella <i>et al.</i> (2020)	P15B-00W	1	150	5,5	38,1	5,58	2,66	0,37	9,84
	P15B-45W	1	150	5,5	38,1	5,70	2,72	0,38	13,50
	P15B-45N	1	150	5,5	38,1	6,63	3,16	0,44	13,75
	P24B-00W	1	150	5,5	38,1	7,06	3,37	0,47	12,36
	P24B-45W	1	150	5,5	38,1	6,37	3,04	0,42	13,74
	P24B-45N	1	150	5,5	38,1	7,50	3,58	0,50	18,58
	P15P-00W	1	150	5,5	25,0	4,88	3,55	0,33	5,49
	P15P-45W	1	150	5,5	25,0	5,79	4,21	0,39	9,75
	P15P-45N	1	150	5,5	25,0	6,21	4,52	0,41	13,08
	P24P-00W	1	150	5,5	25,0	5,26	3,83	0,35	6,23
	P24P-45W	1	150	5,5	25,0	5,60	4,07	0,37	11,97
	P24P-45N	1	150	5,5	25,0	6,15	4,47	0,41	14,04

Na Tabela 2.12 são fornecidos resultados de ensaios *push-out* em modelos de conexões entre perfis de aço formados a frio e placas de madeira, obtidos por autores anteriores. Em geral, os ensaios *push-out* foram feitos para avaliar o desempenho mecânico de conexões típicas para sistemas de piso seco em LSF e os resultados experimentais mostraram que essas conexões são eficientes e apresentam bom desempenho. Os resultados mostraram também que as propriedades mecânicas e a espessura da madeira podem afetar significativamente o desempenho mecânico da conexão, assim como o diâmetro, o espaçamento e a orientação dos parafusos.

# 3

---

## MATERIAIS E MÉTODOS

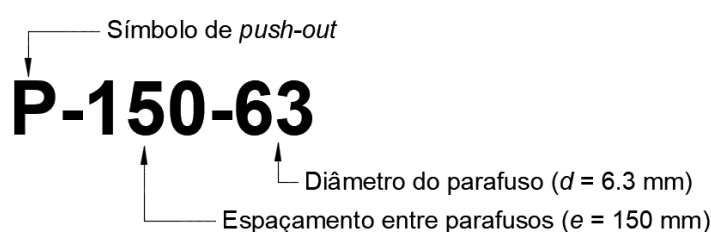
### 3.1. Considerações gerais

Neste capítulo, apresenta-se o programa experimental realizado. Apresentam-se as características dos modelos experimentais, bem como os materiais utilizados. Em seguida são mostradas a metodologia de produção dos modelos. Por fim, são apresentados os equipamentos, a instrumentação e o procedimento utilizados nos ensaios *push-out*.

### 3.2. Características dos modelos experimentais

Os modelos *push-out* utilizados neste trabalho foram compostos por duas placas de OSB conectadas a um perfil de aço formado a frio por meio de parafusos autoatarraxantes. Esses modelos foram identificados por uma simbologia composta pela letra **P** (símbolo de *push-out*), um número que se refere ao espaçamento entre os parafusos e um número que indica o diâmetro do parafuso, conforme mostrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Simbologia adotada para identificação dos modelos



Para desenvolvimento do programa experimental, realizou-se uma variação das características dos modelos em função da combinação de dois diâmetros de parafusos e de três espaçamentos

entre parafusos, o que gerou seis modelos distintos. Para tornar os resultados mais representativos, foram produzidas cinco amostras para cada modelo, totalizando 30 amostras.

Ao longo da execução do programa experimental, notou-se que era oportuno avaliar também a influência da utilização de arruelas de aço em conjunto com os parafusos. Esta avaliação teve um caráter exploratório com objetivo de observar o comportamento, visto que isso não fazia parte do planejamento inicial dos ensaios. Em função disso, para cada modelo experimental foram produzidas quatro amostras sem arruelas e uma com arruelas.

Na Tabela 3.1 apresenta-se a identificação dos modelos em função da variação do espaçamento entre parafusos e do diâmetro dos mesmos.

Tabela 3.1 – Identificação dos modelos

<b>Modelo</b>	<b>Espaçamento entre parafusos (mm)</b>	<b>Diâmetro do parafuso (mm)</b>
P-150-55	150	5,5
P-200-55	200	5,5
P-250-55	250	5,5
P-150-63	150	6,3
P-200-63	200	6,3
P-250-63	250	6,3

**Nota:** Para cada modelo foram produzidas cinco amostras. As amostras foram identificadas com o número 0 (ensaio de referência, sem arruelas), 1, 2 e 3 (amostras sem arruelas) e a letra A (amostra com arruelas).

Os modelos foram compostos por duas placas de OSB com dimensões de 150×400×18,3 mm, um perfil de aço formado a frio com seção transversal Ue 140×36×14×1,25 e quatro parafusos autoatarraxantes autobrocantes com cabeça sextavada. Na Figura 3.2 apresenta-se a seção transversal do perfil de aço e a vista superior dos modelos. Na Figura 3.3, na Figura 3.4 e na Figura 3.5 apresentam-se as características geométricas dos modelos com espaçamentos de 150, 200 e 250 mm, respectivamente.

Figura 3.2 – Seção transversal do PFF e vista em planta dos modelos experimentais (dimensões em milímetros)

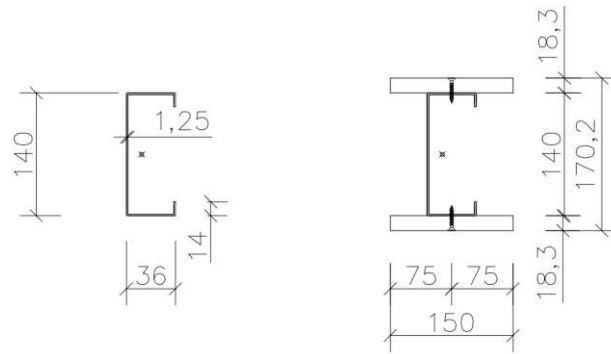


Figura 3.3 – Características geométricas dos modelos com espaçamento igual a 150 mm (dimensões em milímetros)

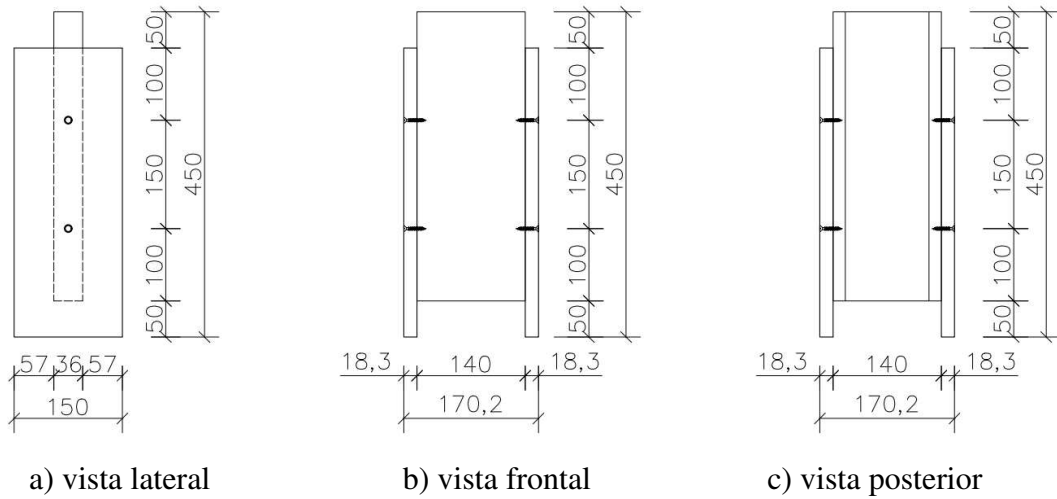


Figura 3.4 – Características geométricas dos modelos com espaçamento igual a 200 mm (dimensões em milímetros)

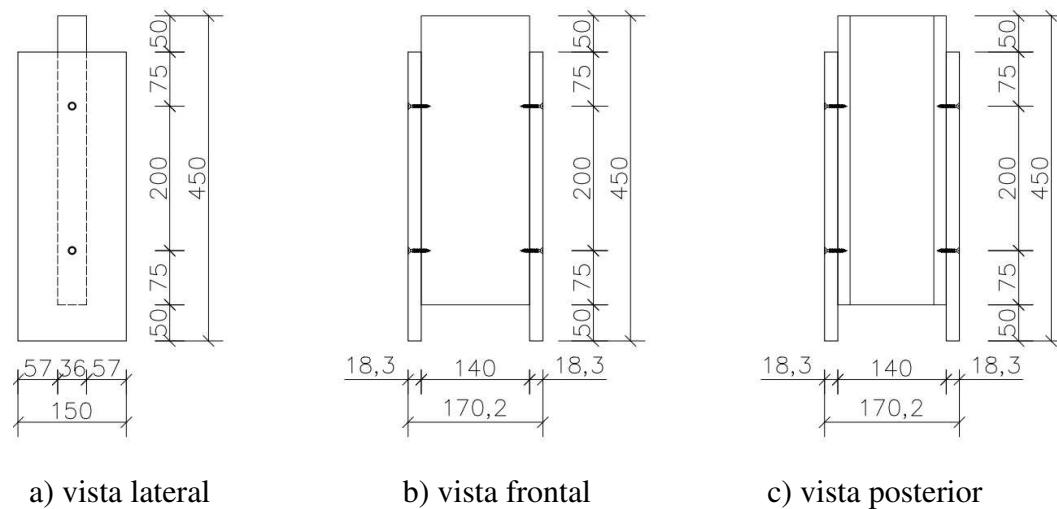
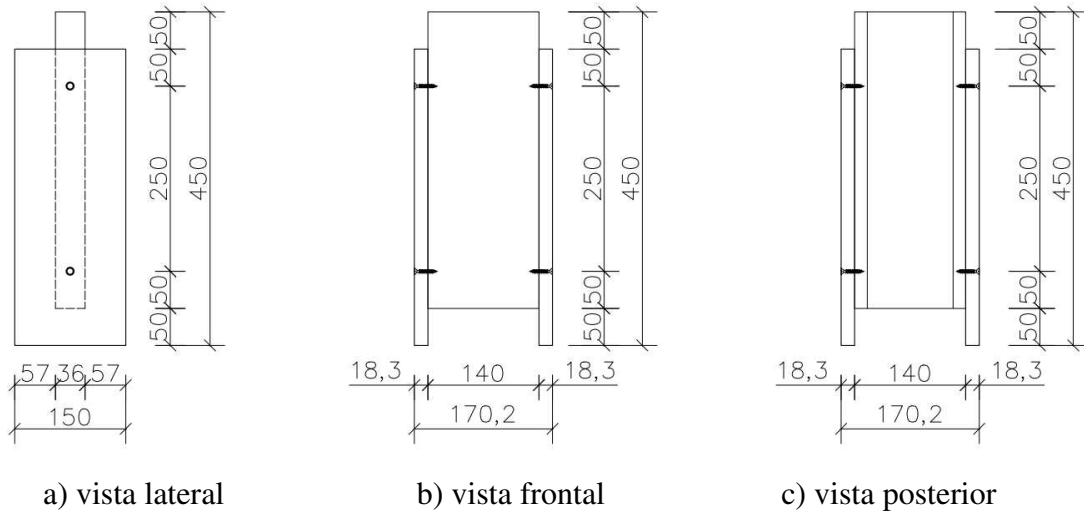

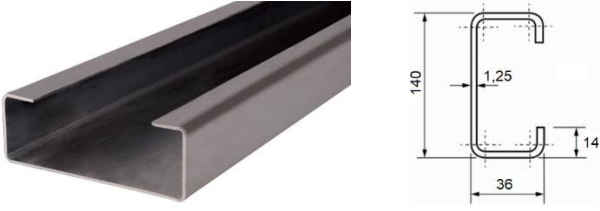
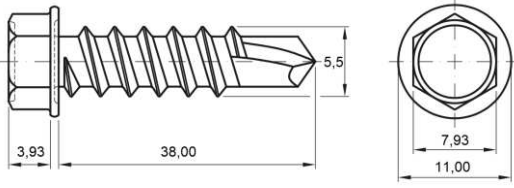
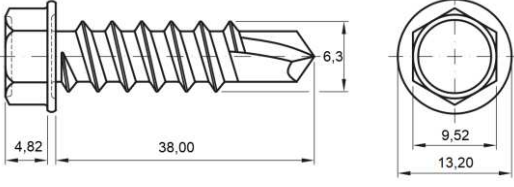
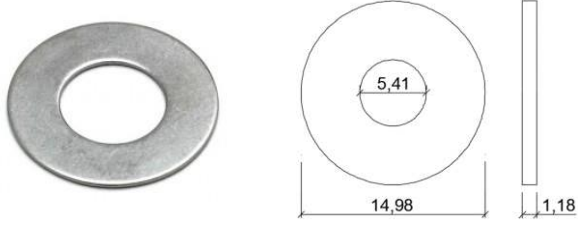
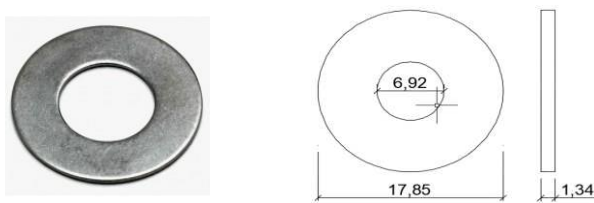


Figura 3.5 – Características geométricas dos modelos com espaçamento igual a 250 mm (dimensões em milímetros)



Para a produção dos modelos experimentais foram utilizados os materiais apresentados na Tabela 3.2. Nessa tabela estão indicadas as quantidades, as dimensões e as características gerais dos materiais utilizados.

Tabela 3.2 – Materiais utilizados na produção dos modelos experimentais

Material	Q	Descrição
	2	<p>Painel OSB LP APA Plus</p> <p>Dimensões: 18,3×1200×2400 mm</p>
	30	<p>Perfis de aço formado a frio galvanizado</p> <p>Seção Ue140×36×14×1,25 mm</p>
	60	<p>Parafusos auto-atarraxantes ponta broca com cabeça sextavada</p> <p>Diâmetro: 5,5 mm</p>
	60	<p>Parafusos auto-atarraxantes ponta broca com cabeça sextavada</p> <p>Diâmetro: 6,3 mm</p>
	12	<p>Arruela de aço galvanizado</p> <p>Diâmetro interno: 5,41 mm</p> <p>Diâmetro externo: 14,98 mm</p> <p>Espessura: 1,18 mm</p>
	12	<p>Arruela de aço galvanizado</p> <p>Diâmetro interno: 6,92 mm</p> <p>Diâmetro externo: 17,85 mm</p> <p>Espessura: 1,34 mm</p>

### 3.3. Produção dos modelos experimentais

Para produção dos modelos experimentais, os painéis de OSB foram cortados inicialmente em placas menores com dimensões de 150×400 mm. Para a produção das 30 amostras foram necessárias 60 placas de 150×400 mm.

Na Figura 3.6 e na Figura 3.7 é apresentado o aspecto final das amostras montadas com parafusos de 5,5 mm, referentes aos modelos P-150-55 e P-200-55, respectivamente.

Figura 3.6 – Amostras referentes ao modelo P-150-55

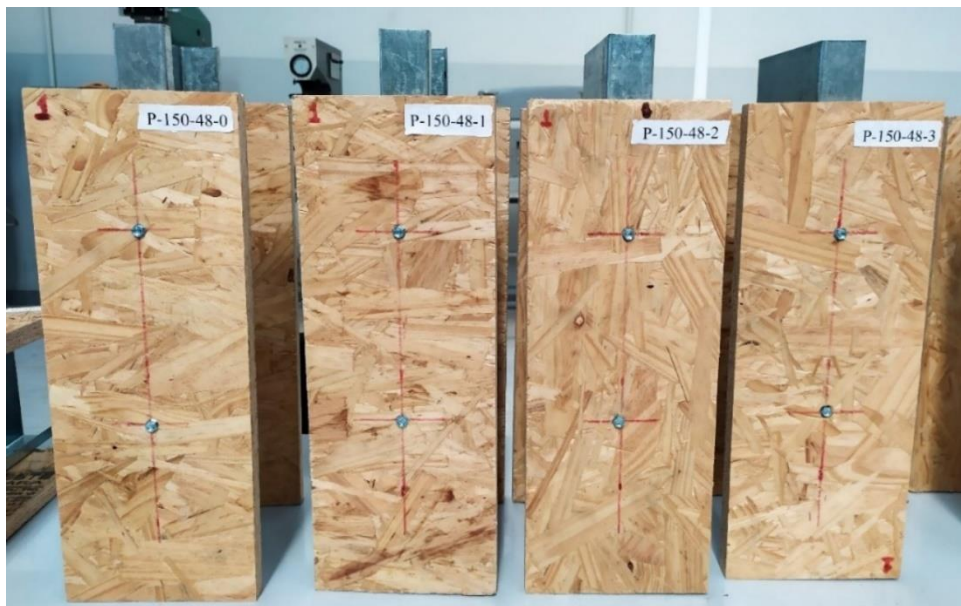
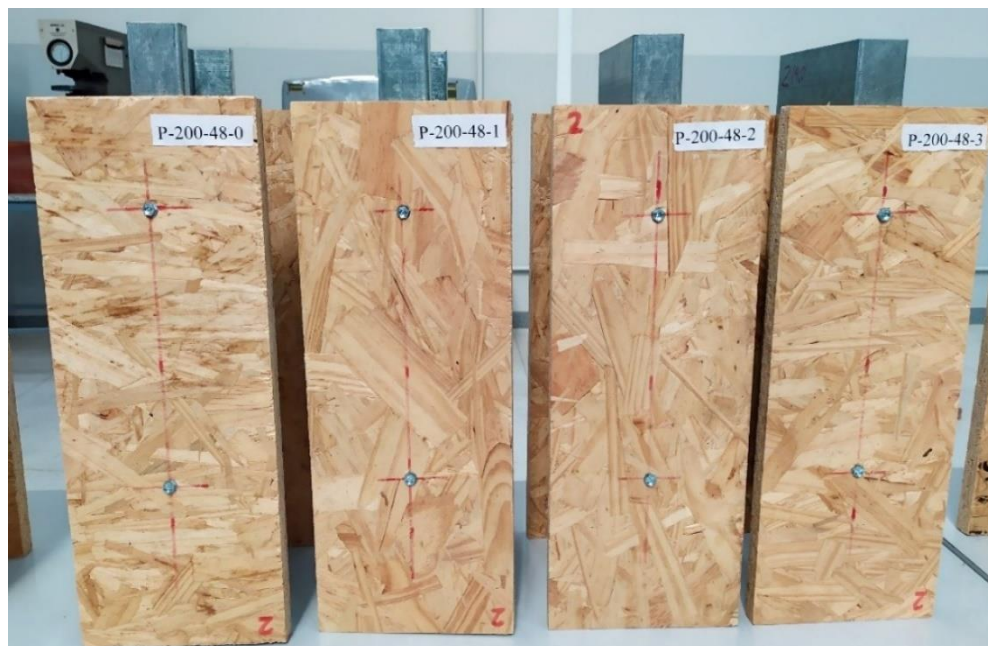


Figura 3.7 – Amostras referentes ao modelo P-200-55



Nas Figura 3.8, Figura 3.9 e Figura 3.10 são mostradas algumas amostras montadas com parafusos de 6,3 mm, referentes aos modelos P-150-63, P-200-63 e P-250-63, respectivamente.

Figura 3.8 – Amostras referentes ao modelo P-150-63

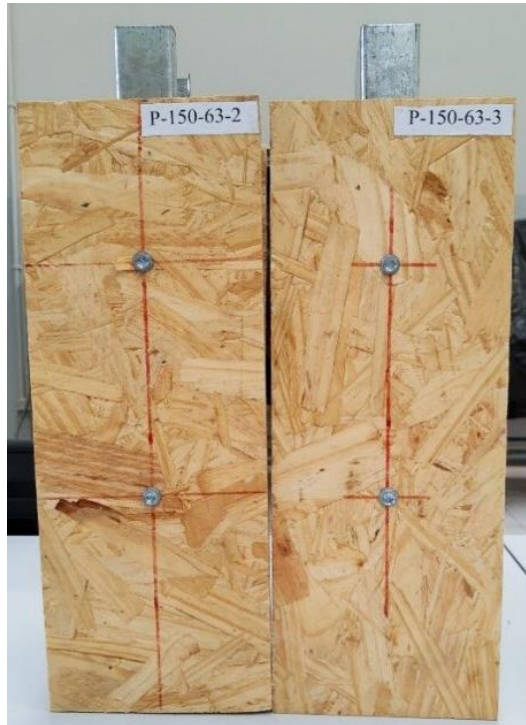


Figura 3.9 – Amostras referentes ao modelo P-200-63



Figura 3.10 – Amostras referentes ao modelo P-250-63



Na Figura 3.11 são apresentadas as amostras com utilização de arruelas de aço.

Figura 3.11 – Amostras com arruelas de aço



Para evitar o escorregamento lateral das bases dos modelos *push-out* construiu-se uma placa de base de madeira compensada de 18 mm (150 x 400 mm) com elementos de madeira maciça fixados na placa com pregos, conforme mostrado na Figura 3.12. A distância entre as peças de madeira maciça foi prevista para encaixar firmemente as placas de OSB das amostras.

Figura 3.12 – Placa de base utilizada para os modelos *push-out*

### 3.4. Ensaio *push-out*



#### 3.4.1. Equipamento utilizados

Para realização dos ensaios *push-out* foram utilizados os equipamentos apresentados na Tabela 3.3. Nessa tabela estão indicados os fabricantes, modelos e configurações de cada equipamento.

Tabela 3.3 - Equipamentos utilizados no ensaio *push-out* (parte 1/2)

Equipamento	Descrição
	Transdutores de deslocamento HBM WA 20mm
	Célula de carga HBM modelo C6A com capacidade para 200 kN
	SAD HBM QuantumX MX840A para conexão da célula de carga HBM C6A 200kN e dos transdutores de deslocamento HBM WA 20mm

Tabela 3.3 - Equipamentos utilizados no ensaio push-out (parte 2/2)

Equipamento	Descrição
	<p>Máquina universal de ensaios EMIC modelo DL60000, com capacidade de 600 kN</p>
	<p>Nível laser MTX com tripé de autonivelamento</p>

### 3.4.2. Instrumentação

Para facilitar o referenciamento da instrumentação e das medições, o lado da amostra onde os enrijecedores do perfil de aço ficavam aparentes foi denominado como LA (lado aberto) e o lado oposto como LF (lado fechado).

Para medir o deslizamento relativo entre a placa de OSB e o perfil de aço, foram fixadas duas cantoneiras de aço às placas de OSB, no ponto médio entre os parafusos, por meio de cola à base de cianoacrilato, de forma que a extremidade dos transdutores de deslocamento WA 20 mm ficasse em contato com a cantoneira. Desse modo, quando o perfil de aço deslizesse em relação à placa de OSB o transdutor mediria o deslizamento relativo entre os dois elementos.

Conforme mostrado na Figura 3.13 e na Figura 3.14, todos os transdutores foram fixados no perfil de aço por meio de suportes ajustáveis de coluna reta, com base magnética.

Figura 3.13 – Instrumentação do “Lado Aberto - LA” da amostra

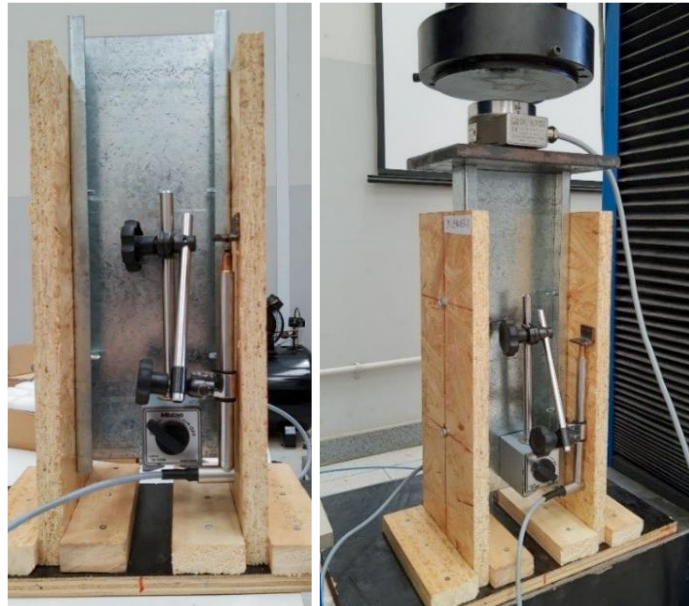


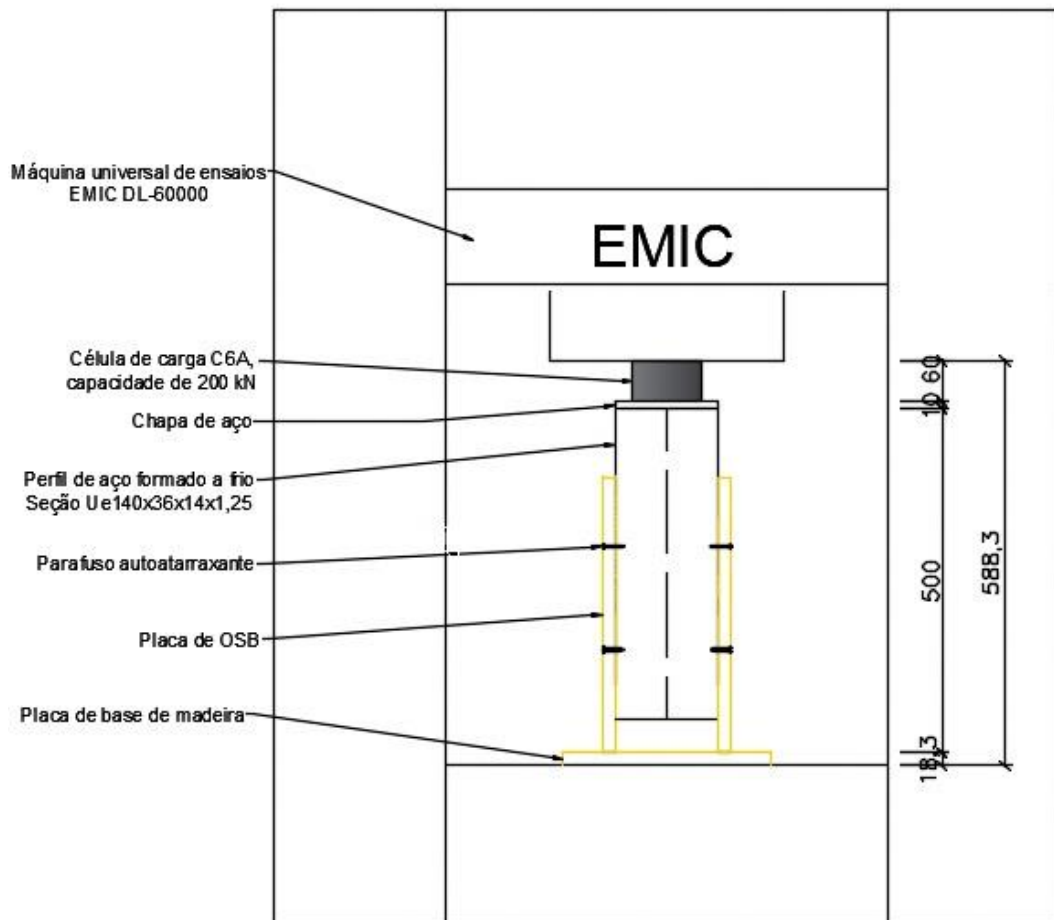
Figura 3.14 – Instrumentação do “Lado Fechado - LF” da amostra



### **3.4.3. Procedimento de ensaio**

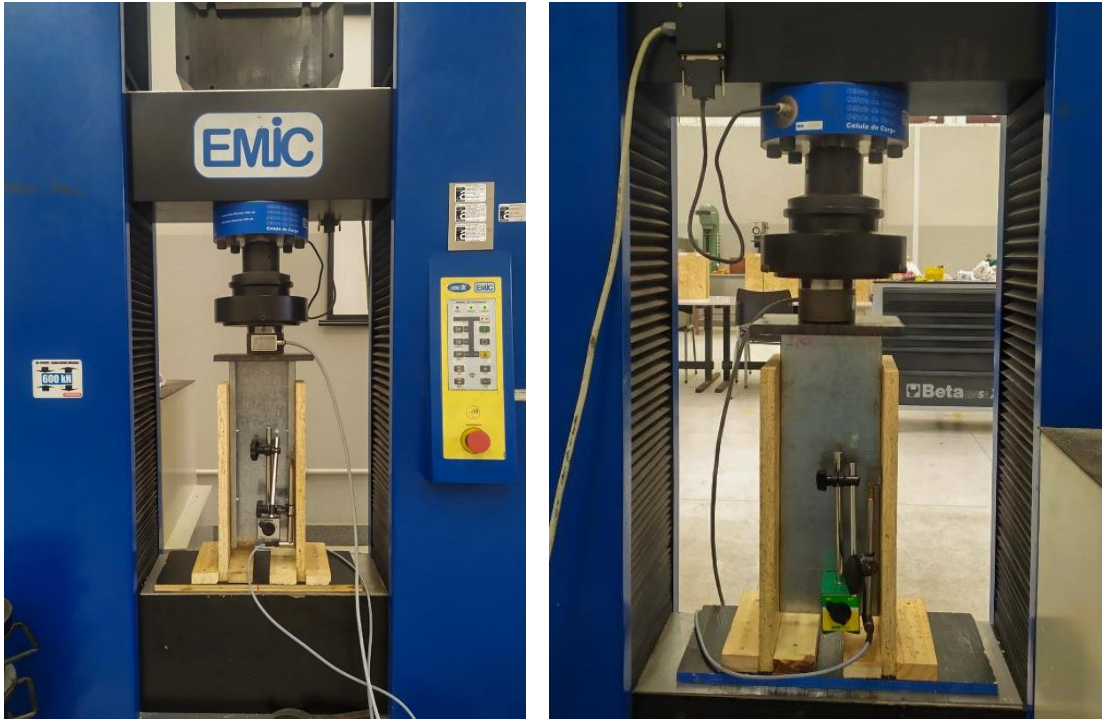
A posição de cada elemento na máquina universal EMIC DL-60000 para execução dos ensaios *push-out* é mostrada na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Posição dos elementos na EMIC DL-60000 para execução dos ensaios *push-out* (dimensões em mm)



Uma chapa grossa de aço (com 10 mm de espessura) foi colocada sobre a amostra, e uma célula de carga C6A 200 kN foi posicionada sobre a chapa, conforme mostrado na Figura 3.16. Com este procedimento, buscou-se distribuir a força aplicada de maneira uniforme na seção transversal do perfil. Entre o atuador da máquina e a célula de carga foi montado um prato oscilante para eliminar alguma excentricidade porventura decorrente do desalinhamento entre as superfícies em contato.

Figura 3.16 – Posicionamento do modelo na máquina universal de ensaios para execução do ensaio *push-out*



A célula de carga e os transdutores de deslocamento foram conectados ao sistema de aquisição de dados MX840A e o software CATMAN foi configurado para registrar os dados gerados pela célula de carga e pelos transdutores de deslocamento.

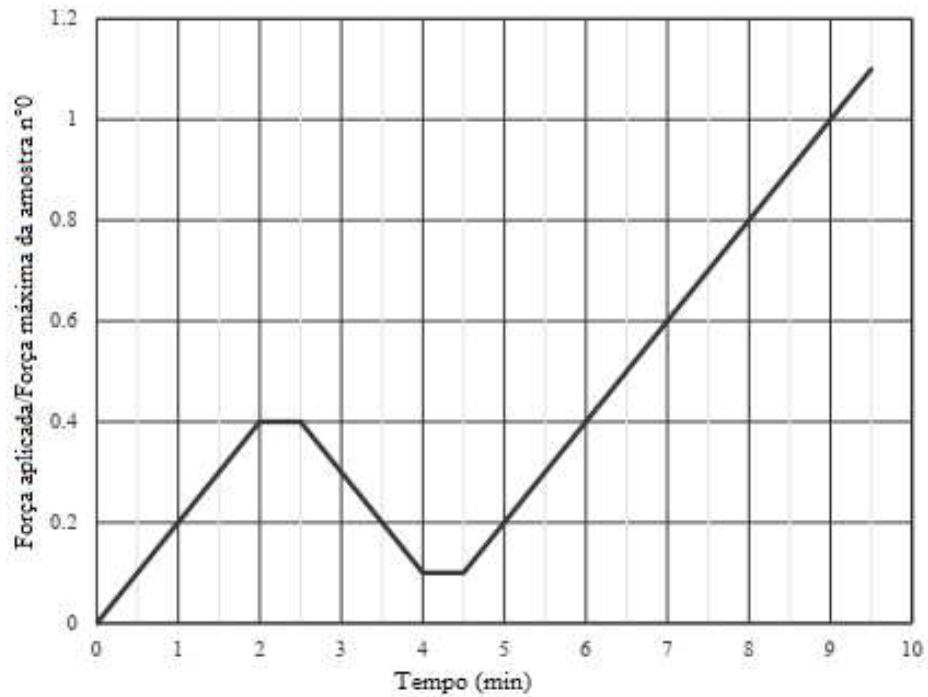
Para aplicação do carregamento, foi utilizado o procedimento prescrito pela EN 26891:1991, também empregado nos trabalhos de Northcutt (2012), Martin (2014), Loehr (2016), Hassanieh *et al.* (2016), Kyvelou (2017), Liu (2018) e Vella *et al.* (2020), conforme descrito a seguir:

- a) conduzir um ensaio preliminar em cada série de teste para determinar a força última ( $F_{ref}$ ) correspondente à falha da amostra de referência n° 0 ou a um deslizamento relativo de 15 mm entre os elementos de aço e madeira;
- b) carregar o modelo a uma velocidade de  $0,2F_{ref}/\text{min}$  até atingir a força de  $0,4F_{ref}$ ;
- c) manter a força de  $0,4F_{ref}$  por 30 segundos;
- d) reduzir a força de  $0,4F_{ref}$  para  $0,1F_{ref}$  a uma velocidade de  $0,2F_{ref}/\text{min}$ ;
- e) manter a força de  $0,1F_{ref}$  por 30 segundos;

f) recarregar o modelo a uma velocidade de  $0,2 F_{ref}/\text{min}$ , até que ocorra falha ou que seja atingido um deslizamento relativo de 15 mm entre os elementos de aço e madeira.

Na Figura 3.17 é apresentado um gráfico representativo do procedimento de carregamento padrão prescrito pela norma europeia EN 26981/1991.

Figura 3.17 - Procedimento de carregamento padrão utilizados para os ensaios *push-out*



Adaptado de EN 26981:1991

## 4

---

**RESULTADOS E DISCUSSÃO**
**4.1. Considerações gerais**

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos no programa experimental e a discussão dos mesmos. São apresentadas as curvas força / deslizamento para todas as amostras ensaiadas, seguido da capacidade resistente, do módulo de deslizamento e do fator de ductilidade. Em seguida apresenta-se uma discussão sobre influência de algumas variáveis no comportamento da conexão e a identificação e avaliação do modo de falha típico observado nos modelos. Ao final do capítulo, propõe-se um modelo de cálculo para estimar a força resistente máxima da conexão entre perfis de aço formados a frio e placas madeira.

Na Tabela 4.1 é apresentada a simbologia adotada para identificação das amostras.

Tabela 4.1 – Simbologia utilizada para identificação das amostras

<b>Código final de identificação das amostras</b>	<b>Descrição</b>
0	Amostra n° 0 adotada como referência para obtenção da força máxima do modelo, sem a realização do procedimento de carregamento padrão apresentado na Figura 3.24.
1	Amostra n° 1 com a realização do procedimento de carregamento padrão apresentado na Figura 3.24.
2	Amostra n° 2 com a realização do procedimento de carregamento padrão apresentado na Figura 3.24.
3	Amostra n° 3 com a realização do procedimento de carregamento padrão apresentado na Figura 3.24.
A	Amostra A com arruelas de aço, com a realização do procedimento de carregamento padrão apresentado na Figura 3.24.

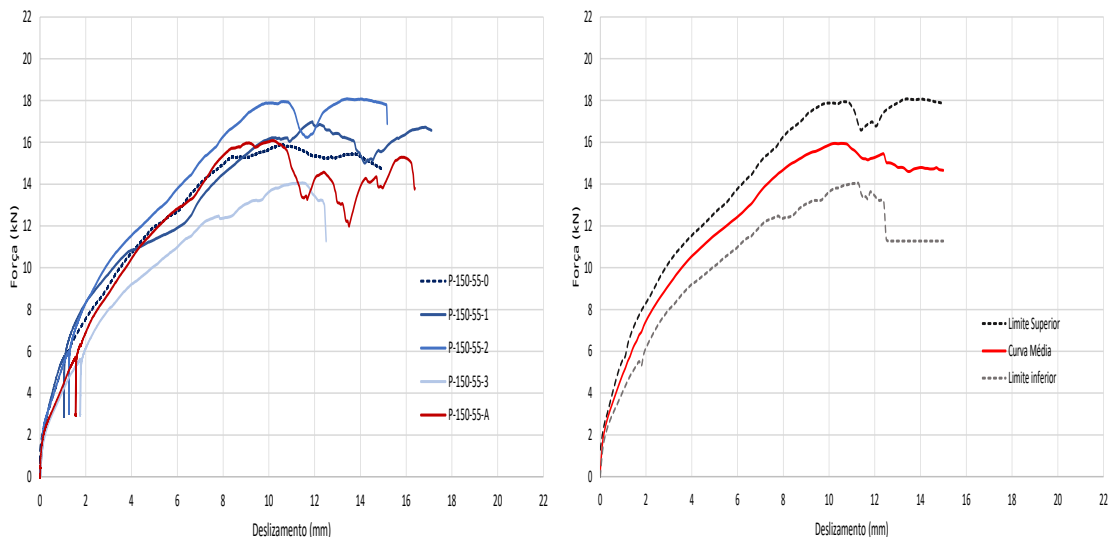
## 4.2. Resultados dos ensaios *push-out*

Os resultados dos ensaios *push-out* detalhados de todas as amostras estão apresentados no Apêndice A deste trabalho. Neste item apresenta-se uma síntese dos resultados dos 6 modelos experimentais.

### 4.2.1. Modelo 1: P-150-55

Na Figura 4.1.a são apresentadas as curvas de força/deslizamento das amostras do modelo P-150-55. Na Figura 4.1.b são mostradas a curva força/deslizamento média para o modelo e as curvas com os limites superior e inferior de força correspondente a cada deslizamento medido.

Figura 4.1 – Curvas força/deslizamento para o modelo P-150-55



a) Curvas força/deslizamento das amostras do modelo P-150-55

b) Curvas força/deslizamento média e relativas aos limites superior e inferior para as amostras do modelo P-150-55

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados de força resistente, deslizamento, módulo de deslizamento e ductilidade para o modelo P-150-55. Os resultados médios de força, deslizamento, módulo de deslizamento e ductilidade foram calculados a partir da média dos valores das cinco amostras. Os resultados característicos de força e deslizamento foram obtidos considerando-se 90% do menor valor entre as amostras.

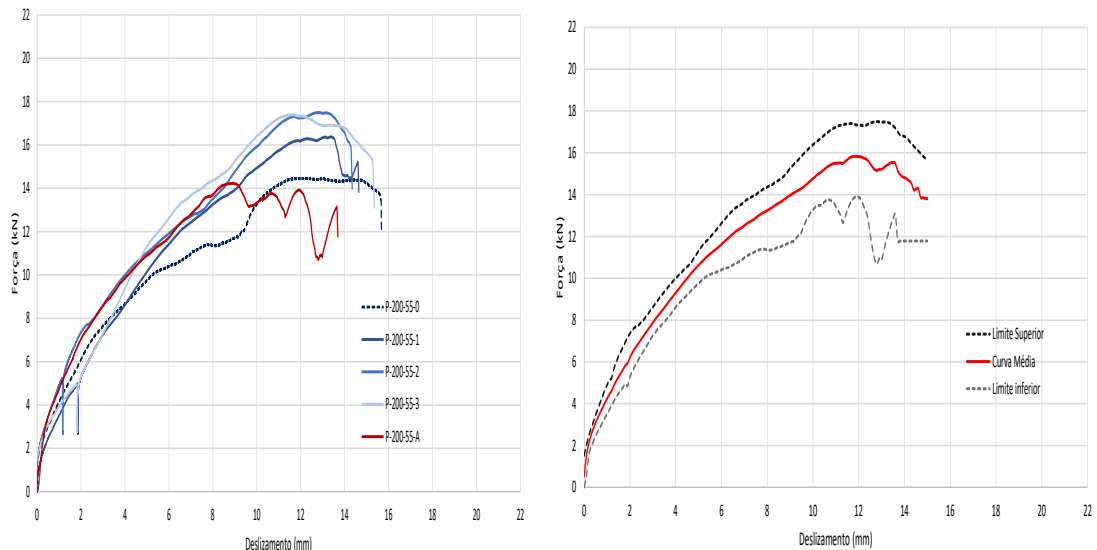
Tabela 4.2 – Síntese dos resultados para o modelo P-150-55

Resultado	Valor
Força máxima média ( $F_{m\acute{a}x}$ )	16,22 kN
Força última média ( $F_u$ )	15,20 kN
Força última característica ( $F_{u,k}$ )	11,49 kN
Força de escoamento média ( $F_y$ )	13,83 kN
Deslizamento último médio ( $v_u$ )	15,19 mm
Deslizamento último característico ( $v_{u,k}$ )	11,19 mm
Deslizamento último médio ( $v_y$ )	3,40 mm
Módulo de deslizamento a 40% de $F_{m\acute{a}x}$ ( $k_{s0,4}$ )	4,17 kN/mm
Módulo de deslizamento a 60% de $F_{m\acute{a}x}$ ( $k_{s0,6}$ )	2,89 kN/mm
Módulo de deslizamento a 80% de $F_{m\acute{a}x}$ ( $k_{s0,8}$ )	2,08 kN/mm
Fator de ductilidade ( $D$ )	4,58

#### 4.2.2. Modelo 2: P-200-55

Na Figura 4.2.a, as curvas de força/deslizamento das amostras do modelo P-200-55 são apresentadas. Na Figura 4.2.b estão mostradas a curva média de força/deslizamento para o modelo e as curvas com os limites superior e inferior de força correspondente a cada deslizamento medido.

Figura 4.2 - Curvas força/deslizamento para o modelo P-200-55



a) Curvas força/deslizamento das amostras do modelo P-200-55

b) Curvas força/deslizamento média e relativas aos limites superior e inferior para as amostras do modelo P-200-55

Na Tabela 4.3 são apresentados os parâmetros de força resistente, deslizamento, módulo de deslizamento e ductilidade para o modelo P-200-55. Os resultados médios de força, deslizamento, módulo de deslizamento e ductilidade foram calculados a partir da média dos valores das cinco amostras. Os resultados característicos de força e deslizamento foram obtidos como 90% do menor valor entre as amostras.

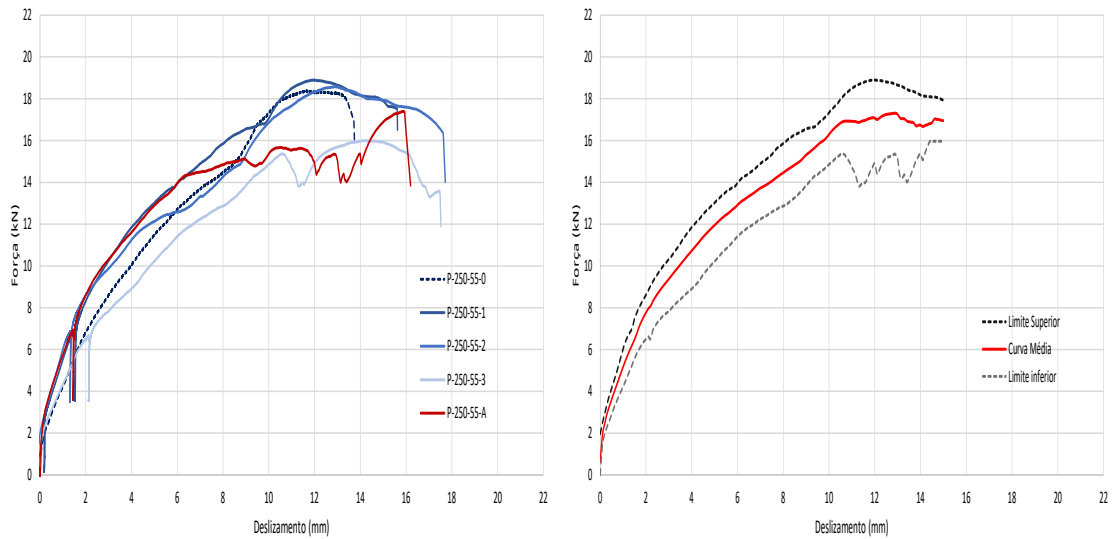
Tabela 4.3 – Síntese dos resultados para o modelo P-200-55

<b>Resultado</b>	<b>Valor</b>
Força máxima média ( $F_{m\acute{a}x}$ )	15,98 kN
Força última média ( $F_u$ )	14,47 kN
Força última característica ( $F_{u,k}$ )	11,52 kN
Força de escoamento média ( $F_y$ )	13,58 kN
Deslizamento último médio ( $v_u$ )	14,69 mm
Deslizamento último característico ( $v_{u,k}$ )	12,29 mm
Deslizamento último médio ( $v_y$ )	4,48 mm
Módulo de deslizamento a 40% de $F_{m\acute{a}x}$ ( $k_{s0,4}$ )	3,20 kN/mm
Módulo de deslizamento a 60% de $F_{m\acute{a}x}$ ( $k_{s0,6}$ )	2,35 kN/mm
Módulo de deslizamento a 80% de $F_{m\acute{a}x}$ ( $k_{s0,8}$ )	1,72 kN/mm
Fator de ductilidade ( $D$ )	4,38

#### **4.2.3. Modelo 3: P-250-55**

Na Figura 4.3.a, as curvas de força/deslizamento das amostras do modelo P-250-55 são apresentadas. Na Figura 4.3.b estão mostradas a curva média de força/deslizamento para o modelo e as curvas com os limites superior e inferior de força correspondente a cada deslizamento medido.

Figura 4.3 - Curvas força/deslizamento para o modelo P-250-55



a) Curvas força/deslizamento das amostras do modelo P-250-55

b) Curvas força/deslizamento média e relativas aos limites superior e inferior para as amostras do modelo P-250-55

Na Tabela 4.4 são apresentados os parâmetros de força resistente, deslizamento, módulo de deslizamento e ductilidade para o modelo P-250-55. Os parâmetros médios de força, deslizamento, módulo de deslizamento e ductilidade foram calculados a partir da média dos valores das cinco amostras. E os parâmetros característicos de força e deslizamento foram obtidos como 90% do menor valor entre as amostras.

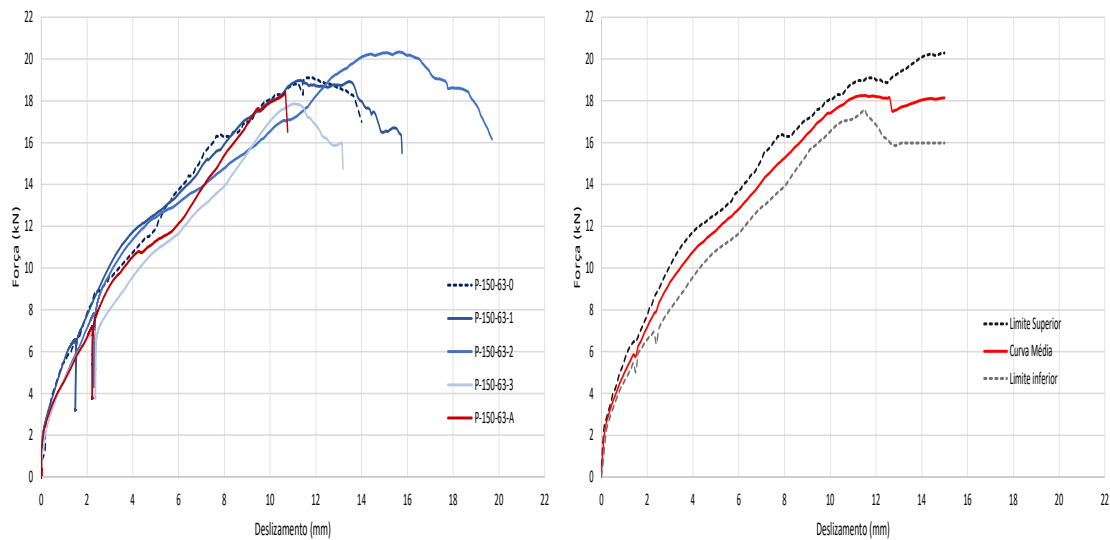
Tabela 4.4 – Síntese dos resultados para o modelo P-250-55

Resultado	Valor
Força máxima média ( $F_{m\acute{a}x}$ )	17,84 kN
Força última média ( $F_u$ )	16,29 kN
Força última característica ( $F_{u,k}$ )	11,99 kN
Força de escoamento média ( $F_y$ )	14,89 kN
Deslizamento último médio ( $v_u$ )	16,05 mm
Deslizamento último característico ( $v_{u,k}$ )	12,34 mm
Deslizamento último médio ( $v_y$ )	3,83 mm
Módulo de deslizamento a 40% de $F_{m\acute{a}x}$ ( $k_{s0,4}$ )	4,03 kN/mm
Módulo de deslizamento a 60% de $F_{m\acute{a}x}$ ( $k_{s0,6}$ )	2,76 kN/mm
Módulo de deslizamento a 80% de $F_{m\acute{a}x}$ ( $k_{s0,8}$ )	1,90 kN/mm
Fator de ductilidade ( $D$ )	3,69

#### 4.2.4. Modelo 4: P-150-63

Na Figura 4.4.a, as curvas de força/deslizamento das amostras do modelo P-150-63 são apresentadas. Na Figura 4.4.b estão mostradas a curva média de força/deslizamento para o modelo e as curvas com os limites superior e inferior de força correspondente a cada deslizamento medido.

Figura 4.4 - Curvas força/deslizamento para o modelo P-150-63



a) Curvas força/deslizamento das amostras do modelo P-150-63

b) Curvas força/deslizamento média e relativas aos limites superior e inferior para as amostras do modelo P-150-63

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados de força resistente, deslizamento, módulo de deslizamento e ductilidade para o modelo P-150-63. Os resultados médios de força, deslizamento, módulo de deslizamento e ductilidade foram calculados a partir da média dos valores das cinco amostras. Os resultados característicos de força e deslizamento foram obtidos como 90% do menor valor entre as amostras.

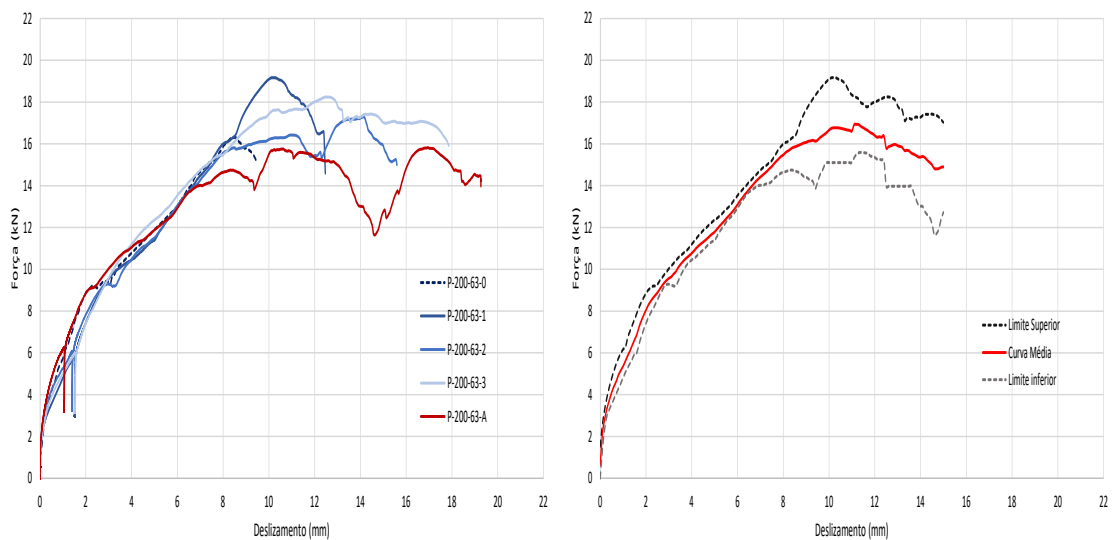
Tabela 4.5 – Síntese dos resultados para o modelo P-150-63

Resultado	Valor
Força máxima média ( $F_{m\acute{a}x}$ )	18,93 kN
Força última média ( $F_u$ )	16,69 kN
Força última característica ( $F_{u,k}$ )	14,06 kN
Força de escoamento média ( $F_y$ )	15,39 kN
Deslizamento último médio ( $v_u$ )	14,65 mm
Deslizamento último característico ( $v_{u,k}$ )	9,59 mm
Deslizamento último médio ( $v_y$ )	4,32 mm
Módulo de deslizamento a 40% de $F_{m\acute{a}x}$ ( $k_{s0,4}$ )	3,72 kN/mm
Módulo de deslizamento a 60% de $F_{m\acute{a}x}$ ( $k_{s0,6}$ )	2,78 kN/mm
Módulo de deslizamento a 80% de $F_{m\acute{a}x}$ ( $k_{s0,8}$ )	2,06 kN/mm
Fator de ductilidade ( $D$ )	3,59

#### 4.2.5. Modelo 5: P-200-63

Na Figura 4.5.a, as curvas de força/deslizamento das amostras do modelo P-200-63 são demonstradas. Na Figura 4.5.b estão apresentadas a curva média de força/deslizamento para o modelo e as curvas com os limites superior e inferior de força correspondente a cada deslizamento medido.

Figura 4.5 - Curvas força/deslizamento para o modelo P-200-63



a) Curvas força/deslizamento das amostras do modelo P-200-63

b) Curvas força/deslizamento média e relativas aos limites superior e inferior para as amostras do modelo P-200-63

Na Tabela 4.6 são apresentados os resultados de força resistente, deslizamento, módulo de deslizamento e ductilidade para o modelo P-200-63. Os resultados médios de força, deslizamento, módulo de deslizamento e ductilidade foram calculados a partir da média dos valores das cinco amostras. Os resultados característicos de força e deslizamento foram obtidos como 90% do menor valor entre as amostras.

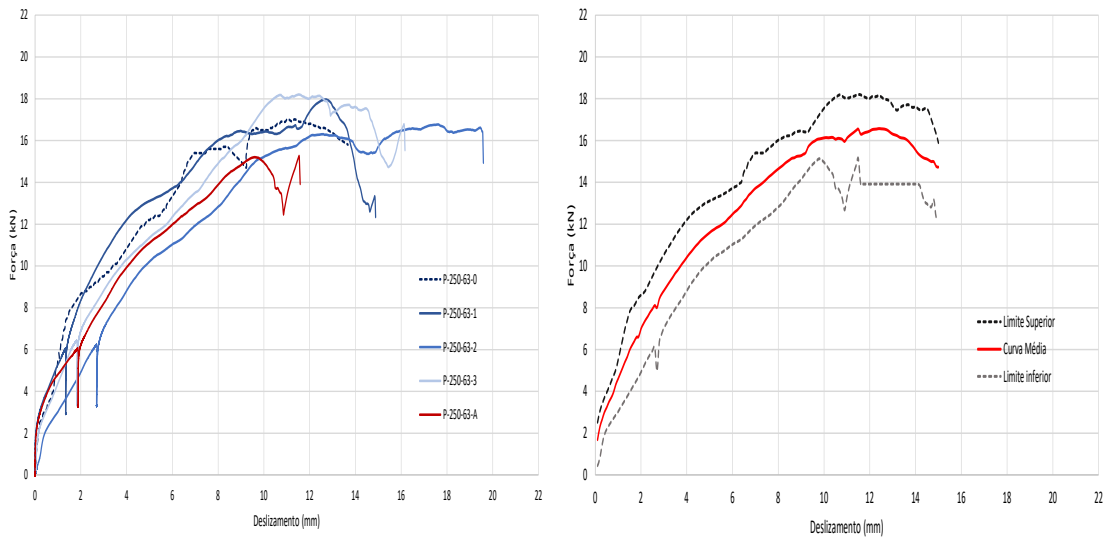
Tabela 4.6 – Síntese dos resultados para o modelo P-200-63

<b>Resultado</b>	<b>Valor</b>
Força máxima média ( $F_{máx}$ )	17,37 kN
Força última média ( $F_u$ )	15,39 kN
Força última característica ( $F_{u,k}$ )	12,95 kN
Força de escoamento média ( $F_y$ )	14,40 kN
Deslizamento último médio ( $v_u$ )	14,93 mm
Deslizamento último característico ( $v_{u,k}$ )	8,54 mm
Deslizamento último médio ( $v_y$ )	3,34 mm
Módulo de deslizamento a 40% de $F_{máx}$ ( $k_{s0,4}$ )	4,50 kN/mm
Módulo de deslizamento a 60% de $F_{máx}$ ( $k_{s0,6}$ )	2,89 kN/mm
Módulo de deslizamento a 80% de $F_{máx}$ ( $k_{s0,8}$ )	2,12 kN/mm
Fator de ductilidade ( $D$ )	3,43

#### **4.2.6. Modelo 6: P-250-63**

Na Figura 4.6.a, as curvas de força/deslizamento das amostras do modelo P-250-63 são apresentadas. Na Figura 4.6.b estão mostradas a curva média de força/deslizamento para o modelo e as curvas com os limites superior e inferior de força correspondente a cada deslizamento medido.

Figura 4.6 - Curvas força/deslizamento para o modelo P-250-63



a) Curvas força/deslizamento das amostras do modelo P-250-63

b) Curvas força/deslizamento média e relativas aos limites superior e inferior para as amostras do modelo P-250-63

Na Tabela 4.7 são apresentados os resultados de força resistente, deslizamento e módulo de deslizamento para o modelo P-250-63. Os resultados médios de força, deslizamento, módulo de deslizamento e ductilidade foram calculados a partir da média dos valores das cinco amostras. Os resultados característicos de força e deslizamento foram obtidos como 90% do menor valor dentre as amostras.

Tabela 4.7 – Síntese dos resultados para o modelo P-250-63

Resultado	Valor
Força máxima média ( $F_{m\acute{a}x}$ )	17,48 kN
Força última média ( $F_u$ )	15,36 kN
Força última característica ( $F_{u,k}$ )	11,48 kN
Força de escoamento média ( $F_y$ )	14,81 kN
Deslizamento último médio ( $v_u$ )	15,92 mm
Deslizamento último característico ( $v_{u,k}$ )	12,31 mm
Deslizamento último médio ( $v_y$ )	4,21 mm
Módulo de deslizamento a 40% de $F_{m\acute{a}x}$ ( $k_{s0,4}$ )	3,92 kN/mm
Módulo de deslizamento a 60% de $F_{m\acute{a}x}$ ( $k_{s0,6}$ )	2,68 kN/mm
Módulo de deslizamento a 80% de $F_{m\acute{a}x}$ ( $k_{s0,8}$ )	1,96 kN/mm
Fator de ductilidade ( $D$ )	3,50

#### 4.2.7. Síntese dos resultados

Na Tabela 4.8 são apresentados os resultados médios de força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ), de força resistente última ( $F_u$ ) e de força resistente ao escoamento ( $F_y$ ), e o resultado característico de força resistente última ( $F_{u,k}$ ), tomado como 90% do menor valor de  $F_u$  entre as amostras do modelo. Para determinação da força resistente última característica admite-se o mesmo critério recomendado pela EN-1994-1-1:2004 para o ensaio *push-out* de conexões entre aço e concreto.

As expressões para determinação do fluxo de cisalhamento longitudinal máximo na conexão ( $q_{l,m\acute{a}x}$ ) e da tensão de compressão máxima na placa de madeira ( $f_{c,m\acute{a}x}$ ) são respectivamente:

$$q_{l,m\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{e} \quad [4.1]$$

$$f_{c,m\acute{a}d} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{d_b t_{mad}} \quad [4.2]$$

onde:

$e$  é o espaçamento entre parafusos (comprimento do vão de cisalhamento);

$d_b$  é o diâmetro do parafuso;

$t_{mad}$  é a espessura da placa de madeira.

Tabela 4.8 – Forças resistentes, fluxo de cisalhamento longitudinal e tensão de compressão máxima na placa de madeira para os ensaios *push-out*

Modelo	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	$F_u$ (kN)	$F_y$ (kN)	$F_{u,k}$ (kN)	$q_{l,m\acute{a}x}$ (kN/cm)	$f_{c,m\acute{a}d}$ (kN/cm)
P-150-55	16,22	15,20	13,83	11,49	1,08	16,12
P-200-55	15,98	14,47	13,58	11,52	0,80	15,88
P-250-55	17,84	16,29	14,89	11,99	0,71	17,72
P-150-63	18,93	16,69	15,39	14,06	1,26	16,42
P-200-63	17,37	15,39	14,40	12,95	0,87	15,07
P-250-63	17,48	14,86	14,81	11,48	0,70	15,16

Na Tabela 4.9 são apresentados os resultados médios de módulo de deslizamento a 40% de  $F_{m\acute{a}x}$  ( $k_{s0,4}$ ), módulo de deslizamento a 60% de  $F_{m\acute{a}x}$  ( $k_{s0,6}$ ) e módulo de deslizamento a 80% de  $F_{m\acute{a}x}$  ( $k_{s0,8}$ ). Também são apresentados os resultados médios de deslizamento último ( $v_u$ )

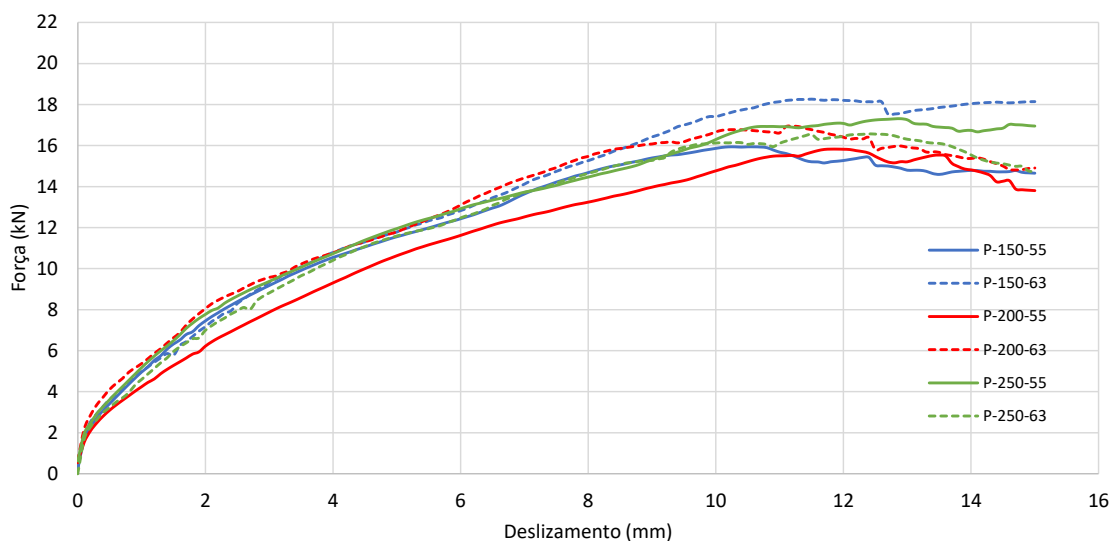
e de deslizamento no escoamento ( $v_y$ ) e o resultado característico de deslizamento último ( $v_{u,k}$ ), tomado como 90% do menor valor de  $v_u$  entre as amostras do modelo. Para determinação do deslizamento último característico admite-se o mesmo critério recomendado pela EN-1994-1-1:2004 para o ensaio *push-out* de conexões entre aço e concreto. Os resultados médios do fator de ductilidade ( $D$ ) para cada modelo também são mostrados.

Tabela 4.9 – Módulos de deslizamento, deslizamentos e fator de ductilidade dos modelos obtidos nos ensaios *push-out*

<i>Modelo</i>	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)	$v_u$ (mm)	$v_{u,k}$ (mm)	$v_y$ (mm)	$D$
P-150-55	4,17	2,89	2,02	15,19	11,19	3,40	4,58
P-200-55	3,20	2,35	1,72	14,69	12,29	4,48	4,38
P-250-55	4,03	2,76	1,90	16,05	12,34	3,83	3,69
P-150-63	3,46	2,55	1,93	14,65	9,59	4,32	3,59
P-200-63	4,50	2,89	2,12	14,93	8,54	3,34	3,43
P-250-63	3,92	2,68	1,96	15,92	12,31	4,21	3,50

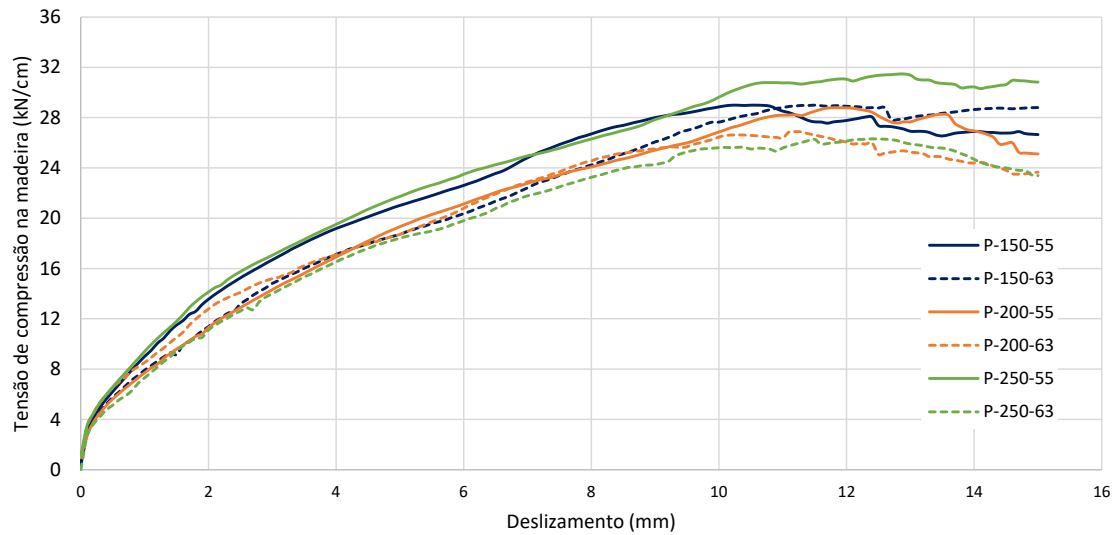
Na Figura 4.7 estão apresentadas as curvas médias de força/deslizamento dos modelos experimentais. Os ensaios *push-out* revelaram que os conectores formados por parafusos autoatarraxantes são capazes de transmitir a força de cisalhamento com grande rigidez inicial e ductilidade, conforme observado por meio dos parâmetros obtidos a partir da curva EEEP. Os valores de força resistente máxima e a ductilidade desses conectores indicam o potencial de uso na formação de vigas mistas de aço e madeira

Figura 4.7- Curvas de força/deslizamento dos modelos experimentais



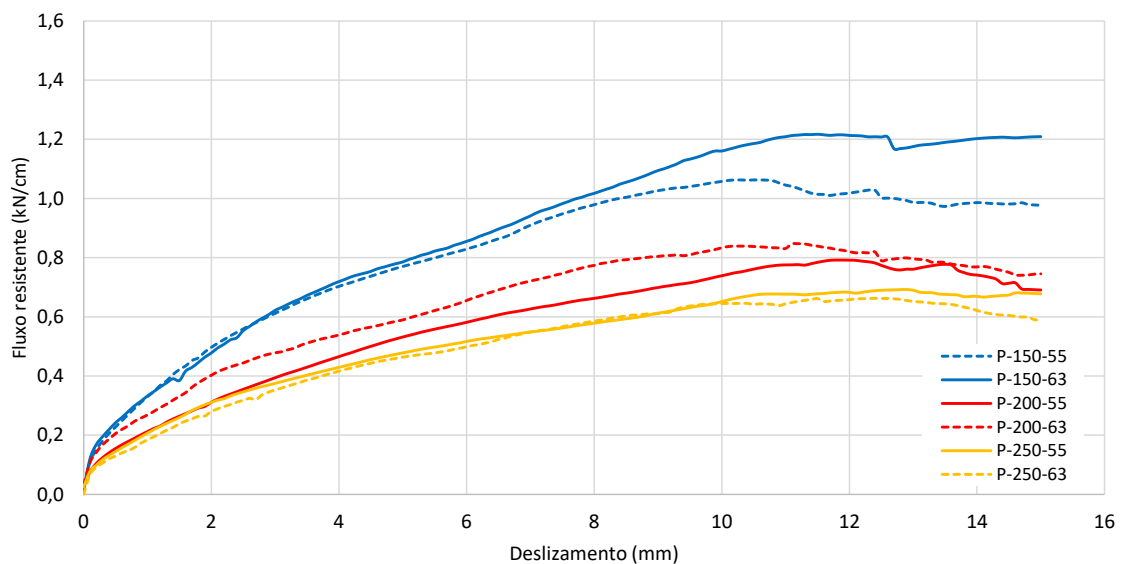
Na Figura 4.8 estão apresentadas as curvas médias de tensão /deslizamento dos modelos experimentais.

Figura 4.8- Curvas de tensão de compressão na placa de madeira/deslizamento dos modelos experimentais



Na Figura 4.8 estão apresentadas as curvas médias de fluxo de cisalhamento longitudinal/deslizamento dos modelos experimentais.

Figura 4.9- Curvas de fluxo de cisalhamento longitudinal/deslizamento dos modelos experimentais

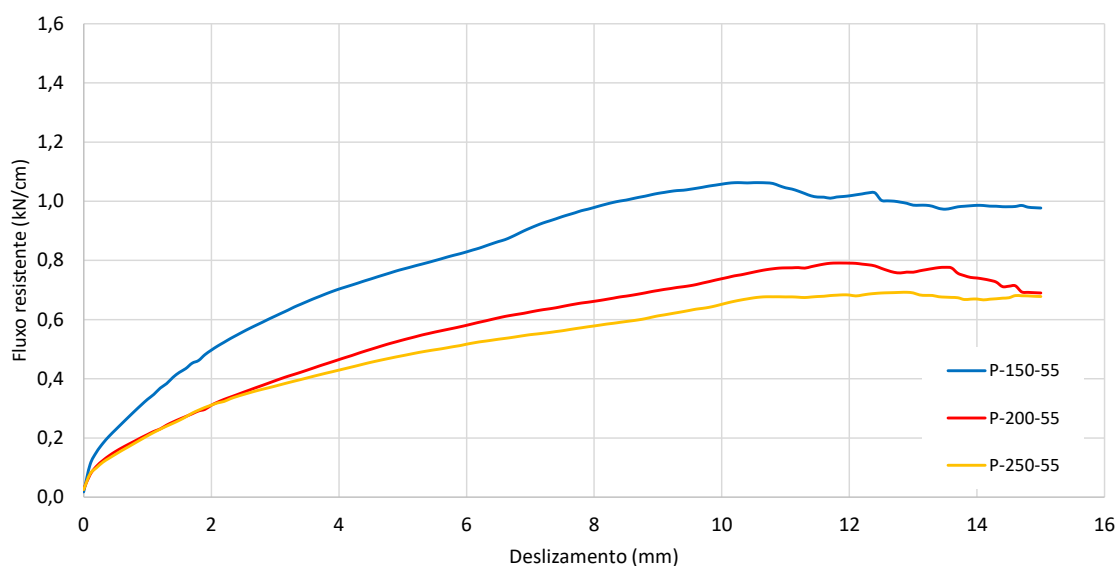


### 4.3. Avaliação da influência das variáveis consideradas nos ensaios

#### 4.3.1. Espaçamento entre os parafusos autoatarraxantes

Na Figura 4.10 são apresentadas as curvas médias de fluxo de cisalhamento longitudinal/deslizamento dos três modelos com parafusos de diâmetro igual a 5,5 mm, com o objetivo de identificar a influência do espaçamento entre parafusos nestes modelos.

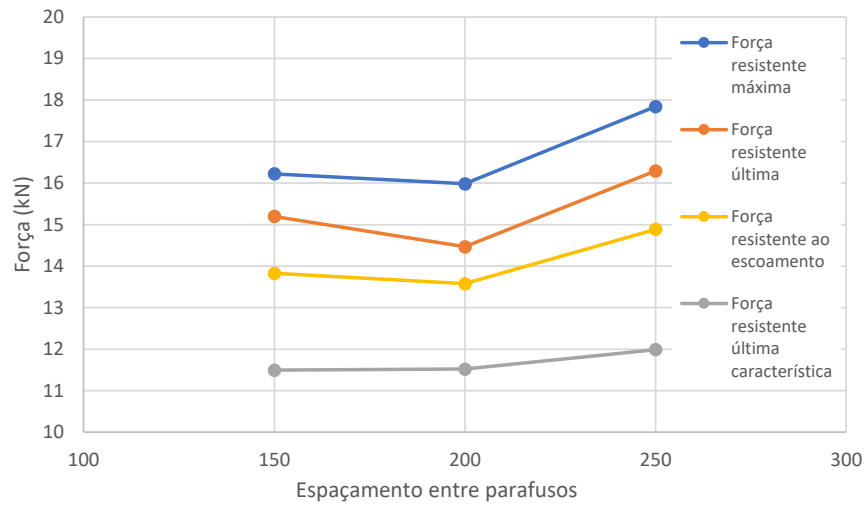
Figura 4.10 – Curvas fluxo de cisalhamento longitudinal/deslizamento médias para os modelos com parafusos de diâmetro igual a 5,5 mm



Com base nas curvas médias de fluxo de cisalhamento longitudinal/deslizamento da Figura 4.10, pode-se observar que o modelo com menor espaçamento entre parafusos apresentou maiores valores de fluxo de cisalhamento longitudinal durante o ensaio *push-out*. Observa-se assim uma influência do espaçamento entre parafusos no fluxo de cisalhamento longitudinal da conexão, de modo que quanto maior o espaçamento menor o fluxo de cisalhamento longitudinal.

Na Figura 4.11 mostra-se o gráfico com as forças resistentes máxima, última média, última característica e ao escoamento para cada espaçamento entre parafusos dos modelos com parafusos de diâmetro igual a 5,5 mm.

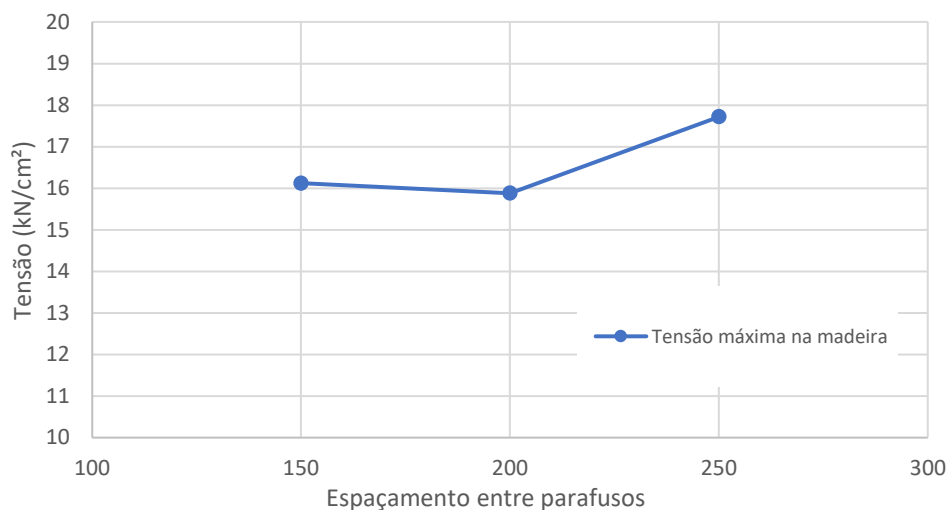
Figura 4.11 – Forças resistentes dos modelos com parafusos com diâmetro igual a 5,5 mm



O modelo P-250-55 apresentou forças resistentes maiores do que os demais modelos com parafusos de 5,5 mm. O modelo P-150-55 apresentou forças resistentes máxima, última média e ao escoamento ligeiramente maiores que o modelo P-200-55, enquanto o modelo P-200-55 apresentou força última característica ligeiramente maior do que o modelo P-150-55.

Na Figura 4.12 mostra-se o gráfico com a tensão resistente máxima na placa de madeira para cada espaçamento entre parafusos dos modelos com parafusos de diâmetro igual a 5,5 mm.

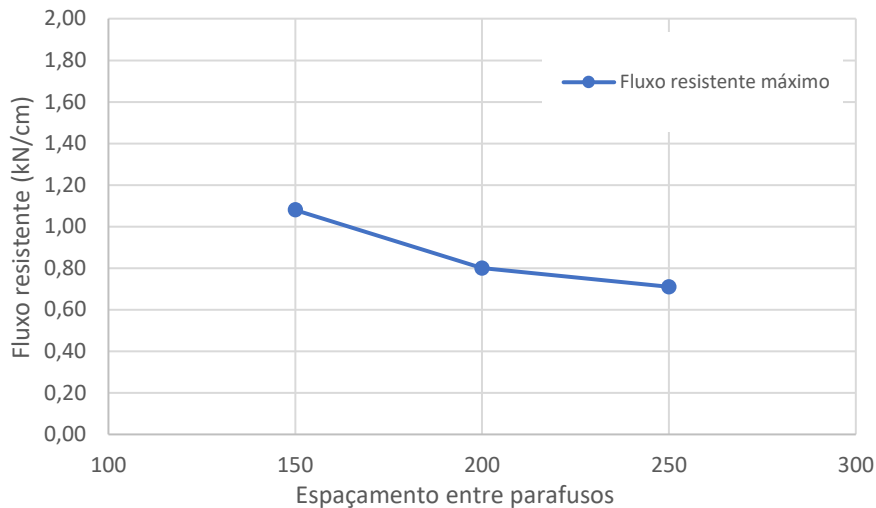
Figura 4.12 – Tensão resistente máxima da madeira para os modelos com parafusos com diâmetro igual a 5,5 mm



Com base na figura acima, observa-se que os modelos com espaçamento de 150 e 200 mm apresentaram tensão resistente máxima na placa de madeira ( $f_{c, mad}$ ) semelhantes. O valor de  $f_{c, mad}$  foi maior para o modelo com espaçamento de 250 mm.

Na Figura 4.13 mostra-se o gráfico com o fluxo de cisalhamento longitudinal máximo para cada espaçamento entre parafusos dos modelos com parafusos de diâmetro igual a 5,5 mm.

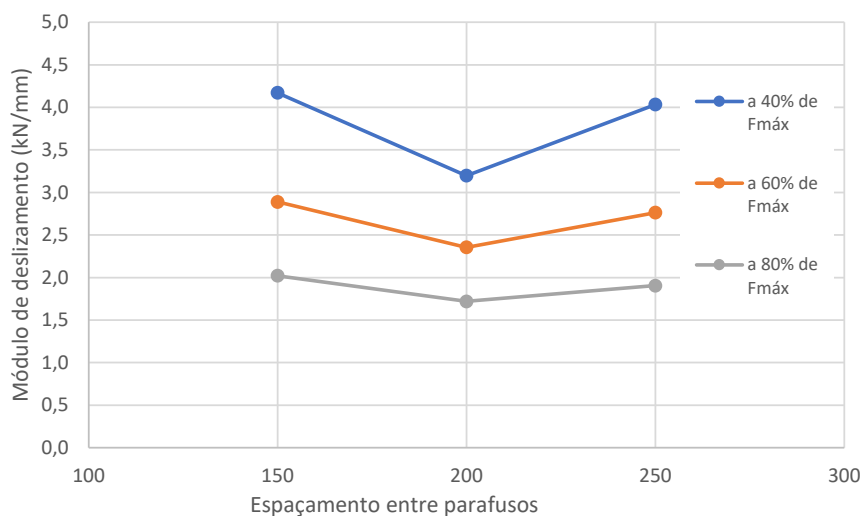
Figura 4.13 – Fluxo de cisalhamento longitudinal máximo dos modelos com parafusos com diâmetro igual a 5,5 mm



Com base na figura acima, observa-se uma tendência de queda no valor do fluxo de cisalhamento longitudinal máximo ( $q_{l,máx}$ ) com o aumento do espaçamento entre parafusos. Isso quer dizer que quanto menor o espaçamento entre parafusos, maior o valor de  $q_{l,máx}$  para os modelos com parafusos de 5,5 mm.

Na Figura 4.14 mostram-se os módulos de deslizamentos a 40%, 60% e 80% de  $F_{máx}$  para cada espaçamento entre parafusos dos modelos com parafusos de diâmetro igual a 5,5 mm.

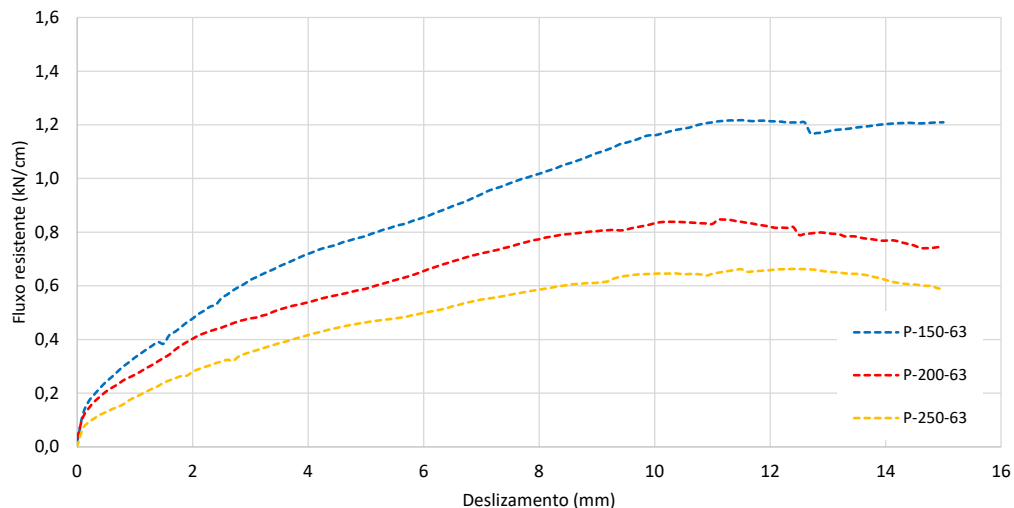
Figura 4.14 - Módulos de deslizamento dos modelos com parafusos com diâmetro igual a 5,5 mm



O modelo com espaçamento de 150 mm apresentou maiores valores para os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{máx}$ , o que era esperado. O modelo com espaçamento de 200 mm apresentou os menores valores para os módulos de deslizamento dentre os modelos com parafusos de 5,5 mm. Por outro lado, o modelo com espaçamento de 250 mm apresentou módulos de deslizamento maiores do que aqueles obtidos para o modelo com espaçamento de 200 mm, contrariando a tendência esperada.

Na Figura 4.15 apresentam-se as curvas de fluxo de cisalhamento longitudinal/deslizamento médias dos três modelos com parafusos de diâmetro igual a 6,3 mm, com objetivo de identificar a influência do espaçamento entre parafusos nestes modelos.

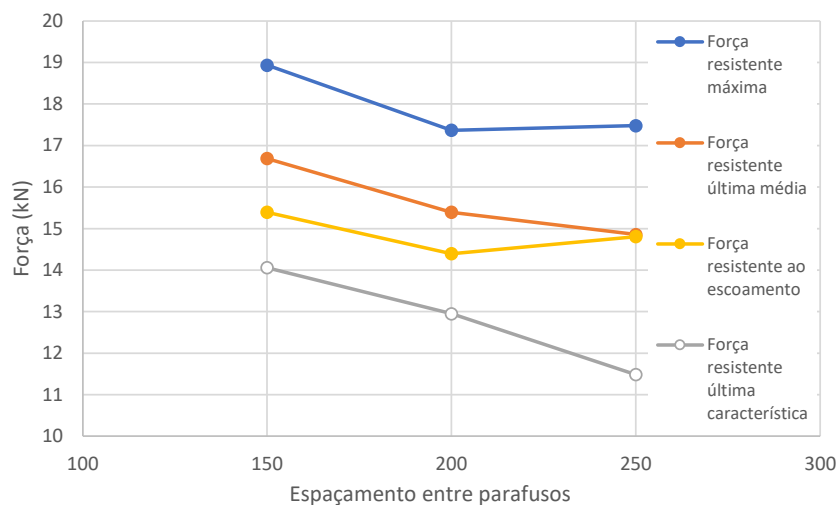
Figura 4.15 - Curvas fluxo de cisalhamento longitudinal/deslizamento médias para os modelos com parafusos de diâmetro igual a 6,3 mm



Com base nas curvas médias de fluxo de cisalhamento longitudinal/deslizamento da Figura 4.15, pode-se observar que o modelo com menor espaçamento entre parafusos apresentou maiores valores de fluxo de cisalhamento longitudinal durante o ensaio *push-out*. Observa-se assim uma influência do espaçamento entre parafusos no fluxo de cisalhamento longitudinal da conexão, sendo que quanto maior o espaçamento menor o fluxo de cisalhamento longitudinal.

Na Figura 4.16 mostra-se o gráfico com as forças resistentes máxima, última média, última característica e ao escoamento para cada espaçamento entre parafusos dos modelos com parafusos de diâmetro igual a 6,3 mm.

Figura 4.16 - Forças resistentes dos modelos com parafusos com diâmetro de 6,3 mm

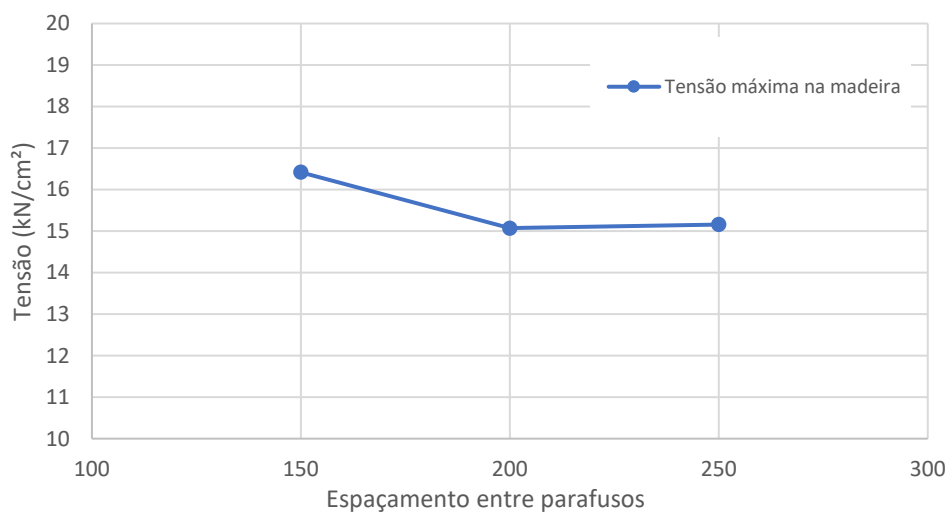


O modelo P-150-63 apresentou forças resistentes significativamente maiores do que os demais modelos com parafusos de 6,3 mm. O modelo P-200-63 apresentou forças resistentes última média e última características maiores que o modelo P-250-63, enquanto o modelo P-250-63 apresentou força resistente ao escoamento maior do que o modelo P-200-63. Os modelos com 200 e 250 mm de espaçamento entre parafusos apresentaram forças resistentes máximas semelhantes.

Nos modelos com parafusos de 5,5 mm, o modelo com espaçamento de 250 mm foi o que apresentou maiores forças resistentes, enquanto os modelos com espaçamentos de 150 e 200 mm apresentaram forças resistentes semelhantes. Nos modelos com parafusos de 6,3 mm, o modelo com espaçamento de 150 mm foi o que apresentou maiores forças resistentes, enquanto os modelos com espaçamentos de 200 e 250 mm apresentaram forças resistentes semelhantes. Nota-se, portanto, que não há uma relação bem definida entre o espaçamento entre parafusos e as forças resistentes dos modelos.

Na Figura 4.17 mostra-se o gráfico com a tensão resistente máxima na placa de madeira para cada espaçamento entre parafusos dos modelos com parafusos de diâmetro igual a 6,3 mm.

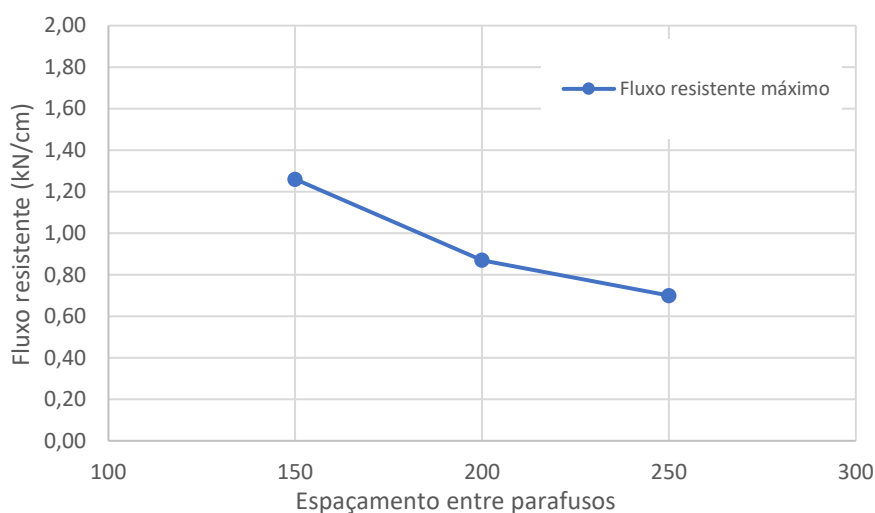
Figura 4.17 – Tensão resistente máxima da madeira para os modelos com parafusos com diâmetro igual a 6,3 mm



Com base na Figura 4.17, observa-se que os modelos com espaçamento de 200 e 250 mm apresentaram tensão resistente máxima na placa de madeira ( $f_{c, mad}$ ) semelhantes. O valor de  $f_{c, mad}$  foi maior para o modelo com espaçamento de 150 mm.

Na Figura 4.18 mostra-se o gráfico com o fluxo de cisalhamento longitudinal máximo para cada espaçamento entre parafusos dos modelos com parafusos de diâmetro igual a 6,3 mm.

Figura 4.18 – Fluxo de cisalhamento longitudinal máximo dos modelos com parafusos com diâmetro igual a 6,3 mm

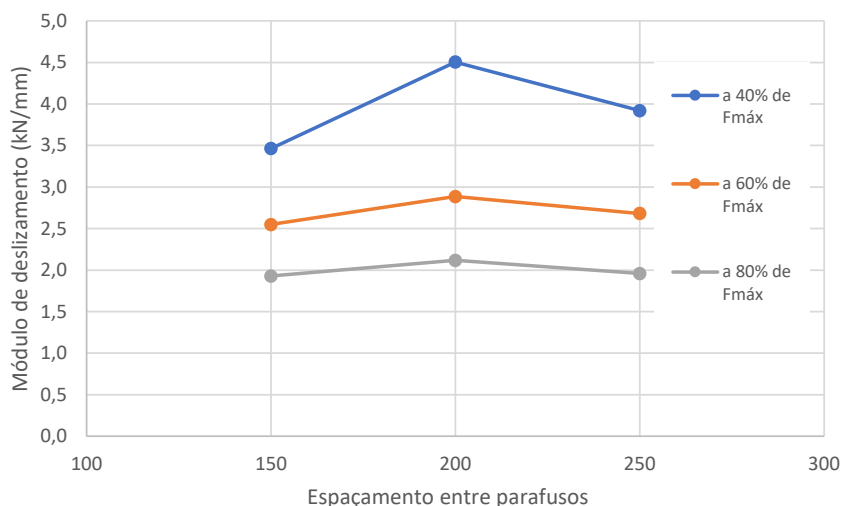


Com base na figura acima, observa-se uma tendência de queda no valor do fluxo de cisalhamento longitudinal máximo ( $q_{l, máx}$ ) com o aumento do espaçamento entre parafusos. Isso

quer dizer que quanto menor o espaçamento entre parafusos, maior o valor de  $q_{l,máx}$  para os modelos com parafusos de 6,3 mm.

Na Figura 4.19 mostra-se o gráfico com os módulos de deslizamentos a 40%, 60% e 80% de  $F_{máx}$  para cada espaçamento entre parafusos entre os modelos com parafusos de diâmetro igual a 6,3 mm.

Figura 4.19 - Módulos de deslizamento dos modelos com parafusos com diâmetro de 6,3 mm



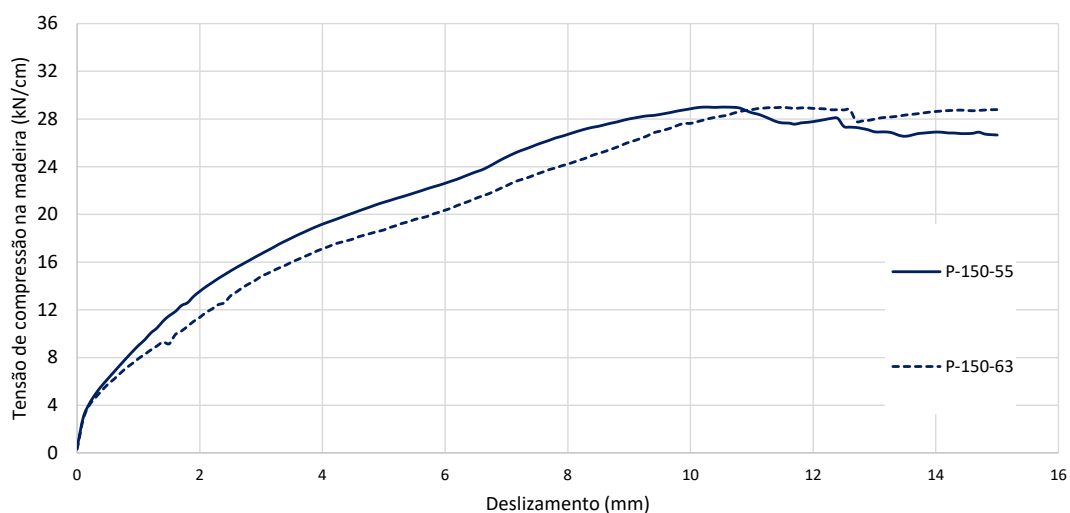
O modelo com espaçamento de 200 mm apresentou os maiores valores de módulo de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{máx}$ . O modelo com espaçamento de 150 mm apresentou os menores valores para o módulo de deslizamento a 40% e a 60% de  $F_{máx}$  dentre os modelos com parafusos de 6,3 mm.

Esperava-se que o aumento no espaçamento entre parafusos causasse uma diminuição nos módulos de deslizamentos dos modelos, com base nos resultados de Northcutt (2012), Martin (2014), Loehr (2016) e Liu (2018). Entretanto, essa relação não foi confirmada para os modelos ensaiados neste trabalho.

#### **4.3.2. Diâmetro dos parafusos**

Na Figura 4.20 são apresentadas as curvas médias de tensão/deslizamento dos dois modelos com espaçamento de 150 mm entre parafusos, com objetivo de avaliar a influência do diâmetro dos parafusos nestes modelos.

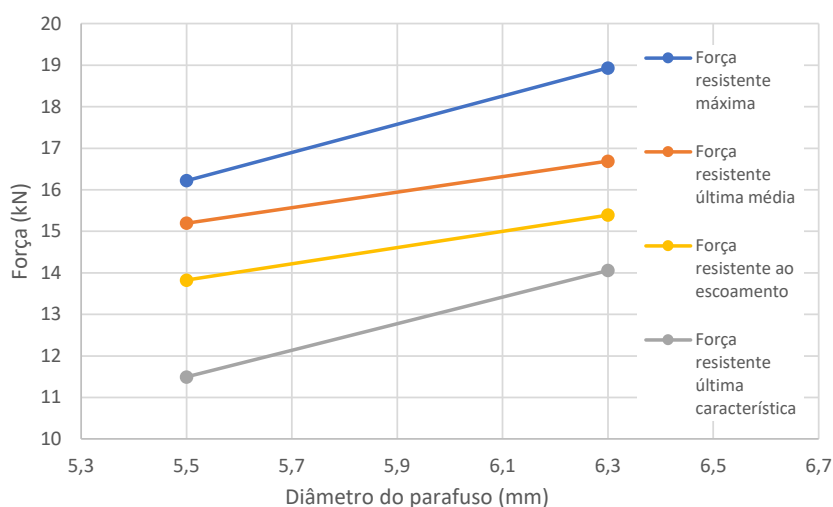
Figura 4.20 – Curvas médias de tensão/deslizamento para os modelos com espaçamento entre parafusos de 150 mm



O modelo com parafusos de 5,5 mm apresentou maiores tensões resistentes quando comparado ao modelo com parafusos de 6,3 mm. Isso pode ser explicado pela maior tensão causada pelo parafuso de menor diâmetro no contato com a madeira. O modelo com parafusos de menor diâmetro (5,5 mm) alcançou a tensão resistente máxima para um deslizamento inferior em relação ao modelo com parafusos de maior diâmetro (6,3 mm).

Na Figura 4.21 mostra-se o gráfico com as forças resistentes máxima, última média, última característica e ao escoamento para diâmetro referente aos modelos com 150 mm de espaçamento entre parafusos.

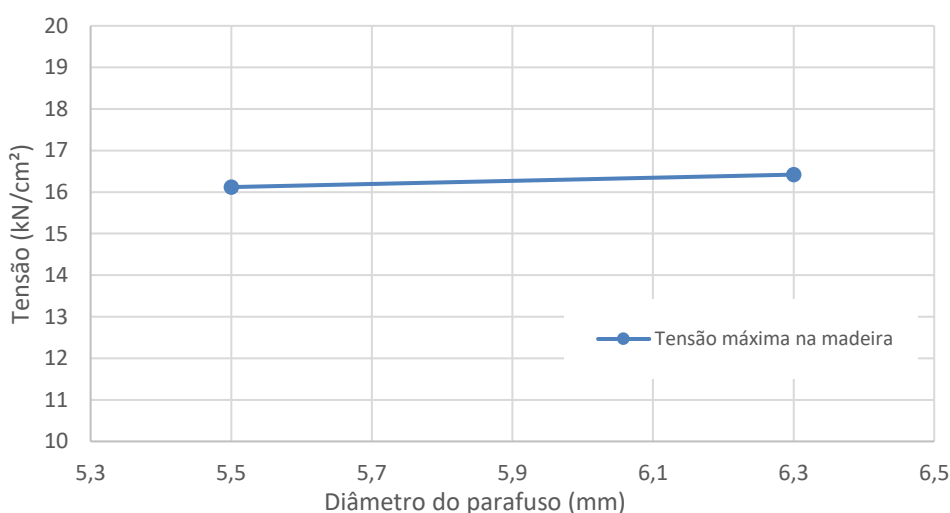
Figura 4.21 - Forças resistentes dos modelos com espaçamento de 150 mm entre parafusos



O modelo com parafusos de 6,3 mm apresentou forças resistentes (máxima, última média, última característica e ao escoamento) superiores às do modelo com parafusos de 5,5 mm. Isso era esperado e é devido à maior tensão causada pelo parafuso de menor diâmetro no contato com a madeira. Por isso, os modelos com parafuso de menor diâmetro atingiram a falha para forças menores quando comparadas aos modelos com parafusos de maior diâmetro.

Na Figura 4.22 mostra-se o gráfico com a tensão resistente máxima na placa de madeira para os modelos com espaçamento entre parafusos igual a 150 mm.

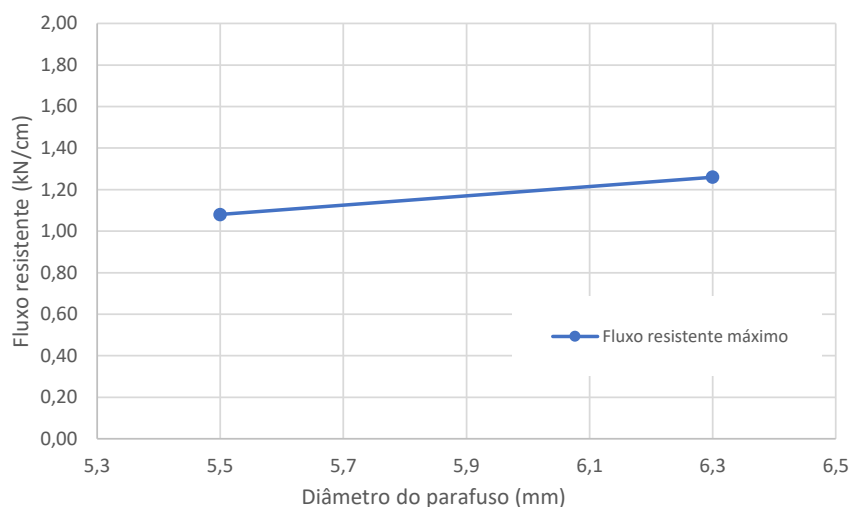
Figura 4.22 – Tensão resistente máxima da madeira para os modelos com espaçamento entre parafusos igual a 150 mm



Com base na figura acima, observa-se que o modelo com parafusos de maior diâmetro (6,3 mm) alcançou uma tensão resistente máxima na madeira ligeiramente maior do que o modelo com parafusos de menor diâmetro (5,5 mm).

Na Figura 4.23 mostra-se o gráfico com o fluxo de cisalhamento longitudinal máximo para os modelos com espaçamento entre parafusos igual a 150 mm.

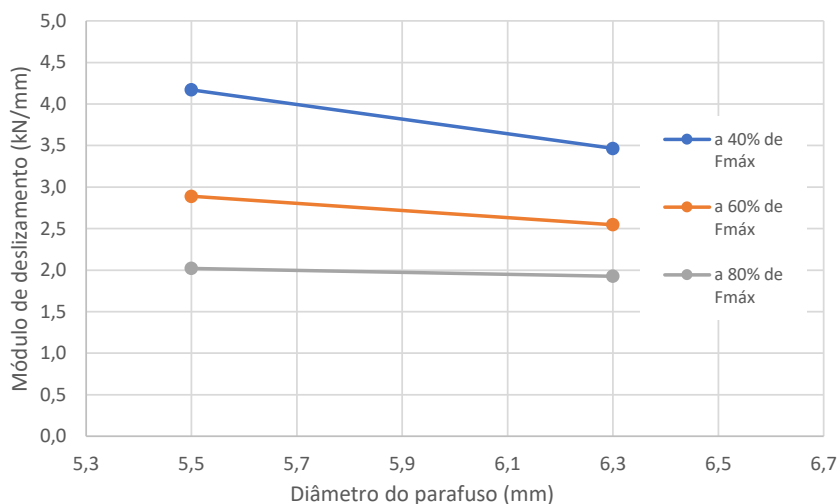
Figura 4.23 – Fluxo de cisalhamento longitudinal máximo dos modelos com espaçamento entre parafusos igual a 150 mm



Com base na figura acima, observa-se que o modelo com parafusos de maior diâmetro (6,3 mm) alcançou um fluxo de cisalhamento longitudinal máximo maior do que o modelo com parafusos de menor diâmetro (5,5 mm).

Na Figura 4.24 mostra-se o gráfico com os módulos de deslizamentos a 40%, 60% e 80% de  $F_{máx}$  para cada diâmetro referente aos modelos com 150 mm de espaçamento entre parafusos.

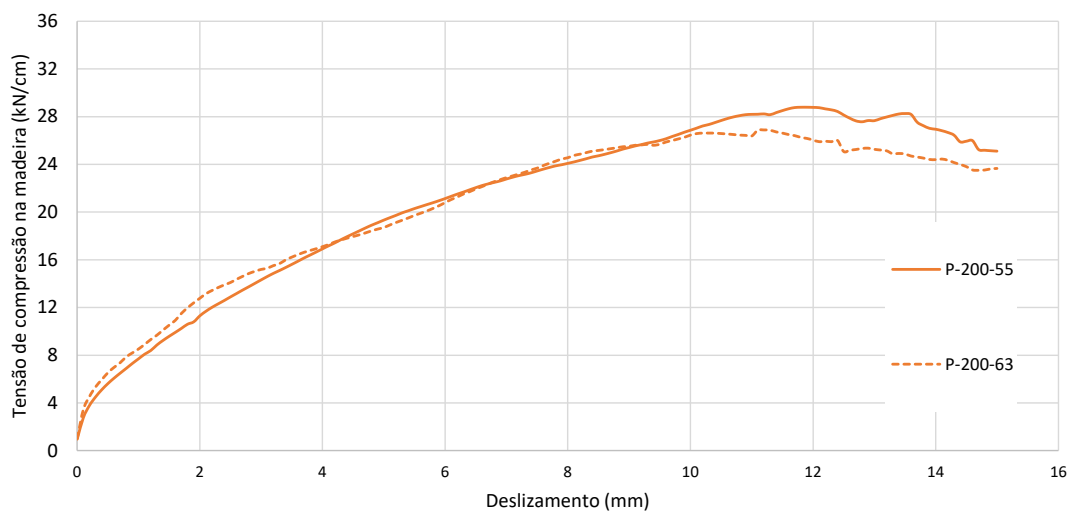
Figura 4.24 - Módulos de deslizamento dos modelos com espaçamento de 150 mm entre parafusos



O modelo com parafuso de 5,5 mm apresentou módulo de deslizamento a 40% de  $F_{máx}$  superior ao modelo de 6,3 mm. Os modelos apresentaram módulos de deslizamento a 60% e a 80% de  $F_{máx}$  semelhantes.

Na Figura 4.25 são apresentadas as curvas médias de tensão/deslizamento dos dois modelos com espaçamento de 200 mm entre parafusos para identificar a influência do diâmetro dos parafusos nesses modelos.

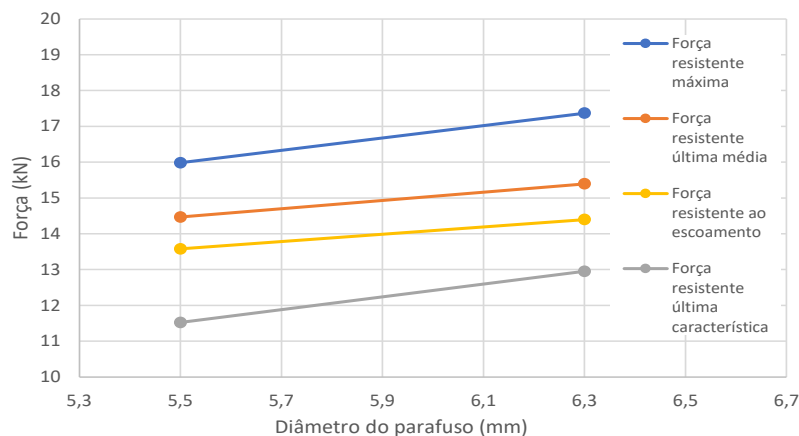
Figura 4.25 - Curvas médias de tensão/deslizamento para os modelos com espaçamento entre parafusos de 200 mm



Com base na Figura 4.25 nota-se que os dois modelos apresentaram tensões resistentes semelhantes, sendo que o modelo com parafusos de 5,5 mm alcançou uma tensão resistente máxima superior. Uma maior tensão foi gerada no parafuso de menor diâmetro no contato com a madeira, fazendo com que os modelos com 5,5 mm falhassem precocemente em relação aos modelos de 6,3 mm.

Na Figura 4.26 mostra-se o gráfico com as forças resistentes máxima, última média, última característica e ao escoamento para cada diâmetro referente aos modelos com 200 mm de espaçamento entre parafusos.

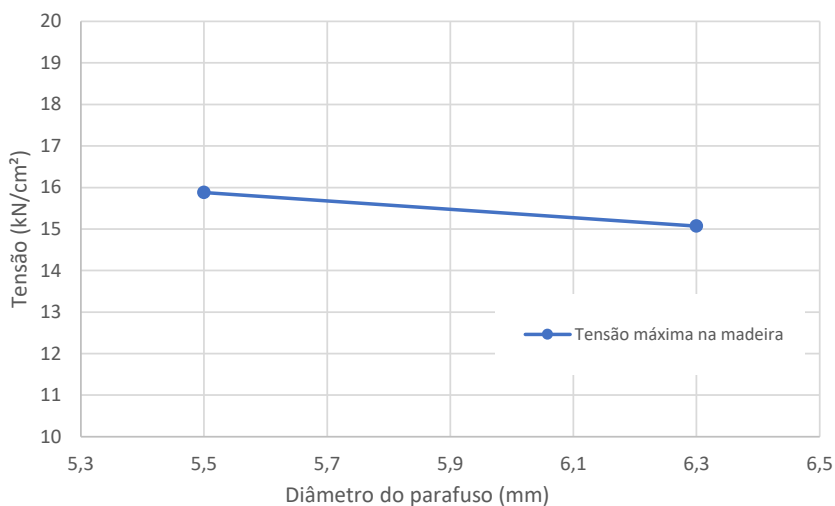
Figura 4.26 - Forças resistentes dos modelos com espaçamento de 200 mm entre parafusos



O modelo com parafusos de 6,3 mm apresentou forças resistentes máxima, última média, última característica e ao escoamento com valores superiores às do modelo com parafusos de 5,5 mm, confirmando a tendência esperada.

Na Figura 4.27 mostra-se o gráfico com a tensão resistente máxima na placa de madeira para os modelos com espaçamento entre parafusos igual a 200 mm.

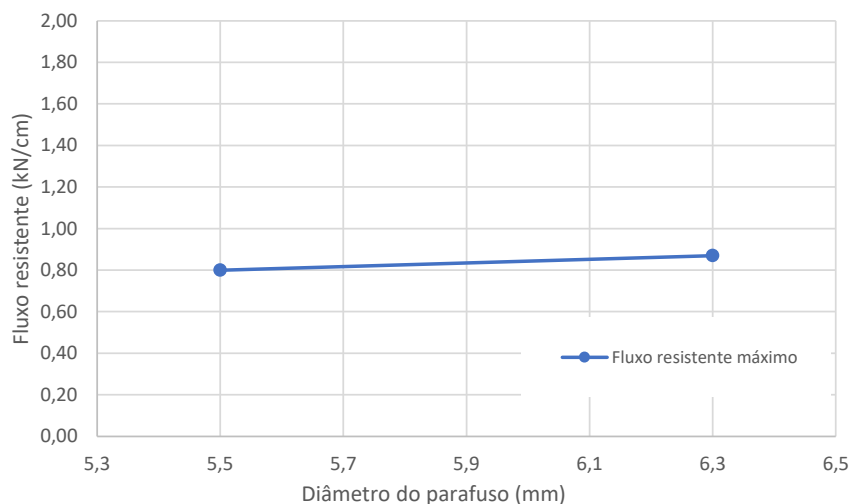
Figura 4.27 – Tensão resistente máxima da madeira para os modelos com espaçamento entre parafusos igual a 200 mm



Com base na figura acima, observa-se que o modelo com parafusos de menor diâmetro (5,5 mm) alcançou uma tensão resistente máxima na madeira ligeiramente maior do que o modelo com parafusos de maior diâmetro (6,3 mm). Isso é devido à maior tensão causada pelo parafuso de menor diâmetro no contato com a madeira, fazendo que os modelos com parafusos de 5,5 mm falhassem precocemente.

Na Figura 4.28 mostra-se o gráfico com o fluxo de cisalhamento longitudinal máximo para os modelos com espaçamento entre parafusos igual a 200 mm.

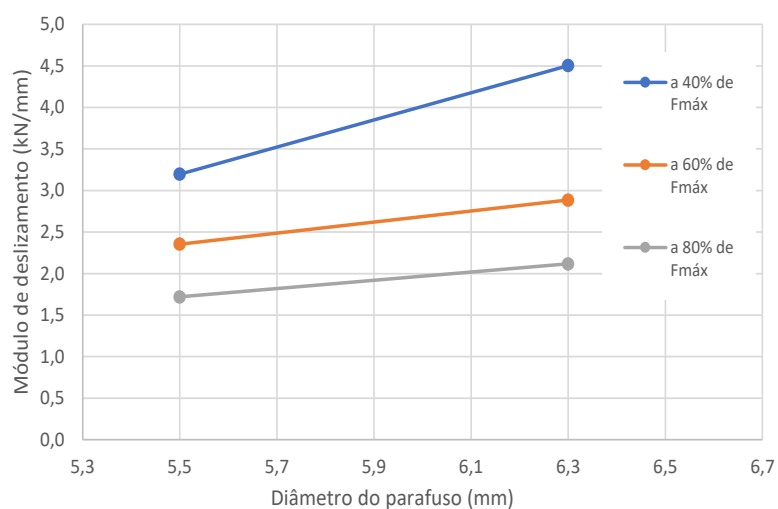
Figura 4.28 – Fluxo de cisalhamento longitudinal máximo dos modelos com espaçamento entre parafusos igual a 200 mm



Com base na figura acima, observa-se que o modelo com parafusos de maior diâmetro (6,3 mm) alcançou um fluxo de cisalhamento longitudinal máximo ligeiramente maior do que o modelo com parafusos de menor diâmetro (5,5 mm).

Na Figura 4.29 apresenta-se o gráfico com os módulos de deslizamentos a 40%, 60% e 80% de  $F_{máx}$  para cada diâmetro referente aos modelos com 200 mm de espaçamento entre parafusos.

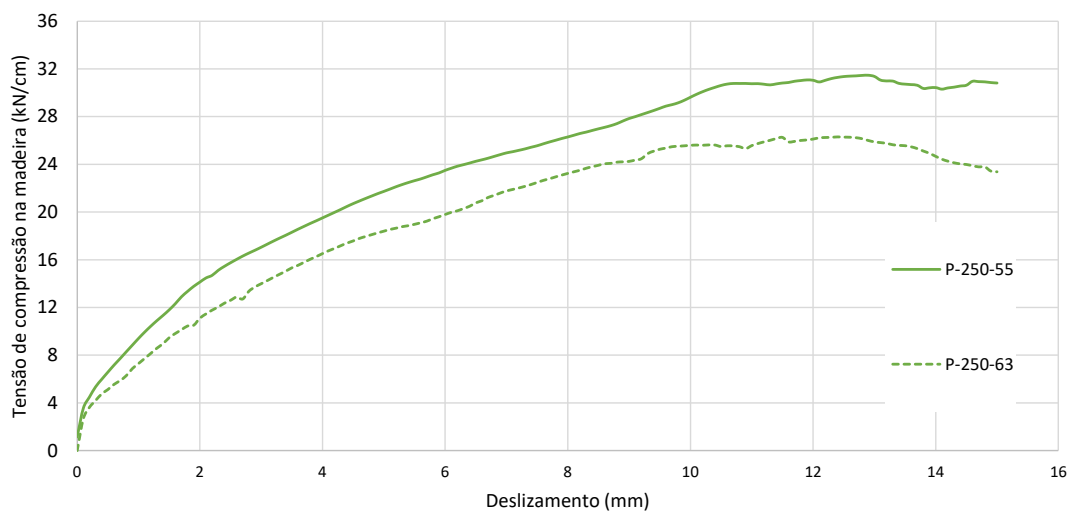
Figura 4.29 - Módulos de deslizamento dos modelos com espaçamento de 200 mm entre parafusos



O modelo com parafusos de 6,3 mm apresentou módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{máx}$  superiores ao modelo com parafusos de 5,5 mm.

Na Figura 4.30 são apresentadas as curvas médias de tensão/deslizamento dos dois modelos com espaçamento de 250 mm entre parafusos, com objetivo de identificar a influência do diâmetro dos parafusos nestes modelos.

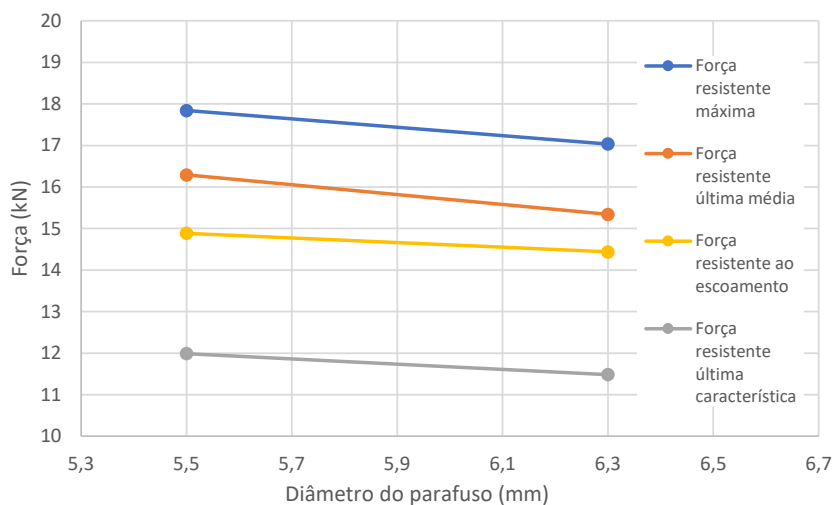
Figura 4.30 - Curvas médias de tensão/deslizamento para os modelos com espaçamento entre parafusos de 250 mm



O modelo com parafusos de 5,5 mm apresentou maiores tensões resistentes quando comparado ao modelo com parafusos de 6,3 mm. A área da superfície de contato do parafuso de 5,5 mm com a madeira é menor do que área do parafuso de 6,3 mm e assim, para uma mesma força aplicada, uma maior tensão é causada pelo parafuso de menor diâmetro no contato com a madeira.

Na Figura 4.31 mostra-se o gráfico com as forças resistentes máxima, última média, última característica e ao escoamento para diâmetro referente aos modelos com 250 mm de espaçamento entre parafusos.

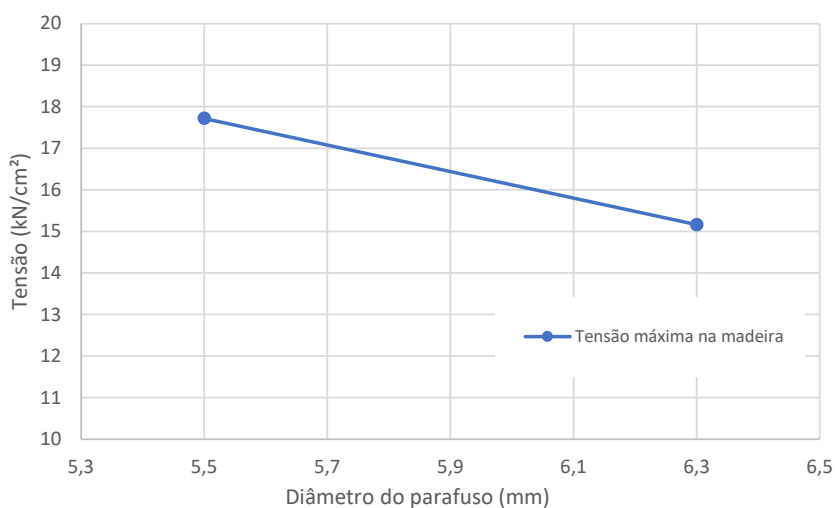
Figura 4.31 - Forças resistentes dos modelos com espaçamento de 250 mm entre parafusos



O modelo com parafusos de 5,5 mm apresentou forças resistentes máxima, última média e última característica com valores superiores às do modelo com 6,3 mm. Ambos os modelos apresentaram forças resistentes ao escoamento semelhantes. Apenas neste caso a tendência de que quanto maior o diâmetro do parafuso maior a força resistente do modelo não foi confirmada.

Na Figura 4.32 mostra-se o gráfico com a tensão resistente máxima na placa de madeira para os modelos com espaçamento entre parafusos igual a 250 mm.

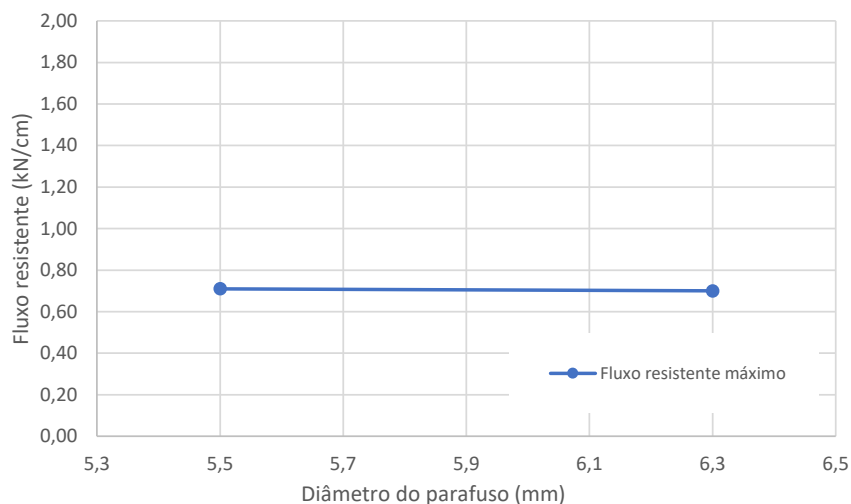
Figura 4.32 – Tensão resistente máxima da madeira para os modelos com espaçamento entre parafusos igual a 250 mm



Com base na figura acima, observa-se que o modelo com parafusos de menor diâmetro (5,5 mm) alcançou uma tensão resistente máxima na madeira maior do que o modelo com parafusos de maior diâmetro (6,3 mm).

Na Figura 4.33 mostra-se o gráfico com o fluxo de cisalhamento longitudinal máximo para os modelos com espaçamento entre parafusos igual a 250 mm.

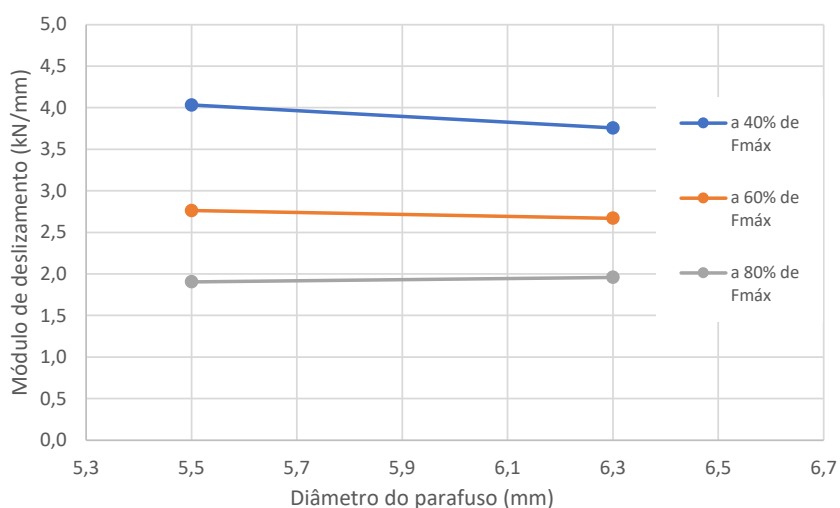
Figura 4.33 – Fluxo de cisalhamento longitudinal máximo dos modelos com espaçamento entre parafusos igual a 250 mm



Com base na figura acima, observa-se que os dois modelos com 250 mm de espaçamento entre parafusos atingiram fluxos resistentes máximos semelhantes.

Na Figura 4.34 mostra-se o gráfico com os módulos de deslizamentos a 40%, 60% e 80% de  $F_{máx}$  para cada diâmetro referente aos modelos com 250 mm de espaçamento entre parafusos.

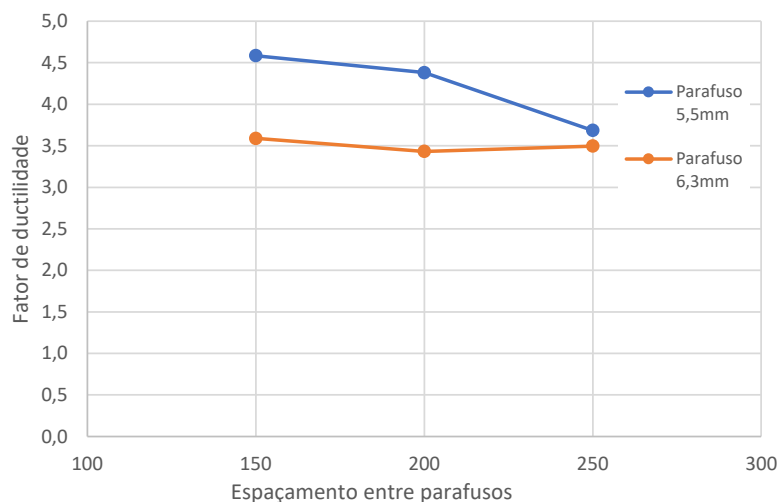
Figura 4.34 - Módulos de deslizamento dos modelos com espaçamento de 250 mm entre parafusos



Os modelos apresentaram valores semelhantes para os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{máx}$ .

Na Figura 4.35 mostra-se o gráfico dos fatores de ductilidade da conexão com parafusos com diâmetro de 5,5 e 6,3 mm, considerando-se o espaçamento entre os mesmos.

Figura 4.35 –Fatores de ductilidade dos modelos experimentais



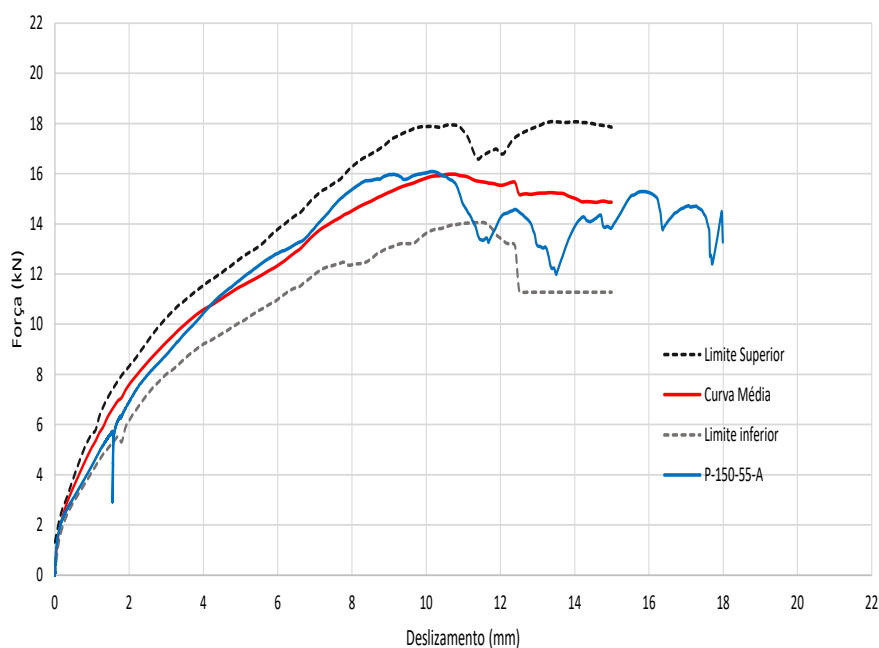
Os modelos com parafusos de 5,5 mm apresentaram fatores de ductilidade superiores aos dos modelos com parafusos de 6,3 mm. Nota-se, portanto, que os modelos com parafusos de menor diâmetro apresentaram maiores deformações plásticas antes de falharem do que os com parafusos de maior diâmetro.

Os fatores de ductilidade diminuíram com o aumento do espaçamento para os modelos com parafusos de 5,5 mm. Para os modelos com parafusos de 6,3 mm, os fatores de ductilidade foram semelhantes para os diferentes espaçamentos entre parafusos considerados.

#### **4.3.3. Uso de arruelas de aço nos parafusos autoatarraxantes**

Na Figura 4.36 mostra-se a curva de força/deslizamento da amostra P-150-55-A e as curvas média, de limite superior e de limite inferior de força para cada deslizamento medido, relativas ao modelo P-150-55.

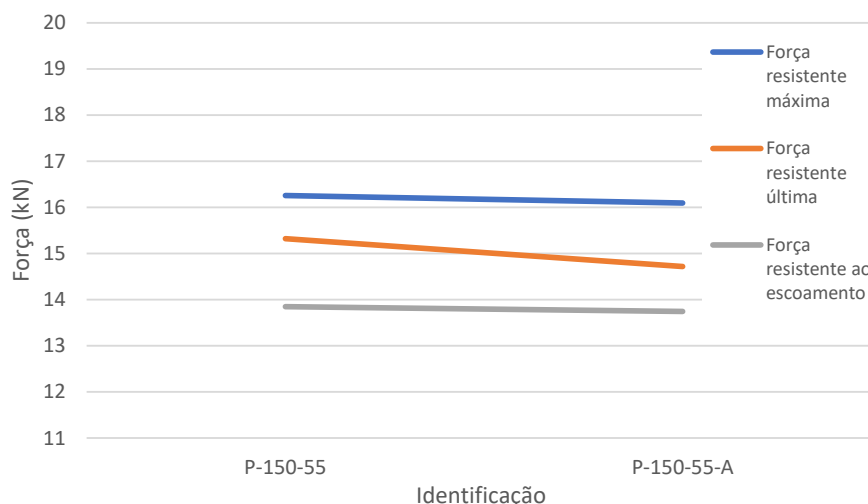
Figura 4.36 – Curva de força/deslizamento da amostra P-150-55-A em comparação com as curvas média, de limite superior e de limite inferior, relativas ao modelo P-150-55



A amostra com arruelas de aço apresentou um comportamento dentro dos limites obtidos para todas as outras amostras do mesmo modelo, tendo-se observado um comportamento próximo ao descrito pela média. A arruela, nesse caso, não aumentou a rigidez do modelo como era esperado.

Na Figura 4.37 mostra-se o gráfico com as forças resistentes máxima, última média e ao escoamento para o modelo P-150-55 e para a amostra com arruelas.

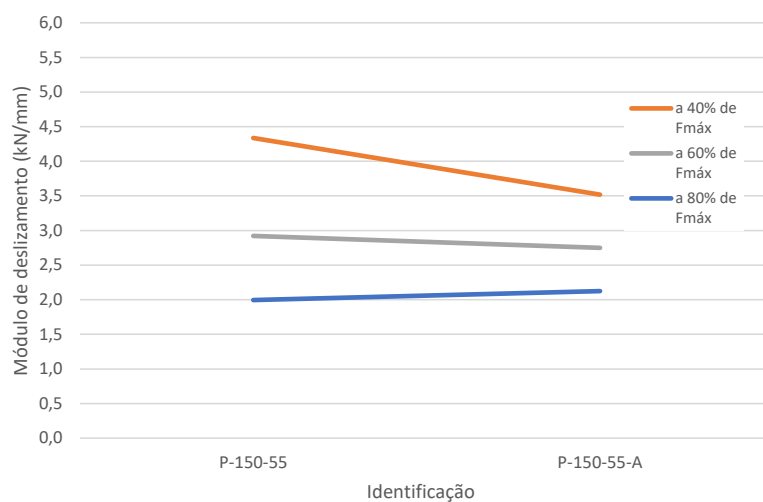
Figura 4.37 - Forças resistentes da amostra P-150-55-A e do modelo P-150-55



A amostra com arruelas de aço apresentou forças resistentes semelhantes à média das amostras para o modelo P-150-55. A arruela, neste caso, não melhorou a capacidade resistente do modelo conforme esperado.

Na Figura 4.38 mostra-se o gráfico com os módulos de deslizamentos a 40%, 60% e 80% de  $F_{m\acute{a}x}$  para o modelo P-150-55 e para a amostra com arruelas de aço.

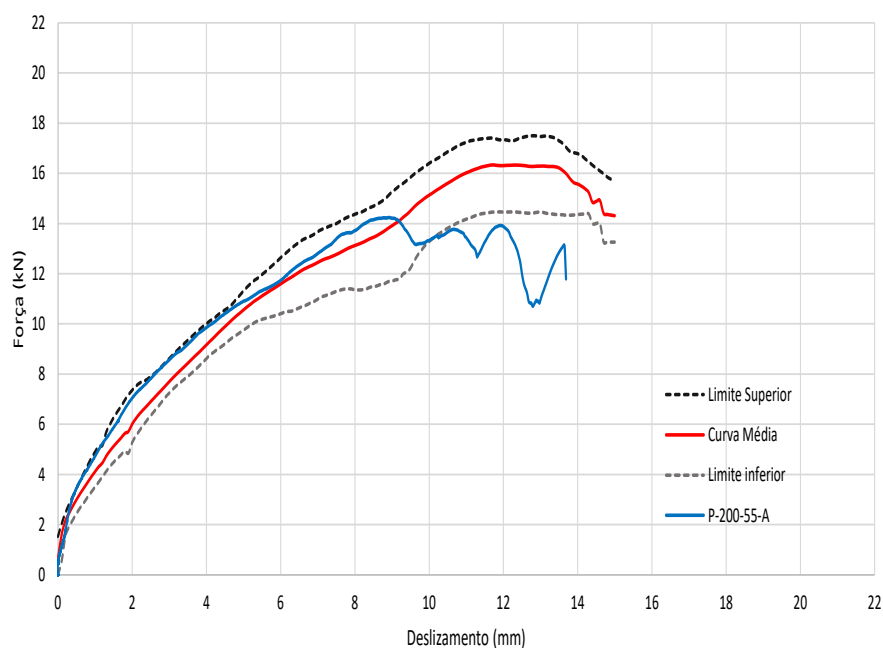
Figura 4.38 - Módulos de deslizamento da amostra P-150-55-A e do modelo P-150-55



A amostra com arruelas apresentou valores inferiores para o módulo de deslizamento a 40% de  $F_{m\acute{a}x}$  quando comparada aos valores médios do modelo P-150-55. Para os módulos de deslizamento a 60% e a 80% de  $F_{m\acute{a}x}$ , os valores foram semelhantes. Era esperado que a utilização de arruelas ocasionasse um aumento nos valores de módulo de deslizamento, o que não foi observado.

Na Figura 4.39 mostra-se a curva de força/deslizamento da amostra P-200-55-A e as curvas média, de limite superior e de limite inferior de força para cada deslizamento medido relativas ao modelo P-200-55.

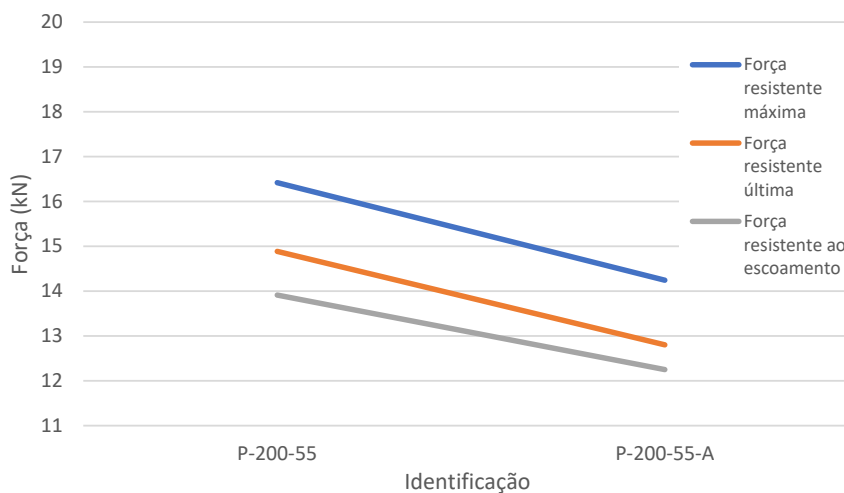
Figura 4.39 - Curva de força/deslizamento da amostra P-200-55-A em comparação com as curvas média, de limite superior e de limite inferior, relativas ao modelo P-200-55



A amostra com arruelas apresentou rigidez próxima à média das amostras até cerca de 75% da força máxima do modelo P-200-55, porém atingiu uma força resistente máxima inferior à média e abaixo do limite inferior das outras amostras do modelo P-200-55. Neste caso, a utilização de arruelas diminuiu a capacidade resistente do modelo.

Na Figura 4.40 mostra-se o gráfico com as forças resistentes máxima, última média e ao escoamento para o modelo P-200-55 e para a amostra com arruelas.

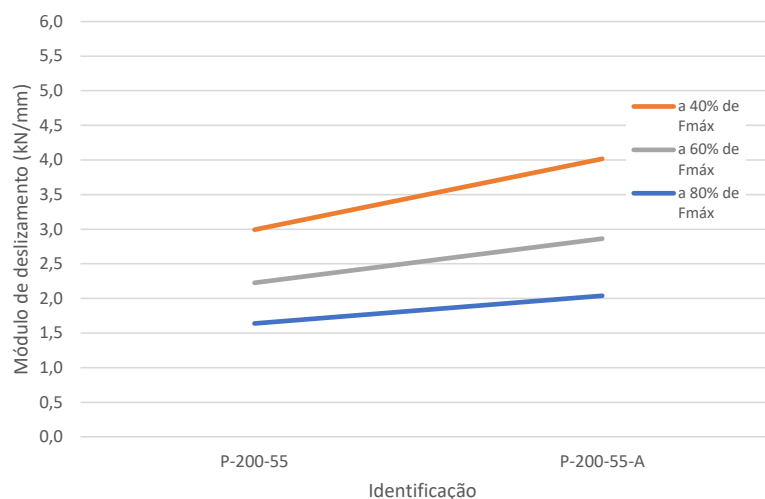
Figura 4.40 - Forças resistentes da amostra P-200-55-A e do modelo P-200-55



A amostra com arruelas apresentou valores inferiores às médias do modelo P-200-55 para as forças resistentes máxima, última e ao escoamento, contrariando tendência esperada.

Na Figura 4.41 mostra-se o gráfico com os módulos de deslizamentos a 40%, 60% e 80% de  $F_{máx}$  para o modelo P-200-55 e para a amostra com arruelas de aço.

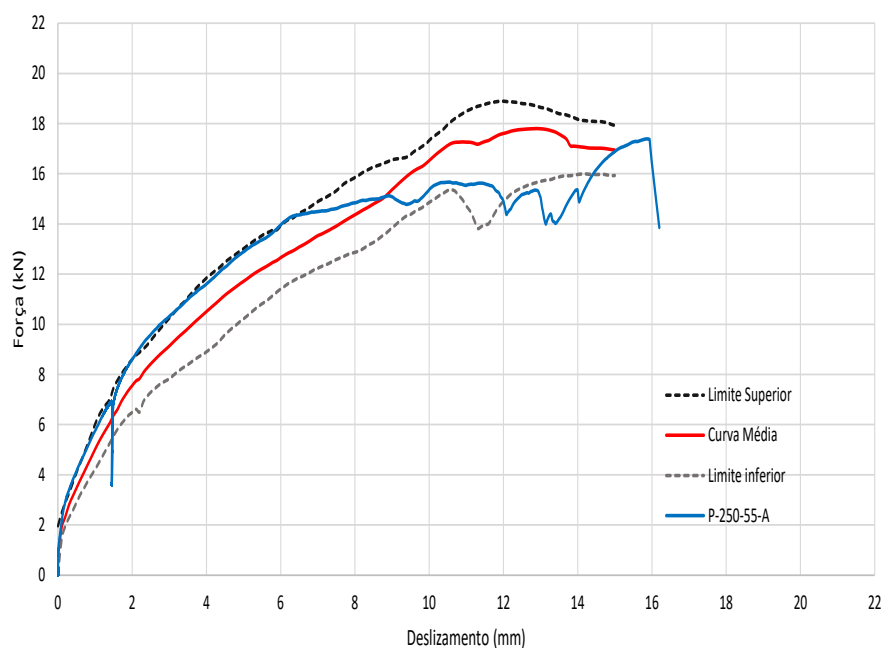
Figura 4.41 - Módulos de deslizamento da amostra P-200-55-A e do modelo P-200-55



A amostra com arruelas apresentou valores superiores à média do modelo P-200-55 para os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{máx}$ , o que era esperado.

Na Figura 4.42 mostra-se a curva de força/deslizamento da amostra P-250-55-A e as curvas média, de limite superior e de limite inferior de força para cada deslizamento medido relativas ao modelo P-250-55.

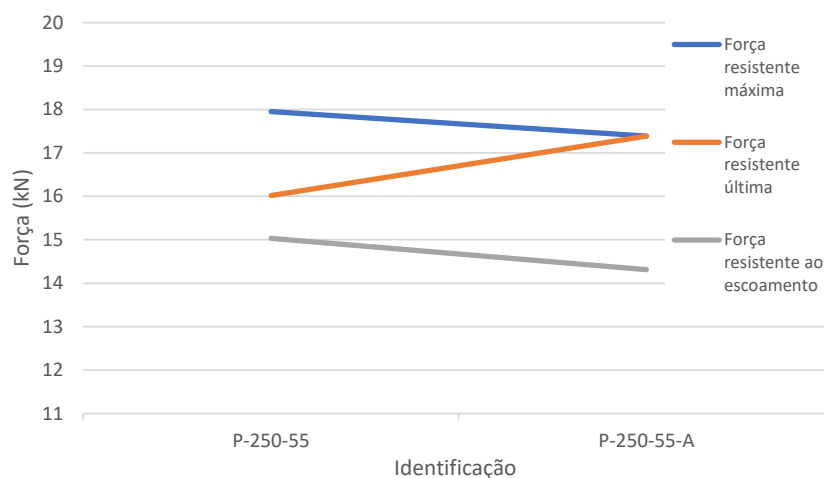
Figura 4.42 - Curva de força/deslizamento da amostra P-250-55-A em comparação com as curvas média, de limite superior e de limite inferior, relativas ao modelo P-250-55



A amostra com arruelas atingiu uma força resistente máxima inferior à média e abaixo do limite inferior das amostras para o modelo P-250-55 para deslizamentos abaixo do critério de deslizamento máximo de 15 mm. Assim que a amostra atingiu a sua força resistente máxima houve uma queda imediata de resistência e a amostra não apresentou grandes deslizamentos antes de falhar. Esse comportamento não foi observado nas demais amostras do modelo.

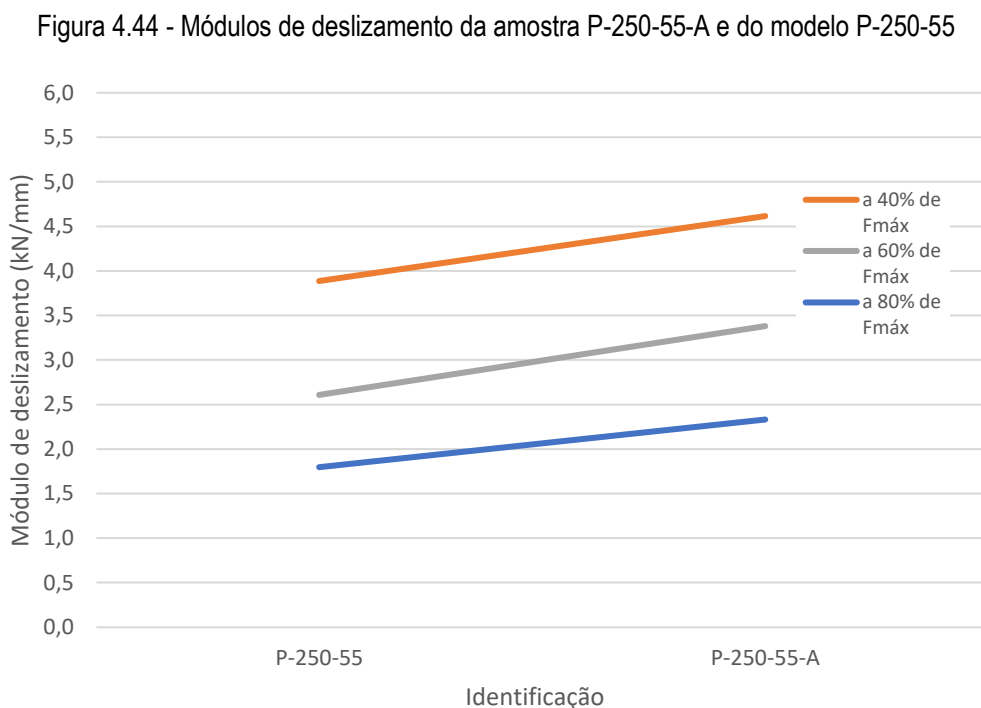
Na Figura 4.43 mostra-se o gráfico com as forças resistentes máxima, última média e ao escoamento para o modelo P-250-55 e para a amostra com arruelas de aço.

Figura 4.43 - Força resistente da amostra P-250-55-A e do modelo P-250-55



A amostra com arruelas atingiu valores menores do que a média do modelo P-250-55 para as forças resistentes máxima e ao escoamento, enquanto atingiu valores superiores para a força resistente última. A arruela, nesse caso, não melhorou a capacidade resistente do modelo conforme era esperado.

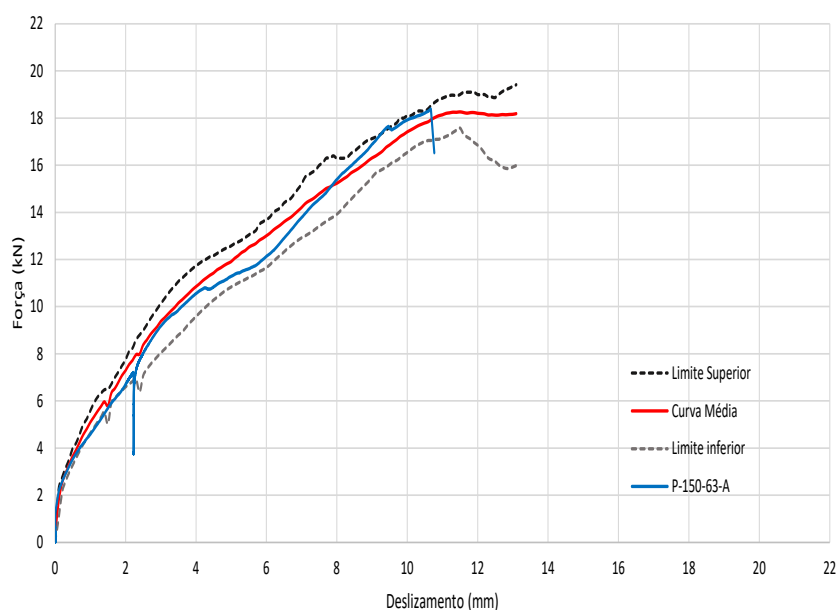
Na Figura 4.44 mostra-se o gráfico com os módulos de deslizamentos a 40%, 60% e 80% de  $F_{máx}$  para o modelo P-250-55 e para a amostra com arruelas de aço.



A amostra com arruelas apresentou valores superiores à média do modelo P-250-55 para os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{máx}$ , confirmando a tendência esperada.

Na Figura 4.45 mostra-se a curva de força/deslizamento da amostra P-150-63-A em comparação com as curvas média e de limites superior e inferior de força para cada deslizamento medido referente ao modelo P-150-63.

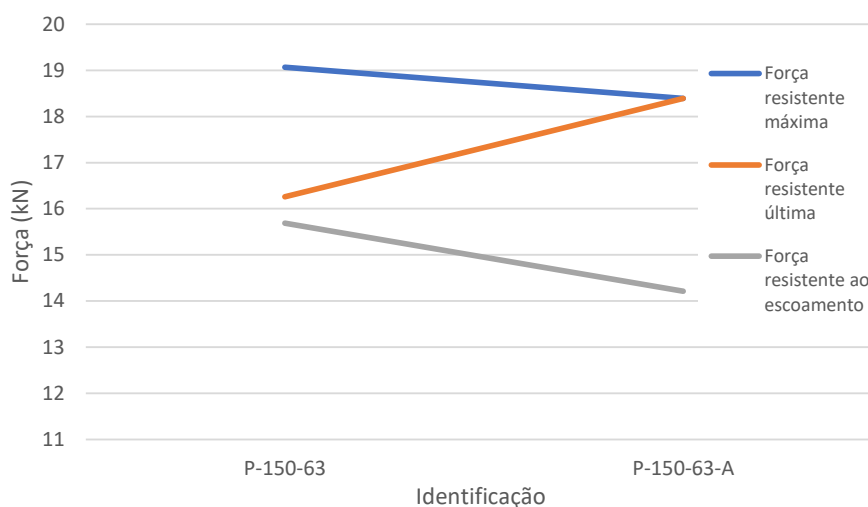
Figura 4.45 - Curva de força/deslizamento da amostra P-150-63-A em comparação com as curvas média, de limite superior e de limite inferior, relativas ao modelo P-150-63



A amostra com arruelas de aço apresentou comportamento resistente dentro dos limites obtidos para todas as amostras, com comportamento próximo à média das amostras. A amostra com arruelas falhou no momento em que atingiu sua força resistente máxima, comportamento que não foi observado nas demais amostras do modelo.

Na Figura 4.46 mostra-se o gráfico com as forças resistentes máxima, última média e ao escoamento para o modelo P-150-63 e para a amostra com arruelas de aço.

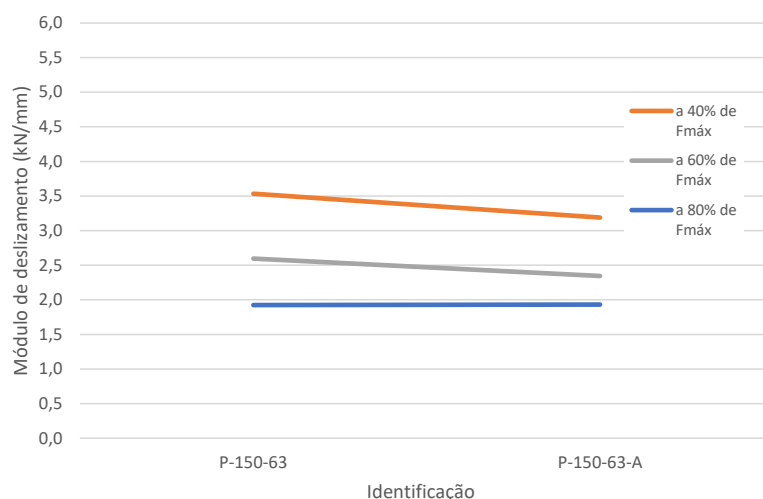
Figura 4.46 - Forças resistentes da amostra P-150-63-A e do modelo P-150-63



A amostra com arruelas atingiu valores menores do que a média do modelo P-150-63 para as forças resistentes máxima e ao escoamento, enquanto atingiu valores superiores para a força resistente última. A arruela, nesse caso, não melhorou a capacidade resistente do modelo.

Na Figura 4.47 está apresentado um gráfico com os módulos de deslizamentos a 40%, 60% e 80% de  $F_{máx}$  para o modelo P-150-63 e para a amostra com arruelas de aço.

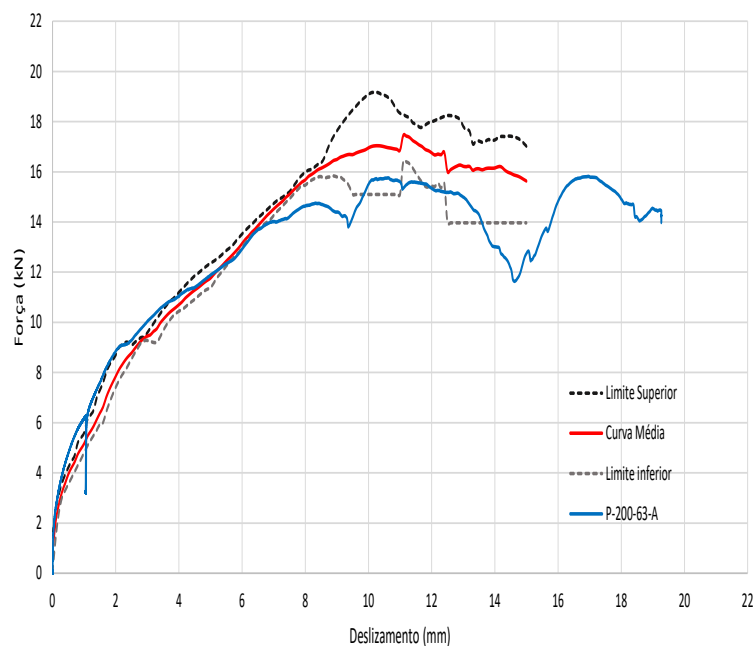
Figura 4.47 - Módulos de deslizamento da amostra P-150-63-A e do modelo P-150-63



A amostra com arruelas apresentou valores semelhantes à média do modelo P-150-63 para os módulos de deslizamento. Era esperado que a utilização de arruelas aumentasse o módulo de deslizamento do modelo, o que não foi confirmado nesse caso.

Na Figura 4.48 mostra-se a curva de força/deslizamento da amostra P-200-63-A em comparação com as curvas média e de limites superior e inferior de força para cada deslizamento medido referente ao modelo P-200-63.

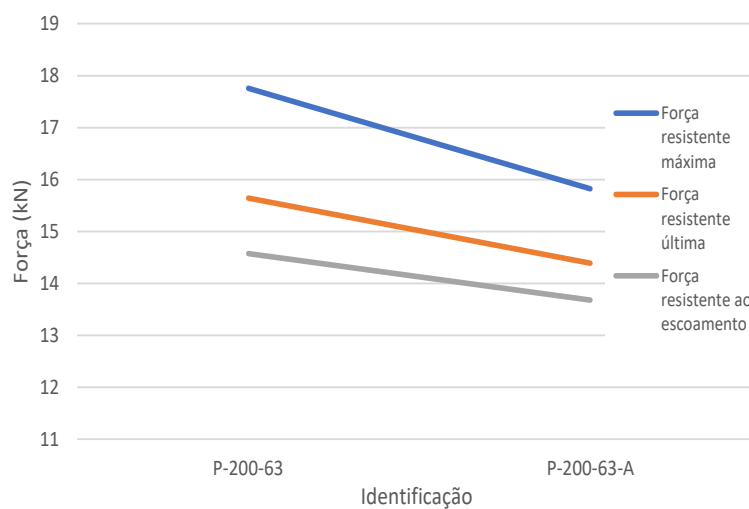
Figura 4.48 - Curva de força/deslizamento da amostra P-200-63-A em comparação com as curvas média, de limite superior e de limite inferior, relativas ao modelo P-200-63



A amostra com arruelas apresentou rigidez próxima à média das amostras, porém atingiu uma força resistente máxima inferior à média e abaixo do limite inferior das amostras para o modelo P-200-63.

Na Figura 4.49 está apresentado um gráfico com as forças resistentes máxima, última média e ao escoamento para o modelo P-200-63 e para a amostra com arruelas de aço.

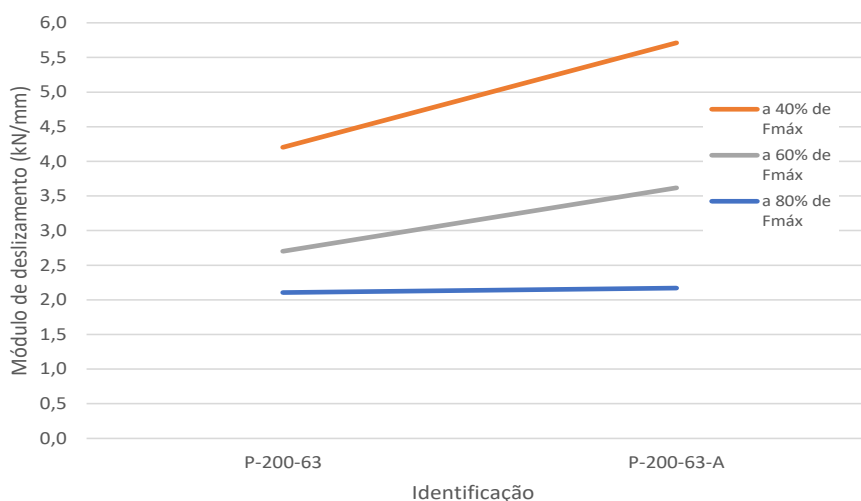
Figura 4.49 - Forças resistentes da amostra P-200-63-A e do modelo P-200-63



A amostra com arruelas apresentou valores inferiores à média do modelo P-200-63 para as forças resistentes máxima, última e ao escoamento. A utilização de arruelas diminuiu a capacidade resistente da amostra.

Na Figura 4.50 mostra-se o gráfico com os módulos de deslizamentos a 40%, 60% e 80% de  $F_{m\acute{a}x}$  para o modelo P-200-63 e para a amostra com arruelas de aço.

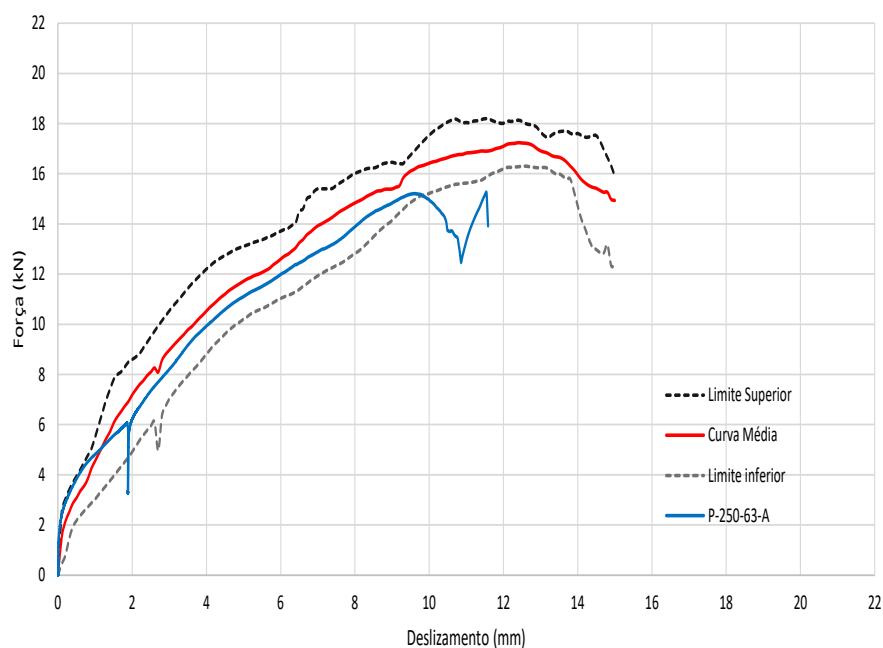
Figura 4.50 - Módulos de deslizamento da amostra P-200-63-A e do modelo P-200-63



A amostra com arruelas apresentou valores superiores à média do modelo P-200-63 para os módulos de deslizamento a 40% e a 60% de  $F_{m\acute{a}x}$ , conforme era esperado. Entretanto, apresentou valores semelhantes para o módulo de deslizamento a 80% de  $F_{m\acute{a}x}$ .

Na Figura 4.51 mostra-se a curva de força/deslizamento da amostra P-250-63-A em comparação com as curvas média e de limites superior e inferior de força para cada deslizamento medido referente ao modelo P-250-63.

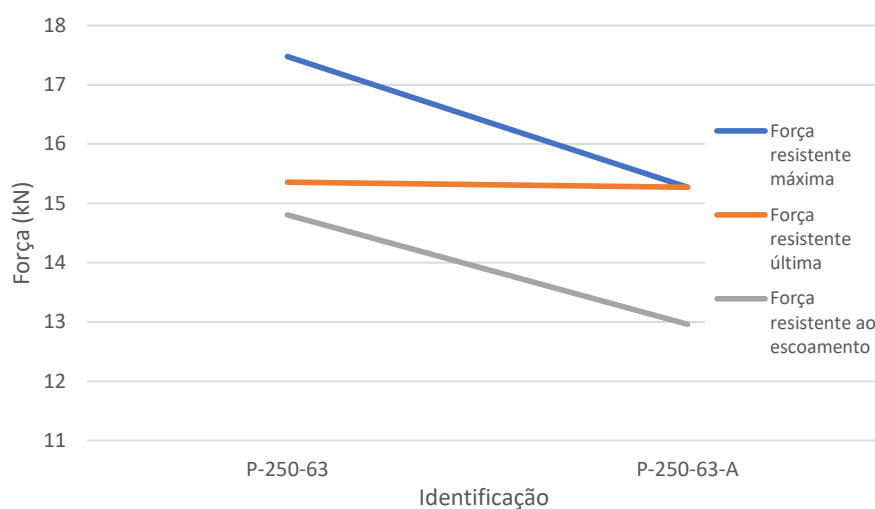
Figura 4.51 - Curva de força/deslizamento da amostra P-250-63-A em comparação com as curvas média, de limite superior e de limite inferior, relativas ao modelo P-250-63



A amostra com arruelas apresentou rigidez semelhante à média das amostras, porém atingiu uma força resistente máxima inferior à média e abaixo do limite inferior das amostras para o modelo P-250-63. A amostra com arruelas falhou no momento em que atingiu sua força resistente máxima, comportamento que não foi observado nas demais amostras do modelo.

Na Figura 4.52 mostra-se o gráfico com as forças resistentes máxima, última média e ao escoamento para o modelo P-250-63 e para a amostra com arruelas de aço.

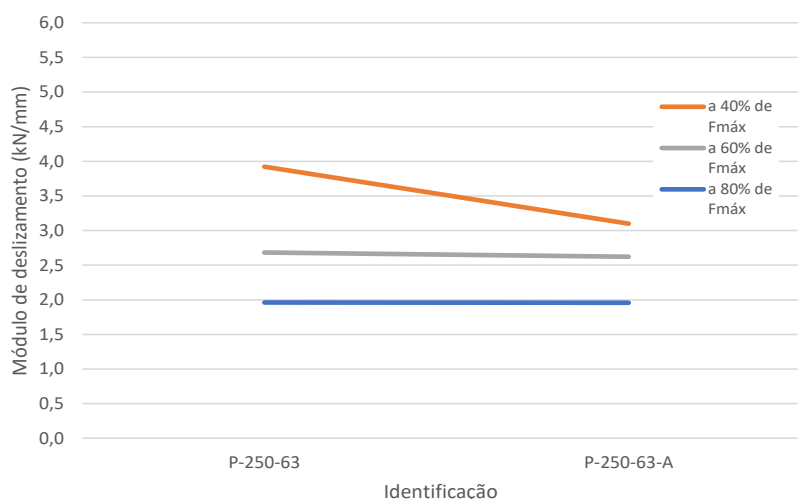
Figura 4.52 - Forças resistentes da amostra P-250-63-A e do modelo P-250-63



A amostra com arruelas apresentou valores inferiores à média do modelo P-250-63 para as forças resistentes máxima e ao escoamento, enquanto apresentou valores semelhantes para a força resistente última. A utilização de arruelas diminuiu a capacidade resistente da amostra.

Na Figura 4.53 mostra-se o gráfico com os módulos de deslizamentos a 40%, 60% e 80% de  $F_{máx}$  para o modelo P-250-63 e para a amostra com arruelas de aço.

Figura 4.53 - Módulos de deslizamento da amostra P-250-63-A e do modelo P-250-63



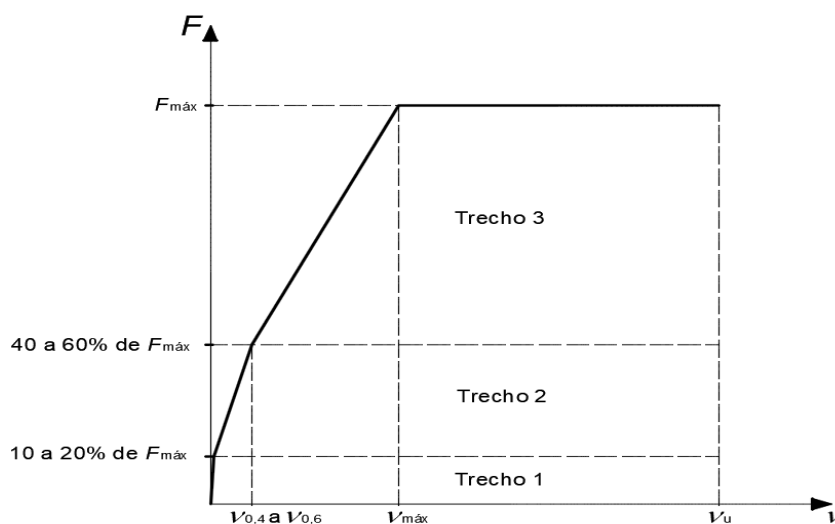
A amostra com arruelas apresentou módulo de deslizamento a 40% de  $F_{máx}$  menor do que a média do modelo, enquanto apresentou valores semelhantes à média para os módulos de deslizamento a 60% e a 80% de  $F_{máx}$ . Era esperado que a utilização de arruelas aumentasse os módulos de deslizamento, o que não foi confirmado.

#### 4.4. Avaliação dos modos de falha da conexão

Em todas as amostras ensaiadas no presente trabalho, observou-se que os parafusos sofreram um giro e penetraram na placa de OSB ao se aumentar a intensidade da força aplicada. Quando a força ultrapassou cerca de 40 a 45% de  $F_{máx}$ , o giro do parafuso se tornou perceptível, assim como foram observados estalos da madeira. Esse giro do parafuso se tornou mais perceptível quando a força superava aproximadamente 70% de  $F_{máx}$ , ficando os estalos mais intensos e o giro do parafuso mais evidente, até a falha da amostra. Considerou-se que a falha foi caracterizada quando houve uma queda da força resistente da amostra associada a um aumento dos deslizamentos entre os materiais.

Na Figura 4.54 apresenta-se a proposição de um diagrama para descrever de forma simplificada a relação força/deslizamento de conexões entre perfis de aço e placas de madeira, obtida a partir de ensaios *push-out*. No trecho 1 as curvas força/deslizamento dos modelos *push-out* apresentaram um deslizamento praticamente nulo para forças variando de 10 a 20% da força máxima resistente ( $F_{m\acute{a}x}$ ), devido ao atrito entre a placa de OSB e o perfil de aço. No trecho 2 os modelos apresentaram uma rigidez praticamente constante para forças variando de 40 a 60% de  $F_{m\acute{a}x}$ . Nesse trecho, observou-se que os parafusos começaram a girar dentro da placa de OSB, em relação à mesa do perfil. No trecho 3 as amostras perderam rigidez à medida que a placa de OSB foi sendo esmagada com o giro dos parafusos, devido ao dano progressivo da placa de OSB. A falha da conexão, caracterizada por esmagamento da placa de OSB ou pela plastificação do parafuso devido à ação combinada de cisalhamento e flexão, se dá quando a força aplicada alcança  $F_{m\acute{a}x}$ , o que vem acompanhado de grandes deslizamentos entre os materiais.

Figura 4.54 – Diagrama força/deslizamento simplificado para conexões entre perfis de aço e placas de madeira.



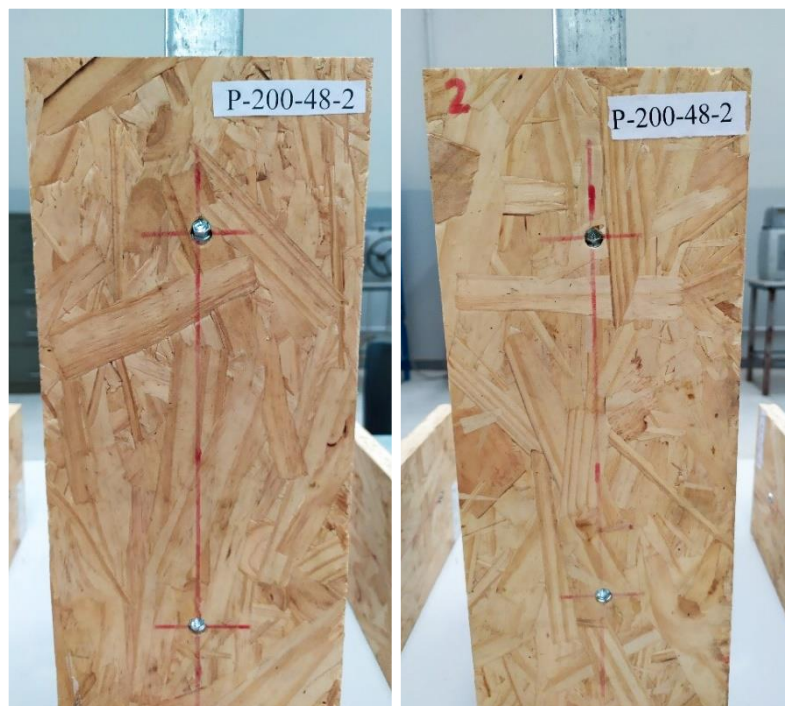
Na Figura 4.55 apresenta-se o aspecto geral de uma amostra do modelo P-150-55 após a falha. Pode-se observar que os parafusos giraram dentro da placa de OSB, de modo que suas cabeças penetraram na mesma. Essa penetração foi observada em todos os modelos é consequência natural do modo de falha observado, qual seja, a rotação do parafuso.

Figura 4.55 – Aspecto geral da amostra P-150-55-1 após a falha



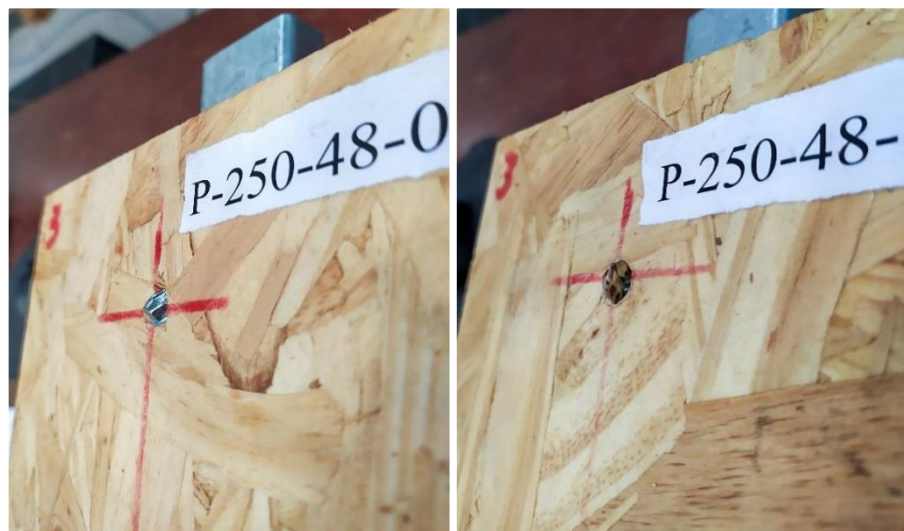
Na Figura 4.56 apresentam-se as vistas laterais de uma amostra do modelo P-200-55 após a falha. Neste caso pode-se observar que os parafusos giraram, de modo que as cabeças sextavadas penetraram totalmente ou parcialmente na placa de OSB.

Figura 4.56 – Vistas laterais da amostra P-200-55-2 após a falha



Na Figura 4.57 mostra-se um detalhe da região dos parafusos superiores de uma amostra do modelo P-250-55 após a falha. Nessa figura pode-se observar o esmagamento da placa de OSB na região de contato entre o parafuso e a placa de OSB.

Figura 4.57 – Detalhe da região dos parafusos superiores da amostra P-250-55-0 após a falha

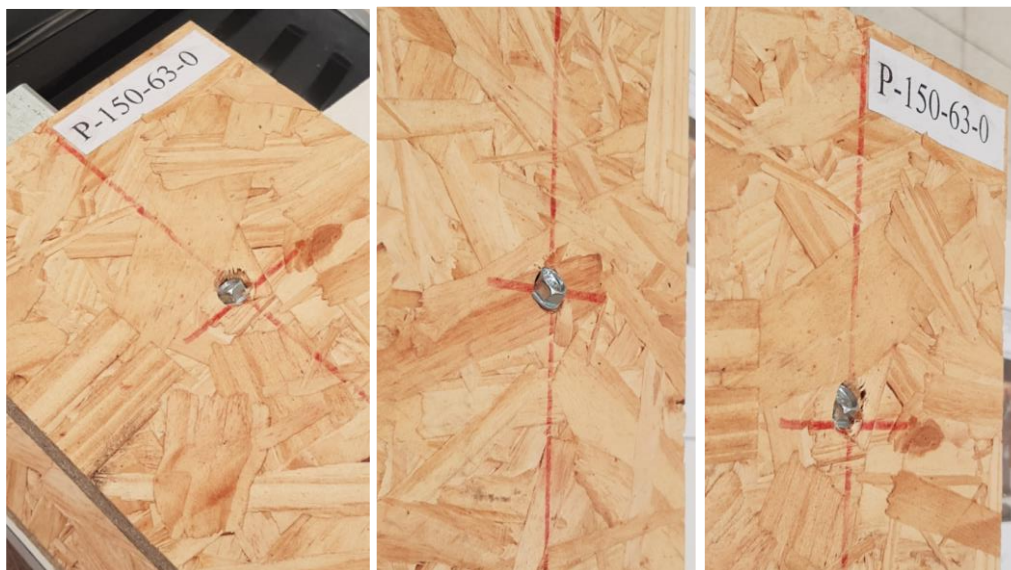


Na Figura 4.58 apresenta-se o aspecto geral da amostra P-150-63 após a falha e na Figura 4.59 mostra-se um detalhe da região dos parafusos dessa amostra. Nessas figuras pode-se observar o giro do parafuso e o esmagamento da placa de OSB na região de contato entre o parafuso e a placa de OSB.

Figura 4.58 – Aspecto geral da amostra P-150-63-0 após a falha



Figura 4.59 – Detalhe da região dos parafusos da amostra P-150-63-0 após a falha



Na Figura 4.60 apresentam-se as vistas laterais de uma amostra do modelo P-200-63 após a falha. Em um dos lados da amostra a cabeça do parafuso superior penetrou totalmente na placa de OSB, enquanto a do parafuso inferior penetrou parcialmente. Na Figura 4.61 pode-se observar o esmagamento da placa de OSB devido ao giro do parafuso. Na Figura 4.62 indicam-se as zonas afetadas pelo esmagamento nas placas de OSB devido ao giro dos parafusos. Para os modelos ensaiados neste trabalho, as zonas afetadas apresentaram uma dimensão média de cerca de 20 mm.

Figura 4.60 – Vistas laterais da amostra P-200-63-2 após a falha



Figura 4.61 – Esmagamento da placa de OSB na região de ligação da amostra P-200-63-2 após a falha



Figura 4.62 – Zonas afetadas pelo esmagamento nas placas de OSB para a amostra P-200-63-2 após a falha



Na Figura 4.63 mostra-se o aspecto geral de uma amostra do modelo P-250-63. Nessa figura pode-se observar o giro dos parafusos após a falha dessa amostra, pela parte interna do perfil. Na Figura 4.64 apresenta-se um detalhe da região de ligação dos parafusos superiores dessa amostra.

Figura 4.63 – Aspecto geral da amostra P-250-63-2 após a falha

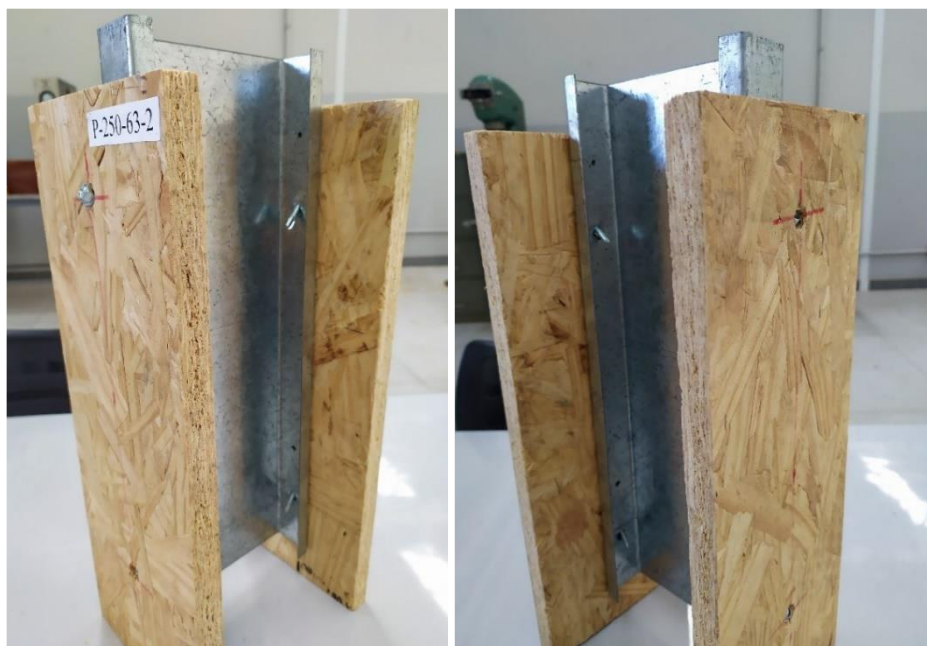


Figura 4.64 – Detalhe da região de ligação dos parafusos superiores da amostra P-250-63-2 após a falha



As amostras nas quais os parafusos foram instalados com arruelas apresentaram um modo de falha semelhante aos das demais amostras, caracterizado pelo esmagamento da placa de OSB com o giro do parafuso autoatarraxante, conforme mostrado na Figura 4.65.

Figura 4.65 – Aspecto geral da amostra P-250-55-A após a falha



Na Figura 4.66 mostra-se um detalhe da região de ligação dos parafusos superiores da amostra P-250-55-A. Nessa figura pode-se observar que algumas arruelas de aço penetraram na placa de OSB, enquanto outras arruelas fletiram sem penetrar na placa.

Figura 4.66 – Detalhe da região de ligação para a amostra P-250-55-A após a falha



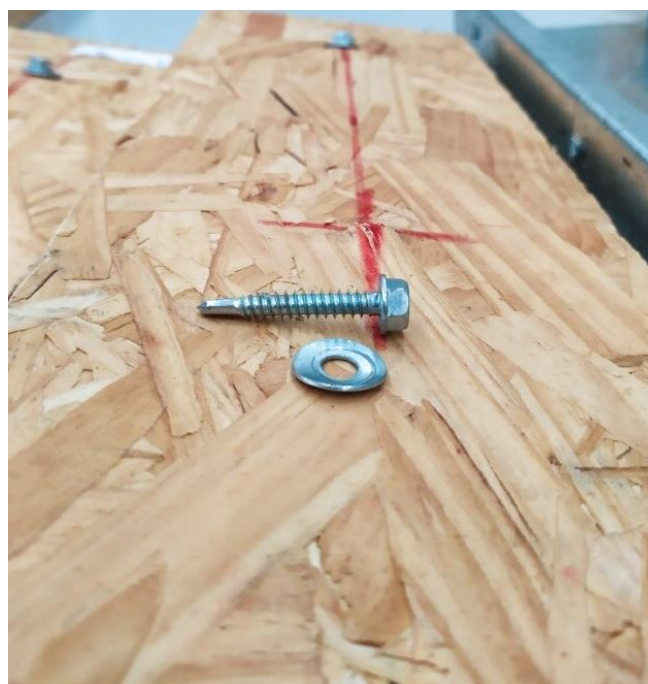
Apenas na amostra P-200-55-A observou-se um rasgamento do perfil de aço na região de ligação, conforme mostrado na Figura 4.67.

Figura 4.67 – Rasgamento do perfil de aço na região de ligação após a falha da amostra P-200-55-A



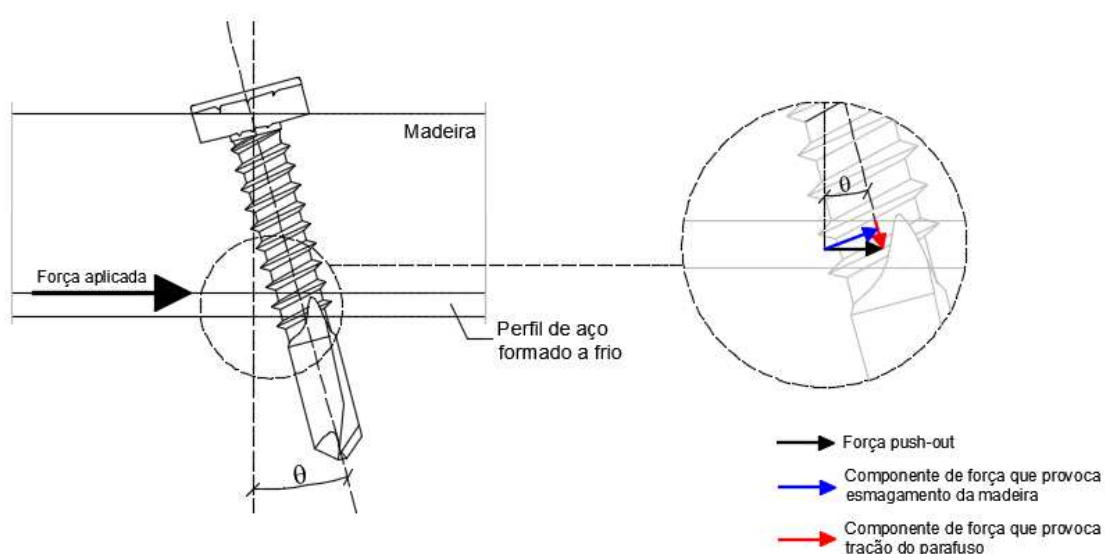
Nas amostras ensaiadas no presente trabalho, com ou sem arruelas, não foi observada falha por uma combinação de cisalhamento e flexão do parafuso, como observada por outros autores (KYVELOU, 2017; VELLA *et al.*, 2020). Várias arruelas fletiram para esforços próximos à falha das amostras, conforme mostrado na Figura 4.68.

Figura 4.68 – Parafuso e arruela após a falha da amostra P-200-63-A



O modo de falha de todas as amostras ensaiadas no presente trabalho consistiu no esmagamento da placa de OSB devido à pressão de contato com o fuste do parafuso, associado ao giro do parafuso. Esse modo de falha também é apresentado por autores anteriores como Northcutt (2012), Martin (2014), Loehr (2016) e Liu (2018), os quais o denominaram de “*screw tilting*”. Nesse modo de falha, à medida que o parafuso gira, esmagando a placa de OSB, a força aplicada no modelo pode ser decomposta nas direções axial e transversal ao eixo do parafuso, conforme mostrado na Figura 4.69. A componente transversal ao eixo do parafuso provoca o esmagamento da madeira por pressão de contato e a componente axial causa a tração do parafuso. Como resultado, o parafuso gira gradualmente e o corpo do parafuso se move na direção da força aplicada, provocando uma componente axial de tração, que aumenta de intensidade à medida que o giro cresce. Esse giro continua até que a força axial de tração é suficiente para desprender o parafuso do perfil de aço, ao mesmo tempo que a cabeça do parafuso penetra total ou parcialmente na placa de madeira.

Figura 4.69 – Mecanismo de falha observado nos modelos ensaiados



Em alguns casos, conforme apresentado por Kyvelou (2017) e Vella *et al.* (2020), a placa de madeira pode ser capaz de impedir o giro do parafuso e provocar plastificação do mesmo devido a uma combinação de flexão e cisalhamento. Esse modo de falha é descrito no item 2.4.10 do presente trabalho e ilustrado na Figura 2.43.

#### 4.5. Modelo semiempírico para estimar a força resistente máxima da conexão aço-madeira

Para propor um modelo capaz de estimar a força máxima da conexão, considerando tratar-se de um problema em que uma variável dependente (força máxima) está relacionada a conjunto de variáveis independentes (diâmetro e o tipo de parafuso, a espessura e o tipo de madeira), utilizou-se o método de análise de regressão linear.

Tendo em vista os resultados observados em ensaios *push-out* para conexões entre perfis de aço formados a frio e placas de madeira, os modos de falha da conexão envolvem o esmagamento da madeira por pressão de contato contra o corpo do parafuso, com giro do parafuso, e a plastificação do parafuso devido a uma ação combinada de flexão e tração.

Para o modo de falha por esmagamento da madeira com giro do parafuso, a expressão para determinação da força resistente máxima da conexão ( $F_{R,1}$ ) deriva de um termo correspondente à força resistente à pressão de contato multiplicado por um coeficiente de ajuste  $B_1$ , conforme mostrado na Eq. (4.3).

$$F_{R,1} = B_1 f_e d_b t_{mad} \quad [4.3]$$

onde:

$f_e$  é a tensão resistente da madeira à pressão de contato;

$d_b$  é o diâmetro do parafuso autoatarraxante;

$t_{mad}$  é a espessura da placa de madeira.

Na EN 1995-1-1:2004-A1:2008 está previsto o modo de falha por plastificação do parafuso devido à ação combinada de cisalhamento e flexão previsto. Para este modo de falha, a expressão para determinação da força resistente máxima da conexão ( $F_{R,2}$ ) deriva da soma entre um termo correspondente à força resistente à flexão do parafuso multiplicado por um coeficiente de ajuste  $B_2$  e um outro termo correspondente à força de tração relacionada ao desprendimento do parafuso do perfil de aço, multiplicado por um coeficiente de ajuste  $B_3$ , conforme mostrado na Eq. (4.4).

$$F_{R,2} = B_2 \sqrt{2 M_{pl} f_e d_b} + B_3 F_{ax,R} \quad [4.4]$$

onde:

$M_{pl}$  é o momento fletor correspondente à plastificação da seção transversal do parafuso, sendo  $M_{pl} = Z f_y$ ;

$Z$  é o módulo plástico da seção transversal do parafuso, sendo  $Z = d_b^3 / 6$ ;

$f_y$  é a resistência ao escoamento do aço do parafuso;

$F_{ax,R}$  é a força resistente ao desprendimento do parafuso do perfil de aço, que deve ser tomada como:

$$F_{ax,R} = f_{ax,R} d_b l_{ef} k_d$$

sendo:

$$f_{ax,R} = 0,52 d_b^{-0,5} l_{ef}^{-0,1} \rho_{mad}^{0,8}$$

$$k_d = \min \left\{ \begin{array}{l} d/8 \\ 1 \end{array} \right\}$$

$f_{ax,R}$  é a tensão resistente da madeira relacionada ao desprendimento do parafuso, em N/mm<sup>2</sup>;

$l_{ef}$  é o comprimento de penetração da parte roscada, em mm;

$\rho_{mad}$  é a densidade da placa de madeira, em kg/m<sup>3</sup>.

As Eqs. (4.3) e (4.4) são as mesmas apresentadas na seção 8 da EN 1995-1-1:2004-A1:2008, para ligações parafusadas entre peças de madeira e chapas finas de aço, exceto pelos coeficientes de ajuste  $B_1$  e  $B_2$ .

Tendo por base a Eq. (4.1) e a Eq. (4.2), foi realizada uma análise de regressão múltipla com auxílio do programa computacional Microsoft Excel para obtenção dos valores dos coeficientes de ajuste  $B_1$ ,  $B_2$  e  $B_3$ . Para essa análise foram considerados os resultados dos ensaios *push-out* obtidos no presente trabalho e, também, os obtidos por Northcutt (2012), Martin (2014), Loehr (2016), Kyvelou (2017), Liu (2018) e Vella *et al.* (2020). Com isso, foram considerados 197 resultados, cujos parâmetros são mostrados no Apêndice B.

Com base na análise regressão múltipla, foram obtidos os coeficientes de ajuste mostrados na Tabela 4.10. Segundo Ferreira e Patino (2015) o valor-p é definido como a probabilidade de se obter um valor da estatística de teste maior ou igual ao encontrado. Tradicionalmente, o valor

de corte para rejeitar a hipótese nula é de 0,05, ou seja, caso o valor-p seja menor que 0,05 o resultado possui significância estatística. Observa-se assim que os valores-p associados aos coeficientes de regressão  $B_i$  possuem significância estatística, uma vez que são menores que 0,05.

Tabela 4.10 – Resultados da análise de regressão múltipla.

Coeficientes de regressão $B_i$	Erro padrão	Valor-p	Coeficiente de determinação $r^2$
$B_1 = 1,12$	0,009	$4,0 \times 10^{-190}$	0,994
$B_2 = 0,82$	0,210	0,0009	0,992
$B_3 = 0,93$	0,225	0,0005	

Considerando os coeficientes da Tabela 4.10 pode-se reescrever a Eq. (4.3) e a Eq. (4.4), respectivamente:

$$F_{R,1} = 1,12 f_e d_b t_{mad} \quad [4.5]$$

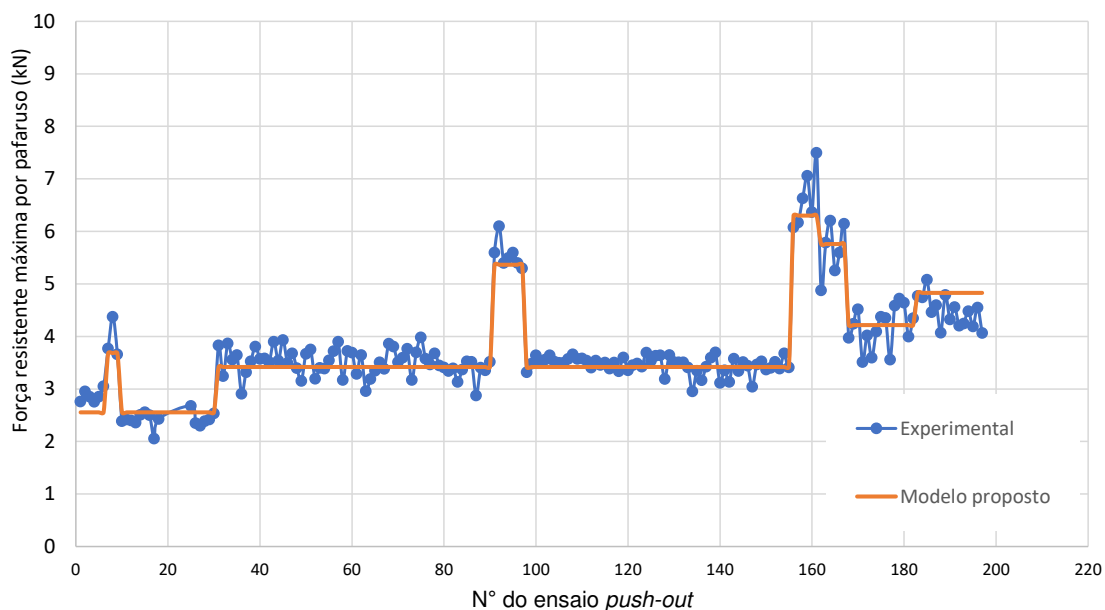
$$F_{R,2} = 0,82 \sqrt{2 M_{pl} f_e d_b} + 0,93 F_{ax,R} \quad [4.6]$$

A força resistente máxima da conexão é determinada então como o menor valor obtido entre  $F_{R,1}$  e  $F_{R,2}$ , conforme apresentado na Eq. (4.7).

$$F_R \leq (F_{R,1}, F_{R,2}) \quad [4.7]$$

Na Figura 4.70 apresentam-se os resultados do modelo semiempírico proposto comparados com os resultados experimentais.

Figura 4.70 – Carta de controle para o modelo proposto.



Com base na Figura 4.70 pode-se observar que a Eq. (4.4) é capaz de estimar com boa aproximação a força resistente máxima da conexão em comparação com os resultados experimentais, apesar das dificuldades de um ajuste devido à grande variabilidade do comportamento da madeira.

Para ajuste do modelo apresentado na Eq (4.7), foram utilizadas as seguintes faixas de parâmetros:

- diâmetro do parafuso:  $4,8 \text{ mm} \leq d_b \leq 6,3 \text{ mm}$ ;
- espessura da madeira:  $12,7 \text{ mm} \leq t_{mad} \leq 38,1 \text{ mm}$ ;
- tensão resistente da madeira à pressão de contato:

OSB:  $f_e = 4,21 \text{ kN/cm}^2$

compensado (*plywood*):  $f_e = 3,74 \text{ kN/cm}^2$

OSB *LP Brasil*:  $f_e = 3,74 \text{ kN/cm}^2$

- resistência ao escoamento e à ruptura por tração do parafuso:

comum:  $f_y = 64 \text{ kN/cm}^2$  ;  $f_u = 80 \text{ kN/cm}^2$

alta resistência:  $f_y = 125 \text{ kN/cm}^2$  ;  $f_u = 142,7 \text{ kN/cm}^2$

No Apêndice B são apresentados os conjuntos de dados experimentais utilizados no ajuste do modelo semiempírico por meio de análise de regressão linear. Apresentam-se os parâmetros das amostras ensaiadas por Northcutt (2012), Martin (2014), Loehr (2016), Kyvelou (2017), Liu (2018), Vella *et al.* (2020) e no presente trabalho, bem como a força resistente máxima ( $F_{exp}$ ) das amostras, obtidas nos ensaios *push-out*. Além disso, também são apresentados a força resistente máxima ( $F_R$ ) estimada pela Eq. (4.6) e o erro percentual de cada caso, bem como os modos de falha previstos pelo modelo (Modo 1 se  $F_R = F_{R,1}$  e Modo 2 se  $F_R = F_{R,2}$ ) e os modos de falha observados nos ensaios *push-out*, sendo o Modo 1 caracterizado pelo esmagamento da madeira com giro do parafuso e o Modo 2 caracterizado pela plastificação do parafuso devido a uma ação combinada entre flexão e tração do parafuso.

Para esse conjunto de resultados, obteve-se uma média de  $F_R / F_{exp}$  igual a 1,0 e um coeficiente de variação ( $CV$ ) da relação  $F_R / F_{exp}$  igual a 7,73%.

#### **4.6. Estudo exploratório sobre o momento fletor resistente para vigas mistas de aço e madeira**

##### **4.6.1. Procedimento de cálculo**

Neste item apresenta-se um procedimento para cálculo do momento fletor resistente de uma viga mista composta por perfis de aço formados a frio e placas de madeira, baseado no procedimento proposto por Kyvelou (2017). O procedimento proposto no presente trabalho toma como base o modelo analítico proposto por Kyvelou (2017) e considera a força resistente máxima da conexão de acordo com o modelo semiempírico apresentado no item 4.5.

Para verificação do estado-limite último de momento fletor da viga mista de aço e madeira deve-se adotar o seguinte procedimento:

- a) obter o valor de cálculo da força resistente máxima da conexão ( $F_{Rd}$ );
- b) calcular o grau de interação ( $\eta_i$ );
- c) obter o valor de cálculo do momento fletor resistente da viga mista ( $M_{Rd}$ );
- d) verificar o grau de conexão mínimo permitido.

A seguir, apresentam-se as etapas do procedimento de cálculo:

## a) Grau de interação

De acordo com Kyvelou (2017), para que haja interação completa, o número de parafusos ( $n$ ) entre a seção transversal de momento nulo e a de momento máximo da viga mista de aço e madeira deve ser suficiente para resistir à força de cisalhamento longitudinal atuante na superfície entre os materiais ( $V_l$ ). Quando isso não acontece, a interação será parcial ou, até mesmo, inexistente. Assim, para uma viga mista com  $n$  parafusos, o grau de conexão ( $\eta_i$ ) é dado por:

$$\eta_i = \frac{n F_{Rd}}{V_l} \quad [4.8]$$

onde:

$F_{Rd}$  é a força resistente máxima da conexão, tomada como 90% de  $F_R$ , calculado de acordo com o item 4.5 deste trabalho, dividida por um coeficiente de ponderação  $\gamma_M = 1,30$  conforme recomenda-se no item 2.4.1 da EN 1995-1-1 (2004);

$V_l$  é a força de cisalhamento longitudinal na superfície entre os materiais, tomada como o mínimo entre  $C_{mad}$  e  $T_a$ ;

$C_{mad}$  é a força resultante de compressão na placa de madeira  $\left( C_{mad} = A_{mad} \frac{k_{mod} f_{c, mad}}{\gamma_M} \right)$ ;

$T_a$  é a força resultante de tração no perfil de aço formado a frio  $\left( T_a = A_a \frac{f_y}{\gamma_M} \right)$ .

onde:

$A_{mad}$  é a área da seção transversal da placa de madeira;

$A_a$  é a área da seção transversal do perfil de aço formado a frio;

$f_y$  é a resistência ao escoamento do perfil de aço formado a frio;

$f_{c, mad}$  é a resistência à compressão da placa de madeira;

$\gamma_M$  é o coeficiente de ponderação relacionado às resistências dos materiais. Para a placa de OSB recomenda-se adotar  $\gamma_M = 1,20$ , conforme item 2.4.1 do EN-1995-1-1 (2004). Para o perfil de aço recomenda-se adotar  $\gamma_M = 1,25$ , conforme item 6.1 da EN 1993-1-1 (2005).

$k_{mod}$  é o coeficiente de modificação que considera os efeitos da duração do carregamento e da umidade sobre as resistências da madeira. Os valores de  $k_{mod}$  são especificados no item 3.1.3 da EN-1995-1-1 (2004).

Os ensaios e simulações numéricas conduzidos por Kyvelou (2017) mostraram que não se observou o efeito de *shear lag* para os espaçamentos entre vigas secundárias comumente utilizados em pisos secos em LSF (*i.e.* 400 e 600 mm). Em função disto, a área da seção transversal da placa de madeira ( $A_{mad}$ ) é definida como:

$$A_{mad} = b_{ef} t_{mad}$$

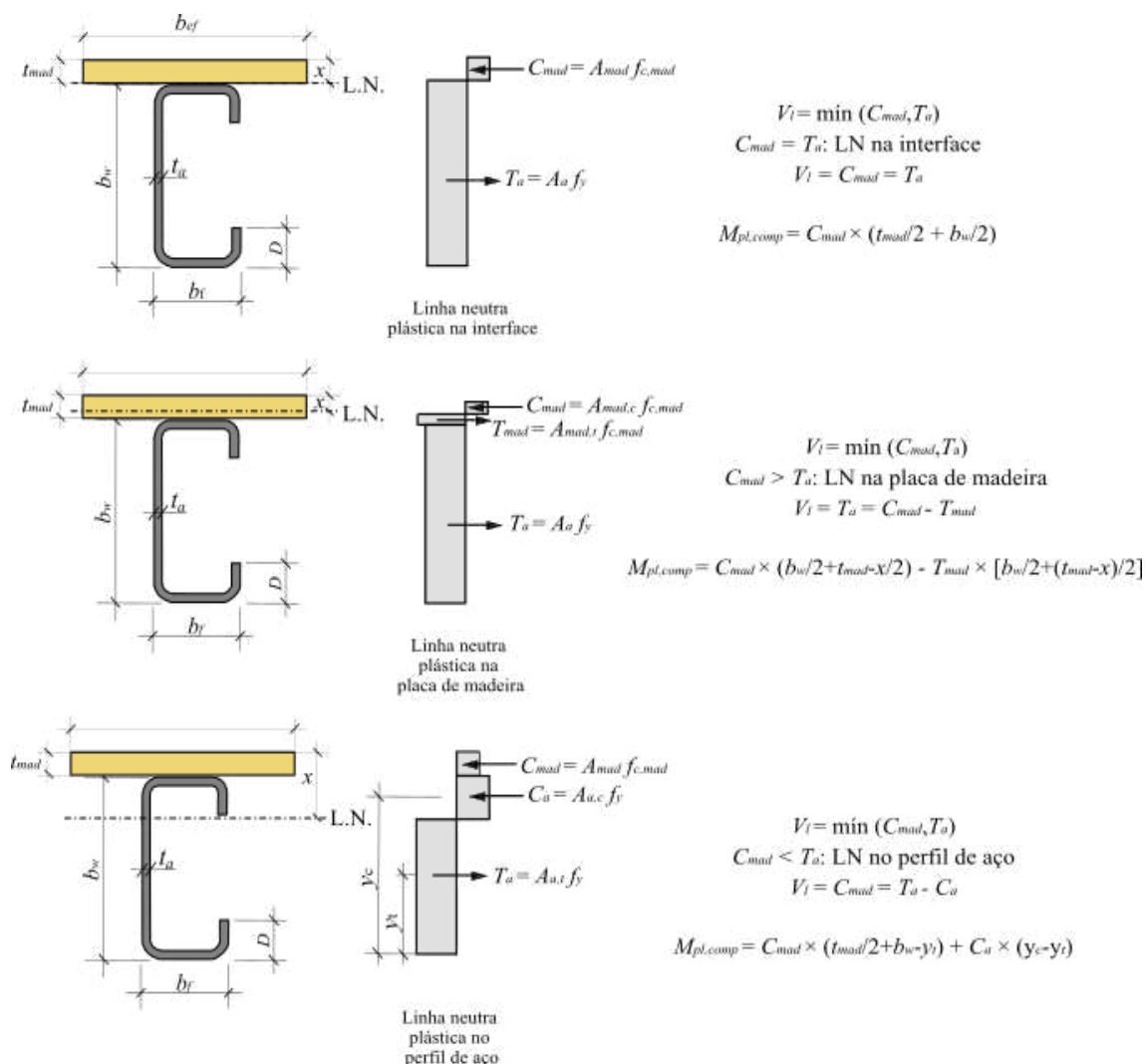
onde:

$t_{mad}$  é a espessura da placa de madeira;

$b_{ef}$  é a largura efetiva da placa de madeira, tomada igual à metade da distância entre a linha de centro da viga analisada e a linha de centro da viga adjacente, de cada lado do eixo longitudinal da viga.

A força de cisalhamento longitudinal na superfície entre aço e madeira ( $V_l$ ) deve ser determinada a partir da verificação da posição da linha neutra (LN) ao longo da altura da seção mista, de acordo com os três cenários possíveis descritos na Figura 4.71.

Figura 4.71 - Força longitudinal transferida pela conector de cisalhamento para uma viga mista com interação completa.

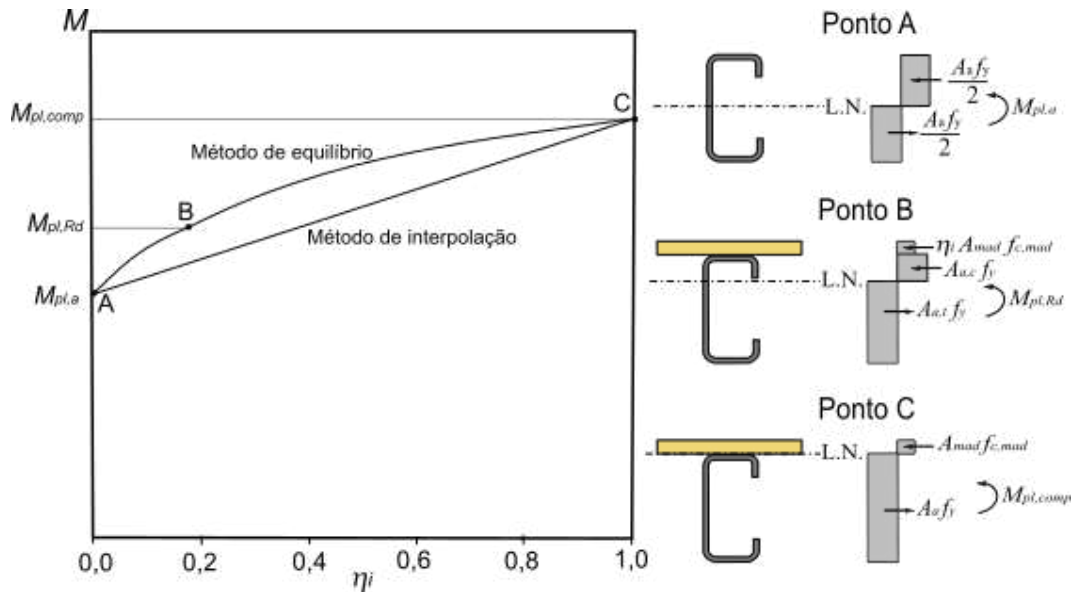


Adaptado de Kyvelou (2017)

## b) Momento fletor resistente da viga mista de aço e madeira

De acordo com o item 6.2.1.3 (3) da EN 1994-1-1 (2005), para vigas de aço com seções transversais de Classe 1 ou 2, o momento fletor resistente plástico de uma viga mista com interação parcial ( $M_{pl, Rd}$ ) varia entre o momento fletor resistente plástico ( $M_{pl, a}$ ) e o momento fletor resistente plástico da viga mista com interação completa ( $M_{pl, comp}$ ) e pode ser calculado considerando-se uma interpolação linear de forma conservadora ou admitindo-se o método de equilíbrio, como mostrado na Figura 4.72.

Figura 4.72 - Variação do momento fletor resistente de vigas mistas convencionais com grau de interação ( $\eta_i$ ) de acordo com a EN 1994-1-1 (2004)



Adaptado de Kyvelou (2017)

O momento fletor resistente plástico da viga mista com interação completa ( $M_{pl,comp}$ ) deve ser determinado em função da posição da linha neutra plástica na altura da seção transversal mista, considerando-se três cenários possíveis, como ilustrado na Figura 4.71:

1) Linha neutra plástica está localizada na interface perfil de aço-placa de madeira

$$M_{pl,comp} = A_{mad} \frac{k_{mod} f_{c, mad} \left( \frac{b_w}{2} + \frac{t_{mad}}{2} \right)}{\gamma_M} \quad [4.10]$$

2) Linha neutra plástica está localizada na placa de madeira

$$M_{pl,comp} = A_{mad,c} \frac{k_{mod} f_{c, mad} \left( \frac{b_w}{2} + t_{mad} - \frac{x}{2} \right)}{\gamma_M} - A_{mad,t} \frac{k_{mod} f_{t, mad} \left( \frac{b_w}{2} + \frac{t_{mad} - x}{2} \right)}{\gamma_M} \quad [4.11]$$

onde  $A_{mad,c}$  e  $A_{mad,t}$  são as áreas da placa de madeira à compressão e à tração, respectivamente;  $f_{c, mad}$  e  $f_{t, mad}$  são as resistências à compressão e à tração da placa de madeira, respectivamente; e  $x$  é a distância da linha neutra até a fibra superior da seção mista.

3) Linha neutra plástica está localizada no perfil de aço

$$M_{pl,comp} = A_{mad} \frac{k_{mod} f_{c, mad}}{\gamma_M} \left( \frac{t_{mad}}{2} + b_w - y_t \right) + A_{a,c} \frac{f_y}{\gamma_M} (y_c - y_t) \quad [4.12]$$

onde  $A_{a,c}$  é a área do perfil de aço à compressão e  $y_c$  e  $y_t$  são as distâncias da fibra inferior da seção mista até os centroides das partes de aço à compressão e à tração, respectivamente.

O momento fletor resistente plástico do perfil de aço ( $M_{pl,a}$ ) pode ser tomado como:

$$M_{pl,a} = Z \frac{f_y}{\gamma_M} \quad [4.13]$$

onde  $Z$  é o módulo resistente plástico da seção transversal do perfil de aço.

O momento fletor resistente do perfil de aço formado a frio ( $M_a$ ) pode ser obtido pelo Método da Largura Efetiva, pelo Método da Seção Efetiva ou pelo Método da Resistência Direta, conforme a ABNT 14.762:2010. Os modos de falha que normalmente controlam o dimensionamento do perfil são a flambagem local, a flambagem distorcional e a flambagem lateral com torção.

Uma vez que os perfis de aço formados a frio normalmente se enquadram na Classe 3 ou 4, o momento fletor resistente ( $M_a$ ) é limitado devido à sua susceptibilidade a instabilidades, ou seja, o momento fletor resistente plástico ( $M_{pl,a}$ ) não pode ser alcançado. No entanto, segundo Kyvelou (2017) caso haja uma situação de conexão total, de modo que a placa de madeira trabalhe de maneira solidária ao perfil de aço formado a frio, o  $M_{pl,comp}$  pode muitas vezes ser alcançado. Isto pode ser explicado com referência à posição da linha neutra, permitindo que a seção transversal do perfil de aço trabalhe principalmente, se não completamente, à tração.

De acordo com o procedimento proposto por Kyvelou (2017), o momento fletor resistente da viga mista ( $M_{Rd}$ ) varia entre o momento fletor resistente do perfil de aço ( $M_a$ ) quando  $\eta_i = 0$  e o da viga mista com conexão total ( $M_{pl,comp}$ ) quando  $\eta_i = 1$ , seguindo a curva A'-C apresentada na onde  $M_{pl,Rd}$  é o momento fletor resistente plástico da viga, que pode ser obtido pelo método de equilíbrio no ponto B da Figura 4.72 ou por interpolação linear entre os pontos A e C da Figura 4.72, de acordo com o grau de interação ( $\eta_i$ ) obtido.

Figura 4.73. A título de exemplo, para uma viga mista com grau de conexão  $\eta_i = 0,1$ , o momento fletor resistente plástico ( $M_{pl,Rd}$ ), representado pelo ponto B na curva A-C da onde  $M_{pl,Rd}$  é o

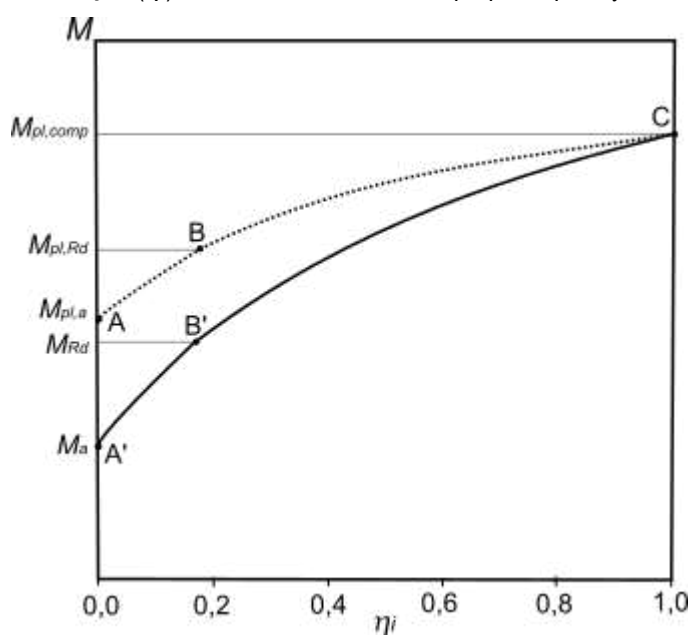
momento fletor resistente plástico da viga, que pode ser obtido pelo método de equilíbrio no ponto B da Figura 4.72 ou por interpolação linear entre os pontos A e C da Figura 4.72, de acordo com o grau de interação ( $\eta_i$ ) obtido.

Figura 4.73. Para calcular o momento fletor resistente da viga mista ( $M_{Rd}$ ), representado pelo ponto B' na curva A'-C, assume-se que  $M_{pl,Rd}$  é reduzido em 90% da diferença entre  $M_{pl,a}$  e  $M_a$ . O momento fletor resistente da viga mista ( $M_{Rd}$ ) com um grau de conexão ( $\eta_i$ ) pode ser calculado de acordo com a seguinte equação:

$$M_{Rd} = M_{pl,Rd} - (1 - \eta_i)(M_{pl,a} - M_a) \quad [4.14]$$

onde  $M_{pl,Rd}$  é o momento fletor resistente plástico da viga, que pode ser obtido pelo método de equilíbrio no ponto B da Figura 4.72 ou por interpolação linear entre os pontos A e C da Figura 4.72, de acordo com o grau de interação ( $\eta_i$ ) obtido.

Figura 4.73 - Variação do momento fletor resistente de vigas mistas convencionais com grau de interação ( $\eta$ ) de acordo com o método proposto por Kyvelou (2017)



Fonte: Kyvelou, 2017

Uma abordagem alternativa, mais conservadora, para calcular o momento fletor resistente da viga mista é interpolar entre os pontos A' e C da Figura 4.73:

$$M_{Rd} = M_a + \eta_i (M_{pl,comp} - M_a) \quad [4.15]$$

c) Grau mínimo de conexão permitido

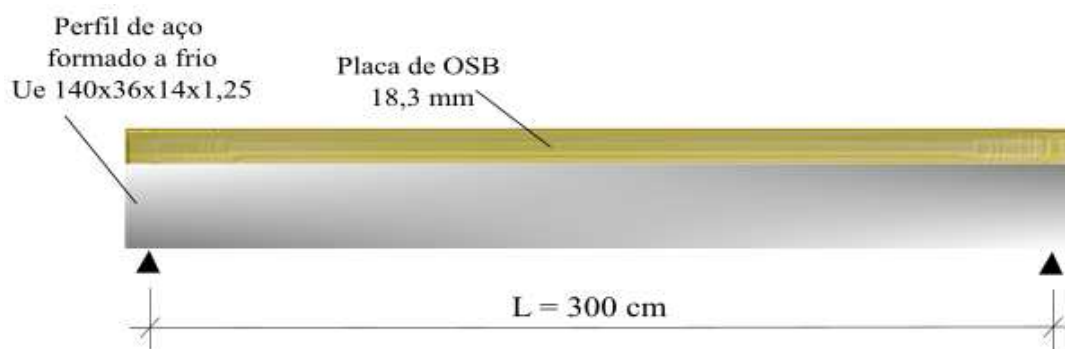
Kyvelou (2017) propôs ainda que o momento fletor resistente ( $M_{Rd}$ ) de uma viga mista de aço formado a frio e madeira deve ser obtido seguindo o procedimento descrito nos itens anteriores para graus de conexão superiores a  $\eta_i = 0,05$ . Para  $\eta_i < 0,05$  o comportamento misto não deve ser considerado e o momento fletor resistente ( $M_{Rd}$ ) deve ser considerado igual ao momento fletor resistente do perfil de aço formado a frio ( $M_a$ ).

#### 4.6.2. Exemplo de cálculo

a) Considerações iniciais

Neste exemplo, determina-se o momento fletor resistente de cálculo ( $M_{Rd}$ ) da viga mista de aço e madeira para um sistema de piso seco em LSF, com vão livre de 300 cm, composta por um perfil de aço formado a frio com seção Ue 140x36x14x1,25 e uma placa de OSB com espessura de 18,3 mm, como mostrado na Figura 4.74.

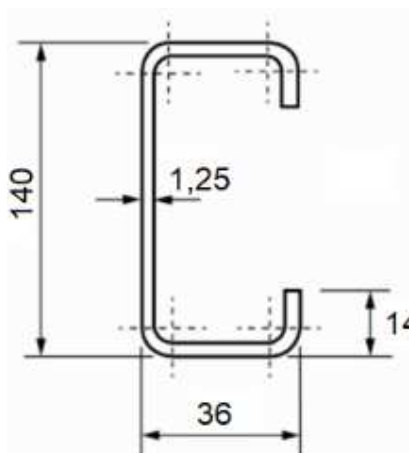
Figura 4.74 – Esquema geral da viga mista de aço e madeira



Considera-se o perfil de aço conectado à placa de OSB por meio de parafusos autoatarraxantes com diâmetro nominal de 5,5 mm, instalados a cada 200 mm. O momento fletor resistente do perfil de aço formado a frio ( $M_a$ ) é igual a 215,5 kN.cm, que foi obtido pelo Método da Resistência Direta, conforme a ABNT 14.762:2010. Neste caso, como o perfil de aço possui uma contenção lateral contínua proporcionada pela placa de OSB, o perfil não sofre flambagem elástica e o modo de falha que governou o dimensionamento foi o escoamento do perfil de aço. A seguir, apresentam-se as propriedades geométricas e mecânicas do perfil de aço formado a frio, da placa de OSB e dos parafusos autoatarraxantes, respectivamente.

### Perfil de aço formado a frio

Figura 4.75 – Seção transversal Ue 140x36x14x1,25



- altura da seção transversal ( $b_w$ ) = 140 mm;
- largura das mesas ( $b_f$ ) = 36 mm;
- espessura do perfil ( $t_a$ ) = 1,25 mm;
- área da seção transversal do perfil ( $A_a$ ) = 2,86 cm<sup>2</sup>;
- comprimento do perfil de aço ( $L$ ) = 300 cm;
- módulo resistente elástico do perfil em relação ao eixo forte ( $W_x$ ) = 11,71 cm<sup>3</sup>;
- módulo resistente plástico do perfil em relação ao eixo forte ( $Z_x$ ) = 13,86 cm<sup>3</sup>;
- resistência ao escoamento do aço do perfil ( $f_y$ ) = 23 kN/cm<sup>2</sup>.
- coeficiente de ponderação da resistência do aço ( $\gamma_M$ ) = 1,25;
- momento fletor resistente do perfil de aço ( $M_a$ ) =

$$M_a = W_x \frac{f_y}{\gamma_M} = 11,71 \frac{23}{1,25} = 215,5 \text{ kN.cm}$$

- momento fletor resistente plástico do perfil de aço ( $M_{pl,a}$ ) =

$$M_{pl,a} = Z_x \frac{f_y}{\gamma_M} = 13,86 \frac{23}{1,25} = 255,0 \text{ kN.cm}$$

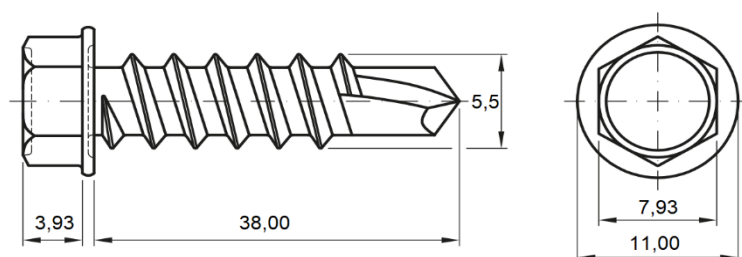
### Placa de OSB

- espessura da placa ( $t_{mad}$ ) = 18,3 mm;
- largura efetiva ( $b_{ef}$ ) = 40 cm;
- área da seção transversal da placa ( $A_{mad}$ ) =  $t_{mad} \cdot b_{ef} = 1,83 \times 40 = 73,2$  cm<sup>2</sup>;
- resistência à tração da placa de OSB ( $f_{t,mad}$ ) = 1,96 kN/cm<sup>2</sup>;

- resistência à compressão da placa de OSB ( $f_{c, mad}$ ) = 1,37 kN/cm<sup>2</sup>;
- tensão resistente à pressão de contato da placa de OSB ( $f_e$ ) = 3,74 kN/cm<sup>2</sup>;
- densidade da placa de OSB ( $\rho_{mad}$ ) = 640 kg/m<sup>3</sup>.
- coeficiente de ponderação da resistência do OSB ( $\gamma_M$ ) = 1,20;
- coeficiente de modificação ( $k_{mod}$ ) = 0,40 (considerando-se: OSB, classe de serviço 1, carregamento de longa duração).

### Parafusos autoatarraxantes

Figura 4.76 – Parafuso autoatarraxante com diâmetro nominal de 5,5 mm



- diâmetro do parafuso ( $d_b$ ) = 0,55 cm ;
- comprimento efetivo da ligação parafusada ( $l_{ef}$ ) = 4  $d_b$  = 2,2 cm ;
- espaçamento entre parafusos ( $e$ ) = 20 cm;
- resistência ao escoamento do aço do parafuso ( $f_{yp}$ ) = 64 kN/cm<sup>2</sup> ;
- momento fletor resistente plástico do parafuso ( $M_{pl}$ ) =  $d_b^3 f_{yp} / 6$  = 1,77 kN.cm ;
- coeficiente de ponderação da resistência da conexão ( $\gamma_M$ ) = 1,30.

### b) Força resistente de cálculo da conexão

Para o cálculo da força resistente da conexão utilizam-se as equações do modelo semiempírico apresentado no item 4.5 deste trabalho. Assim, a força resistente máxima da conexão ( $F_R$ ), definida como o menor valor entre  $F_{R,1}$  e  $F_{R,2}$ , é igual a:

$$F_{R,1} = 1,12 f_e d_b t_{mad} = 1,12 \times 3,74 \times 0,55 \times 1,83 = 4,29 \text{ kN}$$

$$f_{ax,R} = 0,52 d_b^{-0,5} l_{ef}^{-0,1} \rho_{mad}^{0,8} = 0,52 \times 5,5^{-0,5} \times 22^{-0,1} \times 640^{0,8} = 28,6 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{ax,R} = f_{ax,R} d_b l_{ef} = \frac{28,6 \times 5,5 \times 22}{1000} = 3,46 \text{ kN}$$

$$F_{R,2} = 0,82 \sqrt{2 M_{pl} f_e d_b} + 0,93 F_{ax,R} = 0,82 \sqrt{2 \times 1,77 \times 3,74 \times 0,55} + 0,93 \times 3,46 = 5,43 \text{ kN}$$

$$F_R \leq (F_{R,1}, F_{R,2}) = 4,29 \text{ kN}$$

A força resistente de cálculo da conexão ( $F_{Rd}$ ) é obtida com a introdução do coeficiente de ponderação  $\gamma_M = 1,30$ , de acordo com o EN 1994-1-1 (2004), da seguinte forma:

$$F_{Rd} = \frac{0,9F_R}{\gamma_M} = \frac{0,9 \times 4,29}{1,30} = 2,97 \text{ kN}$$

### c) Grau de conexão

Para o cálculo do grau de conexão, inicialmente são necessárias as forças resultantes de compressão na madeira ( $C_{mad}$ ) e de tração no perfil de aço ( $T_a$ ):

$$C_{mad} = A_{mad} \frac{k_{mod} f_{c, mad}}{\gamma_M} = 73,2 \times \frac{0,40 \times 1,37}{1,20} = 33,4 \text{ kN}$$

$$T_a = A_a \frac{f_y}{\gamma_M} = 2,86 \times \frac{23}{1,25} = 52,6 \text{ kN}$$

Uma vez que  $V_l$  é definido como o menor valor entre  $C_{mad}$  e  $T_a$ , tem-se:

$$V_l \leq (C_{mad}, T_a) = 33,4 \text{ kN}$$

Tendo em vista que o vão livre ( $L$ ) da viga mista é igual a 300 cm e espaçamento entre parafusos ( $e$ ) é de 20 cm, o número de parafusos ( $n$ ) entre a seção transversal de momento nulo e a de momento máximo da viga mista de aço e madeira é:

$$n = \frac{\left(\frac{L}{e} - 1\right)}{2} = \frac{\left(\frac{300}{20} - 1\right)}{2} = 7 \text{ parafusos}$$

E assim, o grau de conexão da viga mista é:

$$\eta_i = \frac{n F_{Rd}}{V_l} = \frac{7 \times 2,97}{33,4} = 0,61$$

Como o grau de conexão é maior do que grau mínimo recomendado, ou seja,  $\eta_d > 0,05$ , pode-se utilizar o procedimento apresentado no item 4.6.1 deste trabalho para o cálculo do momento fletor resistente de cálculo da viga mista.

## d) Momento fletor resistente de cálculo da viga mista

Tendo em vista que  $C_{mad} < T_a$ , sabe-se que a linha neutra ( $x$ ) da seção transversal mista está localizada no perfil de aço. Deve-se, assim, verificar se a linha neutra está localizada na mesa superior ou na alma do perfil. Se  $C_a \leq b_f \cdot t_a \cdot \frac{f_y}{\gamma_M}$ , a linha neutra está localizada na mesa superior do perfil, caso contrário, a linha neutra está localizada na alma do perfil:

$$C_a = \frac{1}{2}(T_a - C_{mad}) = \frac{1}{2}(52,6 - 33,4) = 9,6 \text{ kN}$$

$$b_f \cdot t_a \cdot \frac{f_y}{\gamma_M} = 3,6 \times 0,125 \times \frac{23}{1,25} = 8,3 \text{ kN}$$

Uma vez que  $C_a > b_f \cdot t_a \cdot \frac{f_y}{\gamma_M}$ , a linha neutra está localizada na alma do perfil. Assim, pode-se determinar a posição da linha neutra ( $x$ ) a partir da seguinte expressão:

$$x = t_{mad} + t_a + b_w \left[ \frac{C_a - \left( b_f \cdot t_a \cdot \frac{f_y}{\gamma_M} \right)}{b_w \cdot t_a \cdot \frac{f_y}{\gamma_M}} \right]$$

$$x = 1,83 + 0,125 + 14,0 \left[ \frac{9,6 - \left( 3,6 \times 0,125 \times \frac{23,0}{1,25} \right)}{14,0 \times 0,125 \times \frac{23,0}{1,25}} \right] = 2,53 \text{ cm} = 25,3 \text{ mm}$$

Assim, pode-se obter a área da região sob compressão ( $A_{a,c}$ ) e a posição do centroide da área comprimida ( $y_c$ ) e da área tracionada ( $y_t$ ) do perfil de aço:

$$A_{a,c} = A_a \left( \frac{x - t_{mad}}{b_w} \right) = 2,86 \left( \frac{2,53 - 1,83}{14} \right) = 0,143 \text{ cm}^2$$

$$y_c = b_w + t_{mad} - x + \left( \frac{x - t_{mad}}{2} \right) = 14 + 1,83 - 2,53 + \left( \frac{2,53 - 1,83}{2} \right) = 13,65 \text{ cm}$$

$$y_t = \frac{b_w + t_{mad} - x}{2} = \frac{14 + 1,83 - 2,53}{2} = 6,65 \text{ cm}$$

Com as propriedades geométricas obtidas, é possível se determinar o momento de plastificação da viga mista considerando interação completa ( $M_{pl,comp}$ ), admitindo-se que a linha neutra ( $x$ ) está localizada no perfil de aço:

$$M_{pl,comp} = A_{mad} \frac{k_{mod} f_{c, mad}}{\gamma_M} \left( \frac{t_{mad}}{2} + b_w - y_t \right) + A_{a,c} \frac{f_y}{\gamma_M} (y_c - y_t)$$

$$M_{pl,comp} = 73,2 \frac{0,4 \times 1,37}{1,20} \left( \frac{1,83}{2} + 14 - 6,65 \right) + 0,143 \frac{23}{1,25} (13,65 - 6,65) = 294,6 \text{ kN.cm}$$

E o momento de plastificação de cálculo da viga mista ( $M_{pl,Rd}$ ) pode ser obtido, de forma conservadora, por interpolação linear entre  $M_{pl,a}$  e  $M_{pl,comp}$ :

$$M_{pl,Rd} = \eta_d (M_{pl,comp} - M_{pl,a}) + M_{pl,a} = 0,61(294,6 - 255,0) + 255,0 = 279,2 \text{ kN.cm}$$

Finalmente, o momento fletor resistente de cálculo da viga mista ( $M_{Rd}$ ) pode ser obtido:

$$M_{Rd} = M_{pl,Rd} - (1 - \eta_d)(M_{pl,a} - M_a) = 279,2 - (1 - 0,61)(255,0 - 215,5) = 263,8 \text{ kN.cm}$$

Portanto, o momento fletor resistente de cálculo da viga mista de aço e madeira ( $M_{Rd}$ ) é igual a 263,8 kN.cm. Em função disto, tendo em vista que o momento último resistente do perfil de aço  $M_a = 215,5$  kN.cm, pode-se observar que ao considerar a viga mista de aço e madeira, obteve-se um ganho de aproximadamente 22% em relação ao momento último resistente do perfil ( $M_a$ ).

É importante destacar que o ganho de momento fletor resistente obtido no exemplo estudado não permite fazer uma generalização sobre o ganho de resistência que pode ser obtido ao se utilizar a viga mista composta por perfil de aço formado a frio e placa de madeira. Além da verificação para o estado limite último de momento fletor, para as vigas em geral é necessário verificar os estados limite de serviço aplicáveis.

# 5

---

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma investigação do comportamento estrutural de conexões parafusadas para vigas mistas de aço formado a frio e madeira. Esta investigação abrangeu o estudo do comportamento força/deslizamento das conexões, a avaliação da influência de parâmetros que afetam a capacidade resistente, a rigidez e a ductilidade da conexão, a avaliação dos modos de falha e a proposição um modelo para estimar a capacidade resistente da conexão.

Foi realizado um programa experimental composto por 30 ensaios *push-out*, divididos em 6 modelos. Para cada modelo variou-se o diâmetro dos parafusos e o espaçamento entre eles. Também foi avaliada a influência da utilização de arruelas de aço em conjunto com os parafusos. Em função disso, para cada modelo experimental foram produzidas quatro amostras sem arruelas e uma com arruelas.

As curvas força/deslizamento dos modelos *push-out* foram caracterizadas por um deslizamento praticamente nulo para forças variando de 10 a 20% da força máxima resistente, devido ao atrito entre a placa de OSB e o perfil de aço. Os modelos apresentaram uma rigidez praticamente constante para forças variando de 40 a 60% de  $F_{máx}$ . Nessa etapa de carregamento observou-se que os parafusos começaram a girar dentro da placa de OSB, em relação à mesa do perfil. Após isso as amostras perderam rigidez à medida que a placa de OSB foi sendo esmagada com o giro dos parafusos, devido ao dano progressivo da placa de OSB. A falha da conexão, caracterizada por esmagamento da placa de OSB ou pela plastificação do parafuso devido à ação combinada de flexão e retirada do parafuso, se deu quando a força aplicada alcançou  $F_{máx}$ , acompanhada de grandes deslizamentos entre os materiais.

Os resultados obtidos nos ensaios *push-out* demonstraram que a conexão parafusada entre aço e madeira apresenta um comportamento estrutural adequado para uso em vigas mistas de perfis de aço formados a frio e placas de madeira, caracterizado por uma alta rigidez para forças de serviço e uma grande ductilidade para forças últimas.

Os valores obtidos neste trabalho de forças resistentes, tensões resistentes, fluxos resistentes e módulos de deslizamento da conexão foram compatíveis com os resultados obtidos por autores anteriores.

Os resultados experimentais indicaram que, para os modelos estudados, o espaçamento entre parafusos influenciou diretamente o fluxo de cisalhamento longitudinal da conexão. Observou-se que quanto maior o espaçamento entre parafusos menor o fluxo de cisalhamento longitudinal.

Os resultados experimentais indicaram que, para os modelos estudados, os modelos com parafusos de 5,5 mm apresentaram maiores forças e tensões resistentes do que os modelos com parafusos de 6,3 mm. Isso pode ser explicado pela menor área de contato do parafuso de menor diâmetro (5,5 mm) em relação à área do parafuso de maior diâmetro (6,3 mm) fazendo com que a tensão causada no contato com a madeira seja maior para os parafusos de 5,5 mm.

Os resultados experimentais indicaram que as amostras com arruelas de aço não contribuíram no aumento da capacidade resistente e da rigidez dos modelos experimentais. De modo geral, as arruelas de aço dificultaram o giro do parafuso para patamares iniciais de força, porém não foram capazes de impedir o giro. Novos estudos, com maior representatividade de amostras com arruelas, devem ser realizados para investigar o comportamento observado e relatado neste trabalho.

Para os modelos ensaiados, observou-se que a capacidade da conexão parafusada entre aço e madeira decorreu do esmagamento da placa de OSB associado ao giro do parafuso autoatarraxante. Conforme o parafuso gira esmagando a placa de OSB, a força aplicada em cada parafuso se decompõe nas direções transversal e axial. A componente transversal ao parafuso pode provocar o esmagamento da madeira e a componente axial causa a tração do parafuso, puxando-o de encontro à madeira. Esse modo de falha foi denominado como “*screw tilting*” em estudos internacionais anteriores.

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho e em trabalhos de outros autores, foi proposto um modelo semiempírico para predição da força resistente máxima da conexão entre

perfis de aço formados a frio e placas de madeira. O modelo proposto foi capaz de prever de forma satisfatória a força resistente máxima da conexão, dentro das faixas estudadas.

Ao final, apresentou-se um procedimento para cálculo do momento fletor resistente de uma viga mista composta por perfis de aço formados a frio e placas de madeira, considerando-se a força resistente máxima da conexão de acordo com o modelo semiempírico proposto. Com base no procedimento apresentado, realizou-se um exemplo de cálculo no qual obteve-se um ganho aproximado de 22% no momento último resistente, ao se considerar a viga mista de aço e madeira.

Como sugestões para trabalhos futuros, são apontados os seguintes tópicos:

- realizar novos ensaios *push-out* a fim de investigar a influência da utilização de outros tipos de parafusos, diferentes diâmetros de parafusos, outros tipos de placas de madeira e diferentes espessuras das mesmas;
- executar ensaios *push-out* utilizando placas cimentícias para investigar o seu comportamento estrutural e identificar os modos de falha;
- realizar simulações numéricas com auxílio de modelos de elementos finitos e redes neurais, a fim de ampliar a faixa de aplicação do modelo semiempírico proposto neste trabalho;
- executar ensaios de flexão a quatro pontos em vigas mistas de aço formado a frio e madeira em tamanho real para investigar experimentalmente o grau de conexão da viga mista;
- efetuar ensaios de flexão a quatro pontos em protótipos em tamanho real de pisos mistos de aço e madeira com objetivo de avaliar a influência do espaçamento entre vigas na força resistente, rigidez e ductilidade do sistema e avaliar os modos de falha.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM Standard test method E2126. **Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shear resistance of framed walls for buildings**. West Conshohocken, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 7008. **Chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou com liga-zinco ferro pelo processo contínuo de imersão à quente - Especificação**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 7190. **Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 8800. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 15253. **Perfis de aço formados a frio, com revestimento metálico, para painéis estruturais reticulados em edificações – Requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2014.

BRANSTON, A.E. *et al.* **Light-gauge steel-frame – wood structural panel shear wall design method**. *Can. J. Civ. Eng.*, 33(7). 872-889. 2006.

CABRAL, C.P.T.; *et al.* **Propriedades de chapas tipo OSB, fabricadas com partículas acetiladas de madeiras de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus Cloeziana* e *Pinus elliottii***. *Revista Árvore*. Viçosa, no.4, vol.30, jul. 2006.

CALADO, L.; SANTOS, J. **Estruturas mistas de aço e betão**. 2. ed. Lisboa: Press, 2014.

CHATTERJEE, A. *et al.* **System-reliability sensitivity to fastener capacity in cold-formed steel wood-sheathed floor diaphragms.** Eurosteel. Napoli, set. 2014.

CHINIFORUSH, A.A. *et al.* **Long-term behaviour of steel-timber composite (STC) shear connections.** Engineering Structures, v. 196, p. 1-15, out. 2019. Elsevier BV.

DATCHOUA, J.S. **Estudo teórico-experimental do comportamento da ligação de painéis de OSB com perfis do reticulado metálico do sistema construtivo light steel framing.** 2018. 231f. Dissertação (Mestrado) – Pós Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

DAVIES, C.; **Tests on half-scale steel-concrete composite beams with welded stud connectors.** Structural Engineer, Vol.47(1), 29-40, 1969.

DE MELO, N.B.; EMERICK, J.A.; SANT'ANA, G.O. **Análise de soluções estruturais para sistema de piso seco em light steel framing.** 2019, 115f. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

DOLAN, J.D., HEINE, C.P. **Monotonic tests of woodframe shear walls with various openings and base restraint configurations.** Report TE-1997-001, Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 1997a.

DOLAN, J.D., HEINE, C.P. **Sequential phased displacement cyclic tests of wood-frame shear walls with various openings and base restraint configurations.** Report TE-1997-002, Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 1997b.

DOLAN, J.D., HEINE, C.P. **Sequential phased displacement tests of wood-frame shear walls with corners.** Report TE-1997-003, Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 1997c.

DOLAN, J.D., JOHNSON, A.C. **Monotonic tests of long shear walls with openings.** Report TE-1996-001, Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 1996a.

DOLAN, J.D., JOHNSON, A.C. **Cyclic tests of long shear walls with openings**. Report TE-1996-002, Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 1996b.

EN 12512. **Timber Structures – Test methods – Cyclic testing of joints made with mechanical fasteners**. European Committee for Standardization. 2002.

EN 26891. **Timber Structures – Joints made with mechanical fasteners – General Principles for the Determination of Strength and Deformation Characteristics**. European Committee for Standardization. 1991.

EN 1994-1-1:2004. **Design of composite steel and concrete structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings**. European Committee for Standardization. 2004.

EN 1995-1-1:2004. **Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings**. European Committee for Standardization. 2004.

FERREIRA, J.C. e PATINO, C.M. **O que realmente significa o valor-p?** *Jornal Brasileiro de Pneumologia*. 41(5):485-385. 2015.

FOLIENTE, G.C. **Issues in seismic performance testing and evaluation of timber structural systems**. In *Proceedings of the International Wood Engineering Conference*, New Orleans, p.28–31. 1996.

HASSANIEH, A. *et al.* **Experimental and analytical behaviour of steel-timber composite connections**. *Construction And Building Materials*, v. 118, p. 63-75, ago. 2016. Elsevier BV.

HEINE, C.P. **Effect of overturning restraint on the performance of fully sheathed and perforated timber framed shear walls**. M.Sc. thesis, Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 1997.

JOHANSEN, K.W. **Theory of timber connections**. *Memoires de l'Association Internationale de Ponts et Chaussées (IABSE)*. Vol. 9, p.249-262. Suisse. 1949.

JOHNSON, A.C., DOLAN, J.D. **Performance of long shear walls with openings**. In *Proceedings of the International Wood Engineering Conference*, New Orleans, La., 28–31

October 1996. Edited by V.K.A. Gopu. Forest Products Society, Madison, Wis. Vol. 2, pp. 337–344. 1996.

JOHNSON, A.C. **Monotonic and cyclic performance of long shear walls with openings.** M.Sc. thesis, Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 1997.

KASZNAR, I.K.; GONÇALVES, B.M.L. **Regressão múltipla: uma digressão sobre seus usos.** Institutional Business Consultoria Internacional (IBCI). Rio de Janeiro, 2011.

KYVELOU, Pinelopi. **Testing and Analysis of Composite Cold-Formed Steel and Wood-Based Flooring Systems.** Journal Of Structural Engineering, v. 143, n. 11, p. 1-40, nov. 2017. American Society of Civil Engineers (ASCE).

LIU, H. **The slip modulus between cold formed steel and timber sheathing based on fastener spacing increment.** Master science thesis, Department of Civil Engineering, Kansas State University, Manhattan, Kansas, 2018.

LOEHR, W. **The influence of fastener spacing on the slip modulus between cold formed steel and wood sheathing.** Master science thesis, Department of Civil Engineering, Kansas State University, Manhattan, Kansas, 2016.

LOSS, C. *et al.* **Connections for steel-timber hybrid prefabricated buildings.** Part I: Experimental test. Construction and Building Materials. vol. 122. p. 781-795. 2016.

LP BRASIL. **Catálogo técnico de placas de OSB,** 2022. Disponível em: [www.lpbrasil.com.br/producto/osb-apa-plus](http://www.lpbrasil.com.br/producto/osb-apa-plus). Acesso em: 18 mai. 2022.

MARTIN, G. **Investigation of the slip modulus between cold formed steel and plywood sheathing.** Master science thesis, Department of Architectural Engineering and Construction Sciences College of Engineering, Kansas State University, Manhattan, Kansas, 2014.

MEDBERRY, S. B.; SHAHROOZ, B. M. **Perfobond Shear Connector for Composite Construction,** AISC Engineering Journal, Chicago, 2002-1, pp.2-12, 2002.

NAHBRC. **Innovative Residential Floor Construction: Horizontal Diaphragm Values for Cold Formed Steel Framing.** 1999.

NORTHCUTT, A. **Slip modulus of cold-formed steel members sheathed with wood structural panels.** International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, 2012.

OGUEJIOFOR, E. C.; HOSAIN, M. U. **A parametric study of Perfobond rib shear connectors,** Canadian Journal of Civil Engineering, n.21, p.614-625, 1994.

PAES, J.L.R. **Notas de aula da disciplina CIV 657 – Estruturas Mistas de Aço e Concreto.** Universidade Federal de Viçosa. 2020.

PARK, R. **Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing.** Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, p.155–166. 1989.

PFEIL, W., PFEIL, M.S. **Estruturas de madeira.** 7<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro. 2003.

REBIPAR. **Catálogo de parafusos autoatarraxantes,** 2022. Disponível em: [www.rebipar.com.br/parafusos](http://www.rebipar.com.br/parafusos). Acesso em: 25 mai. 2022.

RODRIGUES, F.C *et al.* **Steel Framing: Engenharia.** Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia - Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2016. 127p.

SALENIKOVICH, A.J. **The racking performance of light-frame shear walls.** Ph.D. thesis, Department of Wood Science and Forest Products, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg. 2000.

SANTIAGO, A.K. *et al.* **Steel Framing: Arquitetura.** 2<sup>a</sup> edição. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia - Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), 2012. 151p.

STEINBERG, E., SELLE, R. e FAUST, T. **Connectors for Timber–Lightweight Concrete Composite Structures.** *Journal of Structural Engineering.* 2003.

STEP – STRUCTURAL TIMBER EDUCATION PROGRAM. **Structures en bois aux états limites.** Paris, France. 1996.

VELLA, N. *et al.* **Experimental analysis of cold-formed steel-to-timber connections with inclined screws.** *Structures.* vol. 24. p-890-904. 2020.

VERÍSSIMO, G. S. **Desenvolvimento de um Conector de Cisalhamento em Chapa Dentada para Estruturas Mistas de Aço e Concreto e Estudo do seu Comportamento.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

VILLELA, S.M. **Determinação das Propriedades Mecânicas das Placas de OSB e do Comportamento da Ligação entre as Placas de OSB e o Reticulado de Aço do Sistema Light Steel Framing.** 2014. 170 f. Dissertação (Mestrado) – Pós Graduação em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

YANG, Ruyuan *et al.* **Mechanical behaviour of steel timber composite shear connections.** Construction And Building Materials, v. 258, p. 1-19, out. 2020. Elsevier BV.

ZENID, G. Z. **Madeira: uso sustentável na construção civil.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2009.

ZHOU, X.H. *et al.* **Study on the flexural capacity of cold-formed steel joists-OSB composite floor.** 22nd Internacional Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. 2014.

## APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS *PUSH-OUT*

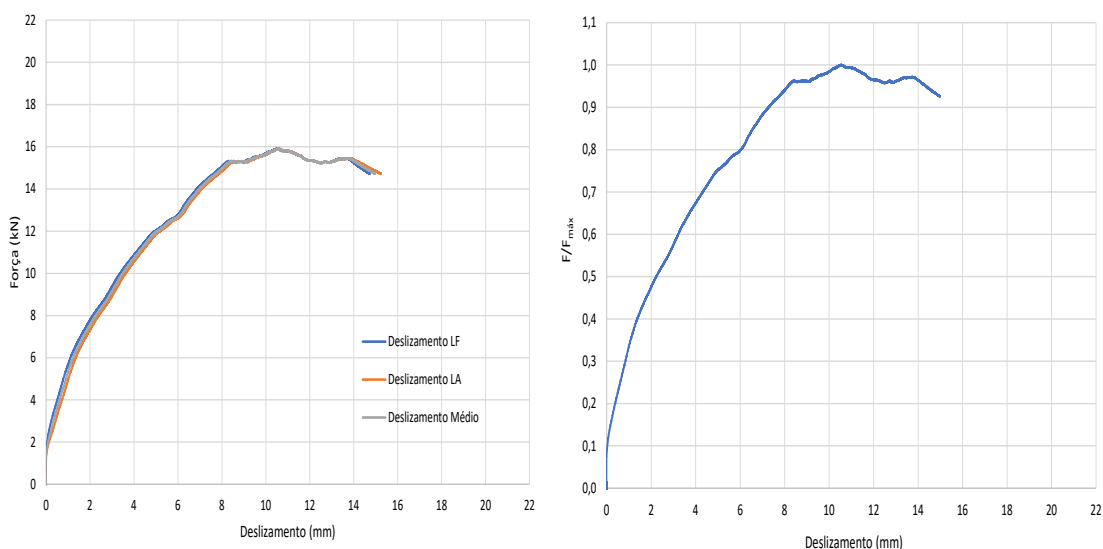
Neste Apêndice A são apresentados os resultados dos ensaios *push-out* de todas as amostras. Para as amostras do modelo 1 apresentam-se os resultados obtidos de forma detalhada, enquanto para as demais amostras os resultados são apresentados de forma resumida.

### A.1. Modelo 1: P-150-55

#### A.1.1. Amostra P-150-55-0

Na Figura A.1.a são apresentadas três curvas de força / deslizamento: com deslizamento medido no lado fechado (LF), com deslizamento medido no lado aberto (LA) e com deslizamento médio. Na Figura A.1.b é mostrada a curva de força / deslizamento média normalizada.

Figura A.1 – Curvas força / deslizamento para a amostra P-150-55-0.



a) Curvas força / deslizamento da amostra com deslocamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.

b) Curva força / deslizamento média normalizada.

A força resistente máxima ( $F_{máx}$ ) obtida neste ensaio foi de 15,90 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 14,73 kN e o deslizamento último ( $v_u$ ) foi de 14,97 mm.

Com base na Figura A.1.b, percebe-se que para forças de até 10% de  $F_{máx}$  não houve deslizamento perceptível devido à acomodação inicial entre os parafusos, o perfil de aço e a placa de OSB. Para forças de 10 a 40% de  $F_{máx}$ , a amostra apresentou rigidez (caracterizada pela razão força / deslizamento) aproximadamente constante. A partir de 40% de  $F_{máx}$  notou-se uma perda de rigidez, que se manteve constante até cerca de 75% de  $F_{máx}$ . Após este ponto, notou-se um pequeno escorregamento entre aço e madeira, seguido de um outro trecho com rigidez semelhante ao anterior, até alcançar cerca de 95% de  $F_{máx}$ . A partir deste ponto, a amostra apresentou deslizamentos mais acentuados até alcançar  $F_{máx}$ . Após o pico de força resistente, a amostra apresentou perda de rigidez, até atingir 93% de  $F_{máx}$  no momento da falha. A seguir são apresentados os módulos de deslizamento a 40% de  $F_{máx}$  ( $k_{s0,4}$ ), a 60% de  $F_{máx}$  ( $k_{s0,6}$ ) e a 80% de  $F_{máx}$  ( $k_{s0,8}$ ) a partir dos resultados de força e deslizamento mostrados na Figura A.1.a:

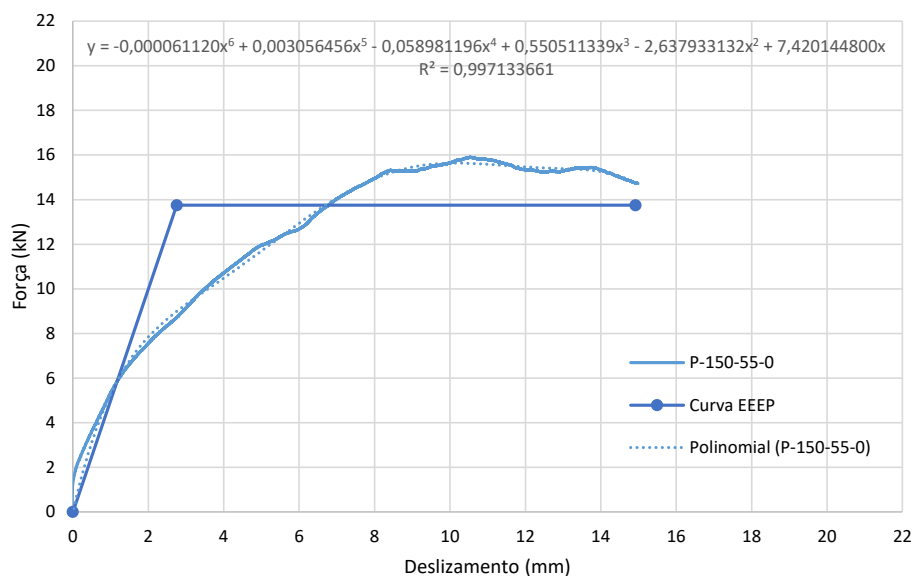
$$k_{s0,4} = \frac{0,4F_{máx}}{v_{0,4}} = \frac{0,4 \times 15,90}{1,37} = 4,63 \text{ kN/mm}$$

$$k_{s0,6} = \frac{0,6F_{máx}}{v_{0,6}} = \frac{0,6 \times 15,90}{3,22} = 2,97 \text{ kN/mm}$$

$$k_{s0,8} = \frac{0,8F_{máx}}{v_{0,8}} = \frac{0,8 \times 15,90}{6,03} = 2,11 \text{ kN/mm}$$

Na Figura A.2 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento.

Figura A.2 - Curva EEEP para a amostra P-150-55-0.



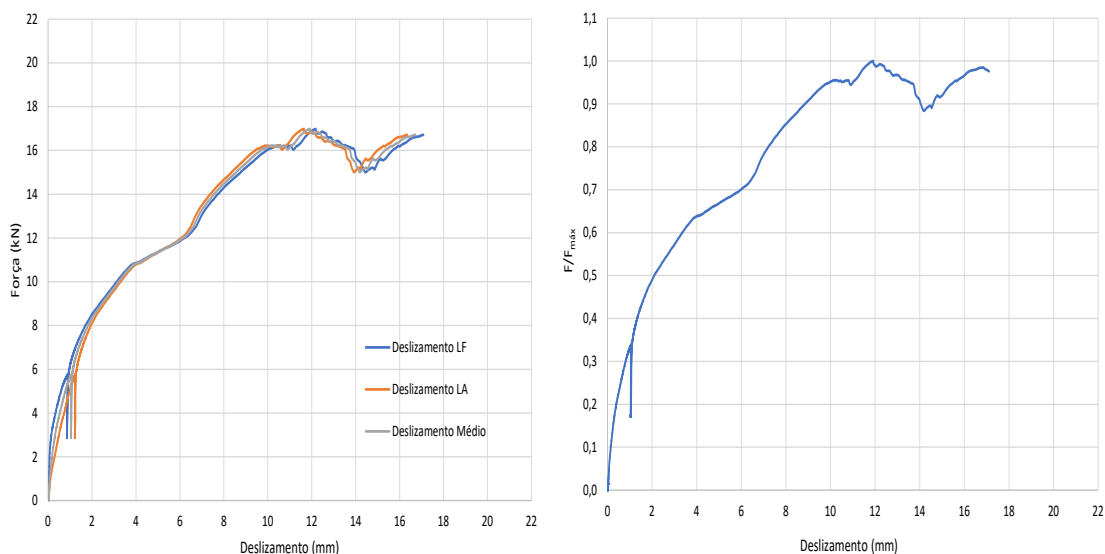
Para se obter a curva EEEP, determinou-se a força de escoamento ( $F_y$ ) e o deslizamento no escoamento ( $v_y$ ) de acordo com as expressões mostradas no item 2.3.4. Para a amostra P-150-55-0, obteve-se  $F_y = 13,75$  kN e  $v_y = 2,99$  mm. Com a definição da curva EEEP, determinou-se o fator de ductilidade (D) sendo:

$$D = \frac{v_u}{v_y} = \frac{14,97}{2,99} = 5,00$$

### A.1.2. Amostra P-150-55-1

Na Figura A.3.a são mostradas três curvas de força / deslocamento para a amostra P-150-55-1: uma curva com deslizamento medido no lado fechado (LF), uma com deslizamento medido no lado aberto (LA) e uma com deslizamento médio. Na Figura A.3.b é apresentada a curva média de força / deslocamento média normalizada.

Figura A.3 - Curvas de força / deslizamento para a amostra P-150-55-1.



a) Curvas força / deslizamento da amostra com deslizamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.

b) Curva força / deslizamento média normalizada.

A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 16,98 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 16,57 kN e o deslizamento último ( $v_u$ ) foi de 17,11 mm.

Com base na Figura A.3.b, percebe-se que para forças de até cerca de 18% de  $F_{m\acute{a}x}$  não houve deslizamento perceptível devido à acomodação inicial entre os parafusos, o perfil de aço e a placa de OSB. A partir de 18% de  $F_{m\acute{a}x}$ , a rigidez da amostra diminuiu até atingir cerca de 65% de  $F_{m\acute{a}x}$ . Após este ponto, notou-se um escorregamento entre aço e madeira, seguido de um outro trecho com uma rigidez um pouco menor que a do trecho anterior, até alcançar cerca de 95% de  $F_{m\acute{a}x}$ . A partir deste ponto, a amostra apresentou deslizamentos mais acentuados até alcançar  $F_{m\acute{a}x}$ . Após o pico de força resistente, a amostra apresentou perda de rigidez, até atingir 98% de  $F_{m\acute{a}x}$  no momento da falha.

A seguir são apresentados os módulos de deslizamento a 40% de  $F_{m\acute{a}x}$  ( $k_{s0,4}$ ), a 60% de  $F_{m\acute{a}x}$  ( $k_{s0,6}$ ) e a 80% de  $F_{m\acute{a}x}$  ( $k_{s0,8}$ ) a partir dos resultados de força e deslizamento mostrados na Figura A.3.a:

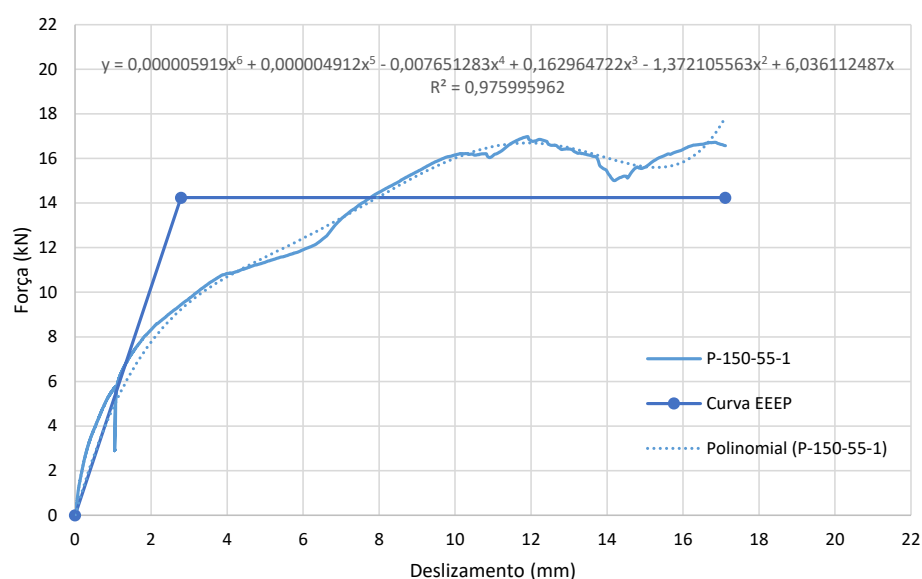
$$k_{s0,4} = \frac{0,4F_{m\acute{a}x}}{v_{0,4}} = \frac{0,4 \times 16,98}{1,33} = 5,1 \text{ kN/mm}$$

$$k_{s,0,6} = \frac{0,6F_{máx}}{\nu_{0,6}} = \frac{0,6 \times 16,98}{3,35} = 3,04 \text{ kN/mm}$$

$$k_{s,0,8} = \frac{0,8F_{máx}}{\nu_{0,8}} = \frac{0,8 \times 16,98}{7,21} = 1,88 \text{ kN/mm}$$

Na Figura A.4 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEE) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento.

Figura A.4 - Curva EEEP para a amostra P-150-55-1.



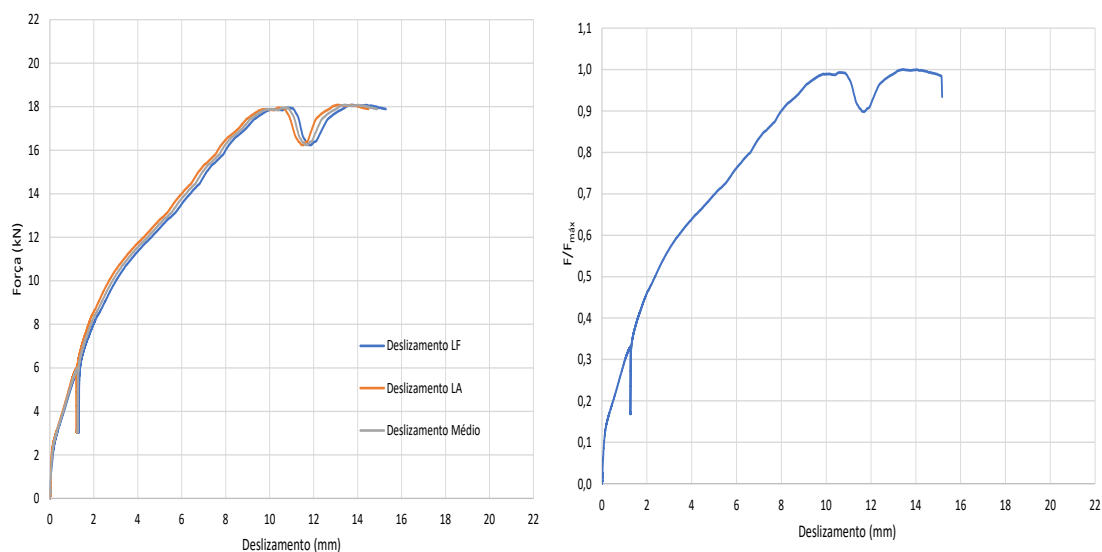
Para se obter a curva EEEP, determinou-se a força de escoamento ( $F_y$ ) e o deslizamento no escoamento ( $\nu_y$ ) de acordo com as expressões mostradas no item 2.3.4. Para a amostra P-150-55-1, obteve-se  $F_y = 14,24$  kN e  $\nu_y = 2,79$  mm. Com a definição da curva EEEP, determinou-se o fator de ductilidade (D) sendo:

$$D = \frac{\nu_u}{\nu_y} = \frac{17,11}{2,79} = 6,14$$

### A.1.3. Amostra P-150-55-2

Na Figura A.5.a são apresentadas três curvas de força / deslizamento: com deslizamento medido no lado fechado (LF), com deslizamento medido no lado aberto (LA) e com deslizamento médio. Na Figura A.5.b é mostrada a curva de força / deslizamento média normalizada.

Figura A.5 - Curvas de força / deslizamento para a amostra P-150-55-2.



- a) Curvas força / deslizamento da amostra com deslizamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.      b) Curva força / deslizamento média normalizada.

A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 18,08 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 17,20 kN e o deslizamento último ( $v_u$ ) foi de 15,15 mm.

Com base na Figura A.5.b, percebe-se que para forças de até cerca de 15% de  $F_{m\acute{a}x}$  não houve deslizamento perceptível devido à acomodação inicial entre os parafusos, o perfil de aço e a placa de OSB. A partir de 15% de  $F_{m\acute{a}x}$ , a conexão assume um outro valor de rigidez até atingir cerca de 60% de  $F_{m\acute{a}x}$ . Após este ponto, notou-se uma nova queda de rigidez até cerca de 72% de  $F_{m\acute{a}x}$ , seguido de um outro trecho com uma rigidez um pouco maior do que a do trecho anterior, até alcançar cerca de 98% de  $F_{m\acute{a}x}$ . A partir deste ponto, a amostra apresentou deslizamentos mais acentuados até alcançar  $F_{m\acute{a}x}$ . Após o pico de força resistente, a amostra apresentou perda de rigidez, até atingir 98% de  $F_{m\acute{a}x}$  no momento da falha.

A seguir são apresentados os módulos de deslizamento a 40% de  $F_{m\acute{a}x}$  ( $k_{s0,4}$ ), a 60% de  $F_{m\acute{a}x}$  ( $k_{s0,6}$ ) e a 80% de  $F_{m\acute{a}x}$  ( $k_{s0,8}$ ) a partir dos resultados de força e deslizamento mostrados na Figura A.5.a:

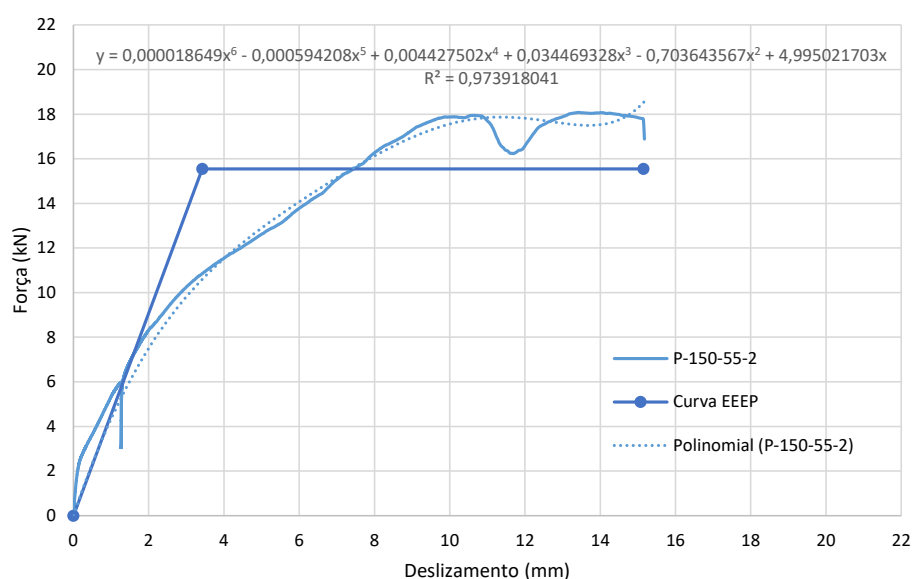
$$k_{s0,4} = \frac{0,4F_{m\acute{a}x}}{v_{0,4}} = \frac{0,4 \times 18,08}{1,59} = 4,54 \text{ kN/mm}$$

$$k_{s,0,6} = \frac{0,6F_{m\acute{a}x}}{v_{0,6}} = \frac{0,6 \times 18,08}{3,42} = 3,17 \text{ kN/mm}$$

$$k_{s,0,8} = \frac{0,8F_{m\acute{a}x}}{v_{0,8}} = \frac{0,8 \times 18,08}{6,62} = 2,19 \text{ kN/mm}$$

Na Figura A.6 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEE) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento.

Figura A.6 - Curva EEEP para a amostra P-150-55-2.



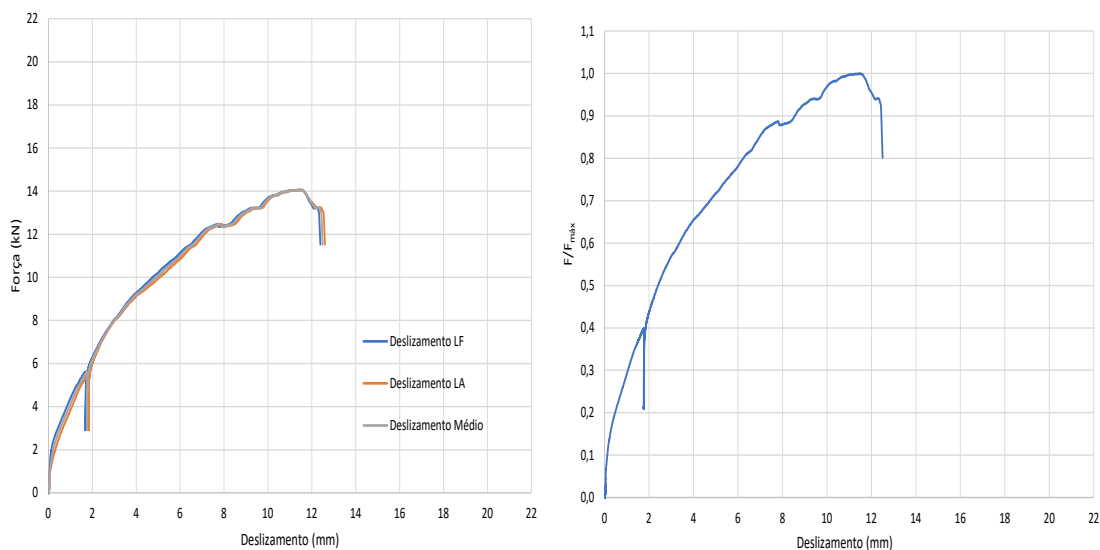
Para se obter a curva EEEP, determinou-se a força de escoamento ( $F_y$ ) e o deslizamento no escoamento ( $v_y$ ) de acordo com as expressões mostradas no item 2.3.4. Para a amostra P-150-55-2, obteve-se  $F_y = 15,55$  kN e  $v_y = 3,43$  mm. Com a definição da curva EEEP, determinou-se o fator de ductilidade (D) sendo:

$$D = \frac{v_u}{v_y} = \frac{15,15}{3,43} = 4,42$$

#### A.1.4. Amostra P-150-55-3

Na Figura A.7.a são apresentadas três curvas força / deslizamento: com deslizamento medido no lado fechado (LF), com deslizamento medido no lado aberto (LA) e com deslizamento médio. Na Figura A.7.b é mostrada a curva de força / deslizamento média normalizada.

Figura A.7 - Curvas força / deslizamento para a amostra P-150-55-3



- a) Curvas força / deslizamento da amostra com deslizamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.      b) Curva força / deslizamento média normalizada.

A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 14,06 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 12,77 kN e o deslizamento último ( $v_u$ ) foi de 12,43 mm.

Com base na Figura A.7.b, percebe-se que para forças de até cerca de 15% de  $F_{m\acute{a}x}$  não houve deslizamento perceptível devido à acomodação inicial entre os parafusos, o perfil de aço e a placa de OSB. A partir de 15% de  $F_{m\acute{a}x}$ , a rigidez da amostra diminuiu até atingir cerca de 89% de  $F_{m\acute{a}x}$ . Após este ponto, notou-se uma nova queda de rigidez até alcançar  $F_{m\acute{a}x}$ . A partir deste ponto, a amostra apresentou pouco deslizamento relativo e alcançou a falha ao atingir 91% de  $F_{m\acute{a}x}$ .

A seguir são apresentados os módulos de deslizamento a 40% de  $F_{m\acute{a}x}$  ( $k_{s0,4}$ ), a 60% de  $F_{m\acute{a}x}$  ( $k_{s0,6}$ ) e a 80% de  $F_{m\acute{a}x}$  ( $k_{s0,8}$ ) a partir dos resultados de força e deslizamento mostrados na Figura A.7.a.

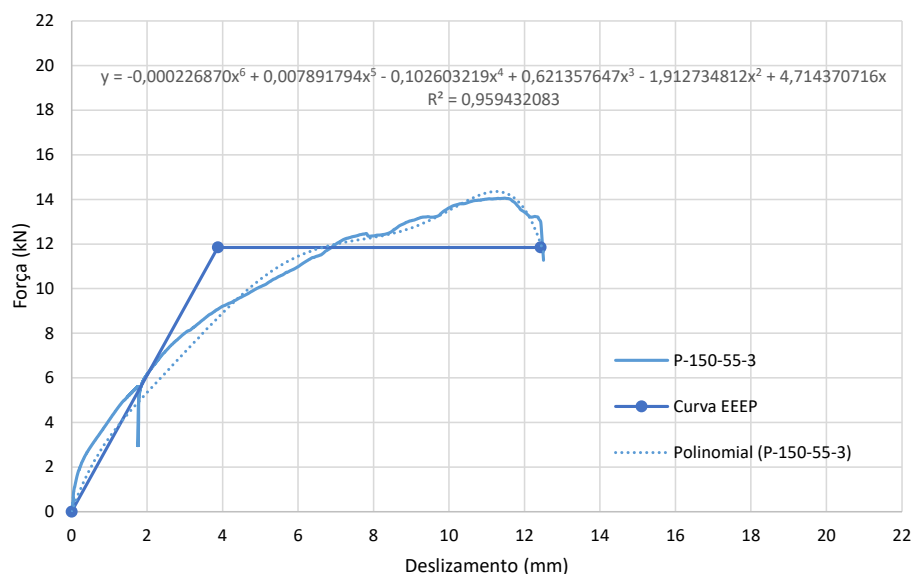
$$k_{s0,4} = \frac{0,4F_{m\acute{a}x}}{v_{0,4}} = \frac{0,4 \times 14,06}{1,84} = 3,06 \text{ kN/mm}$$

$$k_{s0,6} = \frac{0,6F_{m\acute{a}x}}{v_{0,6}} = \frac{0,6 \times 14,06}{3,36} = 2,51 \text{ kN/mm}$$

$$k_{s,0,8} = \frac{0,8F_{m\acute{a}x}}{v_{0,8}} = \frac{0,8 \times 14,06}{6,24} = 1,80 \text{ kN/mm}$$

Na Figura A.8 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEE) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento.

Figura A.8 - Curva EEEP para a amostra P-150-55-3.



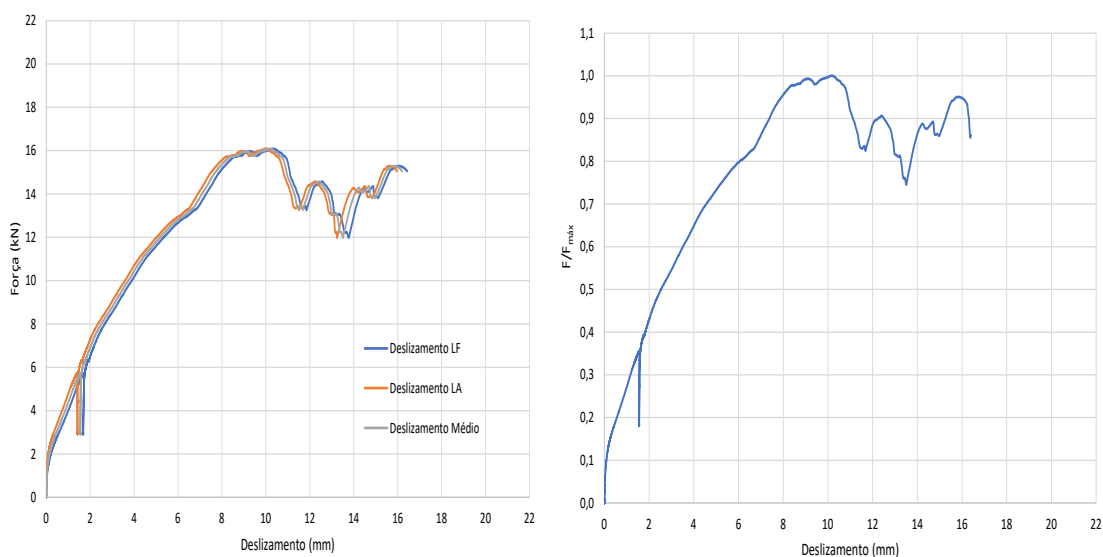
Para se obter a curva EEEP, determinou-se a força de escoamento ( $F_y$ ) e o deslizamento no escoamento ( $v_y$ ) de acordo com as expressões mostradas no item 2.3.4. Para a amostra P-150-55-3, obteve-se  $F_y = 11,85$  kN e  $v_y = 3,88$  mm. Com a definição da curva EEEP, determinou-se o fator de ductilidade (D) sendo:

$$D = \frac{v_u}{v_y} = \frac{12,43}{3,88} = 3,21$$

#### A.1.5. Amostra P-150-55-A

Na Figura A.9.a são apresentadas três curvas de força / deslizamento: com deslizamento medido no lado fechado (LF), com deslizamento medido no lado aberto (LA) e com deslizamento médio. Na Figura A.9.b é mostrada a curva de força / deslizamento média normalizada.

Figura A.9 - Curvas força / deslizamento para a amostra P-150-55-A.



- a) Curvas força / deslizamento da amostra com deslizamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.      b) Curva força / deslizamento média normalizada.

A força resistente máxima ( $F_{máx}$ ) obtida neste ensaio foi de 16,09 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 14,72 kN e o deslizamento último ( $v_u$ ) foi de 16,27 mm.

Com base na Figura A.9.b, percebe-se que para forças de até cerca de 15% de  $F_{máx}$  não houve deslizamento perceptível devido à acomodação inicial entre os parafusos, o perfil de aço e a placa de OSB. A partir de 15% de  $F_{máx}$ , a rigidez da amostra diminuiu até atingir cerca de 80% de  $F_{máx}$ . Após este ponto, notou-se um pequeno escorregamento entre aço e madeira, seguido de um outro trecho com uma rigidez um pouco maior que a do trecho anterior, até alcançar  $F_{máx}$ . A partir deste ponto, a amostra apresentou deslizamentos mais acentuados até atingir 91% de  $F_{máx}$  no momento da falha.

A seguir são apresentados os módulos de deslizamento a 40% de  $F_{máx}$  ( $k_{s,0,4}$ ), a 60% de  $F_{máx}$  ( $k_{s,0,6}$ ) e a 80% de  $F_{máx}$  ( $k_{s,0,8}$ ) a partir dos resultados de força e deslizamento mostrados na Figura A.9.a:

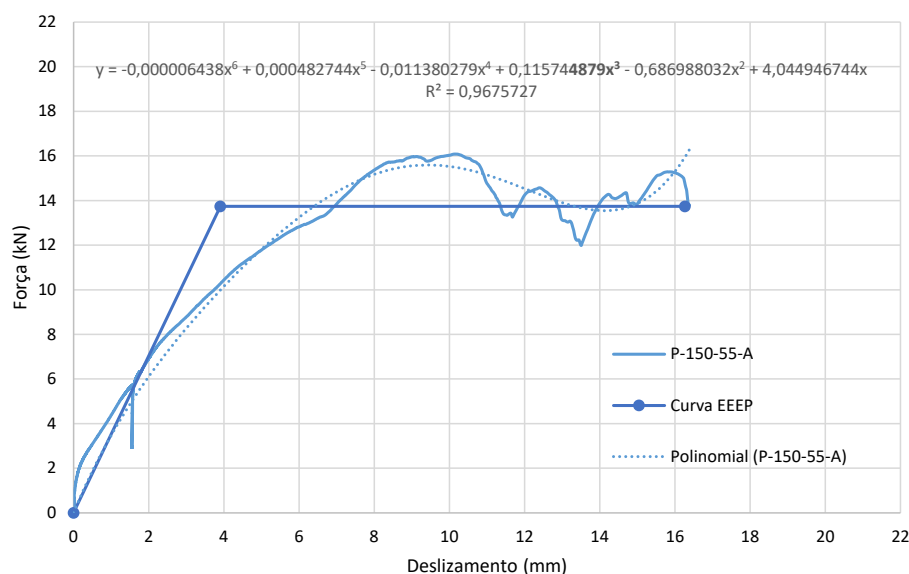
$$k_{s,0,4} = \frac{0,4F_{máx}}{v_{0,4}} = \frac{0,4 \times 16,09}{1,83} = 3,52 \text{ kN/mm}$$

$$k_{s,0,6} = \frac{0,6F_{máx}}{v_{0,6}} = \frac{0,6 \times 16,09}{3,51} = 2,75 \text{ kN/mm}$$

$$k_{s,08} = \frac{0,8F_{m\acute{a}x}}{\nu_{0,8}} = \frac{0,8 \times 16,09}{6,06} = 2,12 \text{ kN/mm}$$

Na Figura A.10 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEE) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento.

Figura A.10 - Curva EEEP para a amostra P-150-55-A.



Para se obter a curva EEEP, determinou-se a força de escoamento ( $F_y$ ) e o deslizamento no escoamento ( $\nu_y$ ) de acordo com as expressões mostradas no item 2.3.4. Para a amostra P-150-55-A, obteve-se  $F_y = 13,74$  kN e  $\nu_y = 3,91$  mm. Com a definição da curva EEEP, determinou-se o fator de ductilidade ( $D$ ) sendo:

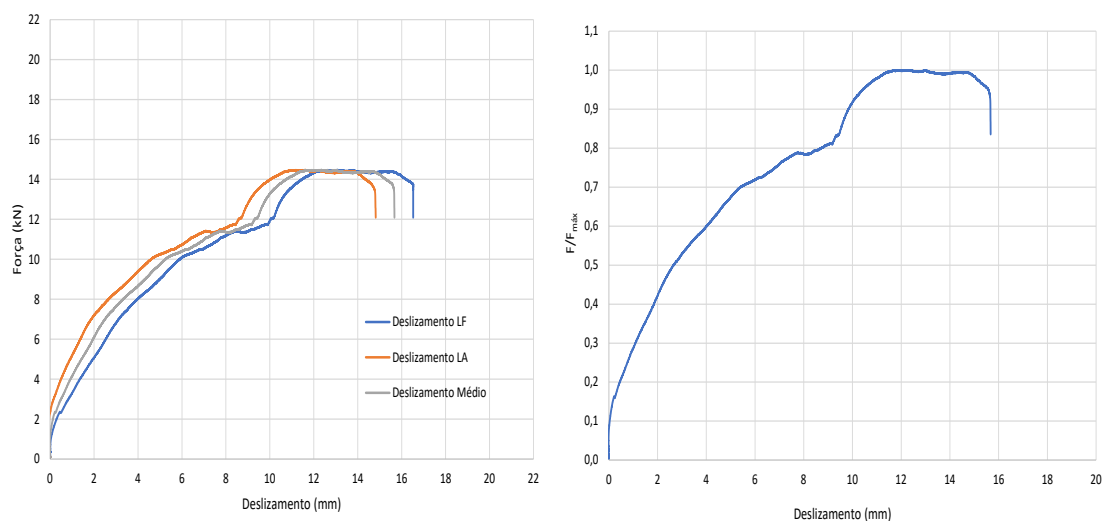
$$D = \frac{\nu_u}{\nu_y} = \frac{16,27}{3,91} = 4,16$$

## A.2. Modelo 2: P-200-55

### A.2.1. Amostra P-200-55-0

Na Figura A.11.a são apresentadas as curvas de força / deslizamento da amostra P-200-55 e na Figura A.11.b é mostrada a curva de força / deslizamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 14,39 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 13,73 kN e o deslizamento último ( $\nu_u$ ) foi de 15,59 mm.

Figura A.11 - Curvas força / deslizamento para a amostra P-200-55-0.



- a) Curvas força / deslizamento da amostra com deslocamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.      b) Curva força / deslizamento média normalizada.

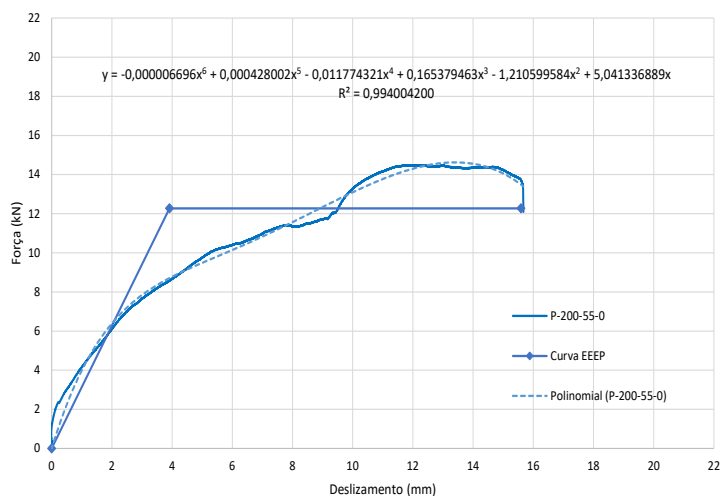
Na Tabela A.1 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{m\acute{a}x}$ , obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.1 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-55-0

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-200-55-0	3,14	2,17	1,34

Na Figura 4.12 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-200-55-1, obteve-se  $F_y = 12,27$  kN,  $v_y = 3,91$  mm e  $D = 3,98$ .

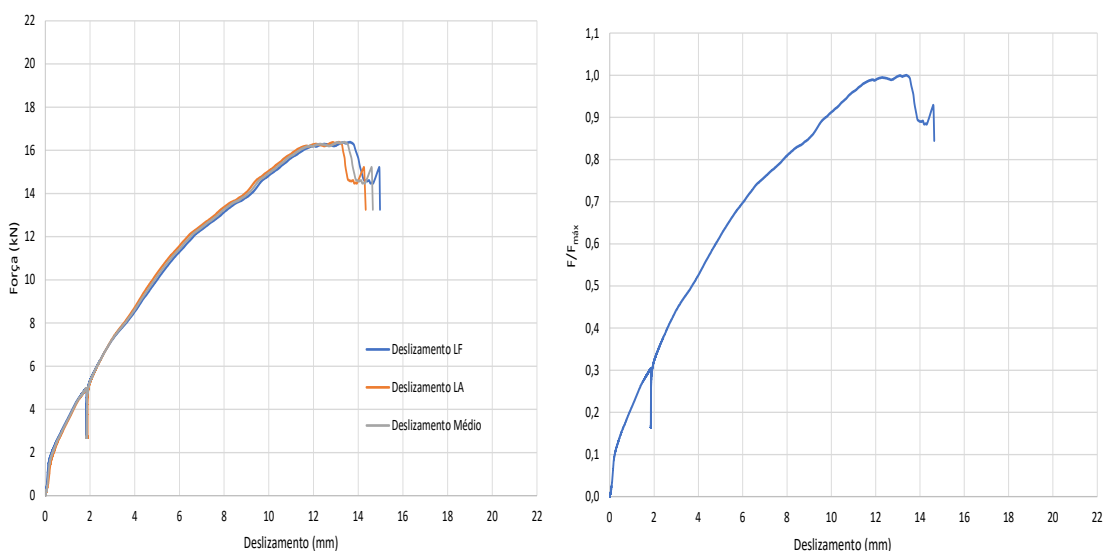
Figura A.12 - Curva EEEP para a amostra P-200-55-0.



### A.2.2. Amostra P-200-55-1

Na Figura A.13.a são apresentadas as curvas de força / deslocamento para a amostra P-200-55-1. Na Figura A.13.b é mostrada a curva de força / deslocamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 16,38 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 14,95 kN e o deslocamento último ( $v_u$ ) foi de 14,62 mm.

Figura A.13 - Curvas força / deslocamento para a amostra P-200-55-1.



a) Curvas força / deslocamento da amostra com deslocamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.

b) Curva força / deslocamento média normalizada.

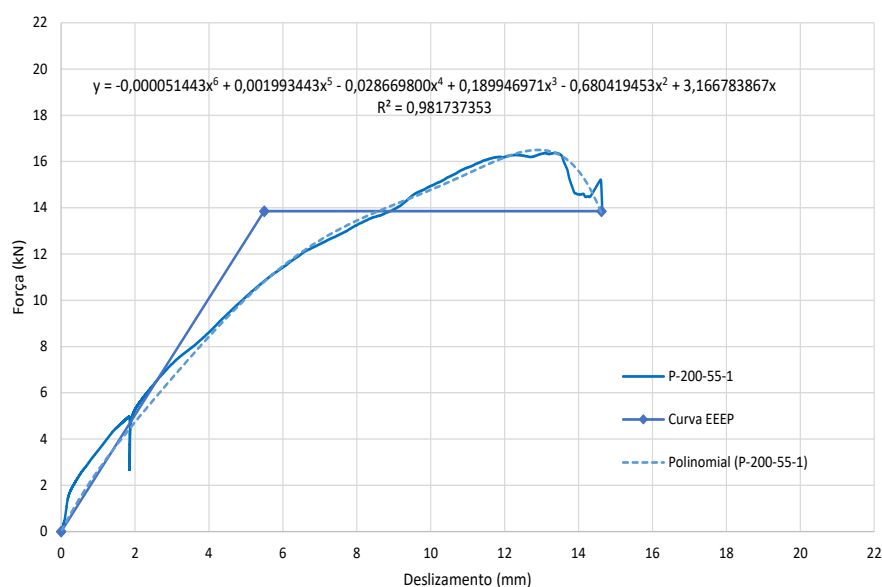
Na Tabela A.2 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{m\acute{a}x}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.2 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-55-1

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-200-55-1	2,52	2,06	1,68

Na Figura A.14 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-200-55-1, obteve-se  $F_y = 13,85$  kN,  $v_y = 5,50$  mm e  $D = 2,66$ .

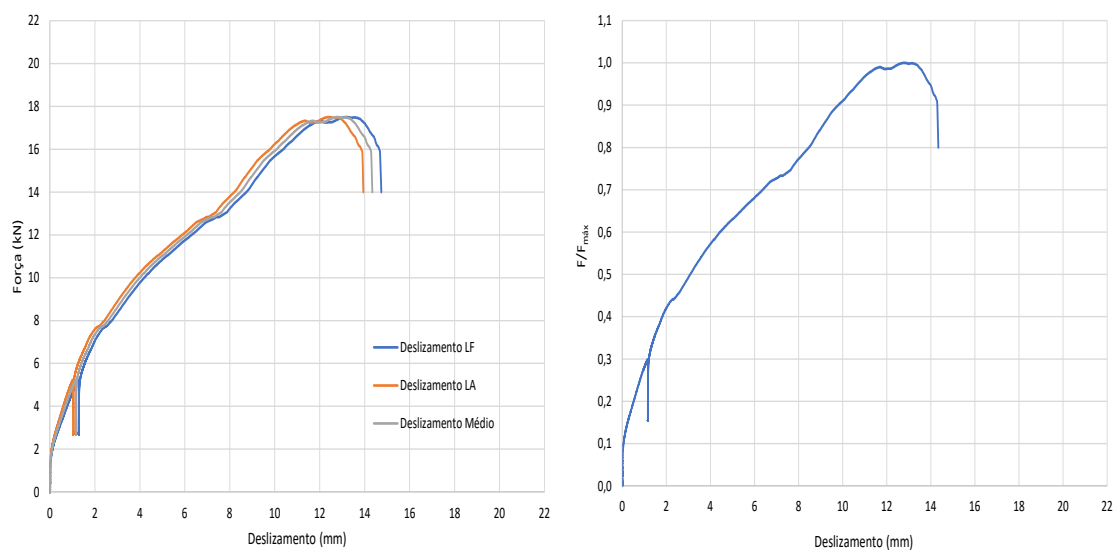
Figura A.14 - Curva EEEP para a amostra P-200-55-1.



### A.2.3. Amostra P-200-55-2

Na Figura A.15.a são apresentadas curvas de força / deslizamento para a amostra P-200-55-2. Na Figura A.15.b é mostrada a curva de força / deslizamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 17,50 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 15,79 kN e o deslizamento último ( $v_u$ ) foi de 14,29 mm.

Figura A.15 - Curvas força / deslizamento para a amostra P-200-55-2.



- a) Curvas força / deslizamento da amostra com deslizamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.      b) Curva força / deslizamento média normalizada.

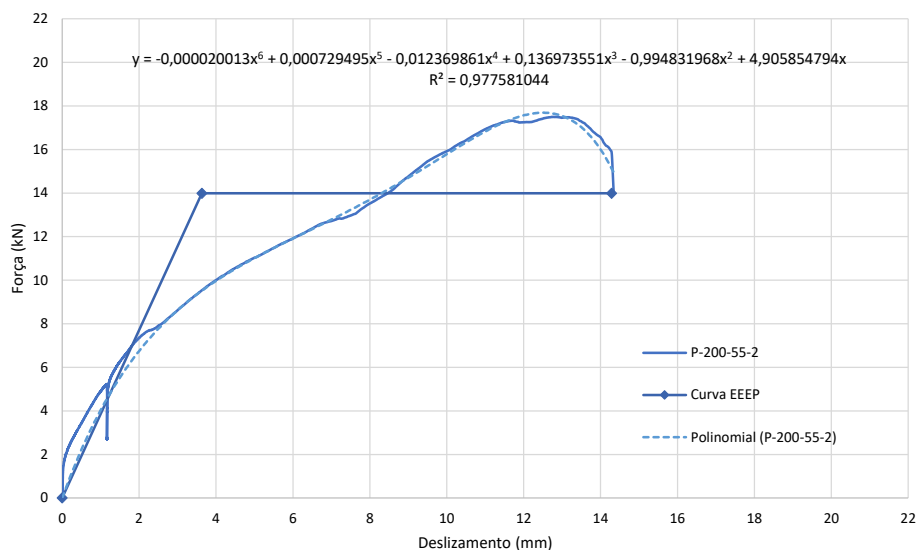
Na Tabela A.3 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{\max}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.3 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-55-2.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-200-55-2	3,85	2,37	1,65

Na Figura A.16 estão apresentadas a curva de força / deslizamento obtida no ensaio, a curva equivalente de energia elasto-plástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-200-55-2 obteve-se  $F_y = 13,99$  kN,  $v_y = 3,63$  mm e  $D = 3,98$ .

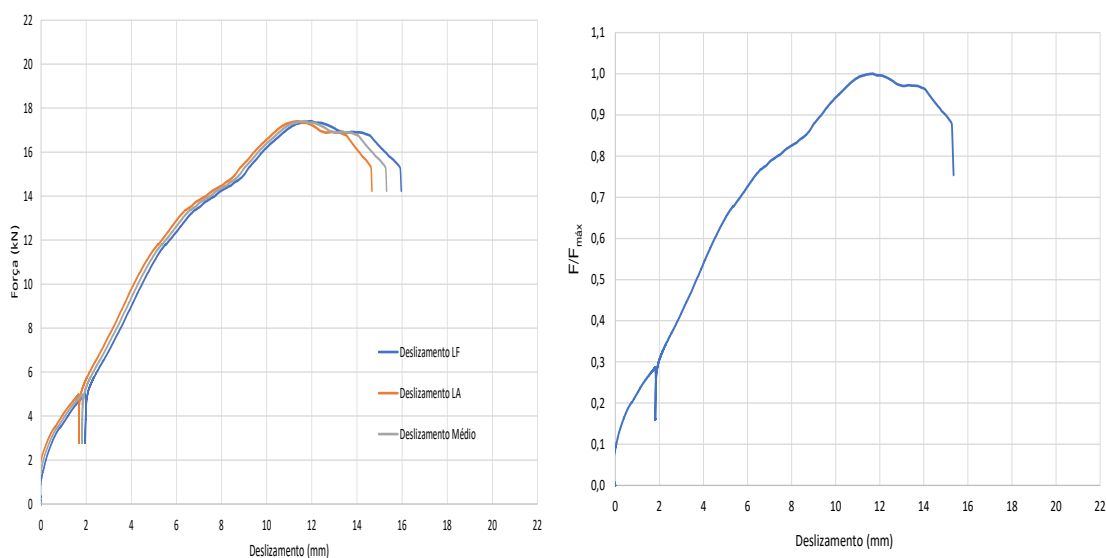
Figura A.16 - Curva EEEP para a amostra P-200-55-2.



#### A.2.4. Amostra P-200-55-3

Na Figura A.17.a são apresentadas curvas de força / deslocamento para a amostra P-200-55-3. Na Figura A.17.b é mostrada a curva de força / deslocamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{máx}$ ) obtida neste ensaio foi de 17,41 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 15,06 kN e o deslocamento último ( $v_u$ ) foi de 15,29 mm.

Figura A.17 - Curvas força / deslocamento para a amostra P-200-55-3.



a) Curvas força / deslocamento da amostra com deslocamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.

b) Curva força / deslocamento média normalizada.

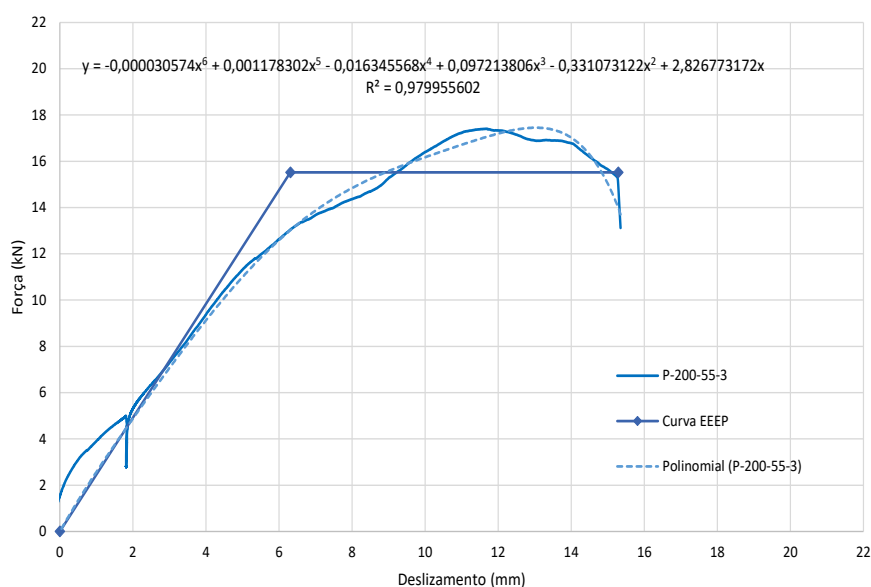
Na Tabela A.4 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{m\acute{a}x}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.4 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-55-3.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-200-55-3	2,46	2,31	1,89

Na Figura A.18 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-200-55-3, obteve-se  $F_y = 15,52$  kN,  $v_y = 6,31$  mm e  $D = 2,42$ .

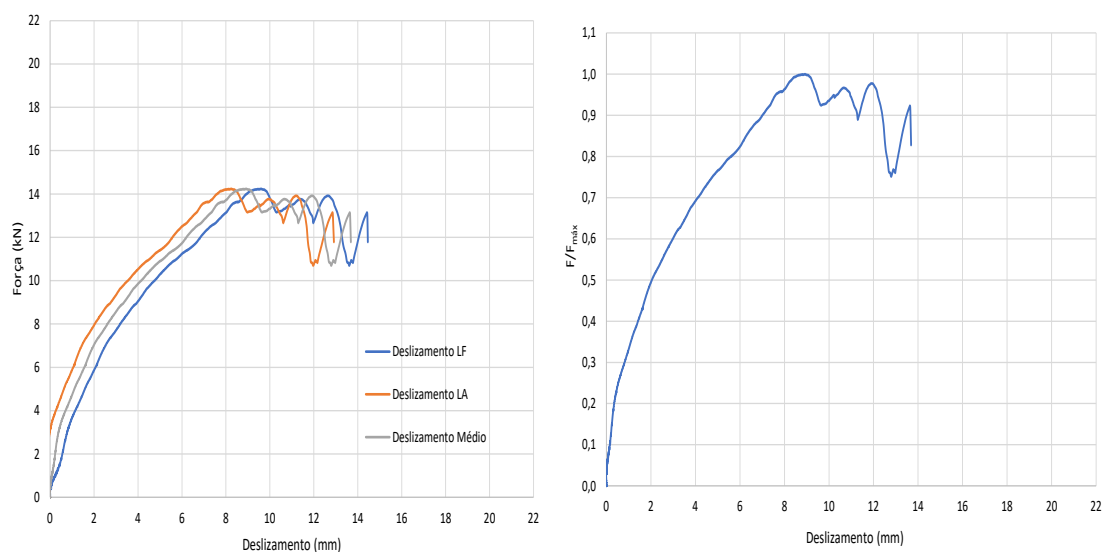
Figura A.18 - Curva EEEP para a amostra P-200-55-3.



### A.2.5. Amostra P-200-55-A

Na Figura A.19.a são apresentadas curvas de força / deslizamento para a amostra P-200-55-A. Na Figura A.19.b é mostrada a curva de força / deslizamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 14,24 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 12,80 kN e o deslizamento último ( $v_u$ ) foi de 13,97 mm.

Figura A.19 - Curvas de força / deslizamento para a amostra P-200-55-A



- a) Curvas força / deslizamento da amostra com deslocamentos medidos nos lados LA (lado aberto) e LF (lado fechado).      b) Curva força / deslizamento média normalizada.

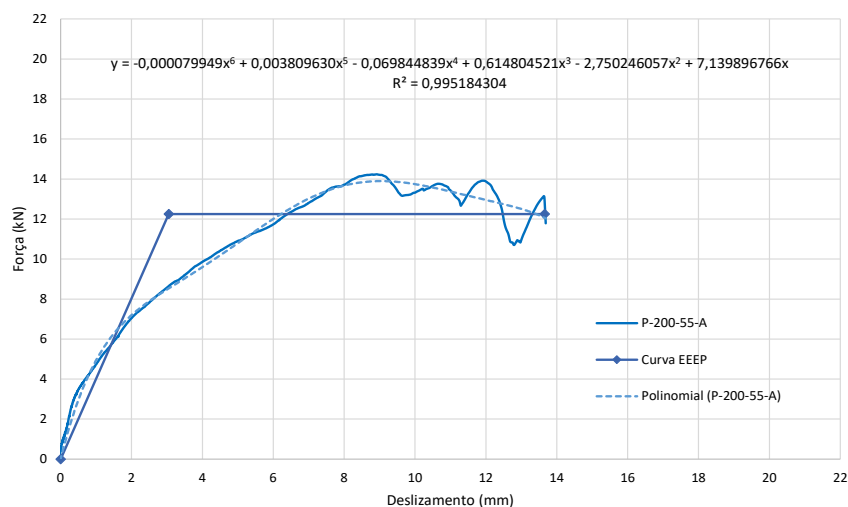
Na Tabela A.5 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{\text{máx}}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.5 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-55-A.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-200-55-A	4,02	2,87	2,04

Na Figura A.20 apresenta-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-200-55-A, obteve-se  $F_y = 12,25$  kN e  $v_y = 3,05$  mm e  $D = 4,48$ .

Figura A.20 - Curva EEEP para a amostra P-200-55-A.

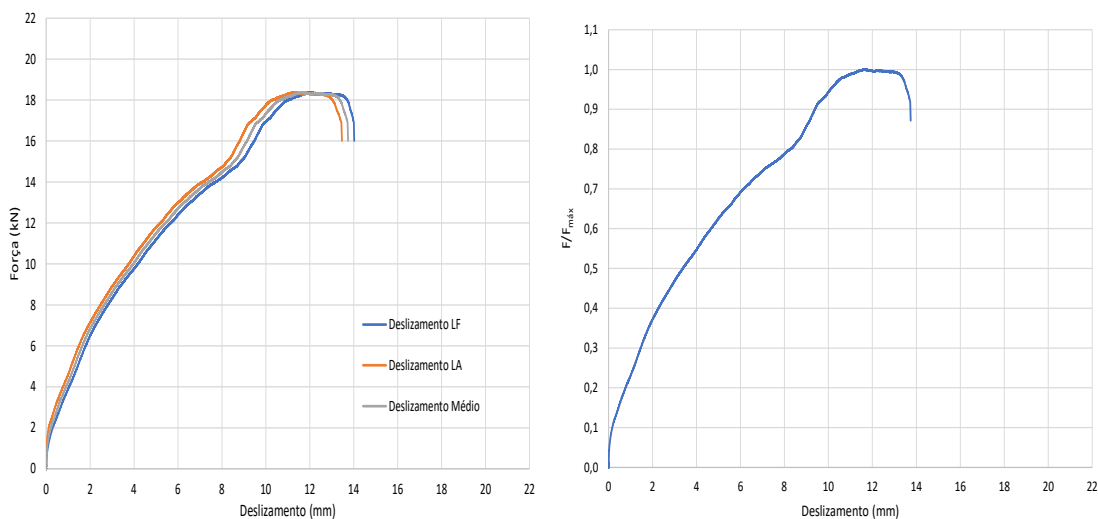


### A.3. Modelo 3: P-250-55

#### A.3.1. Amostra P-250-55-0

Na Figura A.21.a são apresentadas curvas de força / deslocamento para a amostra P-250-55-0. Na Figura A.21.b é mostrada a curva de força / deslocamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 18,35 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 16,94 kN e o deslocamento último ( $v_u$ ) foi de 13,91 mm.

Figura A.21 - Curvas de força / deslocamento para a amostra P-250-55-0



a) Curvas força / deslocamento da amostra com deslocamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.

b) Curva força / deslocamento média normalizada.

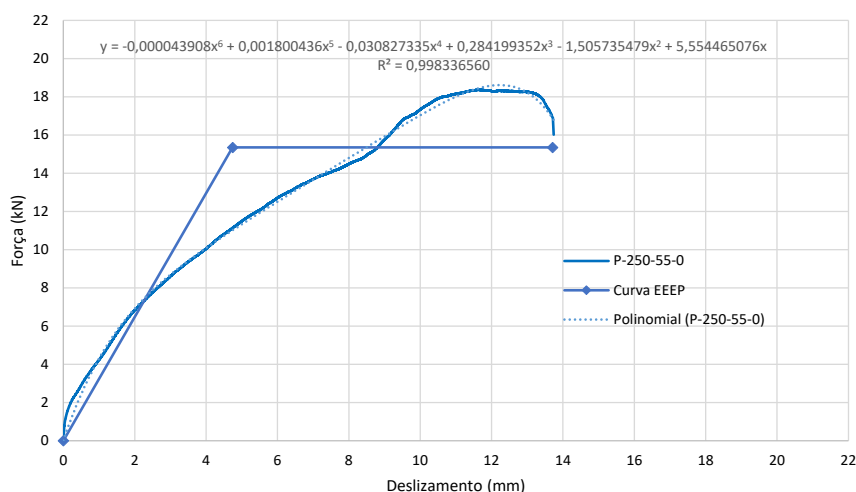
Na Tabela A.6 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{m\acute{a}x}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.6 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-55-0.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-250-55-0	3,24	2,37	1,78

Na Figura A.22 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-250-55-0, obteve-se  $F_y = 15,35$  kN,  $v_y = 4,74$  mm e  $D = 2,89$ .

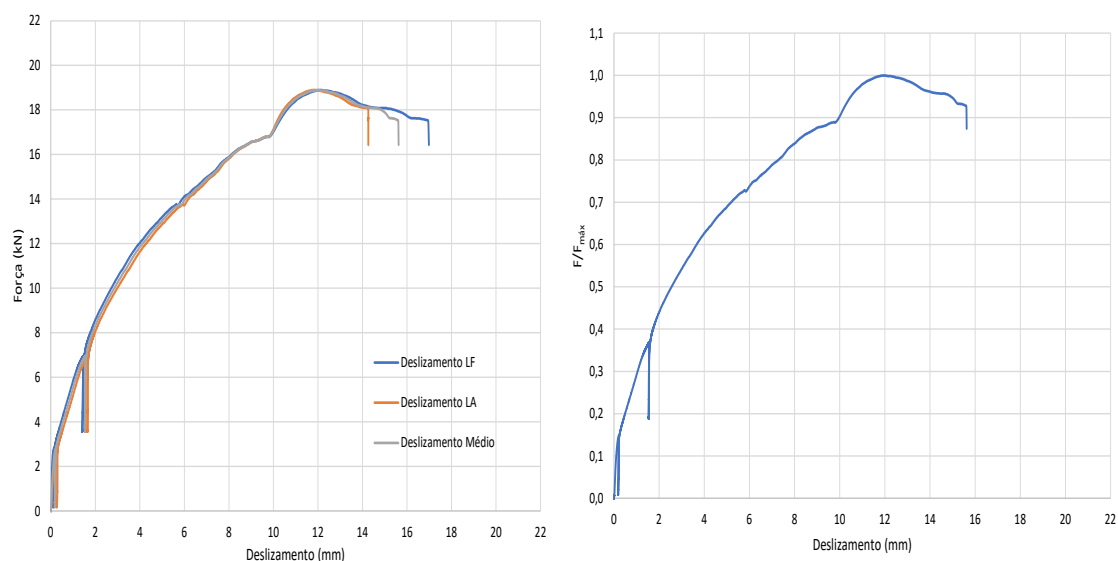
Figura A.22 - Curva EEEP para a amostra P-250-55-0.



### A.3.2. Amostra P-250-55-1

Na Figura A.23.a são apresentadas curvas de força / deslizamento para a amostra P-250-55-1. Na Figura A.23.b é mostrada a curva de força / deslizamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 18,89 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 17,54 kN e o deslizamento último ( $v_u$ ) foi de 15,60 mm.

Figura A.23 - Curvas de força / deslizamento para a amostra P-250-55-1



- a) Curvas força / deslizamento da amostra com deslizamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.      b) Curva força / deslizamento média normalizada.

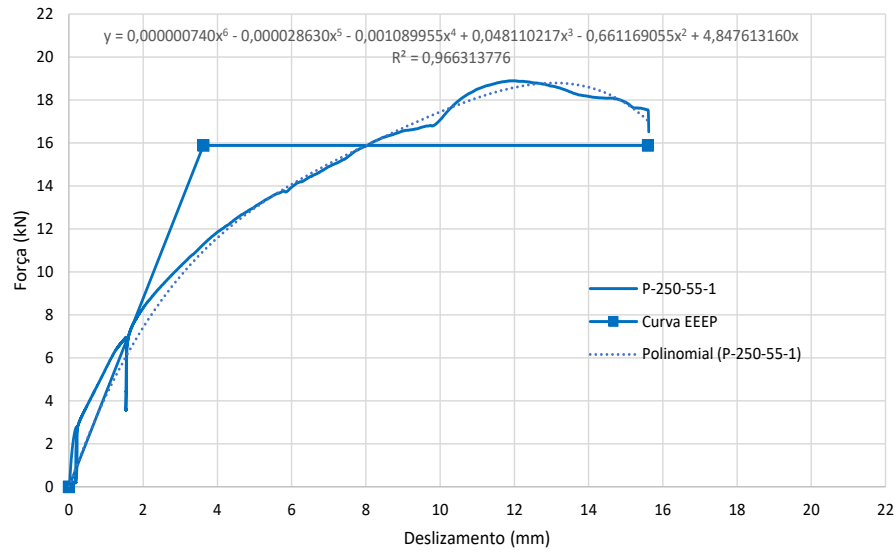
Na Tabela A.7 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{\text{máx}}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.7 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-55-1.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-250-55-1	4,38	3,1	2,08

Na Figura A.24 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elasto-plástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-250-55-1, obteve-se  $F_y = 15,89$  kN,  $v_y = 3,62$  mm e  $D = 4,30$ .

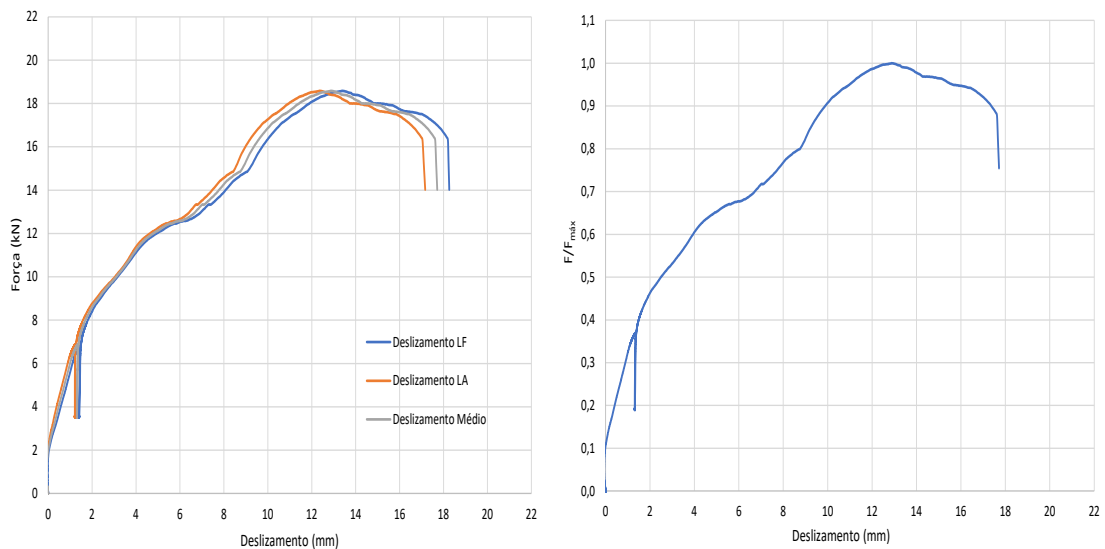
Figura A.24 - Curva EEEP para a amostra P-250-55-1.



### A.3.3. Amostra P-250-55-2

Na Figura A.25.a são apresentadas as curvas de força / deslocamento para a amostra P-250-55-2. Na Figura A.25.b é mostrada a curva de força / deslocamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) atingiu o valor de 18,85 kN, a força resistente última resistente ( $F_u$ ) foi igual a 16,27 kN e o deslocamento último ( $v_u$ ) foi igual a 17,62 mm.

Figura A.25 - Curvas de força / deslocamento para amostra P-250-55-2



a) Curvas força / deslocamento da amostra com deslocamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.

b) Curva força / deslocamento média normalizada.

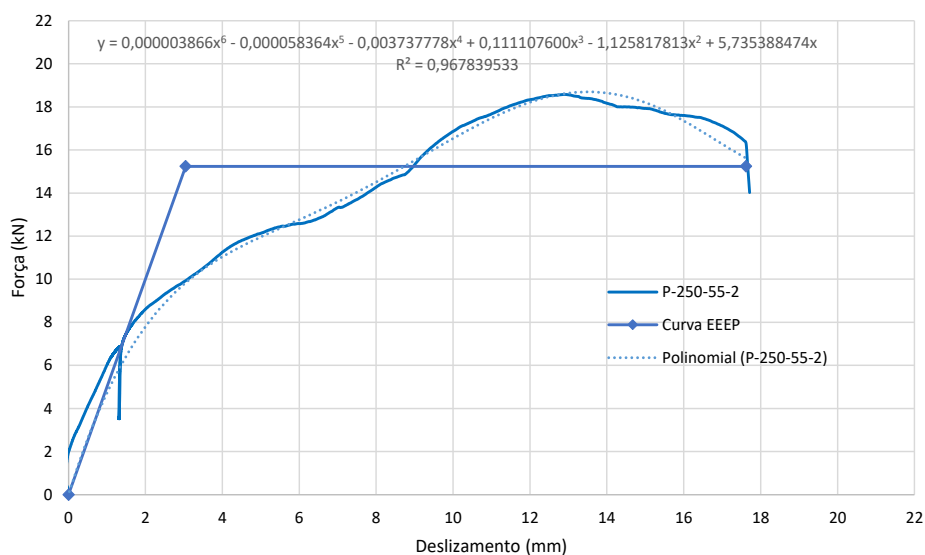
Na Tabela A.8 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{m\acute{a}x}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.8 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-55-2.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-250-55-2	5,00	2,83	1,70

Na Figura A.26 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-250-55-2, obteve-se  $F_y = 15,24$  kN,  $v_y = 3,05$  mm e  $D = 5,79$ .

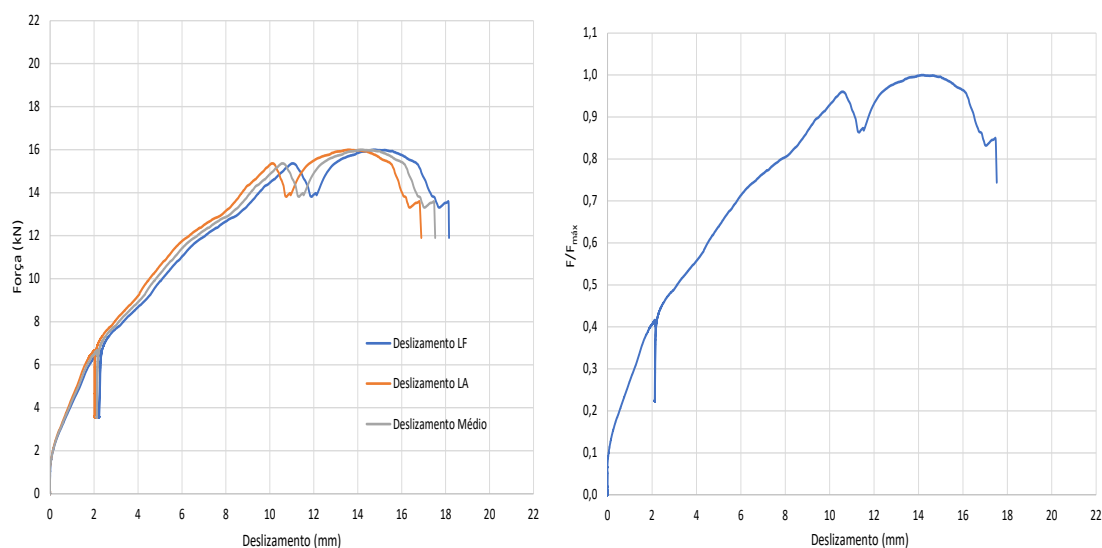
Figura A.26 - Curva EEEP para a amostra P-250-55-2.



#### A.3.4. Amostra P-250-55-3

Na Figura A.27.a são apresentadas as curvas de força / deslizamento para a amostra P-250-55-3. Na Figura A.27.b é mostrada a curva de força / deslizamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) atingiu o valor de 16,00 kN, a força resistente última resistente ( $F_u$ ) foi igual a 13,32 kN e o deslizamento último ( $v_u$ ) foi igual a 17,40 mm.

Figura A.27 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-250-55-3



- a) Curvas força / deslizamento da amostra com deslocamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.      b) Curva força / deslizamento média normalizada.

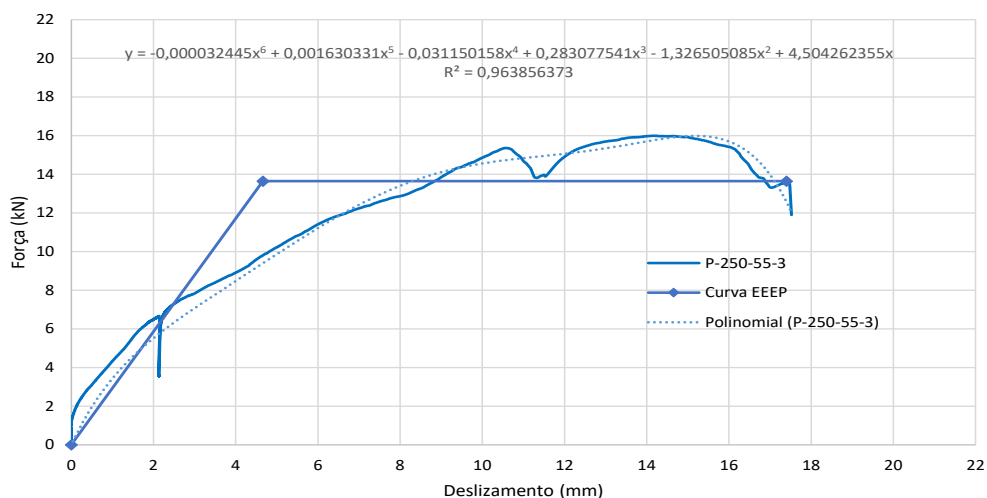
Na Tabela A.9 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{máx}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.9 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-55-3.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-250-55-3	2,92	2,13	1,63

Na Figura A.28 está apresentado um gráfico com a curva de força / deslizamento obtida no ensaio, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-250-55-3, obteve-se  $F_y = 13,64$  kN e  $v_y = 4,66$  mm e  $D = 3,73$ .

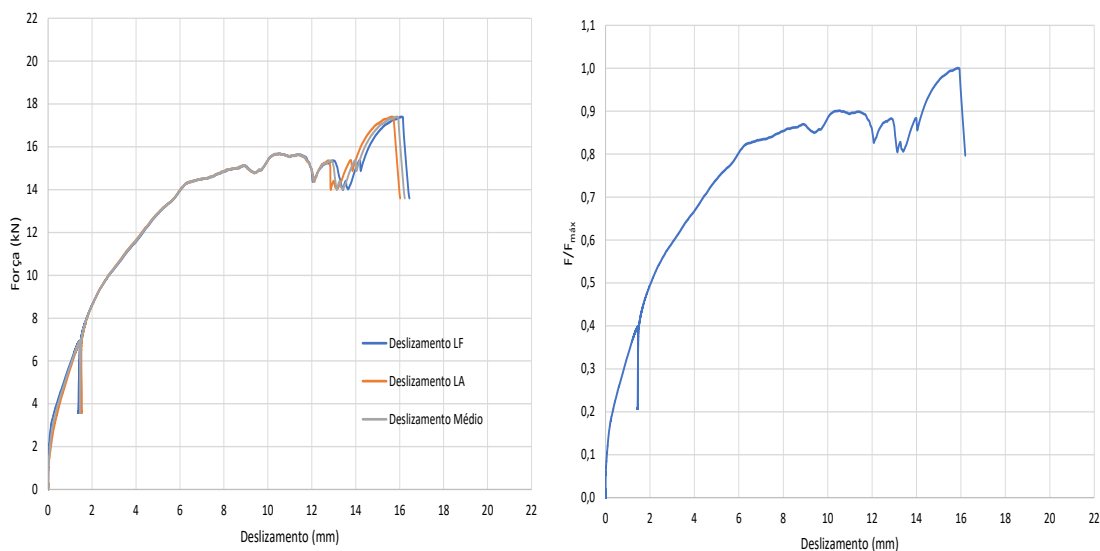
Figura A.28 - Curva EEEP para a amostra P-250-55-3.



### A.3.5. Amostra P-250-55-A

Na Figura A.29.a são apresentadas as três curvas de força / deslocamento para a amostra P-250-55-A. Na Figura A.29.b é mostrada a curva de força / deslocamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 17,39 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 17,39 kN e o deslocamento último ( $v_u$ ) foi de 15,91 mm.

Figura A.29 - Curvas de força / deslocamento da amostra P-250-55-A



a) Curvas força / deslocamento da amostra com deslocamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.

b) Curva força / deslocamento média normalizada.

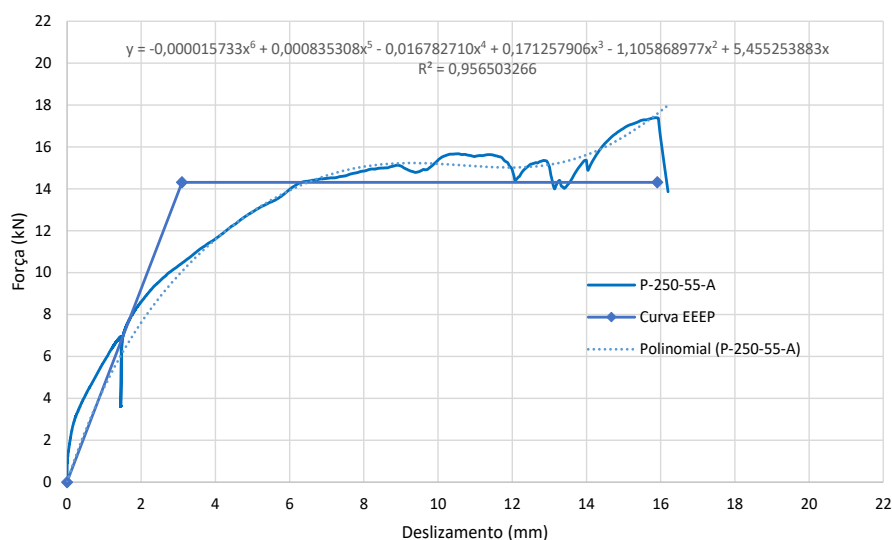
Na Tabela A.10 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{m\acute{a}x}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.10 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-55-A.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-250-55-A	4,62	3,38	2,33

Na Figura A.30 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEE) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-250-55-A, obteve-se  $F_y = 14,31$  kN,  $v_y = 3,10$  mm e  $D = 3,10$ .

Figura A.30 - Curva EEEP para a amostra P-250-55-A.

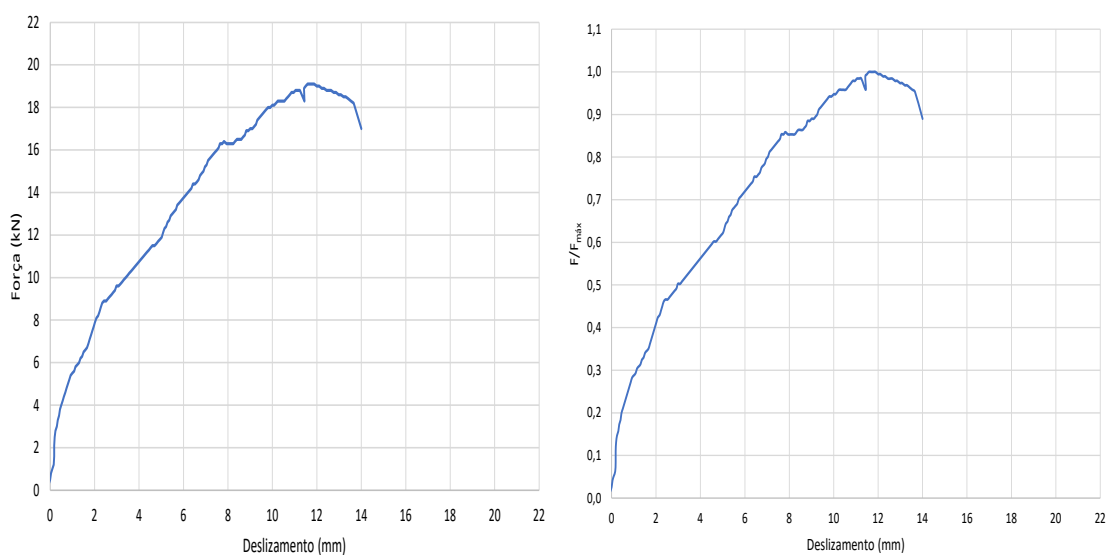


#### A.4. Modelo 4: P-150-63

##### A.4.1. Amostra P-150-63-0

Na Figura A.31.a está apresentada a curva de força / deslizamento para a amostra P-150-63-0. Na Figura A.31.b é mostrada a curva de força / deslizamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 19,10 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 17,00 kN e o deslizamento último ( $v_u$ ) foi de 14,00 mm.

Figura A.31 - Curvas de força / deslizamento para a amostra P-150-63-0.



a) Curvas força / deslizamento da amostra      b) Curva força / deslizamento média normalizada.

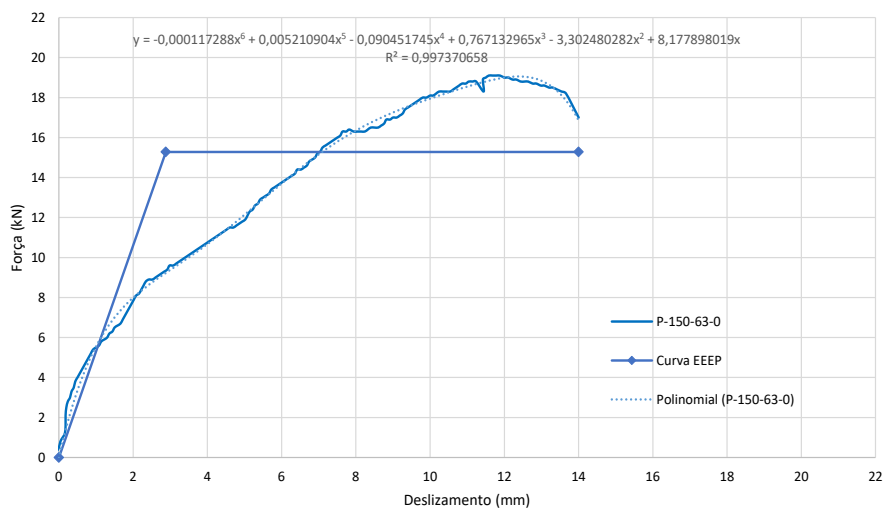
Na Tabela A.11 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{\text{máx}}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.11 – Módulos de deslizamento para a amostra P-150-63-0.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-150-63-0	4,02	2,54	2,20

Na Figura A.32 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-150-63-0, obteve-se  $F_y = 15,28$  kN,  $v_y = 2,88$  mm e  $D = 4,86$ .

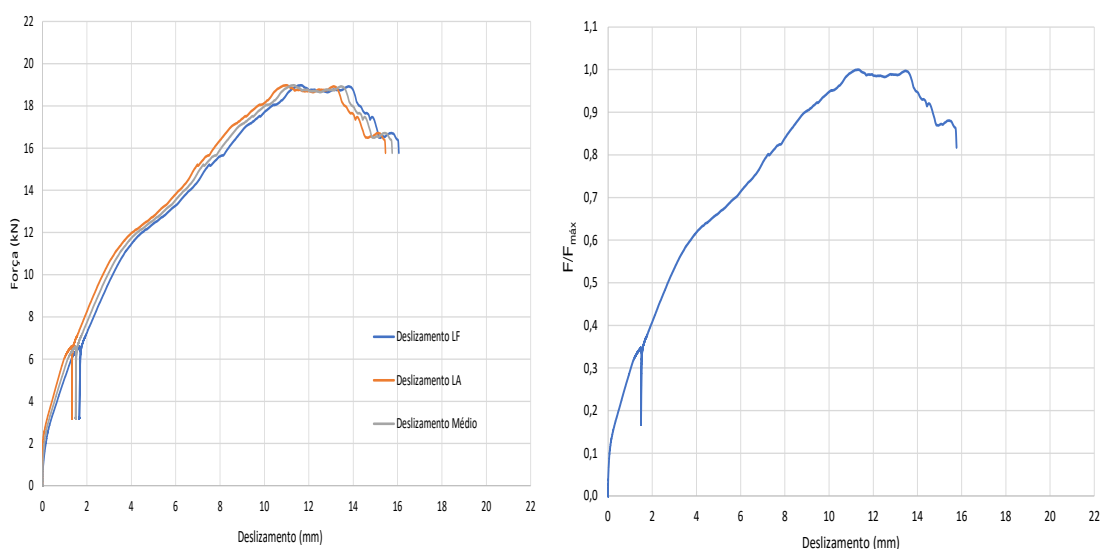
Figura A.32 - Curva EEEP para a amostra P-150-63-0.



#### A.4.2. Amostra P-150-63-1

Na Figura A.33.a são apresentadas as curvas de força / deslocamento para a amostra P-150-63-1. Na Figura A.33.b é mostrada a curva de força / deslocamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 18,98 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 16,27 kN e o deslocamento último ( $v_u$ ) foi de 15,74 mm.

Figura A.33 - Curvas de força / deslocamento para a amostra P-150-63-1



a) Curvas força / deslocamento da amostra com deslocamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.

b) Curva força / deslocamento média normalizada.

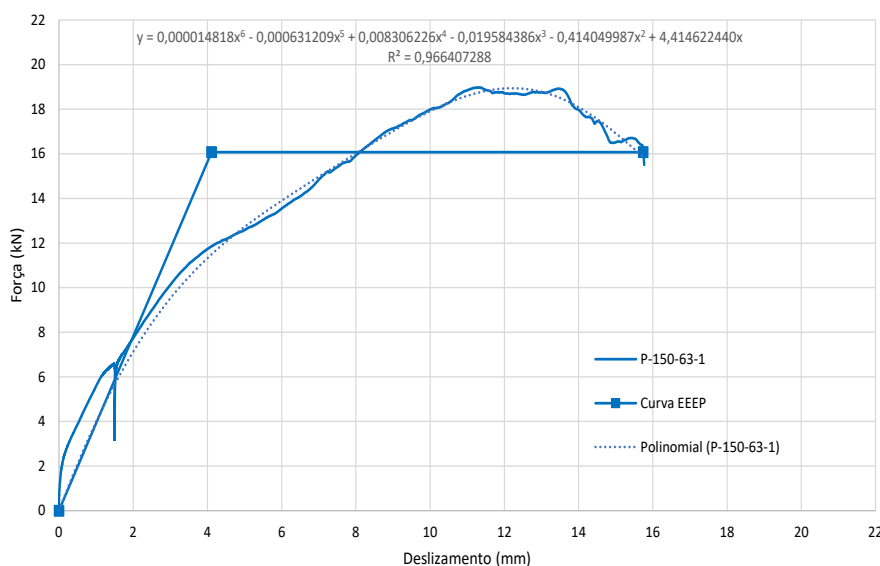
Na Tabela A.12 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{m\acute{a}x}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.12 – Módulos de deslizamento para a amostra P-150-63-1.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-150-63-1	3,91	3,05	2,10

Na Figura A.34 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-150-63-1, obteve-se  $F_y = 16,08$  kN e  $v_y = 4,11$  m e  $D = 3,83$ .

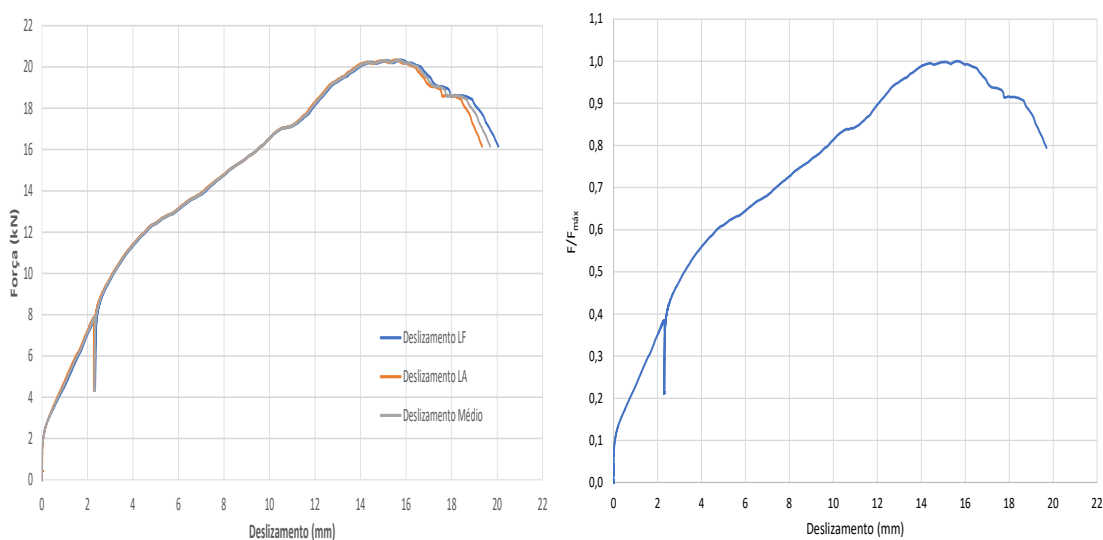
Figura A.34 - Curva EEEP para a amostra P-150-63-1.



#### A.4.3. Amostra P-150-63-2

Na Figura A.35.a são apresentadas as curvas de força / deslizamento para a amostra P-150-63-2. Na Figura A.35.b é mostrada a curva de força / deslizamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 20,34 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 16,16 kN e o deslizamento último ( $v_u$ ) foi de 19,70 mm.

Figura A.35 - Curvas de força / deslizamento para a amostra P-150-63-2



- a) Curvas força / deslizamento da amostra com deslocamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.      b) Curva força / deslizamento média normalizada.

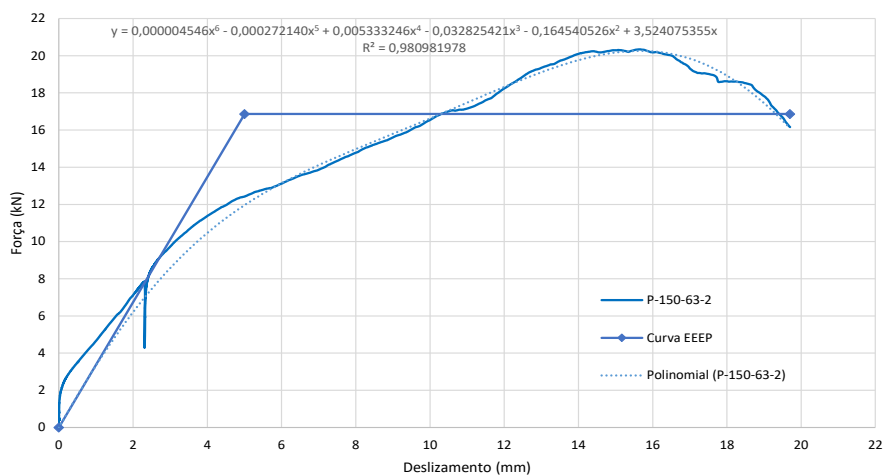
Na Tabela A.13 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{\max}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.13 – Módulos de deslizamento para a amostra P-150-63-2.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-150-63-2	3,37	2,60	1,67

Na Figura A.36 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-150-63-2, obteve-se  $F_y = 16,86$  kN,  $v_y = 5,00$  mm e  $D = 3,94$ .

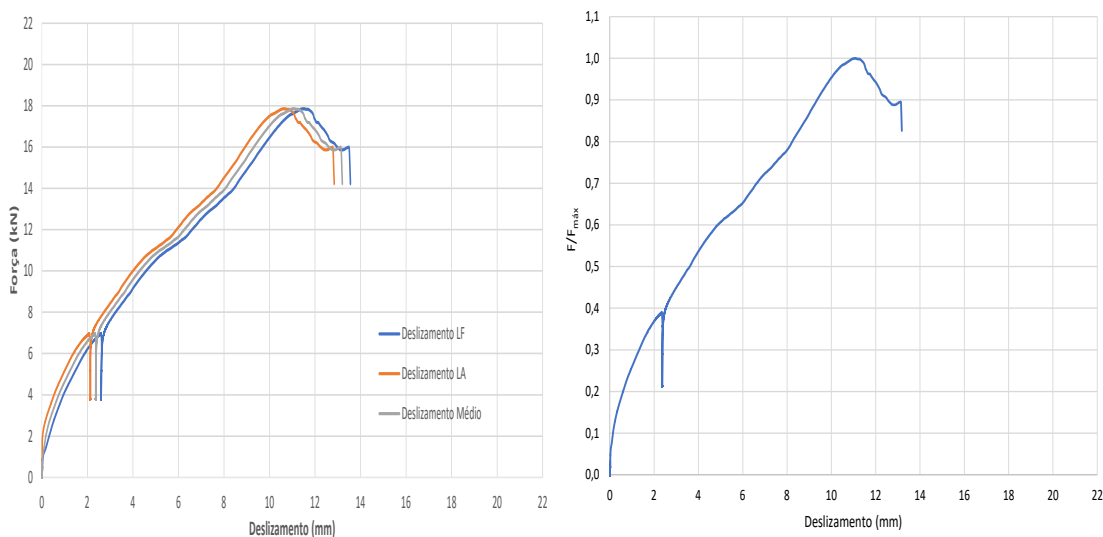
Figura A.36 - Curva EEEP para a amostra P-150-63-2.



#### A.4.4. Amostra P-150-63-3

Na Figura A.37.a são apresentadas as curvas de força / deslocamento para a amostra P-150-63-3. Na Figura A.37.b é mostrada a curva de força / deslocamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 17,86 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 15,62 kN e o deslocamento último ( $v_u$ ) foi de 13,16 mm.

Figura A.37 - Curvas de força / deslocamento da amostra P-150-63-3.



a) Curvas força / deslocamento da amostra com deslocamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.

b) Curva força / deslocamento média normalizada.

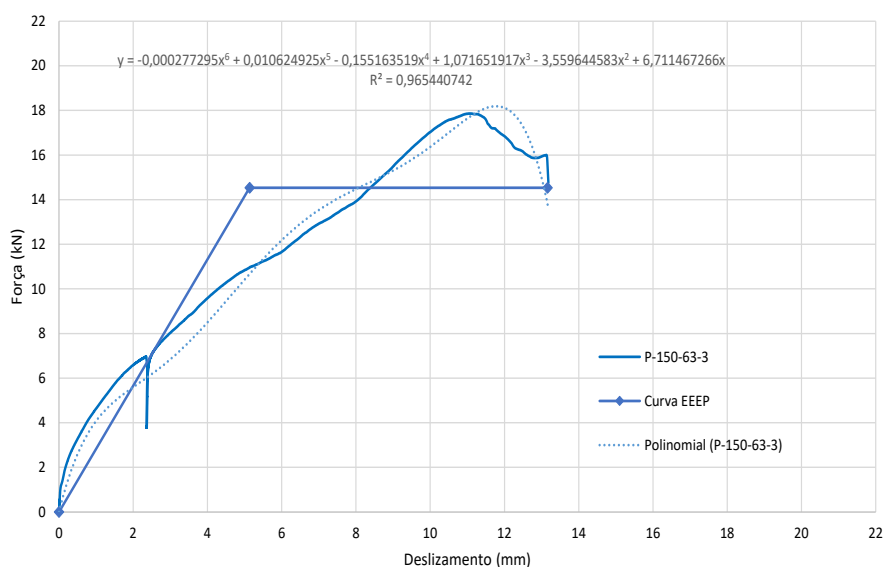
Na Tabela A.14 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{m\acute{a}x}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.14 – Módulos de deslizamento para a amostra P-150-63-3.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-150-63-3	2,83	2,21	1,74

Na Figura A.38 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEE) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-150-55-0, obteve-se  $F_y = 14,53$  kN,  $v_y = 5,13$  mm e  $D = 2,56$ .

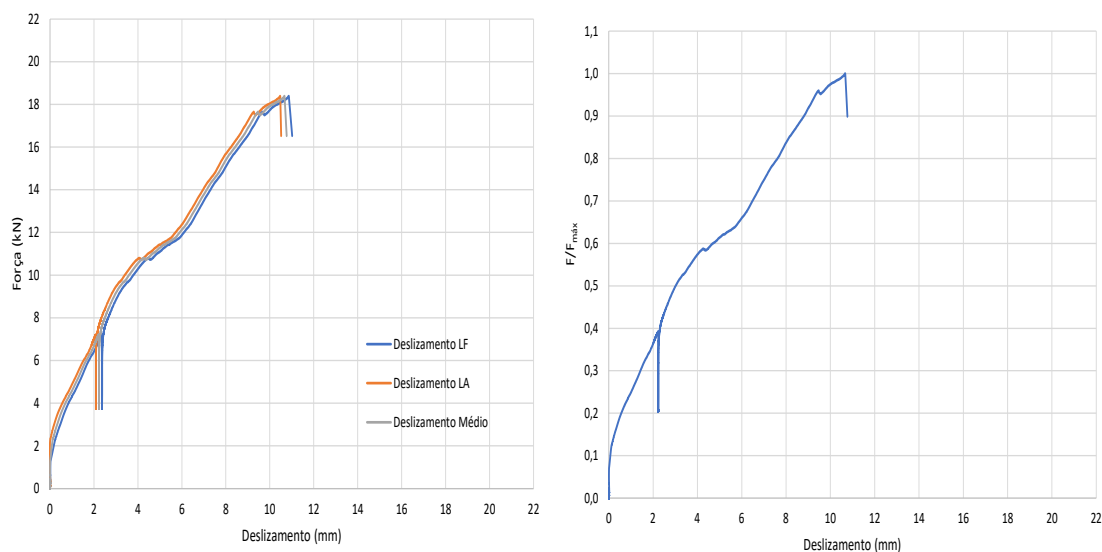
Figura A.38 - Curva EEEP para a amostra P-150-63-3.



#### A.4.5. Amostra P-150-63-A

Na Figura A.39.a. são apresentadas as curvas de força / deslizamento para a amostra P-150-63-A. Na Figura A.39.b é mostrada a curva de força / deslizamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 18,39 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 18,39 kN e o deslizamento último ( $v_u$ ) foi de 10,66 mm.

Figura A.39 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-150-63-A



- a) Curvas força / deslizamento da amostra com deslizamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.      b) Curva força / deslizamento média normalizada.

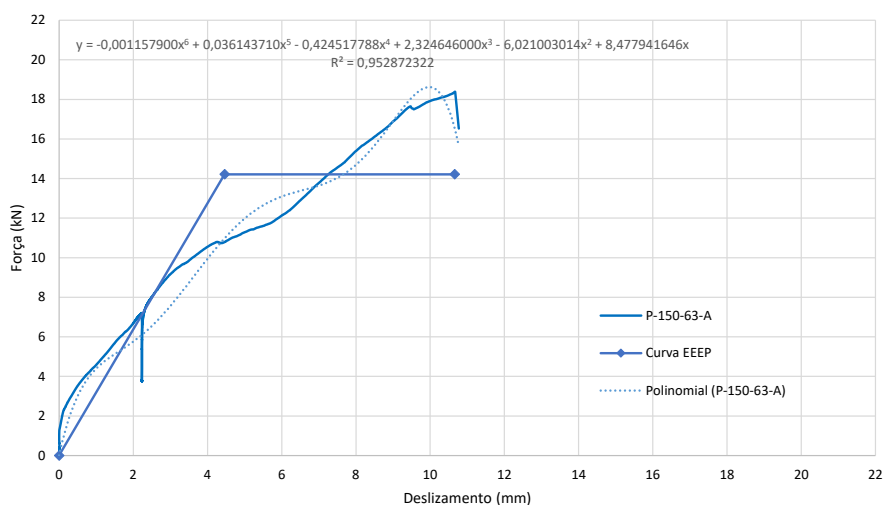
Na Tabela A.15 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{\max}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.15 – Módulos de deslizamento para a amostra P-150-63-A.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-150-63-A	3,19	2,35	1,93

Na Figura A.40 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-150-63-A, obteve-se  $F_y = 14,21$  kN,  $v_y = 4,46$  mm e  $D = 2,39$ .

Figura A.40 - Curva EEEP para a amostra P-150-63-A.

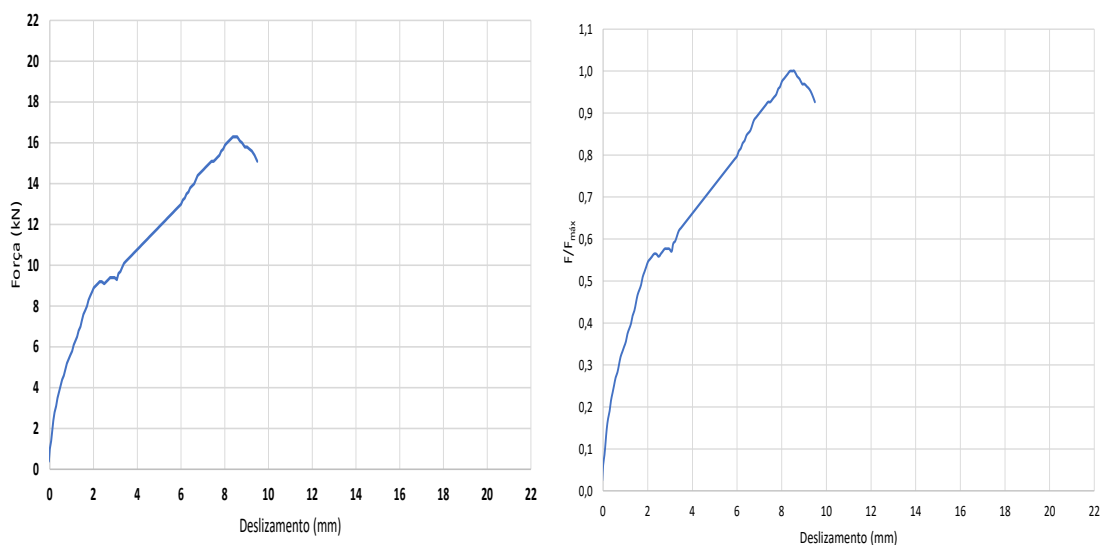


## A.5. Modelo 5: P-200-63

### A.5.1. Amostra P-200-63-0

Na Figura A.41.a está apresentada a curva de força / deslocamento para a amostra P-200-63-0. Na Figura A.41.b é mostrada a curva de força / deslocamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{máx}$ ) obtida neste ensaio foi de 16,30 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 15,10 kN e o deslocamento último ( $v_u$ ) foi de 9,49 mm.

Figura A.41 - Curvas de força / deslocamento da amostra P-200-63-0.



a) Curvas força / deslocamento da amostra

b) Curva força / deslocamento média normalizada.

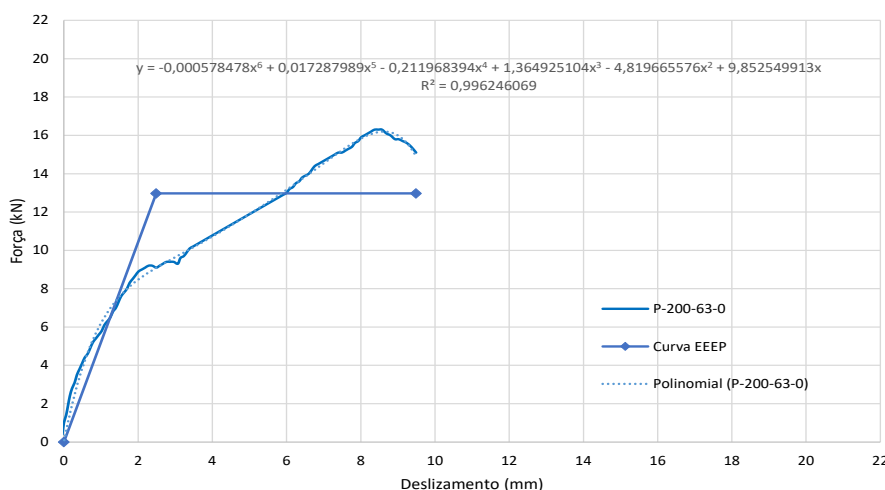
Na Tabela A.16 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{\text{máx}}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.16 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-63-0.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-200-63-0	5,22	3,03	2,17

Na Figura A.42 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-200-63-0, obteve-se  $F_y = 12,97$  kN e  $v_y = 2,49$  mm e  $D = 3,82$ .

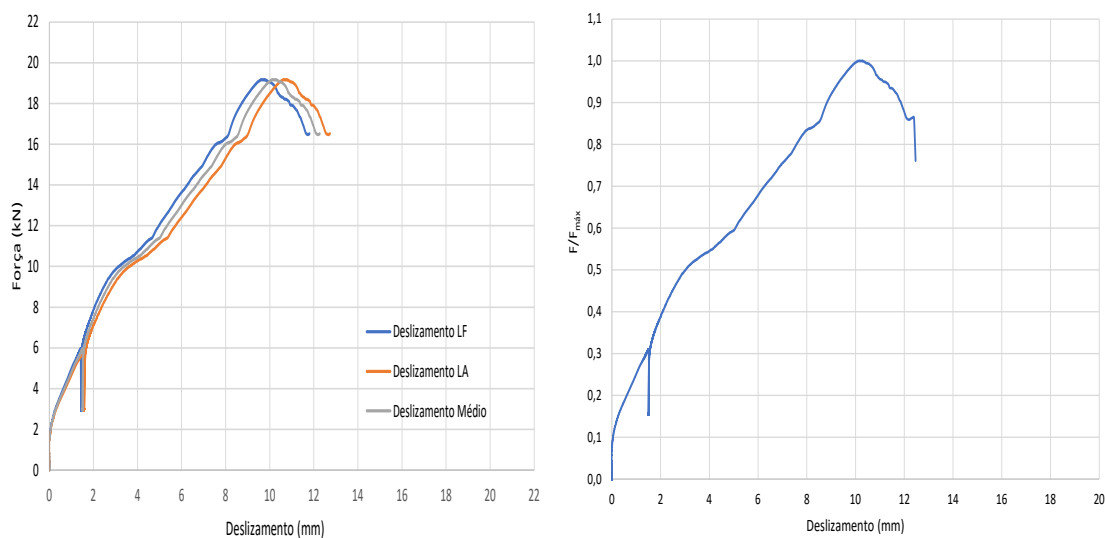
Figura A.42 - Curva EEEP para a amostra P-200-63-0.



### A.5.2. Amostra P-200-63-1

Na Figura A.43.a são apresentadas as curvas de força / deslizamento para a amostra P-200-63-1. Na Figura A.43.b é mostrada a curva de força / deslizamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{\text{máx}}$ ) obtida neste ensaio foi de 19,17 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 16,55 kN e o deslizamento último ( $v_u$ ) foi de 12,31 mm.

Figura A.43 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-200-63-1



- a) Curvas força / deslizamento da amostra com deslizamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.      b) Curva força / deslizamento média normalizada.

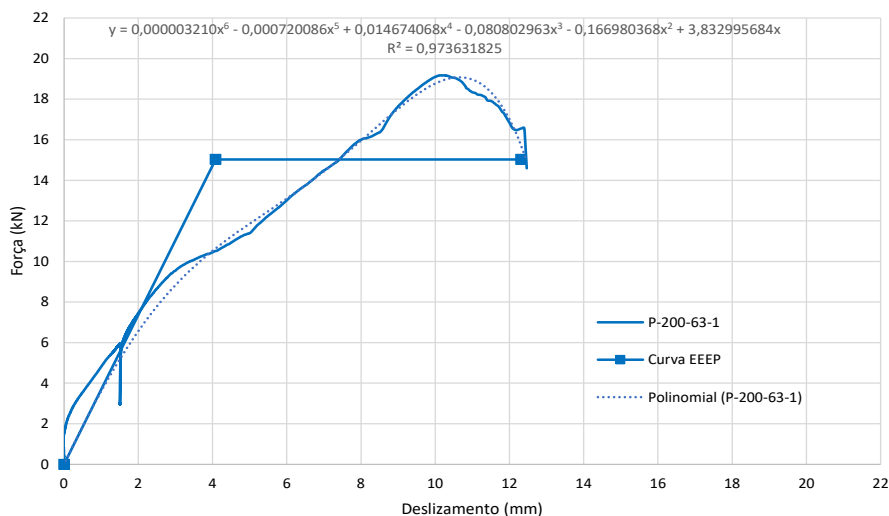
Na Tabela A.17 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{\text{máx}}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.17 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-63-1.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-200-63-1	3,68	2,27	2,03

Na Figura A.44 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-200-63-1, obteve-se  $F_y = 15,03$  kN,  $v_y = 4,08$  mm e  $D = 3,02$ .

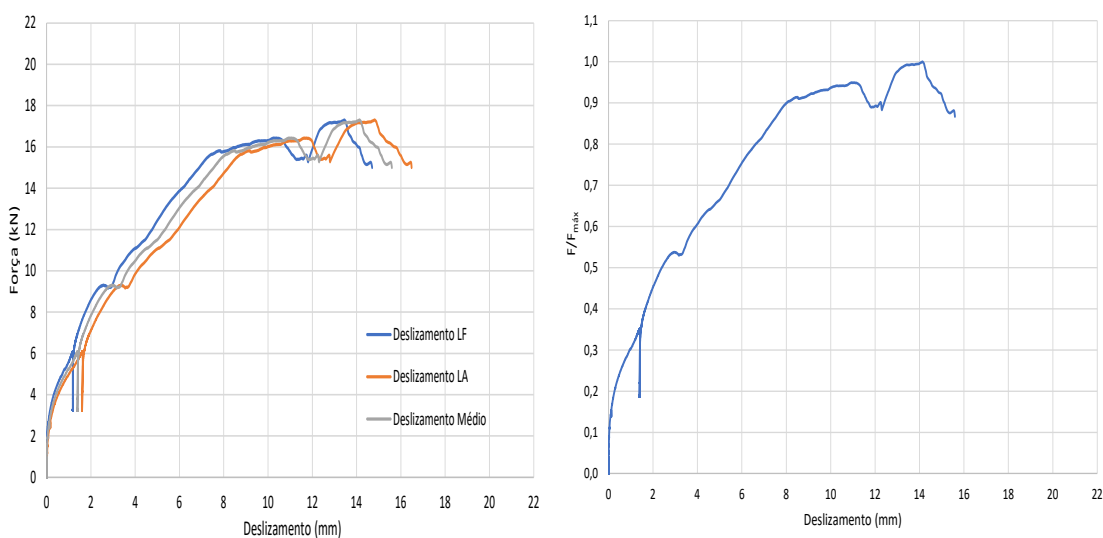
Figura A.44 - Curva EEEP para a amostra P-200-63-1.



### A.5.3. Amostra P-200-63-2

Na Figura A.45.a são apresentadas três curvas de força / deslocamento para a amostra P-200-63-2. Na Figura A.45.b é mostrada a curva de força / deslocamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 17,30 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 15,00 kN e o deslocamento último ( $v_u$ ) foi de 15,59 mm.

Figura A.45 - Curvas de força / deslocamento da amostra P-200-63-2.



a) Curvas força / deslocamento da amostra com deslocamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.

b) Curva força / deslocamento média normalizada.

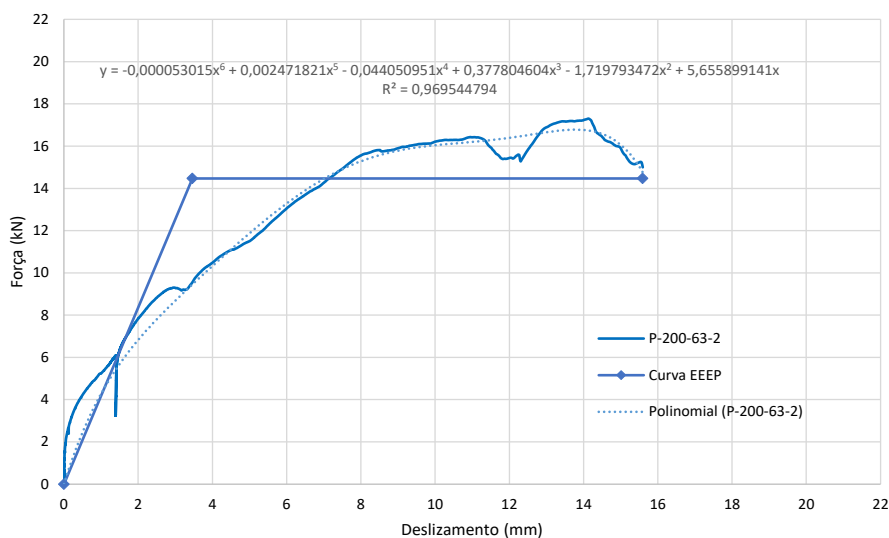
Na Tabela A.18 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{m\acute{a}x}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.18 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-63-2.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-200-63-2	4,18	2,65	2,09

Na Figura A.46 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-200-63-2, obteve-se  $F_y = 14,47$  kN,  $v_y = 3,46$  mm e  $D = 4,50$ .

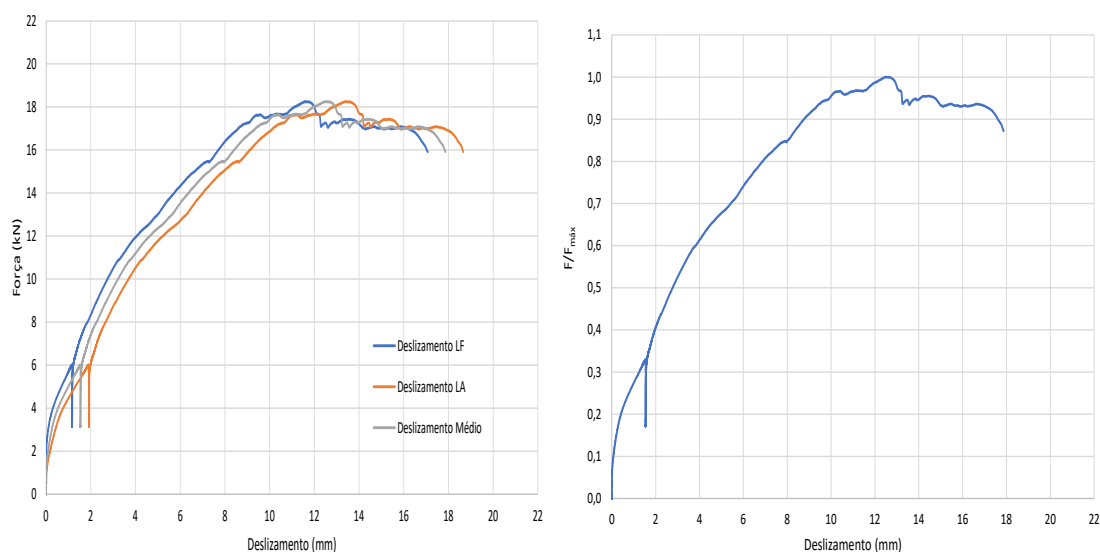
Figura A.46 - Curva EEEP para a amostra P-200-63-2.



#### A.5.4. Amostra P-200-63-3

Na Figura A.47.a são apresentadas as curvas de força / deslizamento para a amostra P-200-63-3. Na Figura A.47.b é mostrada a curva de força / deslizamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 18,25 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 15,92 kN e o deslizamento último ( $v_u$ ) foi de 17,87 mm.

Figura A.47 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-200-63-3.



- a) Curvas força / deslizamento da amostra com deslizamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.      b) Curva força / deslizamento média normalizada.

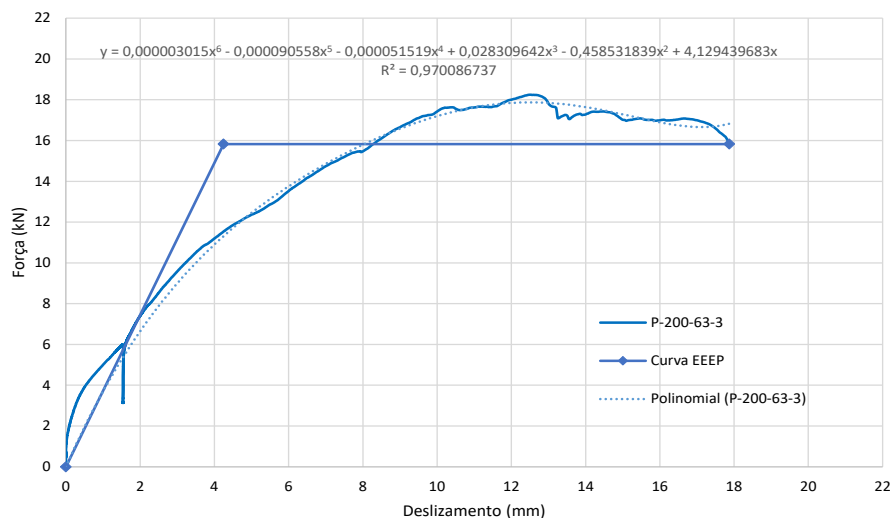
Na Tabela A.19 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{máx}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.19 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-63-3.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-200-63-3	3,73	2,87	2,13

Na Figura A.48 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-200-63-3, obteve-se  $F_y = 15,83$  kN,  $v_y = 4,25$  mm e  $D = 4,21$ .

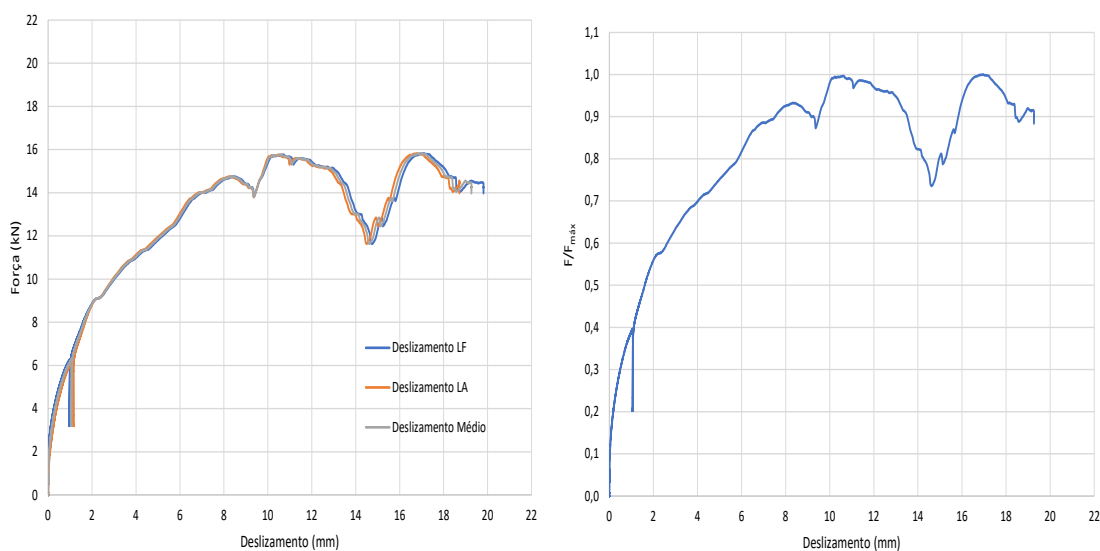
Figura A.48 - Curva EEEP para a amostra P-200-63-3.



### A.5.5. Amostra P-200-63-A

Na Figura A.49.a são apresentadas as curvas de força / deslocamento para a amostra P-200-63-A. Na Figura A.49.b é mostrada a curva de força / deslocamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 15,82 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 14,39 kN e o deslocamento último ( $v_u$ ) foi de 19,37 mm.

Figura A.49 - Curvas de força / deslocamento da amostra P-200-63-A



a) Curvas força / deslocamento da amostra com deslocamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.

b) Curva força / deslocamento média normalizada.

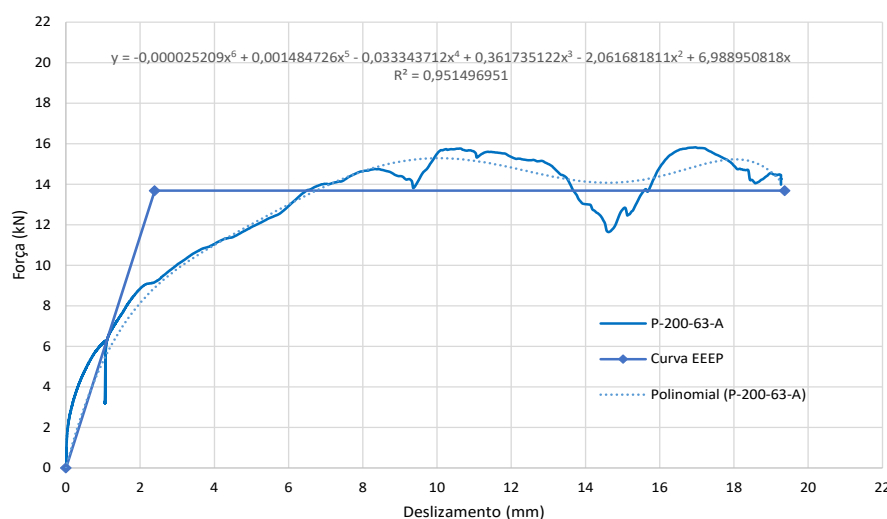
Na Tabela A.20 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{\text{máx}}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.20 – Módulos de deslizamento para a amostra P-200-63-A.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-200-63-A	5,71	3,62	2,17

Na Figura A.50 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEE) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-200-63-A, obteve-se  $F_y = 13,68$  kN,  $v_y = 2,40$  mm e  $D = 8,09$ .

Figura A.50 - Curva EEEP para a amostra P-200-63-A.

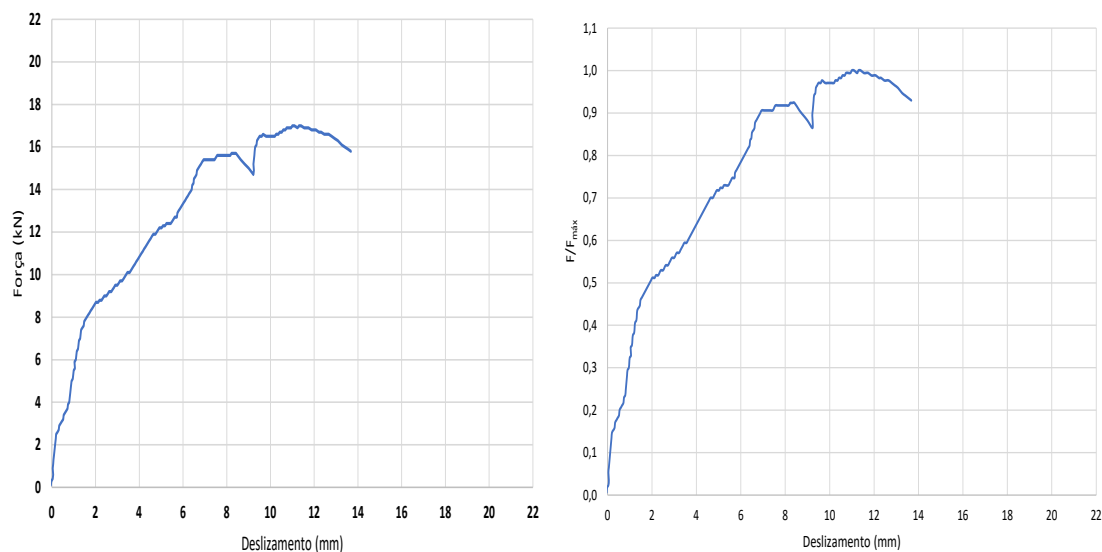


## A.6. Modelo 6: P-250-63

### A.6.1. Amostra P-250-63-0

Na Figura A.51.a é apresentada a curva de força / deslizamento para a amostra P-250-63-0. Na Figura A.51.b é mostrada a curva de força / deslizamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{\text{máx}}$ ) obtida neste ensaio foi de 17,00 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 15,80 kN e o deslizamento último ( $v_u$ ) foi de 13,68 mm.

Figura A.51 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-250-63-0.



a) Curvas força / deslizamento da amostra      b) Curva força / deslizamento média normalizada.

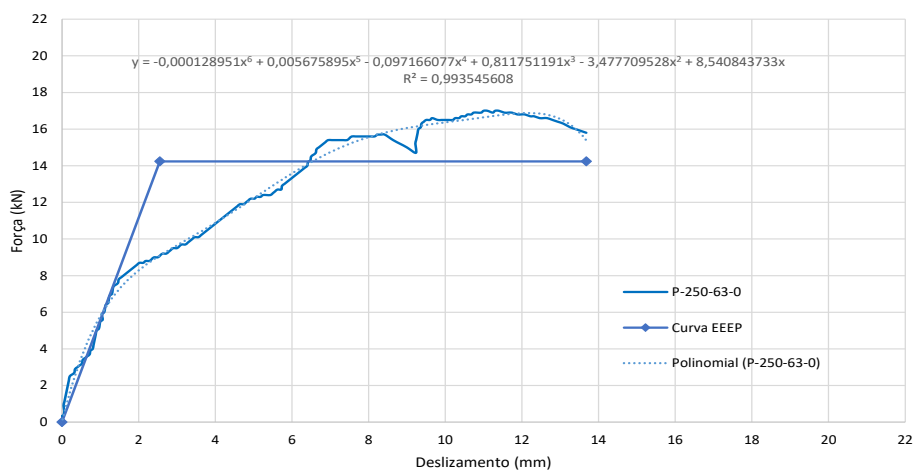
Na Tabela A.21 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{\max}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.21 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-63-0.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-250-63-0	5,57	2,82	2,21

Na Figura A.52 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-250-63-0, obteve-se  $F_y = 14,24$  kN,  $v_y = 2,55$  mm e  $D = 5,35$ .

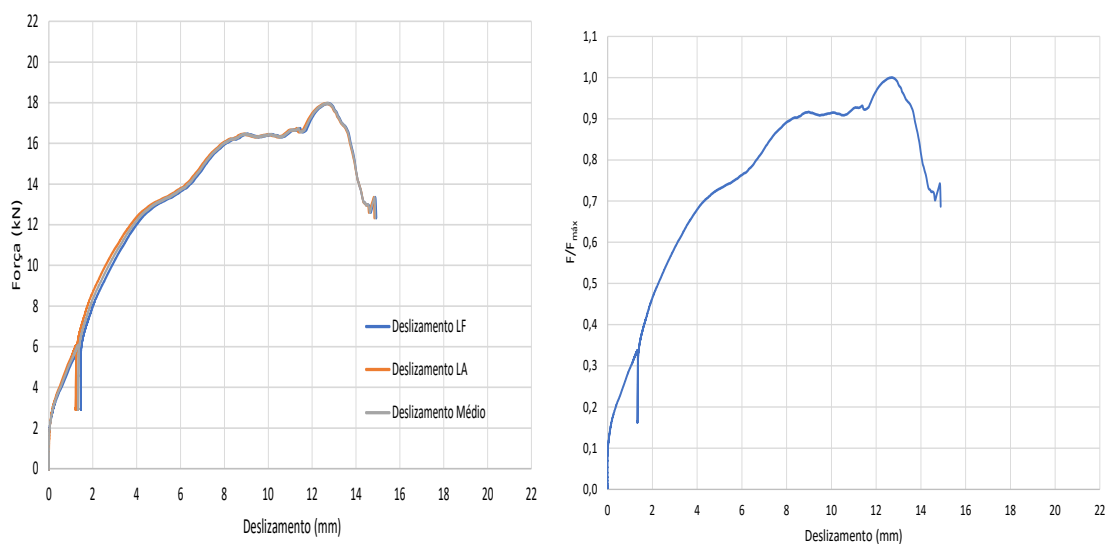
Figura A.52 - Curva EEEP para a amostra P-250-63-0.



### A.6.2. Amostra P-250-63-1

Na Figura A.53.a são apresentadas as curvas de força / deslocamento para a amostra P-250-63-1. Na Figura A.53.b é mostrada a curva de força / deslocamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 17,93 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 12,76 kN e o deslocamento último ( $v_u$ ) foi de 14,68 mm.

Figura A.53 - Curvas de força / deslocamento da amostra P-250-63-1.



a) Curvas força / deslocamento da amostra com deslocamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.

b) Curva força / deslocamento média normalizada.

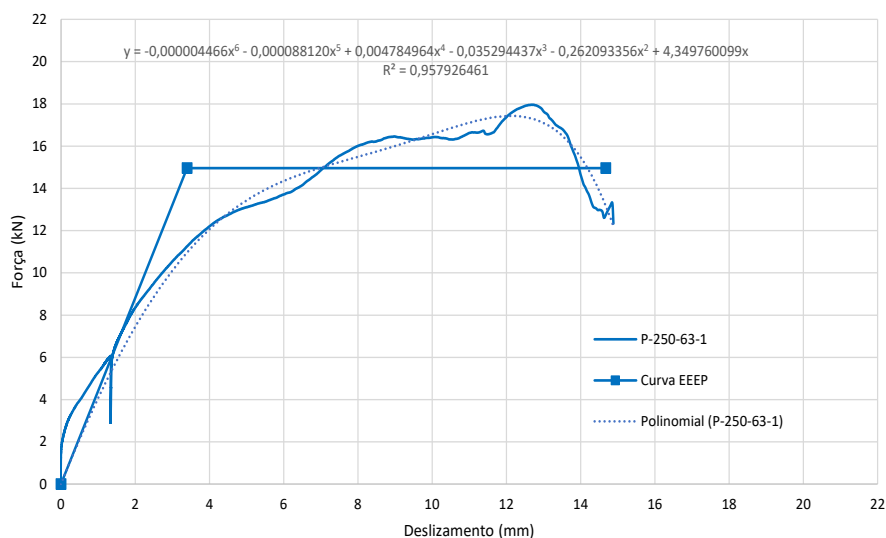
Na Tabela A.22 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{m\acute{a}x}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.22 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-63-1.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-250-63-1	4,40	3,45	2,16

Na Figura A.54 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEE) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-250-63-1, obteve-se  $F_y = 14,96$  kN,  $v_y = 3,40$  mm e  $D = 4,32$ .

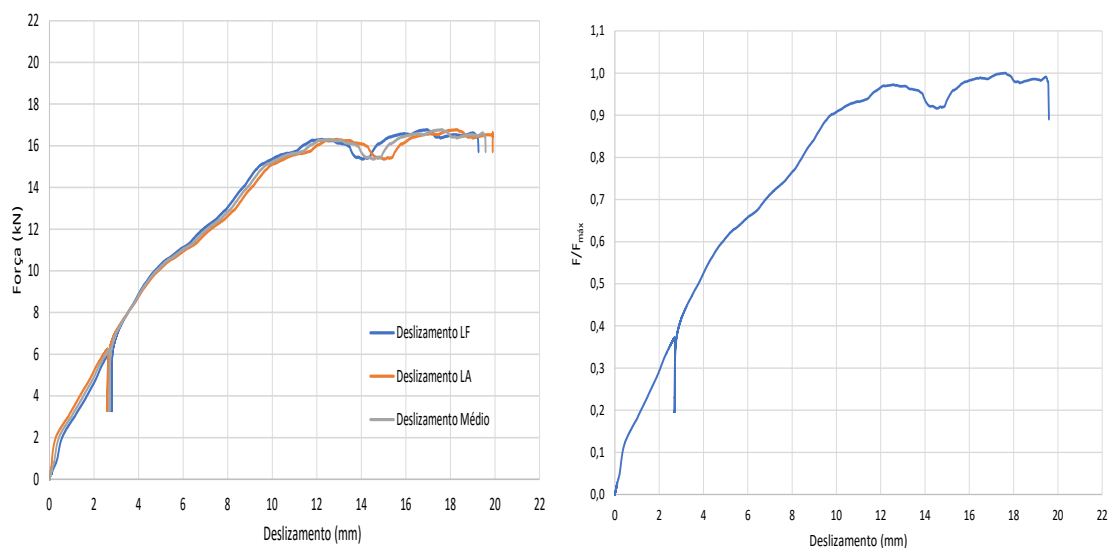
Figura A.54 - Curva EEEP para a amostra P-250-63-1.



### A.6.3. Amostra P-250-63-2

Na Figura A.55.a são apresentadas as curvas de força / deslizamento para a amostra P-250-63-2. Na Figura A.55.b é mostrada a curva de força / deslizamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 16,77 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 16,11 kN e o deslizamento último ( $v_u$ ) foi de 19,57 mm.

Figura A.55 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-250-63-2.



- a) Curvas força / deslizamento da amostra com deslizamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.      b) Curva força / deslizamento média normalizada.

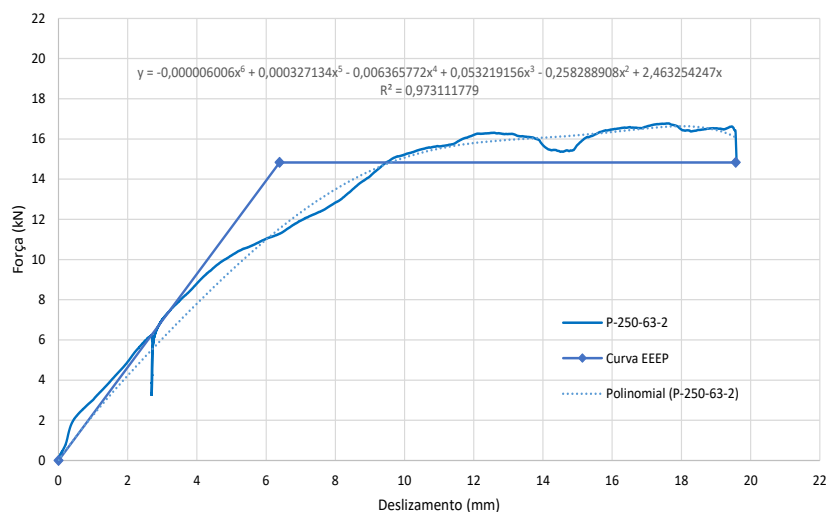
Na Tabela A.23 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{\max}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.23 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-63-2.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-250-63-2	2,32	2,07	1,59

Na Figura A.56 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-250-63-2, obteve-se  $F_y = 14,83$  kN,  $v_y = 6,39$  mm e  $D = 3,06$ .

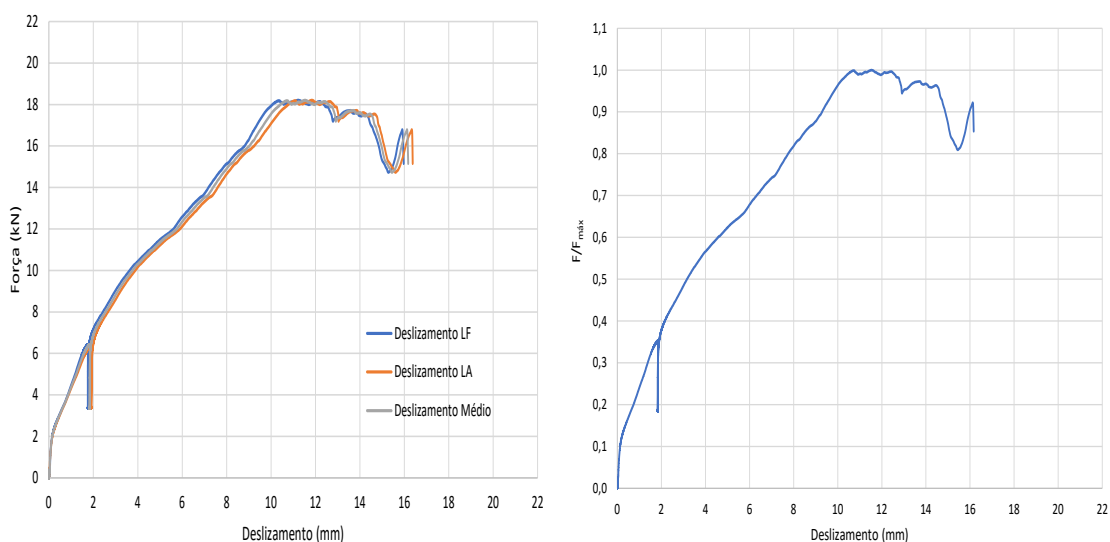
Figura A.56 - Curva EEEP para a amostra P-250-63-2.



#### A.6.4. Amostra P-250-63-3

Na Figura A.57.a são apresentadas as curvas de força / deslocamento para a amostra P-250-63-3. Na Figura A.57.b é mostrada a curva de força / deslocamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) atingiu o valor de 15,90 kN, a força resistente última resistente ( $F_u$ ) foi igual a 14,73 kN e o deslocamento último ( $v_u$ ) foi igual a 14,97 mm.

Figura A.57 - Curvas de força / deslocamento da amostra P-250-63-3.



a) Curvas força / deslocamento da amostra com deslocamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.

b) Curva força / deslocamento média normalizada.

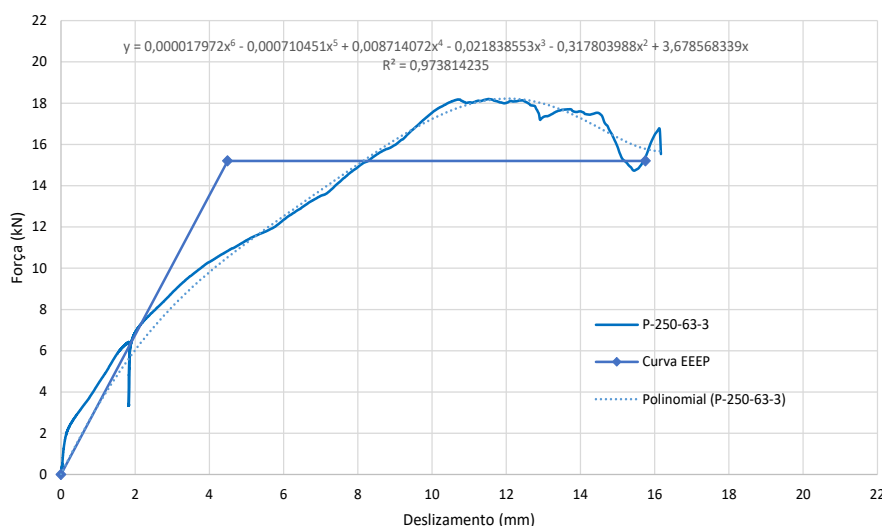
Na Tabela A.24 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{m\acute{a}x}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.24 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-63-3.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-250-63-3	3,38	2,39	1,88

Na Figura A.58 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-250-63-3, obteve-se  $F_y = 15,20$  kN,  $v_y = 4,49$  mm e  $D = 3,51$ .

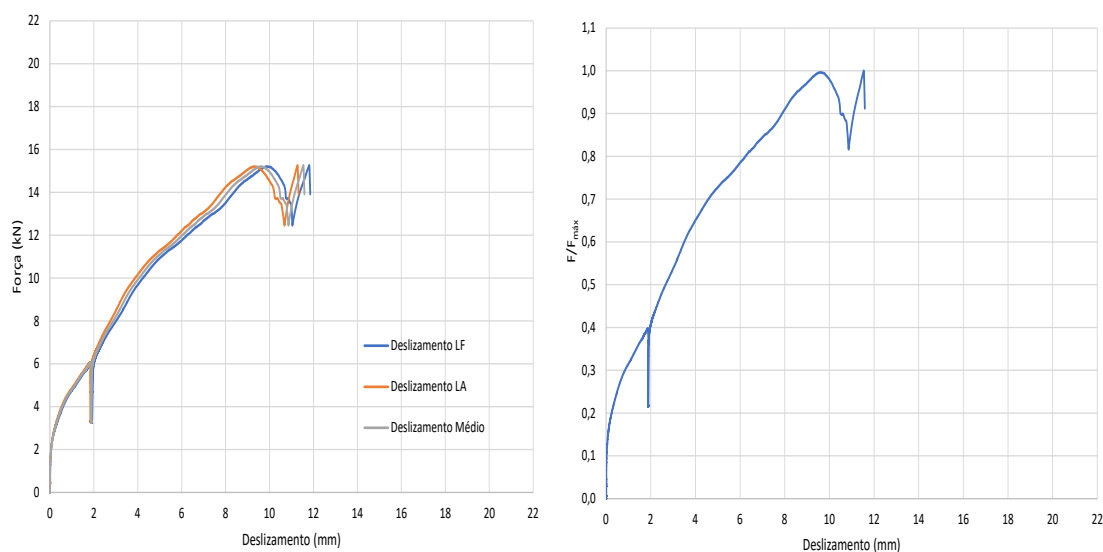
Figura A.58 - Curva EEEP para a amostra P-250-63-3.



### A.6.5. Amostra P-250-63-A

Na Figura A.59.a são apresentadas três curvas de força / deslizamento para a amostra P-250-63-A. Na Figura A.59.b está mostrada a curva de força / deslizamento média normalizada. A força resistente máxima ( $F_{m\acute{a}x}$ ) obtida neste ensaio foi de 15,27 kN, a força resistente última ( $F_u$ ) foi de 15,27 kN e o deslizamento último ( $v_u$ ) foi de 11,85 mm.

Figura A.59 - Curvas de força / deslizamento da amostra P-250-63-A.



a) Curvas força / deslizamento da amostra com deslocamentos no lado LA (lado aberto), LF (lado fechado) e média dos valores.

b) Curva força / deslizamento média normalizada.

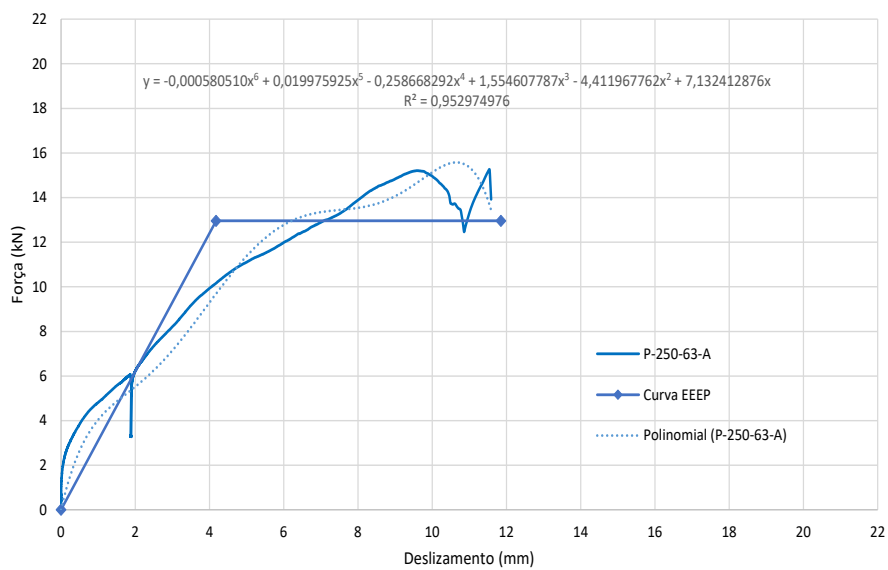
Na Tabela A.25 apresentam-se os módulos de deslizamento a 40%, 60% e 80% de  $F_{\max}$  obtidos a partir dos resultados de força e deslizamento.

Tabela A.25 – Módulos de deslizamento para a amostra P-250-63-A.

Amostra	$k_{s0,4}$ (kN/mm)	$k_{s0,6}$ (kN/mm)	$k_{s0,8}$ (kN/mm)
P-250-63-A	3,10	2,62	1,96

Na Figura A.60 apresentam-se a curva de força / deslizamento, a curva equivalente de energia elastoplástica (EEEP) e a curva polinomial que descreve a relação força / deslizamento. Para a amostra P-250-63-A, obteve-se  $F_y = 12,96$  kN,  $v_y = 4,18$  mm e  $D = 2,83$ .

Figura A.60 - Curva EEEP para a amostra P-250-63-A.



## APÊNDICE B – DADOS EXPERIMENTAIS UTILIZADOS NO AJUSTE DO MODELO SEMIEMPÍRICO

Tabela B.1 - Dados experimentais utilizados nas análises de regressão linear e resultados obtidos (parte 1/12).

N°	Referência	Modelo	$d_b$ (cm)	$t_{mad}$ (cm)	$l_{ef}$ (mm)	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_u$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_e$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{ax,R}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{R,1}$ (kN)	$F_{R,2}$ (kN)	$F_{exp}$ (kN)	$F_R$ (kN)	Modo de falha		$F_R/F_{exp}$	Erro (%)
														Previsto	Experimental		
1	Northcutt (2012)	1	0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,77	2,55	Modo 1	Modo 1	0,92	7,7%
2			0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,96	2,55	Modo 1	Modo 1	0,86	13,6%
3			0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,86	2,55	Modo 1	Modo 1	0,89	10,7%
4		2	0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,76	2,55	Modo 1	Modo 1	0,92	7,5%
5			0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,86	2,55	Modo 1	Modo 1	0,89	10,6%
6			0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	3,05	2,55	Modo 1	Modo 1	0,84	16,4%
7		3	0,48	1,83	19,2	64	80	3,74	31,0	3,68	4,35	3,77	3,68	Modo 1	Modo 2	0,98	2,5%
8			0,48	1,83	19,2	64	80	3,74	31,0	3,68	4,35	4,38	3,68	Modo 1	Modo 2	0,84	15,9%
9			0,48	1,83	19,2	64	80	3,74	31,0	3,68	4,35	3,66	3,68	Modo 1	Modo 2	1,00	-0,4%
10	Martin (2014)	T43	0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,39	2,55	Modo 1	Modo 1	1,07	-6,7%
11			0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,42	2,55	Modo 1	Modo 1	1,05	-5,4%
12			0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,40	2,55	Modo 1	Modo 1	1,06	-6,3%
13		T54	0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,36	2,55	Modo 1	Modo 1	1,08	-8,2%
14			0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,51	2,55	Modo 1	Modo 1	1,02	-1,6%
15			0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,56	2,55	Modo 1	Modo 1	1,00	0,3%
16		T97	0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,50	2,55	Modo 1	Modo 1	1,02	-2,0%
17			0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,06	2,55	Modo 1	Modo 1	1,24	-24,1%
18			0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,43	2,55	Modo 1	Modo 2	1,05	-5,1%
25		TF10	0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,68	2,55	Modo 1	Modo 1	0,95	4,7%
26			0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,35	2,55	Modo 1	Modo 1	1,09	-8,6%
27			0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,30	2,55	Modo 1	Modo 1	1,11	-10,8%
28		TF12	0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,39	2,55	Modo 1	Modo 1	1,07	-6,7%
29			0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,42	2,55	Modo 1	Modo 1	1,05	-5,4%
30			0,48	1,27	19,2	64	80	3,74	31,0	2,55	4,35	2,54	2,55	Modo 1	Modo 1	1,01	-0,7%

Tabela B.1 - Dados experimentais utilizados nas análises de regressão linear e resultados obtidos (parte 2/12).

N°	Referência	Modelo	$d_b$ (cm)	$t_{mad}$ (cm)	$l_{ef}$ (mm)	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_u$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_e$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{ax,R}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{R,1}$ (kN)	$F_{R,2}$ (kN)	$F_{exp}$ (kN)	$F_R$ (kN)	Modo de falha		$F_R/F_{exp}$	Erro (%)
														Previsto	Experimental		
31	Loehr (2016)	6"	0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,83	3,42	Modo 1	Modo 1	0,89	10,9%
32			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,25	3,42	Modo 1	Modo 1	1,05	-5,2%
33			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,87	3,42	Modo 1	Modo 1	0,88	11,7%
34			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,56	3,42	Modo 1	Modo 1	0,96	4,0%
35			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,65	3,42	Modo 1	Modo 1	0,94	6,3%
36			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	2,91	3,42	Modo 1	Modo 1	1,17	-17,3%
37			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,32	3,42	Modo 1	Modo 1	1,03	-2,9%
38			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,53	3,42	Modo 1	Modo 1	0,97	3,1%
39			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,81	3,42	Modo 1	Modo 1	0,90	10,3%
40			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,57	3,42	Modo 1	Modo 1	0,96	4,4%
41			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,58	3,42	Modo 1	Modo 1	0,95	4,7%
42			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,51	3,42	Modo 1	Modo 1	0,97	2,8%
43			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,90	3,42	Modo 1	Modo 1	0,88	12,4%
44			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,54	3,42	Modo 1	Modo 1	0,96	3,6%
45			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,94	3,42	Modo 1	Modo 1	0,87	13,2%

Tabela B.1 - Dados experimentais utilizados nas análises de regressão linear e resultados obtidos (parte 3/12).

N°	Referência	Modelo	$d_b$ (cm)	$t_{mad}$ (cm)	$l_{ef}$ (mm)	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_u$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_e$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{ax,R}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{R,1}$ (kN)	$F_{R,2}$ (kN)	$F_{exp}$ (kN)	$F_R$ (kN)	Modo de falha		$F_R/F_{exp}$	Erro (%)
														Previsto	Experimental		
46	Loehr (2016)	8"	0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,50	3,42	Modo 1	Modo 1	0,98	2,3%
47			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,68	3,42	Modo 1	Modo 1	0,93	7,2%
48			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,40	3,42	Modo 1	Modo 1	1,01	-0,5%
49			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,15	3,42	Modo 1	Modo 1	1,08	-8,4%
50			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,67	3,42	Modo 1	Modo 1	0,93	7,0%
51			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,76	3,42	Modo 1	Modo 1	0,91	9,0%
52			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,20	3,42	Modo 1	Modo 1	1,07	-6,9%
53			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,40	3,42	Modo 1	Modo 1	1,00	-0,4%
54			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,39	3,42	Modo 1	Modo 1	1,01	-0,8%
55			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,55	3,42	Modo 1	Modo 1	0,96	3,6%
56			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,72	3,42	Modo 1	Modo 1	0,92	8,2%
57			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,90	3,42	Modo 1	Modo 1	0,88	12,5%
58			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,17	3,42	Modo 1	Modo 1	1,08	-7,7%
59			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,73	3,42	Modo 1	Modo 1	0,92	8,4%
60	0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,70	3,42	Modo 1	Modo 1	0,92	7,5%		

Tabela B.1 - Dados experimentais utilizados nas análises de regressão linear e resultados obtidos (parte 4/12).

N°	Referência	Modelo	$d_b$ (cm)	$t_{mad}$ (cm)	$l_{ef}$ (mm)	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_u$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_e$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{ax,R}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{R,1}$ (kN)	$F_{R,2}$ (kN)	$F_{exp}$ (kN)	$F_R$ (kN)	Modo de falha		$F_R/F_{exp}$	Erro (%)
														Previsto	Experimental		
61	Loehr (2016)	10"	0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,29	3,42	Modo 1	Modo 1	1,04	-3,9%
62			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,65	3,42	Modo 1	Modo 1	0,94	6,4%
63			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	2,96	3,42	Modo 1	Modo 1	1,15	-15,4%
64			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,19	3,42	Modo 1	Modo 1	1,07	-7,0%
65			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,35	3,42	Modo 1	Modo 1	1,02	-2,0%
66			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,51	3,42	Modo 1	Modo 1	0,97	2,7%
67			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,39	3,42	Modo 1	Modo 1	1,01	-0,9%
68			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,87	3,42	Modo 1	Modo 1	0,88	11,6%
69			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,81	3,42	Modo 1	Modo 1	0,90	10,3%
70			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,52	3,42	Modo 1	Modo 1	0,97	2,8%
71			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,60	3,42	Modo 1	Modo 1	0,95	5,0%
72			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,77	3,42	Modo 1	Modo 1	0,91	9,3%
73			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,17	3,42	Modo 1	Modo 1	1,08	-7,7%
74			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,70	3,42	Modo 1	Modo 1	0,92	7,7%
75			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,99	3,42	Modo 1	Modo 1	0,86	14,3%

Tabela B.1 - Dados experimentais utilizados nas análises de regressão linear e resultados obtidos (parte 5/12).

N°	Referência	Modelo	$d_b$ (cm)	$t_{mad}$ (cm)	$l_{ef}$ (mm)	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_u$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_e$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{ax,R}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{R,1}$ (kN)	$F_{R,2}$ (kN)	$F_{exp}$ (kN)	$F_R$ (kN)	Modo de falha		$F_R/F_{exp}$	Erro (%)
														Previsto	Experimental		
76	Loehr (2016)	12"	0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,58	3,42	Modo 1	Modo 1	0,95	4,6%
77			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,47	3,42	Modo 1	Modo 1	0,99	1,5%
78			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,68	3,42	Modo 1	Modo 1	0,93	7,2%
79			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,45	3,42	Modo 1	Modo 1	0,99	0,9%
80			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,41	3,42	Modo 1	Modo 1	1,00	-0,1%
81			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,35	3,42	Modo 1	Modo 1	1,02	-2,1%
82			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,39	3,42	Modo 1	Modo 1	1,01	-0,7%
83			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,14	3,42	Modo 1	Modo 1	1,09	-8,9%
84			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,37	3,42	Modo 1	Modo 1	1,01	-1,3%
85			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,53	3,42	Modo 1	Modo 1	0,97	3,2%
86			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,52	3,42	Modo 1	Modo 1	0,97	2,9%
87			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	2,88	3,42	Modo 1	Modo 1	1,19	-18,7%
88			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,41	3,42	Modo 1	Modo 1	1,00	-0,3%
89			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,36	3,42	Modo 1	Modo 1	1,02	-1,8%
90	0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,52	3,42	Modo 1	Modo 1	0,97	2,9%		
91	Kyvelou (2017)	P-15-2	0,55	3,81	22	64	80	4,21	28,6	9,88	5,57	5,60	5,57	Modo 2	Modo 2	0,99	0,5%
92		P-15-3	0,55	3,81	22	64	80	4,21	28,6	9,88	5,57	6,10	5,57	Modo 2	Modo 2	0,91	8,7%
93		P-15-4	0,55	3,81	22	64	80	4,21	28,6	9,88	5,57	5,40	5,57	Modo 2	Modo 2	1,03	-3,2%
94		P-30-2	0,55	3,81	22	64	80	4,21	28,6	9,88	5,57	5,50	5,57	Modo 2	Modo 2	1,01	-1,3%
95		P-30-4	0,55	3,81	22	64	80	4,21	28,6	9,88	5,57	5,60	5,57	Modo 2	Modo 2	0,99	0,5%
96		P-30-5	0,55	3,81	22	64	80	4,21	28,6	9,88	5,57	5,40	5,57	Modo 2	Modo 2	1,03	-3,2%
97		P-30-6	0,55	3,81	22	64	80	4,21	28,6	9,88	5,57	5,30	5,57	Modo 2	Modo 2	1,05	-5,1%

Tabela B.1 - Dados experimentais utilizados nas análises de regressão linear e resultados obtidos (parte 6/12).

N°	Referência	Modelo	$d_b$ (cm)	$t_{mad}$ (cm)	$l_{ef}$ (mm)	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_u$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_e$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{ax,R}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{R,1}$ (kN)	$F_{R,2}$ (kN)	$F_{exp}$ (kN)	$F_R$ (kN)	Modo de falha		$F_R/F_{exp}$	Erro (%)
														Previsto	Experimental		
98	Liu (2018)	6"	0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,32	3,42	Modo 1	Modo 1	1,03	-2,9%
99			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,48	3,42	Modo 1	Modo 1	0,98	1,9%
100			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,64	3,42	Modo 1	Modo 1	0,94	6,2%
101			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,54	3,42	Modo 1	Modo 1	0,97	3,3%
102			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,56	3,42	Modo 1	Modo 1	0,96	4,0%
103			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,64	3,42	Modo 1	Modo 1	0,94	6,2%
104			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,52	3,42	Modo 1	Modo 1	0,97	3,0%
105			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,50	3,42	Modo 1	Modo 1	0,98	2,4%
106			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,50	3,42	Modo 1	Modo 1	0,98	2,4%
107			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,57	3,42	Modo 1	Modo 1	0,96	4,4%
108			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,66	3,42	Modo 1	Modo 1	0,93	6,7%
109			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,57	3,42	Modo 1	Modo 1	0,96	4,4%
110			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,59	3,42	Modo 1	Modo 1	0,95	4,7%
111	0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,54	3,42	Modo 1	Modo 1	0,96	3,6%		

Tabela B.1 - Dados experimentais utilizados nas análises de regressão linear e resultados obtidos (parte 7/12).

N°	Referência	Modelo	$d_b$ (cm)	$t_{mad}$ (cm)	$l_{ef}$ (mm)	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_u$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_e$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{ax,R}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{R,1}$ (kN)	$F_{R,2}$ (kN)	$F_{exp}$ (kN)	$F_R$ (kN)	Modo de falha		$F_R/F_{exp}$	Erro (%)
														Previsto	Experimental		
112	Liu (2018)	8"	0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,41	3,42	Modo 1	Modo 1	1,00	-0,2%
113			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,54	3,42	Modo 1	Modo 1	0,96	3,5%
114			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,46	3,42	Modo 1	Modo 1	0,99	1,2%
115			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,51	3,42	Modo 1	Modo 1	0,97	2,6%
116			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,39	3,42	Modo 1	Modo 1	1,01	-0,7%
117			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,50	3,42	Modo 1	Modo 1	0,98	2,5%
118			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,34	3,42	Modo 1	Modo 1	1,02	-2,3%
119			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,60	3,42	Modo 1	Modo 1	0,95	5,2%
120			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,36	3,42	Modo 1	Modo 1	1,02	-1,7%
121			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,46	3,42	Modo 1	Modo 1	0,99	1,1%
122			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,49	3,42	Modo 1	Modo 1	0,98	2,0%
123			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,43	3,42	Modo 1	Modo 1	1,00	0,2%
124			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,69	3,42	Modo 1	Modo 1	0,93	7,5%
125			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,54	3,42	Modo 1	Modo 1	0,97	3,5%

Tabela B.1 - Dados experimentais utilizados nas análises de regressão linear e resultados obtidos (parte 8/12).

N°	Referência	Modelo	$d_b$ (cm)	$t_{mad}$ (cm)	$l_{ef}$ (mm)	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_u$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_e$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{ax,R}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{R,1}$ (kN)	$F_{R,2}$ (kN)	$F_{exp}$ (kN)	$F_R$ (kN)	Modo de falha		$F_R/F_{exp}$	Erro (%)
														Previsto	Experimental		
126	Liu (2018)	10"	0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,64	3,42	Modo 1	Modo 1	0,94	6,0%
127			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,64	3,42	Modo 1	Modo 1	0,94	6,2%
128			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,19	3,42	Modo 1	Modo 1	1,07	-7,0%
129			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,65	3,42	Modo 1	Modo 1	0,94	6,4%
130			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,51	3,42	Modo 1	Modo 1	0,97	2,8%
131			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,51	3,42	Modo 1	Modo 1	0,97	2,7%
132			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,51	3,42	Modo 1	Modo 1	0,97	2,7%
133			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,41	3,42	Modo 1	Modo 1	1,00	-0,1%
134			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	2,96	3,42	Modo 1	Modo 1	1,15	-15,5%
135			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,35	3,42	Modo 1	Modo 1	1,02	-2,0%
136			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,17	3,42	Modo 1	Modo 1	1,08	-7,8%
137			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,43	3,42	Modo 1	Modo 1	1,00	0,2%
138			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,60	3,42	Modo 1	Modo 1	0,95	5,0%
139			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,70	3,42	Modo 1	Modo 1	0,92	7,6%
140	0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,12	3,42	Modo 1	Modo 1	1,10	-9,5%		

Tabela B.1 - Dados experimentais utilizados nas análises de regressão linear e resultados obtidos (parte 9/12).

N°	Referência	Modelo	$d_b$ (cm)	$t_{mad}$ (cm)	$l_{ef}$ (mm)	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_u$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_e$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{ax,R}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{R,1}$ (kN)	$F_{R,2}$ (kN)	$F_{exp}$ (kN)	$F_R$ (kN)	Modo de falha		$F_R/F_{exp}$	Erro (%)
														Previsto	Experimental		
141	Liu (2018)	12"	0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,36	3,42	Modo 1	Modo 1	1,02	-1,8%
142			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,14	3,42	Modo 1	Modo 1	1,09	-9,0%
143			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,58	3,42	Modo 1	Modo 1	0,95	4,5%
144			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,35	3,42	Modo 1	Modo 1	1,02	-2,1%
145			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,52	3,42	Modo 1	Modo 1	0,97	2,8%
146			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,45	3,42	Modo 1	Modo 1	0,99	0,9%
147			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,05	3,42	Modo 1	Modo 1	1,12	-12,2%
148			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,47	3,42	Modo 1	Modo 1	0,99	1,5%
149			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,53	3,42	Modo 1	Modo 1	0,97	3,2%
150			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,37	3,42	Modo 1	Modo 1	1,01	-1,3%
151			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,40	3,42	Modo 1	Modo 1	1,00	-0,4%
152			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,52	3,42	Modo 1	Modo 1	0,97	2,9%
153			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,39	3,42	Modo 1	Modo 1	1,01	-0,7%
154			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,68	3,42	Modo 1	Modo 1	0,93	7,2%
155			0,48	1,51	19,2	64	80	4,21	31,0	3,42	4,45	3,41	3,42	Modo 1	Modo 1	1,00	-0,1%

Tabela B.1 - Dados experimentais utilizados nas análises de regressão linear e resultados obtidos (parte 10/12).

N°	Referência	Modelo	$d_b$ (cm)	$t_{mad}$ (cm)	$l_{ef}$ (mm)	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_u$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_e$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{ax,R}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{R,1}$ (kN)	$F_{R,2}$ (kN)	$F_{exp}$ (kN)	$F_R$ (kN)	Modo de falha		$F_R/F_{exp}$	Erro (%)
														Previsto	Experimental		
156	Vella (2020)	P15B-00W	0,55	3,81	22	125	142,7	4,21	28,6	9,88	6,51	6,08	6,51	Modo 2	Modo 2	1,07	-7,0%
157		P15B-45W	0,55	3,81	22	125	142,7	4,21	28,6	9,88	6,51	6,17	6,51	Modo 2	Modo 2	1,05	-5,5%
158		P15B-45N	0,55	3,81	22	125	142,7	4,21	28,6	9,88	6,51	6,63	6,51	Modo 2	Modo 2	0,98	1,8%
159		P24B-00W	0,55	3,81	22	125	142,7	4,21	28,6	9,88	6,51	7,06	6,51	Modo 2	Modo 2	0,92	7,8%
160		P24B-45W	0,55	3,81	22	125	142,7	4,21	28,6	9,88	6,51	6,37	6,51	Modo 2	Modo 2	1,02	-2,2%
161		P24B-45N	0,55	3,81	22	125	142,7	4,21	28,6	9,88	6,51	7,50	6,51	Modo 2	Modo 2	0,87	13,2%
162		P15P-00W	0,55	2,5	22	125	142,7	3,74	28,6	5,76	6,32	4,88	5,76	Modo 1	Modo 1	1,18	-18,0%
163		P15P-45W	0,55	2,5	22	125	142,7	3,74	28,6	5,76	6,32	5,79	5,76	Modo 1	Modo 1	0,99	0,6%
164		P15P-45N	0,55	2,5	22	125	142,7	3,74	28,6	5,76	6,32	6,21	5,76	Modo 1	Modo 2	0,93	7,3%
165		P24P-00W	0,55	2,5	22	125	142,7	3,74	28,6	5,76	6,32	5,26	5,76	Modo 1	Modo 1	1,09	-9,5%
166		P24P-45W	0,55	2,5	22	125	142,7	3,74	28,6	5,76	6,32	5,60	5,76	Modo 1	Modo 1	1,03	-2,8%
167		P24P-45N	0,55	2,5	22	125	142,7	3,74	28,6	5,76	6,32	6,15	5,76	Modo 1	Modo 2	0,94	6,4%

Tabela B.1 - Dados experimentais utilizados nas análises de regressão linear e resultados obtidos (parte 11/12).

N°	Referência	Modelo	$d_b$ (cm)	$t_{mad}$ (cm)	$l_{ef}$ (mm)	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_u$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_e$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{ax,R}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{R,1}$ (kN)	$F_{R,2}$ (kN)	$F_{exp}$ (kN)	$F_R$ (kN)	Modo de falha		$F_R/F_{exp}$	Erro (%)
														Previsto	Experimental		
168	Presente trabalho	P-150-55	0,55	1,83	22	64	80	3,74	28,6	4,21	5,44	3,98	4,21	Modo 1	Modo 1	1,06	-6,0%
169			0,55	1,83	22	64	80	3,74	28,6	4,21	5,44	4,25	4,21	Modo 1	Modo 1	0,99	0,7%
170			0,55	1,83	22	64	80	3,74	28,6	4,21	5,44	4,52	4,21	Modo 1	Modo 1	0,93	6,7%
171			0,55	1,83	22	64	80	3,74	28,6	4,21	5,44	3,52	4,21	Modo 1	Modo 1	1,20	-19,9%
172			0,55	1,83	22	64	80	3,74	28,6	4,21	5,44	4,02	4,21	Modo 1	Modo 1	1,05	-4,8%
173		P-200-55	0,55	1,83	22	64	80	3,74	28,6	4,21	5,44	3,60	4,21	Modo 1	Modo 1	1,17	-17,2%
174			0,55	1,83	22	64	80	3,74	28,6	4,21	5,44	4,10	4,21	Modo 1	Modo 1	1,03	-2,9%
175			0,55	1,83	22	64	80	3,74	28,6	4,21	5,44	4,38	4,21	Modo 1	Modo 1	0,96	3,7%
176			0,55	1,83	22	64	80	3,74	28,6	4,21	5,44	4,35	4,21	Modo 1	Modo 1	0,97	3,2%
177			0,55	1,83	22	64	80	3,74	28,6	4,21	5,44	3,56	4,21	Modo 1	Modo 1	1,18	-18,4%
178		P-250-55	0,55	1,83	22	64	80	3,74	28,6	4,21	5,44	4,59	4,21	Modo 1	Modo 1	0,92	8,1%
179			0,55	1,83	22	64	80	3,74	28,6	4,21	5,44	4,72	4,21	Modo 1	Modo 1	0,89	10,7%
180			0,55	1,83	22	64	80	3,74	28,6	4,21	5,44	4,65	4,21	Modo 1	Modo 1	0,91	9,3%
181			0,55	1,83	22	64	80	3,74	28,6	4,21	5,44	4,00	4,21	Modo 1	Modo 1	1,05	-5,4%
182			0,55	1,83	22	64	80	3,74	28,6	4,21	5,44	4,35	4,21	Modo 1	Modo 1	0,97	3,0%

Tabela B.1 - Dados experimentais utilizados nas análises de regressão linear e resultados obtidos (parte 12/12).

N°	Referência	Modelo	$d_b$ (cm)	$t_{mad}$ (cm)	$l_{ef}$ (mm)	$f_y$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_u$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_e$ (kN/cm <sup>2</sup> )	$f_{ax,R}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_{R,1}$ (kN)	$F_{R,2}$ (kN)	$F_{exp}$ (kN)	$F_R$ (kN)	Modo de falha		$F_R/F_{exp}$	Erro (%)
														Previsto	Experimental		
183	Presente trabalho	P-150-63	0,63	1,83	25,2	64	80	3,74	26,4	4,83	6,80	4,78	4,83	Modo 1	Modo 1	1,01	-1,1%
184			0,63	1,83	25,2	64	80	3,74	26,4	4,83	6,80	4,75	4,83	Modo 1	Modo 1	1,02	-1,7%
185			0,63	1,83	25,2	64	80	3,74	26,4	4,83	6,80	5,09	4,83	Modo 1	Modo 1	0,95	5,1%
186			0,63	1,83	25,2	64	80	3,74	26,4	4,83	6,80	4,47	4,83	Modo 1	Modo 1	1,08	-8,1%
187			0,63	1,83	25,2	64	80	3,74	26,4	4,83	6,80	4,60	4,83	Modo 1	Modo 1	1,05	-5,0%
188		P-200-63	0,63	1,83	25,2	64	80	3,74	26,4	4,83	6,80	4,08	4,83	Modo 1	Modo 1	1,18	-18,5%
189			0,63	1,83	25,2	64	80	3,74	26,4	4,83	6,80	4,79	4,83	Modo 1	Modo 1	1,01	-0,7%
190			0,63	1,83	25,2	64	80	3,74	26,4	4,83	6,80	4,33	4,83	Modo 1	Modo 1	1,12	-11,6%
191			0,63	1,83	25,2	64	80	3,74	26,4	4,83	6,80	4,56	4,83	Modo 1	Modo 1	1,06	-5,8%
192			0,63	1,83	25,2	64	80	3,74	26,4	4,83	6,80	4,21	4,83	Modo 1	Modo 1	1,15	-14,8%
193		P-250-63	0,63	1,83	25,2	64	80	3,74	26,4	4,83	6,80	4,25	4,83	Modo 1	Modo 1	1,14	-13,6%
194			0,63	1,83	25,2	64	80	3,74	26,4	4,83	6,80	4,48	4,83	Modo 1	Modo 1	1,08	-7,7%
195			0,63	1,83	25,2	64	80	3,74	26,4	4,83	6,80	4,19	4,83	Modo 1	Modo 1	1,15	-15,2%
196			0,63	1,83	25,2	64	80	3,74	26,4	4,83	6,80	4,55	4,83	Modo 1	Modo 1	1,06	-6,1%
197			0,63	1,83	25,2	64	80	3,74	26,4	4,83	6,80	4,07	4,83	Modo 1	Modo 1	1,19	-18,7%