

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA LIGAÇÃO DE PLACAS DE
COMPENSADO ESTRUTURAL COM PERFIS DO SISTEMA
CONSTRUTIVO *LIGHT STEEL FRAMING***

Janaína Costa Rezende

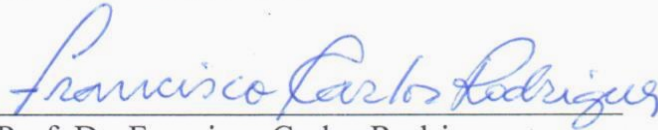
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**"ESTUDO EXPERIMENTAL DA LIGAÇÃO DE PLACAS DE
COMPENSADO ESTRUTURAL COM PERFIS DO SISTEMA
CONSTRUTIVO LIGHT STEEL FRAMING"**

Janaina Costa Rezende

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

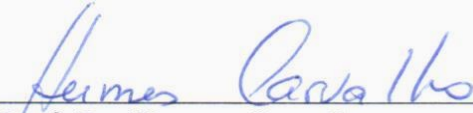
Comissão Examinadora:



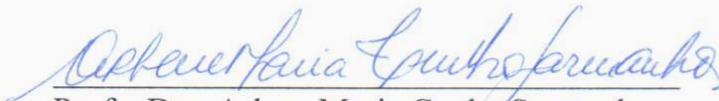
Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues
DEES - UFMG (Orientador)



Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas
DEES - UFMG (Coorientador)



Prof. Dr. Hermes Carvalho
DEES - UFMG



Profa. Dra. Arlene Maria Cunha Sarmanho
UFOP

Belo Horizonte, 27 de junho de 2019

R467e	<p>Rezende, Janaína Costa. Estudo experimental da ligação de placas de compensado estrutural com perfis do sistema construtivo <i>Light Steel Framing</i> [recurso eletrônico] / Janaína Costa Rezende. - 2019. 1 recurso online (xv, 173 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Francisco Carlos Rodrigues. Coorientador: Rodrigo Barreto Caldas.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 126-173.</p> <p>Bibliografia: f. 124-125. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Aço - Estruturas - Teses. 3. Estudos experimentais - Teses. I. Rodrigues, Francisco Carlos. II. Caldas, Rodrigo Barreto. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 624(043)</p>
-------	---

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Regina e Orlando, pelo incentivo aos estudos e pelo carinho.

À Universidade Federal de Minas Gerais por possibilitar a realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Francisco Carlos Rodrigues e ao Professor Dr. Rodrigo Barreto Caldas pela orientação que me deram no desenvolvimento do trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

À FLASAN e aos seus funcionários pelo fornecimento do material necessário e pela ajuda na fabricação dos modelos para a realização dos ensaios.

À equipe do PROPEES pelo suporte ao longo do curso.

À equipe do LAEES pelo apoio durante os ensaios.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Estruturas da Universidade Federal de Minas Gerais (DEES) que contribuíram com a minha formação.

Ao Gustavo, Luiz, Manuela e Marina que foram fundamentais durante os ensaios e nos momentos de distração.

Aos meus amigos da Pós-Graduação, em especial a Ana Carolina e a Kamyla Lima, por toda a ajuda, por compartilhar os momentos de alegria e angústia e por fazerem o momento mais sereno.

Ao Hélio Lima pelo companheirismo e pela paciência.

E a todos os amigos e aos familiares que me apoiaram nessa jornada, em especial ao Thiago Alfenas e a Fernanda Lorena, que estiveram sempre presentes.

“Se a educação sozinha não transforma a sociedade, sem ela
tampouco a sociedade muda”. (FREIRE, 2000)

RESUMO

O sistema construtivo autoportante constituído por perfis leves de aço galvanizado formados a frio, conhecido mundialmente como *Light Steel Framing*, vem ganhando espaço no cenário da construção civil brasileira. Diante disso, esta pesquisa tem por objetivo investigar o comportamento da ligação do compensado estrutural com os perfis do sistema construtivo *Light Steel Framing*, tendo em vista a possibilidade de utilização de tais placas no contraventamento do reticulado de aço desse sistema. Durante a realização dos ensaios foi considerada a anisotropia da madeira e a assimetria de suas propriedades. Foram ensaiados 92 corpos de prova de compensado estrutural para determinar, por meio de ensaios de flexão, o módulo de elasticidade e a resistência à tração na flexão estática das placas de compensado estrutural e 144 espécimes para avaliar o comportamento do conjunto formado pelos parafusos de ligação e as placas de compensado estrutural fixadas nos perfis do sistema *Light Steel Framing*, por meio de ensaios do tipo *push test*. Os resultados mostraram que os corpos de prova formados por placas de compensado estrutural com 18,3 mm de espessura e com corte de placa longitudinal em relação às fibras externas da placa, isto é, paralelamente ao comprimento de 2440 mm do compensado, apresentaram maior resistência à tração na flexão estática em relação às placas de 11,1 mm e com corte de placa transversal. Além disso, nos ensaios de *push test*, os espécimes que continham placas com corte na direção longitudinal, placas de 18,3 mm e perfis de aço de 0,80 mm apresentaram maior rigidez por ligação. Enquanto os espécimes com placas de 11,1 mm de espessura, perfis de aço de 0,95 mm e, também, placas com corte na direção longitudinal apresentaram maior força máxima por parafuso. Tais resultados irão contribuir para estudos acerca da redução do aço no contraventamento desse sistema, comumente feito com fitas e perfis de aço galvanizado, levando em conta a provável eficiência do compensado estrutural como componente de vedação com função estrutural, principalmente em edificações de interesse social. Ademais, este estudo contribuirá com a normalização nacional sobre o assunto estudado, a difusão do conhecimento técnico a respeito desse sistema e com uma construção ainda mais sustentável.

Palavras-chave: *Light steel framing*; compensado estrutural; painel de cisalhamento.

ABSTRACT

The self-supporting construction system, consisting of the galvanized cold-formed profiles, known worldwide as Light Steel Framing, it has been gaining a place in the Brazilian civil construction scenario. Therefore, this research has as main objective to investigate, by means of a theoretical and experimental study, the behavior of the connection of the structural plywood with the Light Steel Framing profiles system, with the intention of using such boards in the shear wall of the system. During the tests it was considered the anisotropy and the asymmetry of the wood. 92 structural plywood specimens were tested to determine, by means of flexure tests, the modulus of elasticity and the rupture stress of the structural plywood boards and 144 specimens to evaluate the connecting behavior between self-tapping screws and the structural plywood boards fixed in the Light Steel Framing profiles system, by means of the push test. The results showed that the specimens formed by 18,3 mm structural plywood boards, with longitudinal cutting in the boards in relation to the external fibers of the board, in other words, when the cutting is parallel to the 2440 mm length of the plywood, showed higher static flexural strength in relation to the 11,1 mm boards and transverse cutting in the boards. In addition, in push test, the specimens that contained longitudinal cutting in the boards, 18,3 mm boards and 0,80 mm steel profiles exhibited greater connection stiffness. While the specimens with 11,1 mm boards, 0,95 mm steel profiles and also longitudinal cutting in the boards showed the highest maximum force per screw. These results will contribute to studies about the reduction of steel in the shear wall of this system, commonly made with strips and steel profiles galvanized, taking into account the likely efficiency of the plywood as a structural component, especially in buildings of social interest (low cost construction). Furthermore, this study will contribute to the national standardization on the subject studied, the diffusion of technical knowledge about this system and a more sustainable construction.

Keywords: Light steel framing; structural plywood; shear wall.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2	CARACTERÍSTICAS GERAIS DO SISTEMA	3
1.3	OBJETIVOS	7
1.4	JUSTIFICATIVA	7
1.5	METODOLOGIA.....	8
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1	PAINEL DE CISALHAMENTO	10
2.2	CARACTERIZAÇÃO DOS PARAFUSOS	12
2.2.1	MODOS DE RUPTURA DA LIGAÇÃO	14
2.3	PLACAS DE COMPENSADO ESTRUTURAL	15
2.4	ESTABILIDADE DIMENSIONAL DO COMPENSADO.....	17
2.5	SUSTENTABILIDADE	19
2.6	PESQUISAS REALIZADAS.....	20
2.6.1	PESQUISA REALIZADA POR SERRETTE <i>ET AL.</i> (1997)	20
2.6.2	PESQUISA REALIZADA POR TIAN <i>ET AL.</i> (2004)	22
2.6.3	PESQUISA REALIZADA POR IWAKIRI <i>ET AL.</i> (2012)	23
2.6.4	PESQUISA REALIZADA POR FUENTES <i>ET AL.</i> (2014)	25
2.6.5	PESQUISA REALIZADA POR HATAMI <i>ET AL.</i> (2014)	26
2.6.6	PESQUISA REALIZADA POR SHAHI <i>ET AL.</i> (2014)	28
2.6.7	PESQUISA REALIZADA POR SILVA (2017).....	29
2.6.8	PESQUISA REALIZADA POR DATCHOUA (2018).....	31
3	ENSAIO DE FLEXÃO	33
3.1	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.2	ENSAIOS E PROCEDIMENTOS.....	36
3.2.1	TRATAMENTO DE DADOS	39
3.3	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	41
3.3.1	ENSAIOS DE FLEXÃO: POSIÇÃO HORIZONTAL.....	42
3.3.2	ENSAIOS DE FLEXÃO: POSIÇÃO VERTICAL.....	49
3.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	54

3.4.1	INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DE EXTRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA (LONGITUDINAL E TRANSVERSAL)	54
3.4.2	INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DOS CORPOS DE PROVA	55
3.4.3	INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	56
4	ENSAIOS DE DESLIZAMENTO, CISALHAMENTO OU <i>PUSH TEST</i>	58
4.1	MATERIAIS	58
4.2	ENSAIOS E PROCEDIMENTOS	64
4.2.1	TRATAMENTO DE DADOS	68
4.3	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	71
4.3.1	MODELO M1	71
4.3.2	MODELO M2	83
4.3.3	MODELO M3	94
4.3.4	COMPILAÇÃO DOS VALORES MÉDIOS DE CADA MODELO	105
4.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	107
4.4.1	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA DIREÇÃO DO CORTE DAS PLACAS DOS ESPÉCIMES (LONGITUDINAL E TRANSVERSAL)	107
4.4.2	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DAS PLACAS DE COMPENSADO ESTRUTURAL	110
4.4.3	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO ESPAÇAMENTO ENTRE OS PARAFUSOS	113
4.4.4	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA CHAPA DOS PERFIS DE AÇO	116
4.4.5	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DOS PARAFUSOS NOS MODELOS	119
5	CONCLUSÃO	121
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	123
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
	APÊNDICE A	126
	GRÁFICOS DE FORÇA <i>VERSUS</i> DESLOCAMENTO, CURVA TEÓRICA E CURVA SUAVIZADA	126

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Componentes de um painel estrutural com abertura. Fonte: Crasto <i>et al.</i> , 2012.....	3
Figura 1.2: Desenho esquemático de uma residência em <i>Light Steel Framing</i> . Fonte: Crasto <i>et al.</i> , 2012.....	5
Figura 1.3: Estrutura de piso em <i>Light Steel Framing</i> . Fonte: Crasto <i>et al.</i> , 2012.....	6
Figura 1.4: Caibros e vigas alinhados com montantes de painel estrutural. Fonte: Crasto <i>et al.</i> , 2012. .	6
Figura 2.1: Painel com contraventamento em "X". Fonte: Crasto <i>et al.</i> , 2012.....	10
Figura 2.2: Contraventamento em "K". Fonte: Crasto <i>et al.</i> , 2012.	11
Figura 2.3: Fixação das diagonais nos painéis por placa de <i>Gusset</i> . Fonte: Crasto <i>et al.</i> , 2012.....	11
Figura 2.4: Diagrama das forças do painel de cisalhamento. Fonte: Bredel, 2013.....	12
Figura 2.5: Fixação de um parafuso auto-atarraxante. Fonte: Rodrigues e Caldas, 2016.	12
Figura 2.6: Pontas broca e agulha (parafuso auto-atarraxante). Fonte: Crasto <i>et al.</i> , 2012.....	13
Figura 2.7: Tipos de cabeças dos parafusos auto-atarraxantes: Lentilha, Sextavada e Trombeta. Fonte: Crasto <i>et al.</i> , 2012.	13
Figura 2.8: Modos de ruptura <i>Pull-Out e Pull-Over</i> . Fonte: Vitor, 2012.	14
Figura 2.9: Exemplo de modo de ruptura <i>pull-over</i> . Fonte: AISI, 2005.....	15
Figura 2.10: Exemplo de compensado estrutural. Fonte: Globalplac, 2018.....	15
Figura 2.11: Posicionamento das lâminas de compensado. Fonte: Dias, 2005.	16
Figura 2.12: Mecanismo de inchamento em espessura de painéis de madeira. a) EI = espessura inicial; b) IET = inchamento em espessura total; c) IEH = inchamento em espessura higroscópico, IETC = inchamento em espessura pelas tensões de compressão, EF = espessura final. Fonte: DEL MENEZZI, 2004.....	18
Figura 2.13: a) Dimensões do painel em grande escala. b) Dimensões do painel em pequena escala. Fonte: Serrette <i>et al.</i> , 1997.	21
Figura 2.14: Corpos de Prova. Fonte: Tian <i>et al.</i> , 2004.....	23
Figura 2.15: Máquina universal de ensaios, curva força <i>versus</i> deslocamento e amostra de ensaio. Fonte: Fuentes <i>et al.</i> , 2014.....	25
Figura 2.16: Dimensões dos espécimes com os dispositivos de medição de força e deslocamento. Fonte: Fuentes <i>et al.</i> , 2014.....	25
Figura 2.17: Gráfico do comportamento dos painéis A e B no ensaio monotômico. a) Espécime FCB-Mon-A. b) Espécime FCB-Mon-B. Fonte: Shahi <i>et al.</i> , 2014.....	29
Figura 2.18: Ensaio do compensado naval a Flexão Estática. Fonte: Silva, 2017.....	29
Figura 2.19: Modelos dos espécimes prontos para o ensaio <i>Push Test</i> . a) Modelo 1. b) Modelo 2. c) Modelo 3. Fonte: Datchoua, 2018.....	31
Figura 3.1: Desenho da retirada dos corpos de prova para a determinação da resistência à flexão estática e módulo de elasticidade na placa de compensado de espessura de 11,1 mm.....	34

Figura 3.2: Desenho da retirada dos corpos de prova para a determinação da resistência à flexão estática e módulo de elasticidade da placa de compensado de espessura de 18,3 mm.....	35
Figura 3.3: Corpos de prova de 18,3 mm antes do ensaio de flexão.	35
Figura 3.4: Arranjo esquemático da máquina de ensaio. Fonte: ABNT, 2012.....	36
Figura 3.5: Máquina universal de ensaios EMIC DL-30.000 em realização de ensaio.....	37
Figura 3.6: Máquina universal de ensaios EMIC DL-30.000 vista de cima e o DT durante a realização dos ensaios.	37
Figura 3.7: Sistema de aquisição de dados, juntos aos <i>software Catman 4.5</i> e <i>Tesc</i>	38
Figura 3.8: CP disposto de forma horizontal na máquina de ensaios.	38
Figura 3.9: CP disposto de forma vertical na máquina de ensaios.	39
Figura 3.10: Gráfico força <i>versus</i> flecha dos CP's de 11,1 mm da série "FH 11,1 L".....	43
Figura 3.11: Gráfico força <i>versus</i> flecha dos CP's de 11,1 mm da série "FH 11,1 T".....	44
Figura 3.12: Gráfico força <i>versus</i> flecha dos CP's de 18,3 mm da série "FH 18,3 L".....	46
Figura 3.13: Gráfico força <i>versus</i> flecha dos CP's de 18,3 mm da série "FH 18,3 T".....	47
Figura 3.14: Gráfico força <i>versus</i> flecha dos CP's de 11,1 mm da série "FV 11,1 L".....	49
Figura 3.15: Gráfico força <i>versus</i> flecha dos CP's de 11,1 mm da série "FV 11,1 T".....	50
Figura 3.16: Gráfico força <i>versus</i> flecha dos CP's de 18,3 mm da série "FV 18,3 L".....	51
Figura 3.17: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento dos CP's de 18,3 mm "FV 18,3 T".....	52
Figura 4.1: Modelo M1 com espaçamento de 150 mm entre os parafusos.....	61
Figura 4.2: Modelo M1 pronto para o ensaio <i>push test</i>	62
Figura 4.3: Modelo M2 com espaçamento de 150 mm entre os parafusos.....	62
Figura 4.4: Modelo M2 pronto para o ensaio <i>push test</i>	63
Figura 4.5: Modelo M3 com espaçamento de 150 mm entre os parafusos.....	63
Figura 4.6: Modelo M3 pronto para o ensaio <i>push test</i>	64
Figura 4.7: Foto da bomba hidráulica da marca Torvel ao fundo da imagem e do anel dinamométrico acima do espécime.	65
Figura 4.8: Exemplo de <i>pull over</i> no espécime "M1 0,80 C11,1 L150 – E3". a) parafuso 6B antes do ensaio. b) <i>pull over</i> no parafuso 6B, durante o ensaio.	66
Figura 4.9: Exemplo de <i>pull over</i> no espécime "M1 0,80 C11,1 L300 – E2". a) espécime antes do ensaio; b) <i>pull over</i> no parafuso "1B", durante o ensaio.	66
Figura 4.10: Exemplo de <i>pull out</i> no espécime M1 0,95 C18,3 L300 – E2. a) espécime antes do ensaio; b) <i>pull out</i> nas ligações, durante o ensaio.	67
Figura 4.11: Exemplo de <i>pull out</i> no espécime "M2 0,80 C18,3 T 150 – E2". a) espécime antes do ensaio; b) <i>pull out</i> nas ligações, durante o ensaio.....	67
Figura 4.12: Exemplo de cisalhamento com rasgamento na placa de compensado no espécime M3 0,95 C11,1 T150 – E1. a) modelo antes do ensaio; b) cisalhamento com rasgamento nas placas, durante o ensaio.	68

Figura 4.13 - Gráfico com a aproximação bilinear da curva de Energia Equivalente Elasto-Plástica - EEEP. (Fonte: American Iron and Steel Institute, 2012 – Adaptado pela autora).....	69
Figura 4.14 - Exemplo de gráfico força versus deslocamento do modelo “M1 0,95 C11,1 L150–E1” e curva teórica (EEEEP).....	69
Figura 4.15: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M1 0,80 C11,1 (T e L) 150”	72
Figura 4.16: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M1 0,80 C11,1 (T e L) 300”	74
Figura 4.17: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M1 0,95 C11,1 (T e L) 150”	75
Figura 4.18: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M1 0,95 C11,1 (T e L) 300”	76
Figura 4.19: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M1 0,80 C18,3 (T e L) 150”	78
Figura 4.20: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M1 0,80 C18,3 (T e L) 300”	79
Figura 4.21: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M1 0,95 C18,3 (T e L) 150”	81
Figura 4.22: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M1 0,95 C18,3 (T e L) 300”	82
Figura 4.23: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M2 0,80 C11,1 (T e L) 150”	84
Figura 4.24: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M2 0,80 C11,1 (T e L) 300”	85
Figura 4.25: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M2 0,95 C11,1 (T e L) 150”	87
Figura 4.26: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M2 0,95 C11,1 (T e L) 300”	88
Figura 4.27: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M2 0,80 C18,3 (T e L) 150”	90
Figura 4.28: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M2 0,80 C18,3 (T e L) 300”	91
Figura 4.29: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M2 0,95 C18,3 (T e L) 150”	92
Figura 4.30: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M2 0,95 C18,3 (T e L) 300”	94
Figura 4.31: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M3 0,80 C11,1 (T e L) 150”	95
Figura 4.32: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M3 0,80 C11,1 (T e L) 300”	97
Figura 4.33: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M3 0,95 C11,1 (T e L) 150”	98
Figura 4.34: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M3 0,95 C11,1 (T e L) 300”	99
Figura 4.35: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M3 0,80 C18,3 (T e L) 150”	101
Figura 4.36: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M3 0,80 C18,3 (T e L) 300”	102
Figura 4.37: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M3 0,95 C18,3 (T e L) 150”	103
Figura 4.38: Gráfico força <i>versus</i> deslocamento das séries “M3 0,95 C18,3 (T e L) 300”	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Designações dos perfis de aço formados a frio para uso em <i>Light Steel Framing</i> e suas respectivas aplicações. Fonte: Crasto <i>et al</i> , 2012	4
Tabela 2.1: Bitolas e diâmetros dos parafusos autoatarraxantes. Fonte: Rodrigues e Caldas, 2016	13
Tabela 2.2: Desempenho do compensado estrutural versus placa de OSB Fonte: Adaptado de Globalwood, 2018.....	17
Tabela 2.3: Relação entre a capacidade resistente lateral de paredes com diferentes materiais de fechamento dos ensaios realizados em escala real. Fonte: Serrette <i>et al</i> , 1997, adaptada pela autora. .	22
Tabela 2.4: Relação entre a capacidade resistente lateral de paredes com diferentes materiais de fechamento dos ensaios realizados em escala menor. Fonte: Serrette <i>et al</i> , 1997, adaptada pela autora	22
Tabela 2.5: Tipos de painéis. Fonte: Tian <i>et al</i> , 2004, adaptado pelo autor.	22
Tabela 2.6: Resultados obtidos. Fonte: Tian <i>et al</i> , 2004, adaptado pelo autor.	23
Tabela 2.7: Resultados de módulo de elasticidade e módulo de ruptura – paralelo. Fonte: Iwakiri <i>et al</i> , 2012, adaptado pelo autor.	24
Tabela 2.8: Resultados de módulo de elasticidade e módulo de ruptura – perpendicular. Fonte: Iwakiri <i>et al</i> , 2012, adaptado pelo autor.	24
Tabela 2.9: Tabela de resultados. Fonte: Fuentes <i>et al</i> , 2014, adaptado pelo autor.	26
Tabela 2.10: Comparação entre resultados numéricos e experimentais. Fonte: Hatami <i>et al</i> , 2014, adaptado pelo autor.	27
Tabela 2.11: Caracterização dos modelos de painéis ensaiados. Fonte: Shahi <i>et al</i> , 2014, adaptado pelo autor.	28
Tabela 2.12: Resultado dos ensaios monotômicos. Fonte: Shahi <i>et al</i> , 2014, adaptado pelo autor.....	28
Tabela 2.13: Resultados obtidos para a Flexão Estática do Compensado Naval. Fonte: Silva, 2017. .	30
Tabela 2.14: Resultados obtidos para a Flexão Estática das placas de OSB Home Plus. Fonte: Silva, 2017.....	30
Tabela 2.15: Resultados relativos ao ensaio dos corpos de prova – Cisalhamento (<i>Push test</i>) (valores médios). Fonte: Datchoua, 2018.	32
Tabela 3.1: Parâmetros relativos aos CP's fabricados para os ensaios de flexão com a maior superfície do CP na horizontal.....	41
Tabela 3.2: Parâmetros relativos aos CP's fabricados para os ensaios de flexão com a maior superfície do CP na vertical.....	41
Tabela 3.3: Resultados relativos aos CP's de 11,1 mm da série “FH 11,1 L”.....	43
Tabela 3.4: Resultados relativos aos CP's de 11,1 mm da série “FH 11,1 T”.....	45
Tabela 3.5: Resultados relativos aos CP's de 18,3 mm da série “FH 18,3 L”.....	46
Tabela 3.6: Resultados relativos aos CP's de 18,3 mm da série “FH 18,3 T”.....	48

Tabela 3.7: Resultados relativos aos CP's de 11,1 mm da série "FV 11,1 L".....	50
Tabela 3.8: Resultados relativos aos CP's de 11,1 mm da série "FV 11,1 T".....	51
Tabela 3.9: Resultados relativos aos CP's de 18,3 mm da série "FV 18,3 L".....	52
Tabela 3.10: Resultados relativos aos CP's de 18,3 mm da série "FV 18,3 T".....	53
Tabela 3.11: Valores médios encontrados para o módulo de elasticidade (E) e a tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) e, seus respectivos C_v	54
Tabela 4.1: Espécimes referentes ao modelo 1 para os ensaios de <i>push test</i>	60
Tabela 4.2: Espécimes referentes ao modelo 2 para os ensaios de <i>push test</i>	60
Tabela 4.3: Espécimes referentes ao modelo 2 para os ensaios de <i>push test</i>	61
Tabela 4.4: Resultados relativos às séries de "M1 0,80 C11,1 (T e L) 150".....	73
Tabela 4.5: Resultados relativos às séries "M1 0,80 C11,1 (T e L) 300".....	74
Tabela 4.6: Resultados relativos às séries "M1 0,95 C11,1 (T e L) 150".....	75
Tabela 4.7: Resultados relativos às séries "M1 0,95 C11,1 (T e L) 300".....	77
Tabela 4.8: Resultados relativos às séries "M1 0,80 C18,3 (T e L) 150".....	78
Tabela 4.9: Resultados relativos às séries "M1 0,80 C18,3 (T e L) 300".....	79
Tabela 4.10: Resultados relativos às séries "M1 0,95 C18,3 (T e L) 150".....	81
Tabela 4.11: Resultados relativos às séries "M1 0,95 C18,3 (T e L) 300".....	82
Tabela 4.12: Resultados relativos às séries "M2 0,80 C11,1 (T e L) 150".....	84
Tabela 4.13: Resultados relativos às séries "M2 0,80 C11,1 (T e L) 300".....	86
Tabela 4.14: Resultados relativos às séries "M2 0,95 C11,1 (T e L) 150".....	87
Tabela 4.15: Resultados relativos às séries "M2 0,95 C11,1 (T e L) 300".....	88
Tabela 4.16: Resultados relativos às séries "M2 0,80 C18,3 (T e L) 150".....	90
Tabela 4.17: Resultados relativos às séries "M2 0,80 C18,3 (T e L) 300".....	91
Tabela 4.18: Resultados relativos às séries "M2 0,95 C18,3 (T e L) 150".....	93
Tabela 4.19: Resultados relativos às séries "M2 0,95 C18,3 (T e L) 300".....	94
Tabela 4.20: Resultados relativos às séries "M3 0,80 C11,1 (T e L) 150".....	96
Tabela 4.21: Resultados relativos às séries "M3 0,80 C11,1 (T e L) 300".....	97
Tabela 4.22: Resultados relativos às séries "M3 0,95 C11,1 (T e L) 150".....	98
Tabela 4.23: Resultados relativos às séries "M3 0,95 C11,1 (T e L) 300".....	100
Tabela 4.24: Resultados relativos às séries "M3 0,80 C18,3 (T e L) 150".....	101
Tabela 4.25: Resultados relativos às séries "M3 0,80 C18,3 (T e L) 300".....	102
Tabela 4.26: Resultados relativos às séries "M3 0,95 C18,3 (T e L) 150".....	104
Tabela 4.27: Resultados relativos às séries "M3 0,95 C18,3 (T e L) 300".....	105
Tabela 4.28: Valores médios para os resultados encontrados nos modelos M1.....	106
Tabela 4.29: Valores médios para os resultados encontrados nos modelos M2.....	106
Tabela 4.30: Valores médios para os resultados encontrados nos modelos M3.....	107
Tabela 4.31: Análise da influência da direção do corte das placas dos espécimes no modelo M1.....	108

Tabela 4.32: Análise da influência da direção do corte das placas dos espécimes no modelo M2.	109
Tabela 4.33: Análise da influência da direção do corte das placas dos espécimes no modelo M3.	110
Tabela 4.34: Análise da influência da espessura das placas de compensado estrutural no modelo M1.	111
Tabela 4.35: Análise da influência da espessura das placas de compensado estrutural no modelo M2.	112
Tabela 4.36: Análise da influência da espessura das placas de compensado estrutural no modelo M3.	113
Tabela 4.37: Análise da influência do espaçamento entre os parafusos no modelo M1.	114
Tabela 4.38: Análise da influência do espaçamento entre os parafusos no modelo M2.	115
Tabela 4.39: Análise da influência do espaçamento entre os parafusos no modelo M3.	116
Tabela 4.40: Análise da influência da espessura da chapa dos perfis de aço do modelo M1.....	117
Tabela 4.41: Análise da influência da espessura da chapa dos perfis de aço do modelo M2.....	118
Tabela 4.42: Análise da influência da espessura da chapa dos perfis de aço do modelo M3.....	119

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – Energia dissipada pela ligação
- bw – Dimensão da alma do perfil de aço
- c – Comprimento do corpo de prova
- Cv – Coeficiente de Variação
- DP – Desvio Padrão
- E – Módulo de elasticidade longitudinal
- e – Espessura do corpo de prova
- FH – Flexão horizontal
- FV – Flexão vertical
- $F_2 - F_1$ – Incremento de força no trecho reto da curva força-deformação
- G – Módulo de elasticidade transversal
- K – Taxa de deformação das fibras da madeira
- Ke – Rigidez elástica da ligação
- L – Distância entre apoios (vão)
- l – Largura do corpo de prova
- $P_{máx}$ – Força máxima total
- $P_{máx\ parafuso}$ – Força máxima por parafuso
- $Pe - 0,4$ da força máxima atingida pelo parafuso
- Py – Força inicial de escoamento da ligação
- P/Δ – Inclinação da curva força *versus* Deslocamento
- $S_2 - S_1$ – incremento de deflexão, no ponto central do vão, correspondente a $F_2 - F_1$
- Ue – U enrijecido
- V – Velocidade de carregamento dos corpos de prova à flexão
- $Var(x)$ – Variância
- Xm – Média

LETRAS GREGAS

μ – Ductilidade da ligação

δe – Deslocamento correspondente à rigidez elástica da ligação

δu – Deslocamento correspondente à força de ruptura da ligação

δy – Deslocamento correspondente à força de escoamento inicial da ligação

$\sigma_{máx}$ – Tensão de ruptura à flexão estática

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABIMCI - Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente
- AISI – *American Iron and Steel Institute*
- CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior
- CP - Corpo de Prova
- CSN - Companhia Siderúrgica Nacional
- CSP - *Canadian softwood plywood*
- DEES - Departamento de Engenharia de Estruturas
- DFP - *Douglas-fir plywood*
- DT - Transdutor de Deslocamento
- EN - *European Committee Standardization – European Standard*
- ESA - *Eucalyptus saligna*
- FSC - Forest Stewardship Council
- LAEES - Laboratório de Análise Experimental de Estruturas
- LSF - *Light Steel Framing*
- MEF - Método dos Elementos Finitos
- MOE - Módulo de Elasticidade
- MOR - Módulo de Ruptura ou tensão de ruptura à flexão estática
- NBR - Norma Brasileira
- OSB - *Oriented Strand Board*
- PCB - *Pinus caribaea var. bahamensis*
- PCC - *Pinus caribaea var. caribaea*
- PCH - *Pinus caribaea var. hondurensis*
- PROPEEs - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas
- UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais
- ZAR - Zincado de Alta Resistência
- ZC - Zincado Comercial

1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Após a Primeira Revolução Industrial, o ferro ganhou grande importância no cenário europeu, uma vez que ele foi utilizado em aplicações diversas. Com a Segunda Revolução Industrial, no fim do século XIX, o emprego do aço ganhou força e grandes edifícios europeus começaram a ser construídos em aço, ferro e vidro, como o Palácio de Cristal, em 1851, em Londres e a Torre Eiffel, em 1889, em Paris. Nos Estados Unidos, o primeiro prédio feito em estrutura metálica foi o *Home Insurance Company* em Chicago, em 1885 (CONSUL STEEL, 2002).

A população dos Estados Unidos cresceu 10 vezes causando uma alta demanda, principalmente de habitações, entre os anos de 1810 a 1860. Para atender esta demanda, buscou-se um sistema rápido, produtivo e prático, dos conceitos vindos da revolução industrial. Devido às grandes reservas florestais dessa época, surgiu o sistema construtivo denominado *Wood Framing* pelo emprego de madeira como matéria-prima (BEVILAQUA, 2005). Com o desenvolvimento tecnológico, o uso do aço nas construções foi sendo aprimorado, e ao fim da Segunda Guerra Mundial, surge naquele país um novo sistema, que ficou conhecido como *Light Steel Framing* (LSF), feito basicamente de perfis leves de aço galvanizado formados a frio.

No Japão, após a segunda Guerra Mundial, devido aos constantes incêndios ocasionados pelos ataques que o país sofria e, com o intuito de proteger as reservas de madeira, o governo proibiu o uso desse material nas construções, o que alavancou o uso de perfis de aço nas construções naquele país, tornando-o um grande produtor desse material (CRASTO *et al.*, 2012).

O *Light Steel Frame* (LSF) é um sistema construtivo com inúmeras vantagens. Sua concepção é feita de forma racional, permitindo uma construção a seco, com poucos resíduos de obra, além de poder ser feito de forma rápida, em comparação com as construções em alvenaria.

O sistema LSF é composto por painéis estruturados com reticulados de perfis de aço galvanizado formados a frio que são obtidos a partir de bobinas de aço Zincado de Alta Resistência (ZAR), com revestimentos metálicos de espessuras mínimas de 150 g/m² (alumínio-zinco) e de 275 g/m² (zinco) e tem resistência ao escoamento de no mínimo 230 MPa. Sua capacidade autoportante é devido à forma alinhada no qual se encontram os perfis, dando origem ao termo *in line framing*.

Seu sistema estrutural é dividido em dois subsistemas, os verticais e os horizontais, sendo que os subsistemas horizontais são suportados pelos verticais. Assim, os horizontais são responsáveis por receber e transmitir as cargas de piso e teto, e os subsistemas verticais conduzem as forças verticais e horizontais para a fundação do edifício (RODRIGUES e CALDAS, 2016).

Para garantir que o sistema resista também aos esforços horizontais, é necessário que haja elementos de contraventamento em algumas das paredes da edificação (constituindo as paredes de cisalhamento ou *shear walls*), o que pode ser feito com fitas de aço galvanizado, perfis de aço na solução de encaixes estampadas e, possivelmente, com algumas placas de revestimento com função estrutural.

Além do reticulado de perfis de aço, há outros elementos que compõem o Sistema LSF, como a fundação, os revestimentos com função estrutural e sem função estrutural, como placas de madeira, placas cimentícias e placas de gesso acartonado, as instalações hidráulicas e elétricas e também os isolamentos termo-acústicos.

Atualmente, o sistema é comumente empregado em países onde a construção civil é predominantemente industrializada. No Brasil, um dos maiores produtores de aço do mundo, as construções feitas em concreto armado ainda são predominantes, e o LSF ainda é pouco utilizado. No entanto, o uso do aço vem aumentando consideravelmente no país desde a década de 1980.

1.2 Características gerais do sistema

Os perfis formados a frio do LSF são obtidos por dobramento ou por conformação contínua em mesa de roletes. Os perfis mais comercializados no Brasil são os de 90, 140 e 200 mm para a medida de b_w como mostra a Tabela 1.1, e as seções mais utilizadas nas construções são as em formato em “U” para uso em guia, ripa, bloqueador e sanefa, enquanto o “Ue” enrijecido, é comumente usado como bloqueador, enrijecedor de alma, montante, verga e viga, como demonstra a Figura 1.1. Além dessas, as seções do tipo cartola, usados em ripas de telhados, e a cantoneira, utilizada para fazer conexões, também podem ser empregadas.

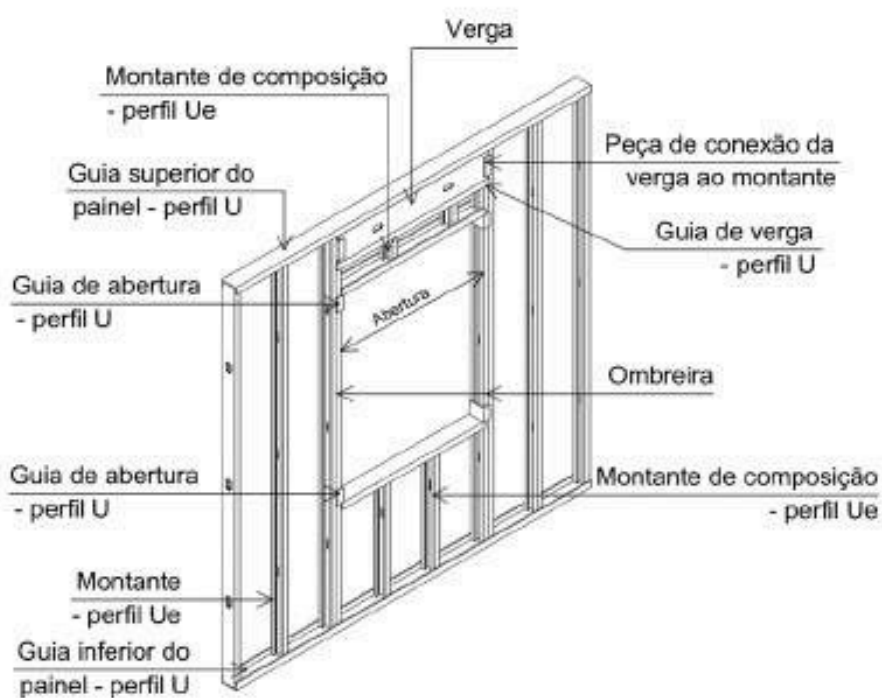
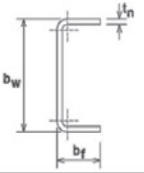
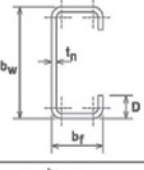
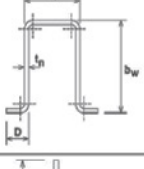



Figura 1.1: Componentes de um painel estrutural com abertura. Fonte: Crasto *et al.*, 2012

Tabela 1.1: Designações dos perfis de aço formados a frio para uso em *Light Steel Framing* e suas respectivas aplicações. Fonte: Crasto *et al*, 2012

SEÇÃO TRANSVERSAL	SÉRIE Designação NBR 6355:2003	Utilização
	U simples $U\ b_w \times b_f \times t_n$	Guia Ripa Bloqueador Sanefa
	U enrijecido $Ue\ b_w \times b_f \times D \times t_n$	Bloqueador Enrijecedor de alma Montante Verga Viga
	Cartola $Cr\ b_w \times b_f \times D \times t_n$	Ripa
	Cantoneira de abas desiguais $L\ b_{f1} \times b_{f2} \times t_n$	Cantoneira

Os painéis estruturais que compõem as paredes são compostos de montantes, separados entre si por 400 ou 600 mm. Os painéis distribuem as forças da estrutura, levando até o solo e podem ser revestidos por diversos materiais, tanto na parte externa quanto na parte interna.

O sistema de fechamento dos painéis estruturais é feito com placas de vedação na parte externa e interna do edifício. Elas precisam ser leves e racionalizadas com o projeto. No Brasil, os revestimentos mais utilizados são as placas de OSB (*oriented strand board*), placa cimentícia e gesso acartonado, conforme informa Crasto *et al.* (2012).

Existem algumas opções para o acabamento final das placas de OSB, como a argamassa e o *siding*, que pode ser vinílico, em madeira ou cimentício. Outra forma de revestimento é a placa cimentícia, composta de cimento Portland e agregados, tendo alta resistência, permitindo seu uso tanto na parte externa quanto na interna. O gesso acartonado também é uma alternativa para vedação, ele é composto de gesso, água e aditivos, no entanto só pode ser utilizado na parte interna da edificação e sem função estrutural. Além dessas vedações, existe a possibilidade de aplicar um isolante termo-acústico no sistema LSF, que segue o princípio massa-mola-massa, no qual há um preenchimento com um material absorvedor entre

as placas de revestimento, como a lâ de vidro. A Figura 1.2 representa o esquema de uma residência em LSF.

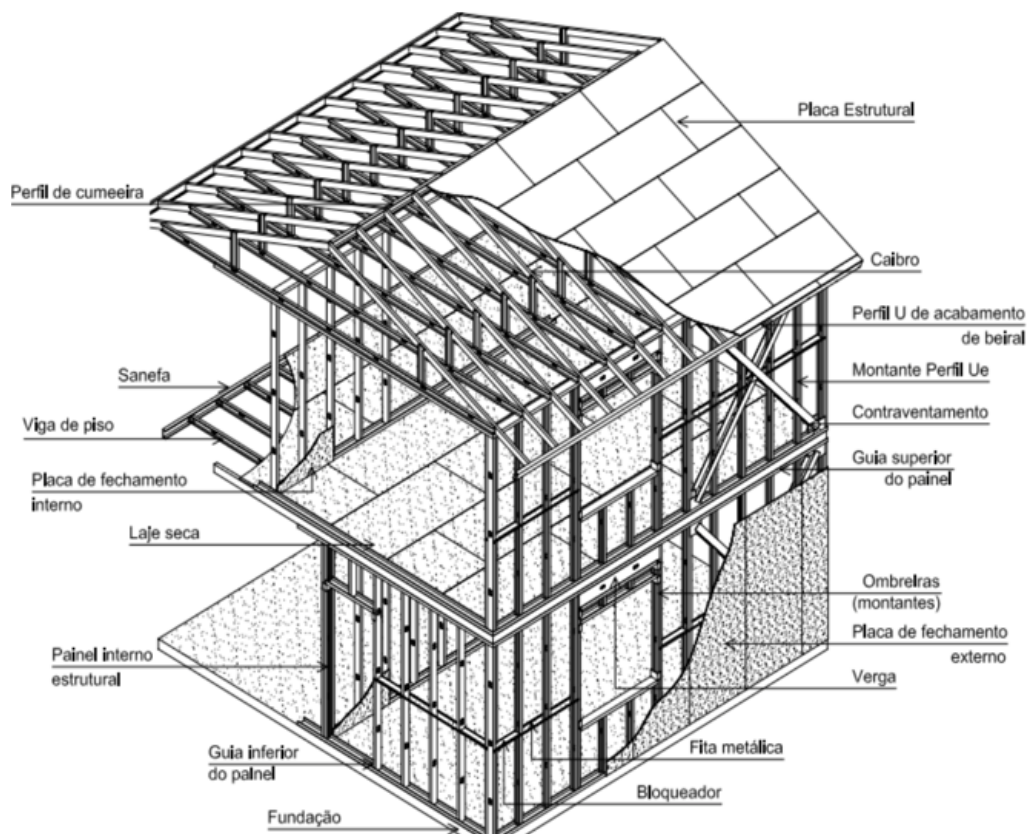


Figura 1.2: Desenho esquemático de uma residência em *Light Steel Framing*. Fonte: Crasto *et al.*, 2012

As vigas de piso estão apoiadas nos montantes, de forma alinhada, para garantir que a estrutura atenda aos esforços solicitantes, além de que precisam ter capacidade resistente o suficiente para suportar as cargas como peso próprio da laje, pessoas, mobiliário, equipamentos, entre outros. Para compor a laje, além das vigas de piso, são necessários outros elementos, como a sanefa ou guia de encabeçamento e o enrijecedor de alma. Quanto aos tipos de lajes, existem duas, a laje do tipo úmida e a laje do tipo seca. A do tipo úmida utiliza concreto para fazer a base do contrapiso, e a seca, placas de OSB parafusadas junto às vigas de piso, sendo que as lajes do tipo seca são feitas de forma mais rápida e limpa, como deixa claro a Figura 1.3.

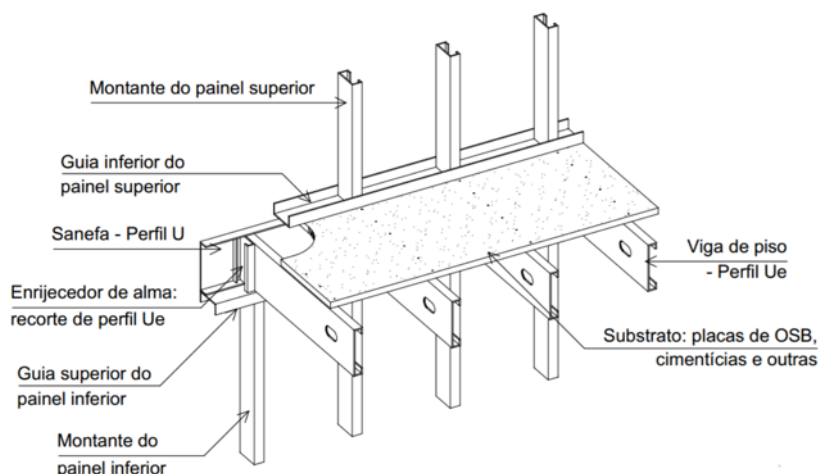


Figura 1.3: Estrutura de piso em *Light Steel Framing*. Fonte: Crasto *et al.*, 2012

A cobertura, como mostra a Figura 1.4, tem uma gama de possibilidades, tanto pode ser inclinada, quanto horizontal. Os telhados inclinados se assemelham aos convencionais de madeira, no entanto os perfis são substituídos pelos de aço galvanizado. Para que o sistema *in line framing* seja obedecido é necessário que as almas dos perfis do telhado estejam alinhadas às almas dos perfis dos painéis estruturais. As lajes horizontais podem ser feitas com vigas ou com treliças planas, quando é necessário vencer grandes vãos.

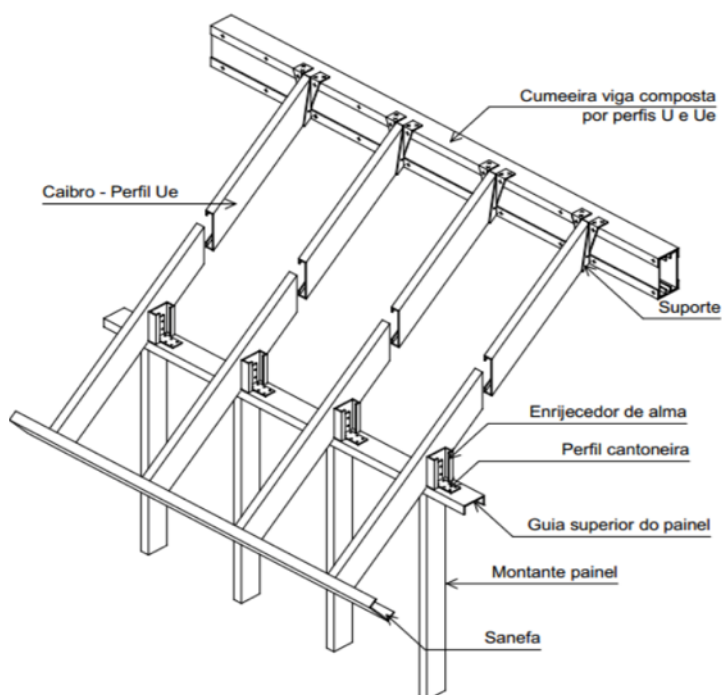


Figura 1.4: Caibros e vigas alinhados com montantes de painel estrutural. Fonte: Crasto *et al.*, 2012.

Para que o sistema LSF funcione corretamente, é necessário que os conectores sejam utilizados de maneira apropriada e a montagem seja feita conforme o projeto. Quanto mais

industrializado é o projeto, mais racionalizado será o canteiro de obras. No Brasil, os conectores, como os parafusos auto-atarraxantes e os auto-perfurantes são os mais comuns nesse tipo de estrutura. Esses parafusos tem uma proteção similar a estrutura galvanizada e devem fixar não só os perfis de aço como também os demais elementos, como as placas de fechamento.

Para as instalações utilizadas no sistema LSF, como as elétricas, hidráulicas, sanitárias, telefônicas, dentre outras, são feitos furos nas almas dos perfis U enrijecido nos painéis estruturais e nas vigas. As formas, dimensões máximas e distâncias mínimas dos furos são pré-determinados no projeto conforme a ABNT NBR 15253:2014 (ABNT, 2014).

1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é identificar experimentalmente o comportamento da ligação da placa de compensado estrutural, também conhecido mundialmente como *plywood*, com os perfis do sistema construtivo LSF, por intermédio de ensaios do tipo *push test*. Dessa forma, este estudo irá contribuir com pesquisas futuras relacionadas ao contraventamento dos painéis do sistema LSF feito por placas de compensado estrutural.

1.4 Justificativa

Devido às inúmeras vantagens do LSF, o uso desse sistema vem crescendo no país. Um dos seus empregos se insere em programas de habitação de interesse social, uma vez que possibilita a otimização do projeto, bem como sua viabilidade econômica. A Caixa Econômica Federal, por exemplo, autoriza o financiamento dos edifícios em LSF desde que os mesmos utilizem apenas placas cimentícias ou placas de OSB nas edificações. Por isso, a presente pesquisa visa avaliar o emprego do compensado estrutural nessas obras como uma contribuição técnico-científica para tais edificações, sobretudo as de interesse social.

O sistema de contraventamento do LSF geralmente é constituído por fitas de aço galvanizado. As placas de revestimento podem ser utilizadas desde que sejam asseguradas pelo fabricante como elementos estruturais e tenham comprovado desempenho estrutural no contraventamento dos painéis. Espera-se, portanto, que o uso do compensado estrutural no LSF, proposto nesta pesquisa, seja uma inovação tecnológica para o contraventamento do

sistema. Também poderá ser uma alternativa de materiais quanto ao uso de revestimentos, no qual são mais utilizadas as placas de OSB. Além disso, poderá contribuir com a competitividade no mercado de placas de madeira para o sistema LSF.

Além disso, o estudo sobre o comportamento das placas de compensado estrutural poderá contribuir na diminuição dos custos finais de obra, uma vez que sua utilização no contraventamento da estrutura poderá substituir as fitas de aço galvanizado ou os perfis em diagonal no sistema de encaixe.

Apesar do emprego de placas de revestimento como elementos de contraventamento do LSF, ainda não existem normas brasileiras para especificação e determinação dos parâmetros de ensaio dos painéis de cisalhamento tendo placas de compensado como estrutura de contraventamento. Espera-se que os resultados obtidos nesta pesquisa contribuam e sirvam de base para a sua elaboração.

Ademais, este trabalho atende aos objetivos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas (PROPEEs/UFMG), além de complementar pesquisas já iniciadas no referido Programa.

1.5 Metodologia

Para alcançar os objetivos desta pesquisa, foram indispensáveis:

- a) A elaboração de uma pesquisa bibliográfica a fim de verificar os ensaios que já foram realizados e os seus respectivos resultados para uma comparação posterior com os ensaios realizados neste trabalho, cujos elementos de composição dos modelos são fabricados no Brasil;
- b) Determinar por meio de ensaios de flexão de três pontos, algumas propriedades mecânicas do compensado estrutural nas direções longitudinal e transversal da placa, tais como: o módulo de elasticidade (E) e a tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{m\acute{a}x}$), ou seja, a resistência à tração na flexão estática com base na ABNT NBR 9533:2012 (ABNT, 2012).

- c) A realização de ensaios do tipo *push test*, com variações nas espessuras do compensado estrutural e do perfil metálico considerando o posicionamento e o espaçamento entre os parafusos, para analisar o comportamento do conjunto compensado, parafuso e reticulado, determinado por meio de uma (adaptação dos ensaios de cisalhamento, do tipo *Standard Push test*, preconizado pelo *Eurocode 4* (EN 1994-1-1, 2004).

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PAINEL DE CISLHAMENTO

Para que o sistema LSF consiga resistir a esforços horizontais, é necessário que haja um contraventamento feito nas paredes estruturais, compostas de montantes separados entre si por 400 ou 600 mm, com fitas de aço galvanizado, cuja forma mais comum é em formato de “X”, como mostra a Figura 2.1. Quando esse formato não é adequado devido, por exemplo, a alguma abertura, pode-se utilizar o contraventamento em outros formatos, como em "K", "Λ" e "V" (Figura 2.2) (RODRIGUES e CALDAS, 2016). Caso se disponha de comprovações técnicas, ainda é possível utilizar placas de madeira, como o compensado estrutural e a placa de OSB (*Oriented Strand Board*) para garantir a estabilidade da estrutura. O efeito diafragma é a capacidade que essas paredes têm em resistir às forças laterais, e o painel recebe o nome de diafragma rígido ou painel de cisalhamento (*shear wall*).



Figura 2.1: Painel com contraventamento em "X". Fonte: Crasto *et al.*, 2012.



Figura 2.2: Contraventamento em “K”. Fonte: Crasto *et al.*, 2012.

As fitas de aço galvanizado são parafusadas com parafusos do tipo HEX com cabeça sextavada na chapa de Gusset, de mesmo material, junto a montantes duplos, que ficam junto a ancoragem (*hold down*) do painel, como mostra a Figura 2.3. Dessa forma, é possível que esforços transmitidos pelo contraventamento sejam absorvidos pela fundação. Além disso, o ângulo entre a guia inferior e a fita de aço galvanizado deve estar compreendido entre 30° e 60° , para que haja eficiência estrutural do painel diafragma. (RODRIGUES e CALDAS, 2016).

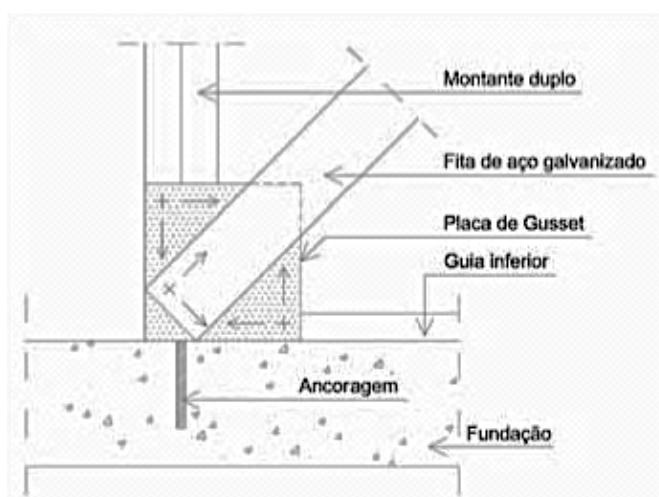


Figura 2.3: Fixação das diagonais nos painéis por placa de *Gusset*. Fonte: Crasto *et al.*, 2012.

Já algumas das placas de revestimento podem ser utilizadas no lugar das fitas de aço galvanizado para desempenhar com o reticulado de aço a função de diafragma rígido. No entanto, a capacidade de desempenho estrutural dessas placas deve ser garantida pelo seu

fabricante ou obtida na literatura aceita cientificamente ou por meio de ensaios realizados em instituição de ensino e pesquisa ou laboratórios nacionais ou internacionais.

Para que o painel exerça o efeito diafragma, é preciso que ele esteja engastado na parte inferior e que seu deslocamento na parte superior esteja dentro dos limites preconizados nas normas brasileiras aplicáveis, dentre elas está a ABNT NBR 14762:2010 (ABNT, 2010). O diagrama de forças exercido pelo painel de cisalhamento é mostrado na Figura 2.4.

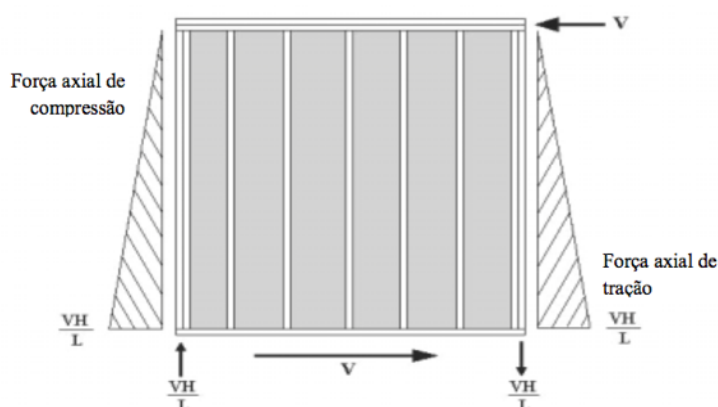


Figura 2.4: Diagrama das forças do painel de cisalhamento. Fonte: Bredel, 2013.

2.2 Caracterização dos parafusos

No sistema LSF, os meios de ligações mais utilizados no Brasil são os parafusos denominados de autobrocantes e auto-atarraxantes (Figura 2.5). Esses conectores são responsáveis pela fixação entre si dos perfis formados a frio e de outros componentes que fazem parte do sistema, como as placas estruturais ou placas de revestimento. Além disso, são os responsáveis pela transmissão de esforços entre os perfis de aço e a placa de fechamento (CRASTO *et al*, 2012).

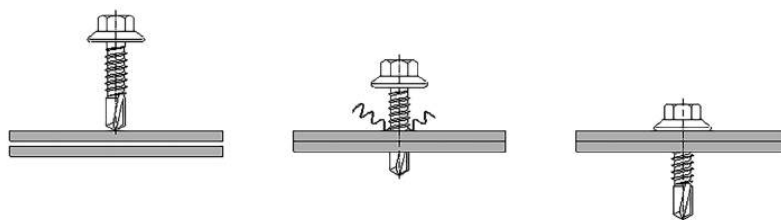


Figura 2.5: Fixação de um parafuso auto-atarraxante. Fonte: Rodrigues e Caldas, 2016.

Os parafusos são feitos de aço baixo carbono galvanizado, podendo ser estruturais ou ter apenas a função de montagem. Tais parafusos podem ter dois tipos de pontas e, também, três tipos de cabeça, que são utilizados conforme o tipo de material a ser fixado. A ponta broca ou *self-drilling* é utilizada quando o perfil tiver espessura superior a 0,80 mm e a agulha ou *self-piercing* quando essa é de 0,80 mm (Figura 2.6).



Figura 2.6: Pontas broca e agulha (parafuso auto-atarraxante). Fonte: Crasto *et al.*, 2012.

As cabeças tipo lentilha (Plana) e sextavada (HEX) são empregadas na ligação aço-aço e os parafusos com cabeça tipo trombeta são utilizados na fixação de placas de fechamento no reticulado metálico (Figura 2.7).



Figura 2.7: Tipos de cabeças dos parafusos auto-atarraxantes: Lentilha, Sextavada e Trombeta. Fonte: Crasto *et al.*, 2012.

Os diâmetros de parafusos auto-atarraxantes estruturais, estão representados na Tabela 2.1. Os parafusos mais utilizados no LSF são os de nº 8 e nº 10 e os seus comprimentos variam de 12,7 a 38,1 mm. Quanto maior o diâmetro do parafuso, maior sua resistência ao cisalhamento. Esses comprimentos ainda dependem da aplicação, de modo que ao ser usado na fixação aço-aço, o parafuso deverá ultrapassar a última chapa com no mínimo em três filetes de rosca e em 10 mm no caso de placas de fechamento e reticulado metálico (RODRIGUES E CALDAS, 2016).

Tabela 2.1: Bitolas e diâmetros dos parafusos autoatarraxantes. Fonte: Rodrigues e Caldas, 2016

Bitola	Diâmetro (mm)
#8	4,2
#10	4,8
#12	5,5
¼	6,3

Os conectores também podem ser classificados como dúcteis e frágeis, sendo sua ductilidade relacionada ao seu comportamento quando submetido a ensaios de deslizamento. Quando os conectores são dúcteis, antes de atingir sua resistência máxima sob carregamento crescente, continuam se deformando, sem que haja ruptura, permitindo então, que os conectores vizinhos, absorvam também a força cisalhante, dessa forma há um processo de uniformização de resistência dos conectores do sistema LSF (VILLELA, 2015).

O ensaio *push test*, responsável por referenciar os ensaios de cisalhamento ou ensaios de deslizamento, classifica um conector como dúctil desde que seu deslizamento característico seja superior a 6mm. Ademais, os conectores também podem ser classificados por rígidos ou flexíveis, sendo rígidos quando não se deformam sob ação de força e, proporcionam uma conexão quase sem deslizamento relativo entre a placa de revestimento e o perfil metálico, e são flexíveis quando se deformam submetidos a forças e, causam um deslizamento relativo. (DATCHOUA, 2018).

2.2.1 Modos de ruptura da ligação

De acordo com Rodrigues e Caldas (2016), os modos de ruptura que ocorrem quando os parafusos são submetidos a tração são o *Pull-out* e o *Pull-over*. O primeiro acontece quando há o arrancamento do parafuso do perfil metálico junto a placa de revestimento, enquanto o segundo é marcado pelo puncionamento da placa, como representados na Figura 2.8. Na Figura 2.9 está um exemplo da ruptura *pull-over*.

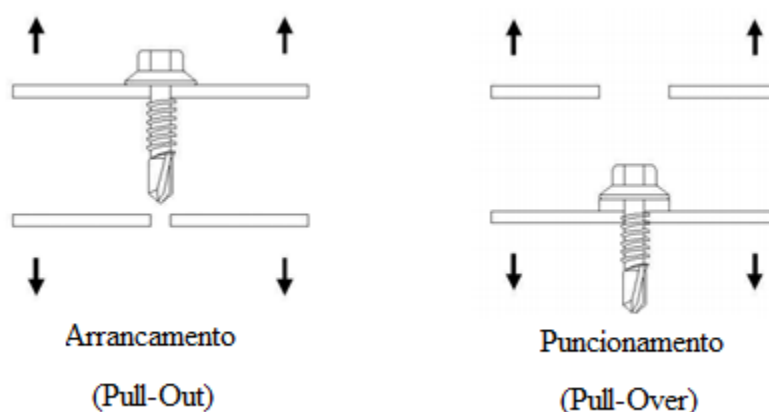


Figura 2.8: Modos de ruptura *Pull-Out* e *Pull-Over*. Fonte: Vitor, 2012.



Figura 2.9: Exemplo de modo de ruptura *pull-over*. Fonte: AISI, 2005.

2.3 Placas de Compensado Estrutural

As indústrias do setor florestal no país passaram por muitas mudanças a partir da década de 1980, uma vez que as florestas plantadas de rápido crescimento, como pinus e eucalipto, passaram a ser as principais produtoras de matéria-prima do setor, substituindo as florestas nativas. A madeira do gênero *Pinus* (*taeda e elliottii*) foi a primeira a ser usada na substituição das madeiras nativas e, nos dias de hoje, é uma das mais utilizadas na fabricação de laminados, compensados, aglomerados, MDF e placas de OSB (IWAKIRI *et al.*, 2007). A Figura 2.10 mostra a imagem de um compensado estrutural.



Figura 2.10: Exemplo de compensado estrutural. Fonte: Globalplac, 2018

Conforme a Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI, 2007), o compensado é um painel de madeira, conhecido mundialmente por *plywood*, feito de colagem de lâminas de madeira sobrepostas, cujas fibras são dispostas perpendicularmente a cada lâmina, a fim de que possa garantir maior resistência mecânica e física, como mostra a Figura 2.11.

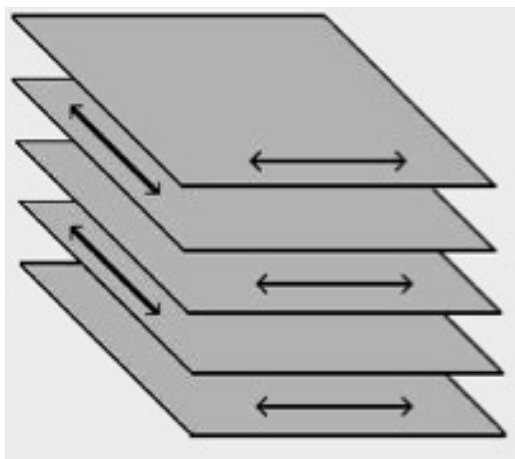


Figura 2.11: Posicionamento das lâminas de compensado. Fonte: Dias, 2005.

Ainda segundo Iwakiri *et al.* (2007), as resinas de fenol-formaldeído ou ureia-formaldeído são responsáveis pela colagem das lâminas do painel, e o processo de prensagem das lâminas demanda atenção em relação ao teor de umidade, pressão e com as tolerâncias fixadas em relação ao teor de umidade, que é de 10 (± 2) %, conforme a ABIMCI. Além disso, o tipo de resina usada dependerá do tipo de compensado. No mercado há sete tipos de compensados, são eles, laminados, sarrafeados, decorativos, industrial, naval, resinado e plastificado.

A ABIMCI, divide os painéis de madeira compensada quanto ao uso, e são consideradas três classes: a classe 1, chamada de condições secas, para compensados que serão protegidos da ação da água, nesse caso são usadas resinas com base em ureia/formaldeído; a classe 2, denominada de condições úmidas, destinadas a painéis utilizados em locais úmidos e capazes de resistir a umidade por pouco tempo, e são utilizadas resinas de ureia/formaldeído ou fenol/formaldeído; e a classe 3, chamada de condições externas, para painéis também utilizados em locais úmidos, porém, nesse caso, eles tem a capacidade de resistir à ação de intempéries por um longo tempo, e são usadas resina fenol/formaldeído. Também, ela divide os painéis quanto aos tipos de aplicação, são eles, os compensados estruturais, utilizados em

paredes, pisos e tetos; e, os não estruturais, utilizados em andaimes, tapumes, folhas de porta, bem como na fabricação de móveis e pisos de madeira decorativos.

Segundo seus fabricantes, o compensado estrutural tem qualidade superficial, estabilidade dimensional, assim como baixa condutividade térmica e acústica, resistência a água e ótimo custo-benefício. Eles são fabricados conforme a ABNT NBR 9533:2012 (ABNT, 2012), visando garantir a resistência do compensado estrutural à flexão estática, item importante a ser levado em consideração ao assegurar a estabilidade das estruturas em *Light Steel Frame* e *Wood Frame*. Na tabela 2.2, a Globalwood, uma empresa de madeiras e compensados, faz uma comparação entre o desempenho físico e mecânico do painel compensado e das placas de OSB. Segundo a empresa, os dois painéis são estruturais e têm desempenho semelhante quando produzidos com colas à prova d' água.

Tabela 2.2: Desempenho do compensado estrutural versus placa de OSB Fonte: Adaptado de Globalwood, 2018.

Desempenho	Compensado	OSB
Maior estabilidade dimensional	sim	não
Menor arranque de pregos	sim	não
Maior resistência à água	sim	não
Painel de madeira estrutural (cola à prova d' água)	sim	sim
Disponível em maiores dimensões	não	sim
Produzido com madeira reflorestada	sim	sim
Menor propensão à retração e deformação	sim	não
Ótima relação resistência elevada e baixo peso	sim	não
Material durável, quando tratado	sim	sim
Uniforme, livre de nós soltos	não*	sim
Fabricado com toras de menor diâmetro	não	sim
Baixa energia para sua produção	sim	sim
Inchaço das bordas, devido à alta exposição à umidade	não	sim
Presença de nós	sim*	não
Boa resistência ao cisalhamento	sim	sim

* Com base na classificação das chapas.

2.4 Estabilidade Dimensional do Compensado

A placa de compensado, assim como os outros produtos que tem como matéria prima a madeira, tem uma característica bastante problemática, a má estabilidade dimensional. Esse problema acontece devido ao fenômeno chamado de anisotropia da madeira, no qual suas propriedades variam de acordo com a direção considerada. Ao absorver água as dimensões da madeira aumentam, e quando a libera, suas dimensões diminuem (Figura 2.12). Essa

característica é resultante do efeito da higroscopicidade da madeira, ou seja, é a capacidade do material de fazer constantes alterações no seu teor de umidade a fim de conseguir equilíbrio em relação a umidade relativa do ambiente em que se encontra. Dessa forma, a madeira e seus produtos derivados podem sofrer grande alterações em suas propriedades física e mecânicas, levando a perda de resistência e diminuição de vida útil. (MELO, 2013).

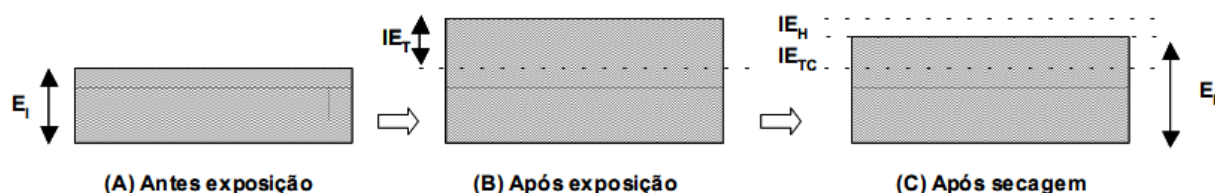


Figura 2.12: Mecanismo de inchamento em espessura de painéis de madeira. a) E_i = espessura inicial; b) IET = inchamento em espessura total; c) IE_H = inchamento em espessura higroscópico, $IETC$ = inchamento em espessura pelas tensões de compressão, E_f = espessura final. Fonte: DEL MENEZZI, 2004.

Ainda segundo Melo (2013), apesar da higroscopicidade da madeira, os compostos de madeira, ao receberem aditivos, como resinas, e ao serem prensados em altas temperaturas e pressão durante sua fabricação, são capazes de aumentar sua estabilidade dimensional, uma vez que a capacidade natural de absorção de água da madeira maciça diminui, devido à alteração que ocorre na estrutura da madeira.

Os painéis de compensado têm maior estabilidade dimensional em relação às placas de OSB, uma vez que a placa de OSB tem maiores tensões internas, ocasionadas durante a prensagem do material, essas tensões são liberadas ao serem expostas a ambientes úmidos. Diferentemente, na fabricação de compensados, o processo de força ao colar as lâminas é menor, gerando assim menores tensões internas quando expostos à umidade.

Apesar dos problemas ocasionados pela estabilidade dimensional, que podem influenciar no desempenho do material, inúmeros estudos estão sendo feitos para melhorar a estabilidade dos compostos de madeira, a fim de diminuir os danos que podem ocorrer nesses materiais. Dessa forma, é possível estudar as causas e criar formas de prevenção para a instabilidade dimensional do compensado.

2.5 Sustentabilidade

Os compensados, segundo as empresas que os fabricam, estão sob rigorosos critérios socioambientais, com seus produtos feitos de madeira de reflorestamento e de baixa emissão de formaldeído. Essa preocupação é devido ao fato de a indústria da construção civil ser uma das que mais polui no mundo. Ela gera grande impacto no meio ambiente, sendo uma das grandes responsáveis pela grande quantidade de CO² emitido na atmosfera, pelo esgotamento das reservas naturais, pelo lixo depositado de forma indevida na natureza, pela degradação do solo, entre outros impactos que atingem também outras esferas além da ambiental, como a econômica e a social. Ademais, esse setor não gera resíduos apenas quando está produzindo seus materiais. As edificações quando prontas também geram resíduos ao longo de toda sua vida útil, principalmente quando essas edificações são pouco sustentáveis.

As empresas de placas de compensado, muitas vezes, também garantem, além do uso de madeira de reflorestamento, a recuperação de áreas degradadas, a conservação de remanescentes florestais, o gerenciamento de resíduos, o controle de atividades ilegais, como a caça, pesca e extração, e, asseguram também o sistema agroflorestal, que permite o uso diversificado da terra. Também, os fabricantes prezam pelo certificado internacional FSC (*Forest Stewardship Council*), o qual certifica que as madeiras utilizadas sejam produzidas sob condições sustentáveis, visando não só a responsabilidade ambiental, mas também a social e a econômica.

As placas de OSB, bem como as de compensado, ideais para uso em revestimento e paredes estruturais nas construções a seco, são feitas de madeiras 100% reflorestadas com espécie de rápido crescimento, como informam os fabricantes. Em relação a produção das placas de OSB, é possível utilizar até 96% das toras de madeira para fabricar uma placa de OSB, contra 56% do compensado (REMADE, 2006).

Além disso, é possível a utilização de troncos mais finos e menores para a produção da placa de OSB, sendo troncos de seis anos para a placa de OSB, e de 14 anos para o de compensado, proporcionando assim um menor valor comercial. Também, assim como o compensado, é um material que os fabricantes asseguram a eliminação de sobras de forma racionalizada, durante sua concepção, além de adequar cada placa de OSB a determinado tipo de uso.

As placas cimentícias, que também podem ser utilizadas na construção a seco, são compostas de uma mistura de cimento Portland, agregados naturais e com reforço de fibras sintéticas, que hoje substituem o amianto, banido em muitos países por ser cancerígeno. No entanto, apesar da substituição dessa fibra mineral por um elemento sustentável, o cimento contido na placa é um elemento responsável por grandes emissões de CO², a produção de uma tonelada de cimento libera aproximadamente uma tonelada de CO² na atmosfera, devido principalmente ao aquecimento de suas matérias-primas básicas como calcário e argila, que chega a temperatura de 1400 °C, contribuindo assim para o efeito estufa (MONTEIRO et al., 2017).

Todavia, as empresas fabricantes de placas cimentícias, garantem a redução do consumo de água e dos resíduos gastos durante as obras que utilizam tais placas, graças a uma possível racionalização do projeto. Além disso, asseguram a resistência da placa, promovendo então, uma redução de reparos durante sua vida útil.

Devido à necessidade da sustentabilidade na construção civil, inúmeras pesquisas estão sendo feitas com o intuito de minimizar os impactos gerados por esse setor. Nesse cenário, podemos encontrar a Análise do Ciclo de Vida (ACV), uma das principais metodologias atuais de análise ambiental, capaz de avaliar os impactos ambientais gerados pelos materiais de construção, desde sua produção até o seu descarte. Apesar de existirem muitos estudos na atualidade para diminuir os danos que a indústria da construção civil causa no meio ambiente, ainda é necessário mais investimentos no setor, como políticas públicas de redução de gases na atmosfera e de controle da exploração de recursos naturais, e de incentivo a pesquisas para a criação e uso de materiais construtivos mais sustentáveis.

2.6 Pesquisas realizadas

2.6.1 Pesquisa realizada por Serrette *et al.* (1997)

Na pesquisa realizada por Serrette *et al.* (1997), desenvolvida para o *American Iron and Steel Institute*, foi comparado o comportamento do compensado, da placa de OSB, do gesso acartonado e do MDF no fechamento de paredes estruturais do sistema construtivo LSF. Os ensaios foram feitos para os mesmos espaçamentos entre os conectores metálicos, variando de 102 mm e 152 mm na borda da placa e de 305 mm no centro da placa, com perfeita fixação e

ancoragem das paredes na base. Os ensaios foram realizados em escala real e em escala menor.

Nos ensaios em escala real foi utilizado um painel com 2440 mm de altura 2440 mm de largura e na menor escala foi utilizado um espécime de 610 mm x 610 mm, conforme mostra a Figura 2.13.

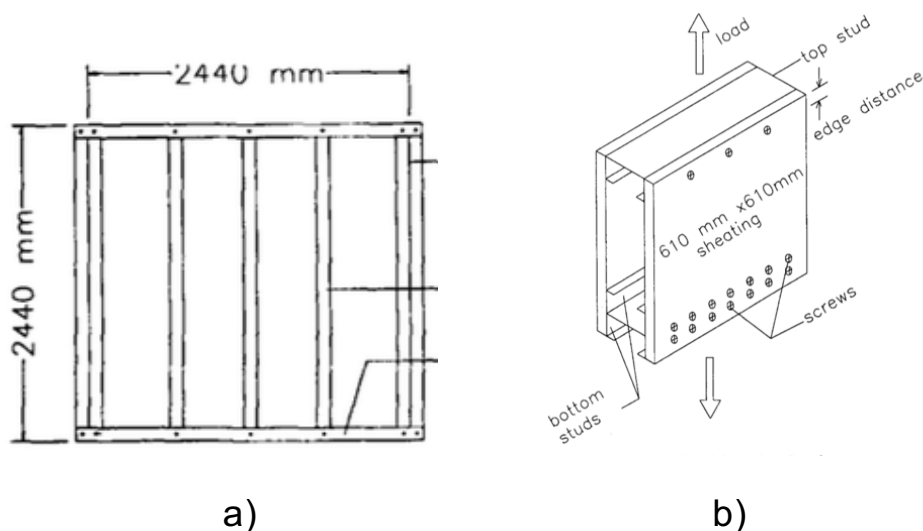


Figura 2.13: a) Dimensões do painel em grande escala. b) Dimensões do painel em pequena escala. Fonte: Serrette *et al*, 1997.

Os resultados apresentados na Tabela 2.3 mostram que o compensado tem maior resistência lateral nas paredes em relação aos outros materiais de fechamento. Ademais, segundo os autores, os valores de resistência para a placa de compensado e os painéis de OSB são similares, enquanto a resistência da parede revestida de placa de gesso é relativamente baixa.

A comparação dos resultados dos ensaios realizados em pequena escala com os resultados dos ensaios em escala real mostrou que os testes em pequena escala são capazes de avaliar o comportamento da resistência relativa de diferentes tipos de parede de cisalhamento em relação a escala real. Na Tabela 2.4 estão os resultados encontrados para os testes em escala menor.

Tabela 2.3: Relação entre a capacidade resistente lateral de paredes com diferentes materiais de fechamento dos ensaios realizados em escala real. Fonte: Serrette *et al.*, 1997, adaptada pela autora.

Material de fechamento	Comparativo de força máxima
Compensado 11,9mm, APA rated exposure 1 – parafusos No. 8 x 31,7mm	100%
OSB 11,1mm APA rated exposure 1 – parafusos No. 8 x 31,7mm	88%
Gesso acartonado 12,7mm Hardirock – parafusos No. 6 x 25,4mm	38%
Fiberboard 12,7mm Fiberboind – parafusos No. 6 x 31,7mm	35%

Tabela 2.4: Relação entre a capacidade resistente lateral de paredes com diferentes materiais de fechamento dos ensaios realizados em escala menor. Fonte: Serrette *et al.*, 1997, adaptada pela autora

Material de fechamento	Comparativo de força máxima
Compensado 11,9mm, APA rated exposure 1 – parafusos No. 8 x 31,7mm	100%
OSB 11,1mm APA rated exposure 1 – parafusos No. 8 x 31,7mm	86%
Gesso acartonado 12,7mm Hardirock – parafusos No. 6 x 25,4mm	34%
Fiberboard 12,7mm Fiberboind – parafusos No. 6 x 31,7mm	38%

2.6.2 Pesquisa realizada por Tian *et al.* (2004)

Na pesquisa feita por Tian *et al.* (2004), foi realizada uma análise da rigidez de 6 diferentes tipos de painéis do sistema LSF, conforme mostra a Tabela 2.5. O espécime 1 não tinha contraventamento; o espécime 2 era composto por placa de OSB e o espécime 3, por placa cimentícia; o espécime 4 tinha o contraventamento tipo X em apenas um lado do painel e o espécime 5, nos dois lados e o espécime 6 era provido de duplo contraventamento nos dois lados do painel, como mostra a Figura 2.14.

Os painéis analisados tinham as dimensões de 2450 mm de altura por 1250 mm de comprimento e o espaçamento dos montantes foi de 600 mm. Além disso, o aço utilizado nos perfis foi o ZAR 350. As fitas de contraventamento tinham 60 mm de largura e 1,0 mm ou 1,25 mm de espessura e o espaçamento entre os parafusos auto-atarraxantes responsável pela fixação das placas de revestimento foi de 300mm.

Tabela 2.5: Tipos de painéis. Fonte: Tian *et al.*, 2004, adaptado pelo autor.

Teste	Tipo de Contraventamento	Quantidade de Contraventamento
1	Sem contraventamento e sem placa	Nenhum
2	Placa OSB	Um
3	Placa Cimentícia	Um
4	Tipo X (1 mm x 60 mm)	Dois
5	Tipo X (1 mm x 60 mm)	Um
6	Duplo contraventamento tipo XX (1,2 mm x 60 mm)	Dois

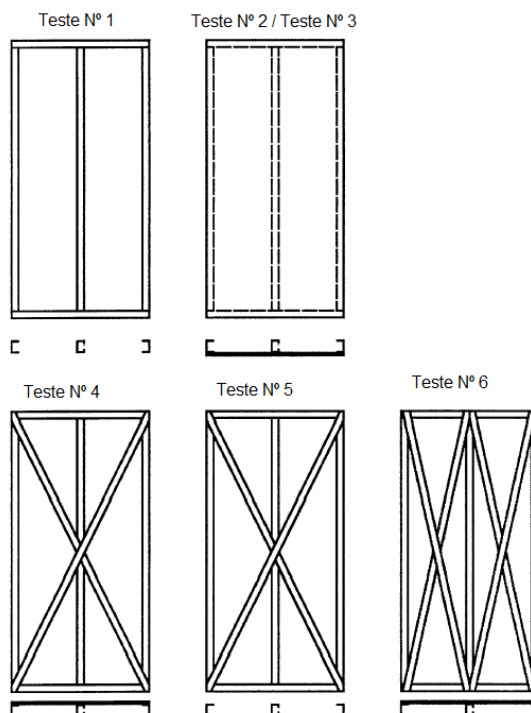


Figura 2.14: Corpos de Prova. Fonte: Tian *et al.*, 2004.

Os resultados da pesquisa, mostrados na Tabela 2.6, indicam que a placa de OSB e a cimentícia (testes 2 e 3) resistem aproximadamente à mesma força cisalhante, se comparados com os resultados apresentados pelos painéis contraventados por fitas metálicas. Além disso, segundo os autores, para estruturas enrijecidas com placas de revestimento, ocorreram fissuras nas placas perto das conexões dos parafusos. Os autores sugeriram aumentar a espessura da placa ou diminuir o espaçamento dos parafusos. Dessa forma, aumentaria a capacidade do espécime em suportar maiores valores de cisalhamento.

Tabela 2.6: Resultados obtidos. Fonte: Tian *et al.*, 2004, adaptado pelo autor.

Teste	Descrição	Força máxima Cisalhante (kN)
1	Sem contraventamento e sem placa	0,4
2	Com OSB em apenas uma face	9,5
3	Com placa cimentícia em apenas uma face	9,9
4	Com contraventamento em X nas duas faces	10,3
5	Com contraventamento em X apenas uma face	5,2
6	Duplo contraventamento em XX nas duas faces	10,1

2.6.3 Pesquisa realizada por Iwakiri *et al.* (2012)

Na pesquisa realizada por Iwakiri *et al.* (2012) foi realizada uma avaliação das placas de compensado estrutural produzidas com lâminas de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea*. As placas eram compostas somente com lâminas da mesma espécie ou com lâminas de várias

espécies intercaladas entre si, sendo elas: *Eucalyptus saligna* (Esa), *Pinus caribaea* var. *caribaea* (Pcc), *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Pch) e *Pinus caribaea* var. *bahamensis* (Pcb).

Os autores produziram placas de 500 mm x 500 mm e com 5 lâminas de 2,2 mm, que foram submetidas a ensaios de flexão estática em 5 corpos de prova retirados na direção paralela e 5 corpos de prova retirados na direção perpendicular às fibras externas de cada tipo de placa de compensado estrutural, a fim de determinar os valores do Módulo de Elasticidade (MOE) e Módulo de Ruptura ou tensão de ruptura à flexão estática (MOR). Os resultados dessa pesquisa mostram que os valores do MOE e do MOR determinados nos corpos de prova paralelos às fibras externas da placa são maiores que os valores relativos ao MOE e ao MOR determinados nos corpos de prova perpendiculares às fibras externas da placa, como mostram as Tabelas 2.7 e 2.8.

Tabela 2.7: Resultados de módulo de elasticidade e módulo de ruptura – paralelo. Fonte: Iwakiri *et al.*, 2012, adaptado pelo autor.

Corpo de Prova	MOE paralelo		MOR paralelo	
	Média (N/mm ²)	Coefficiente de variação (%)	Média (N/mm ²)	Coefficiente de variação (%)
<i>Esa</i>	17467	5,73	130,12	8,57
<i>Pcc</i>	7572	21,32	60,92	14,13
<i>Pch</i>	7598	20,38	75,19	9,48
<i>Psb</i>	8500	21,80	84,05	19,67
<i>Esa/Pcc/Esa/Pcc/Esa</i>	15144	4,52	112,46	13,46
<i>Pcc/ Esa/ Pcc/Esa/Pcc</i>	7547	31,43	68,88	26,84
<i>Esa/Pch/Esa/Pch /Esa</i>	14254	5,47	120,93	11,81
<i>Pch/ Esa/ Pch/Esa/Pch</i>	8896	8,75	84,79	8,89
<i>Esa/Pcb/Esa/Pcb /Esa</i>	15624	11,05	114,11	25,99
<i>Pcb/ Esa/ Pcb/Esa/Pcb</i>	7839	9,78	71,67	11,74

Tabela 2.8: Resultados de módulo de elasticidade e módulo de ruptura – perpendicular. Fonte: Iwakiri *et al.*, 2012, adaptado pelo autor.

Corpo de Prova	MOE perpendicular		MOR perpendicular	
	Média (N/mm ²)	Coefficiente de variação (%)	Média (N/mm ²)	Coefficiente de variação (%)
<i>Esa</i>	4695	12,16	60,10	14,73
<i>Pcc</i>	2132	26,42	34,87	15,36
<i>Pch</i>	2106	12,91	33,23	9,26
<i>Psb</i>	2529	12,00	34,59	12,65
<i>Esa/Pcc/Esa/Pcc/Esa</i>	2456	17,95	36,41	12,61
<i>Pcc/ Esa/ Pcc/Esa/Pcc</i>	4550	6,19	59,02	6,86
<i>Esa/Pch/Esa/Pch /Esa</i>	3354	13,71	48,82	11,37
<i>Pch/ Esa/ Pch/Esa/Pch</i>	3624	5,60	46,73	6,01
<i>Esa/Pcb/Esa/Pcb /Esa</i>	3501	20,01	47,89	11,56
<i>Pcb/ Esa/ Pcb/Esa/Pcb</i>	4175	21,36	51,49	15,47

2.6.4 Pesquisa realizada por Fuentes *et al.* (2014)

Conhecido também como ensaio de cisalhamento ou de deslizamento, o ensaio tipo *push test* é normalmente utilizado para a análise de conectores de cisalhamento na interface perfil metálico e concreto. Na pesquisa feita por Fuentes *et al.* (2014) foi realizada uma adaptação para esse tipo de ensaio, sendo feita uma análise da ligação entre perfis de madeira e placas de OSB. Os ensaios foram feitos com placas de OSB; grampos orientados a 0°, 45° e 90°; com e sem cola e carregamento nas direções paralela e perpendicular às fibras externas da madeira, como mostram as Figuras 2.15 e 2.16.

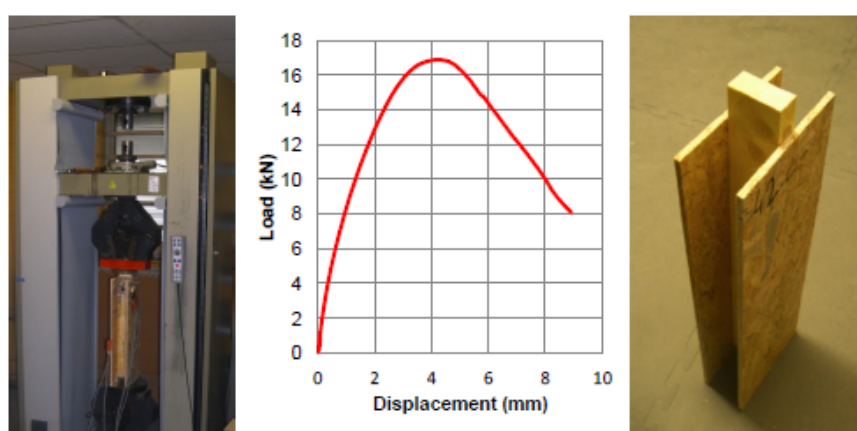


Figura 2.15: Máquina universal de ensaios, curva força *versus* deslocamento e amostra de ensaio. Fonte: Fuentes *et al.*, 2014

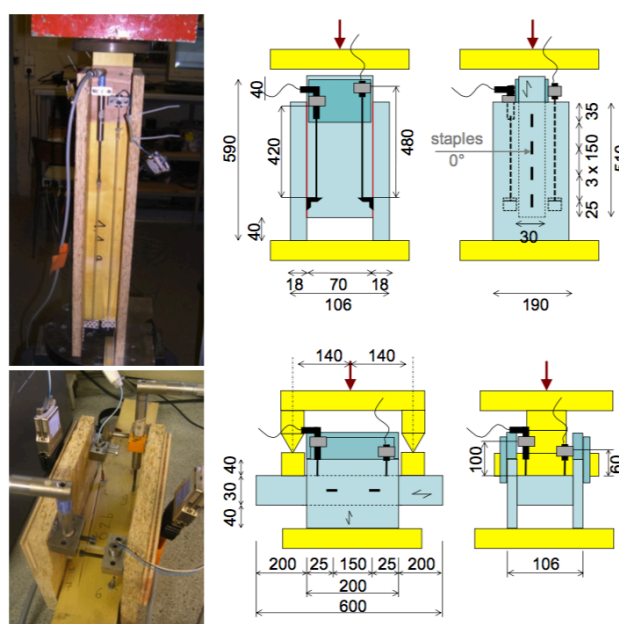


Figura 2.16: Dimensões dos espécimes com os dispositivos de medição de força e deslocamento. Fonte: Fuentes *et al.*, 2014

Os resultados da Tabela 2.9 mostram que os espécimes com placas de OSB de 18 mm e com a direção do corte da placa sendo paralela às fibras externas da madeira suportaram maiores valores de força. A melhor orientação do grampo foi quando estavam perpendiculares à direção das fibras externas da madeira. Além disso, ao dobrar o número de grampos, houve um aumento de força de cerca de 75%. O uso de cola também aumentou a capacidade do espécime em suportar forças e induziu a diminuição da ductilidade.

Tabela 2.9: Tabela de resultados. Fonte: Fuentes *et al.*, 2014, adaptado pelo autor.

Direção do corte das placas	Grampos	Número de Grampos	Cola	Direção dos grampos	Espessura OSB (mm)	F _{máx} (kN)	Rigidez (kN/mm)	Ductilidade
Paralelo	sim	4	não	45°	18	7,7	5,3	>30
Paralelo	sim	4	não	90°	18	8,5	5,9	>26
Paralelo	sim	4	não	0°	18	7,3	6,2	>30
Paralelo	sim	7	não	0°	18	12,8	9,1	>23
Paralelo	não	0	sim	0	18	19	11,4	4
Paralelo	sim	4	não	0°	15	7,8	8,3	>60
Paralelo	sim	4	não	0°	10	6,8	4,1	10
Paralelo	sim	4	sim	0°	18	17,3	13,9	8
Perpendicular	sim	2	não	0°	18	3,8	2,6	15
Perpendicular	sim	2	sim	0°	18	10,7	4,8	6
Perpendicular	sim	3	não	0°	18	6	4,7	17

2.6.5 Pesquisa realizada por Hatami *et al.* (2014)

Hatami *et al.* (2014) realizaram ensaios computacionais em paredes de cisalhamento do sistema construtivo LSF por meio do método dos elementos finitos (MEF) feito pelo software ANSYS. Feito isso, realizou-se uma comparação entre tais resultados em relação a ensaios experimentais feitos por outros autores em paredes de cisalhamento do sistema LSF.

A comparação feita entre os resultados numéricos de Hatami *et al.* (2014) e os resultados experimentais para as forças e deslocamentos laterais realizadas por Rogers *et al.* (2004) é representada na Tabela 2.10. Analisou-se paredes de cisalhamento do sistema LSF em conjunto com as seguintes placas de revestimento OSB, *Canadian softwood plywood* (CSP), *Douglas-fir plywood* (DFP), com espessuras de 11 mm, 12,5 mm e 12,5 mm, respectivamente. O espaçamento entre os parafusos de borda variou entre 76 mm e 152 mm e

para os parafusos no meio painel o espaçamento foi de 305 mm. Além disso, os perfis de aço utilizado foram de 1,12 mm.

Tabela 2.10: Comparação entre resultados numéricos e experimentais. Fonte: Hatami *et al.*, 2014, adaptado pelo autor.

Descrição das paredes de cisalhamento (Espessura do aço: 1,12mm)	Tipo e espessura da placa de revestimento	Espaçamento entre os parafusos de borda (mm)	Força Lateral (kN)		Deslocamento associado à força máxima (mm)		
			Teste Experimental Rogers <i>et al.</i> (2004)	MEF Hatami <i>et al.</i>	Teste Experimental Rogers <i>et al.</i> (2004)	MEF Hatami <i>et al.</i>	
Largura da parede e altura: 1219 mm, 2438 mm. Largura do revestimento e altura: 1219 mm, 2438 mm.	OSB 11 mm (um lado)	152	16,10	16,66	41,1	35,4	
		102	23,52	22,36	39,5	37,5	
		76	28,64	24,14	40,7	48,5	
	DFP 12,5 mm (um lado)	152	19,50	20,73	54,8	48,0	
		102	29,01	28,86	60,6	55,2	
		76	36,20	29,52	58,2	58,8	
	CSP 12,5 mm (um lado)	152	15,48	18,81	50,7	45,5	
		102	20,23	23,93	60,6	53,5	
		76	30,59	26,13	61,0	63,6	
Largura da parede e altura: 609 mm, 2438 mm. Largura do revestimento e altura: 609 mm, 2438 mm.	OSB 11 mm (um lado)	152	7,62	6,69	78,4	78,3	
		102	11,21	10,90	78,0	83,1	
	CSP 12,5 mm (um lado)	152	7,43	7,54	103,3	95,3	
		102	10,97	11,65	107,0	102,3	
		76	152	33,16	40,18	50,5	42,3
			102	49,98	50,16	55,6	49,3
76	102	64,11	66,96	64,1	59,9		
	76	64,11	66,96	64,1	59,9		

Segundo Hatami *et al.* (2014), a diferença máxima entre o modelo numérico e o experimental é de 22%, devido a precisão do software em relação aos modelos reais. Além disso, foi observado que quanto menor o espaçamento entre os parafusos de borda, maior o valor da resistência lateral, tendo uma variação de até 50% entre tais parâmetros.

2.6.6 Pesquisa realizada por Shahi *et al.* (2014)

Na pesquisa realizada por Shahi *et al.* foram realizados ensaios com carregamentos monotônicos em paredes de cisalhamento do sistema LSF com placas cimentícias. Para isso, foram utilizadas placas cimentícias com espessuras de 5 mm, além disso os espaçamentos axiais entre os parafusos foram de 100 mm na borda da placa e de 150 mm no interior da placa, bem como montantes com de espessura de 0,75 mm e alma de 90 mm. Os montantes foram espaçados entre si a cada 600 mm ou 450 mm, como mostra a Tabela 2.11.

Tabela 2.11: Caracterização dos modelos de painéis ensaiados. Fonte: Shahi *et al.*, 2014, adaptado pelo autor.

Espécime	Carregamento	Largura (L)	Altura (H)	Espaçamento Montante	Proporção da placa (H/L)	Número de placas
FCB-Mon-A	Monotômico	2400 mm	2400 mm	600 mm	1,0	2
FCB-Mon-B	Monotômico	900 mm	2400 mm	450 mm	2,7	1

Conforme os resultados apresentados na Tabela 2.12 e Figura 2.17, Shahi *et al.* concluíram que FCB Mon-A é aproximadamente 30% mais rígido que FCB Mon-B. Além disso, a fase inelástica de FCB Mon-A começou por volta de 60% da força última, enquanto a fase inelástica iniciou-se quando foi atingida 40% da força última no FCB Mon-B. Os ensaios monotônicos mostraram uma capacidade de força semelhante por unidade de comprimento na parede ensaiada, no entanto foi observado que o deslocamento do espécime FCB-Mon-B foi 20% maior que o espécime FCB-Mon-A.

Tabela 2.12: Resultado dos ensaios monotômicos. Fonte: Shahi *et al.*, 2014, adaptado pelo autor.

Espécime	Deslocamento controlado	Força Máxima (kN)	Deslocamento associado à força
FCB-Mon-A	30	26,1	23,4
FCB-Mon-B	37	9,4	27,9

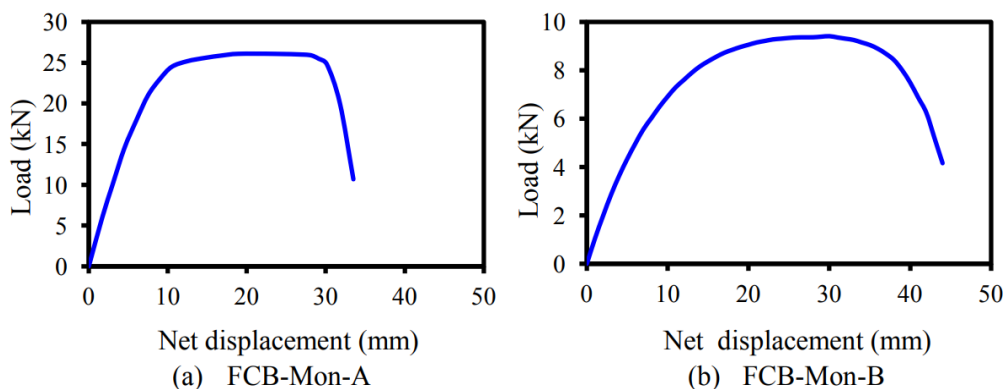


Figura 2.17: Gráfico do comportamento dos painéis A e B no ensaio monotômico. a) Espécime FCB-Mon-A. b) Espécime FCB-Mon-B. Fonte: Shahi *et al*, 2014

2.6.7 Pesquisa realizada por Silva (2017)

Silva (2017) comparou as propriedades físicas e mecânicas das placas de OSB com as do compensado naval, a fim de também utilizar as placas de compensado naval no contraventamento e/ou fechamento externo de um edifício em LSF. Segundo o autor, as obras financiadas pela Caixa Econômica Federal permitem apenas uso de placas de OSB e placas cimentícias nos edifícios em LSF financiados por ela. Desta forma, seu trabalho cria uma possibilidade de aumentar a utilização de placas de madeira estrutural no mercado da construção civil, podendo contribuir para a diminuição dos custos finais da obra em LSF.

O autor realizou ensaios mecânicos (Figura 2.18) para determinar os valores do Módulo de Ruptura ou tensão de ruptura à flexão estática (MOR) e do Módulo de Elasticidade (MOE). As propriedades mecânicas do compensado naval tiveram resultados inferiores em comparação com os valores das propriedades das placas de OSB.

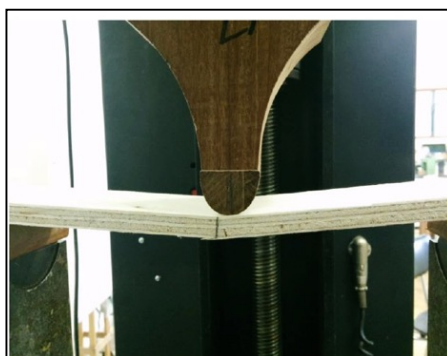


Figura 2.18: Ensaio do compensado naval a Flexão Estática. Fonte: Silva, 2017.

Segundo o autor, os resultados das análises do comportamento físico do compensado naval foram satisfatórios em relação à placa de OSB. No entanto, as propriedades mecânicas do

compensado naval tiveram resultados inferiores em comparação ao painel de OSB. (Tabelas 2.13 e 2.14).

Os valores do MOE e do MOR na direção perpendicular das fibras externas das placas de compensado naval são superiores aos valores na direção paralela, bem como o valor de MOR na direção perpendicular das placas de OSB, que também apresenta valores maiores em relação ao valor de MOE paralelo às fibras externas da placa. No entanto, o valor de MOE determinado nos corpos de prova paralelos às fibras externas da placa de OSB indicou um valor médio superior ao valor de MOE na direção perpendicular às fibras externas das placas.

Tabela 2.13: Resultados obtidos para a Flexão Estática do Compensado Naval. Fonte: Silva, 2017.

Corpo de Prova	Número	MOE (MPa)	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação	MOR (MPa)	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação
Perpendicular	1	3581	3671	287,26	8%	25,17	28,67	3,09	11%
	2	3482				27,64			
	3	3384				26,92			
	4	3809				30,82			
	5	4101				32,82			
Paralelo	6	2455	2323	182,43	8%	18,29	20,49	2,50	12%
	7	2104				18,95			
	8	2514				24,14			
	9	2384				22,02			
	10	2158				19,07			

Tabela 2.14: Resultados obtidos para a Flexão Estática das placas de OSB Home Plus. Fonte: Silva, 2017.

Corpo de Prova	Número	MOE (MPa)	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação	MOR (MPa)	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação
Perpendicular	1	14080	13738	3850	28%	29,05	33,00	3,41	10%
	2	10475				31,50			
	3	20219				36,28			
	4	12242				31,29			
	5	11671				36,88			
Paralelo	6	23595	20680	1657	8%	20,30	21,45	0,71	3%
	7	20450				22,00			
	8	19905				21,63			
	9	19748				22,01			
	10	19703				21,29			

2.6.8 Pesquisa realizada por Datchoua (2018)

Na pesquisa realizada por Datchoua (2018), foi realizado um estudo experimental acerca do comportamento da ligação entre os perfis do sistema construtivo LSF e as placas de OSB, por meio da adaptação do ensaio *push test*. Para isso foi levado em consideração a espessura do aço e da placa de OSB e o espaçamento entre os parafusos. Além disso, foi analisado o comportamento dos parafusos que ficam na borda da placa e no meio da placa.

Os espécimes foram nomeados conforme suas respectivas características, sendo elas na seguinte ordem: o modelo a ser ensaiado (Mi); a série representada pelo espécime (Si); a quantidade de montantes (Mi); a espessura nominal do painel de OSB, sendo A para indicar 9,5 mm e B para 11,1 mm; a espessura nominal da chapa do perfil de aço, sendo 0,80 mm ou 0,95 mm; a dimensão da alma do perfil (140 mm), a distância axial entre os montantes, quando houver; e o espaçamento entre os parafusos, variando entre 150 mm e 300 mm. A Figura 2.19 está representado os três tipos de modelos ensaiados pelo autor.

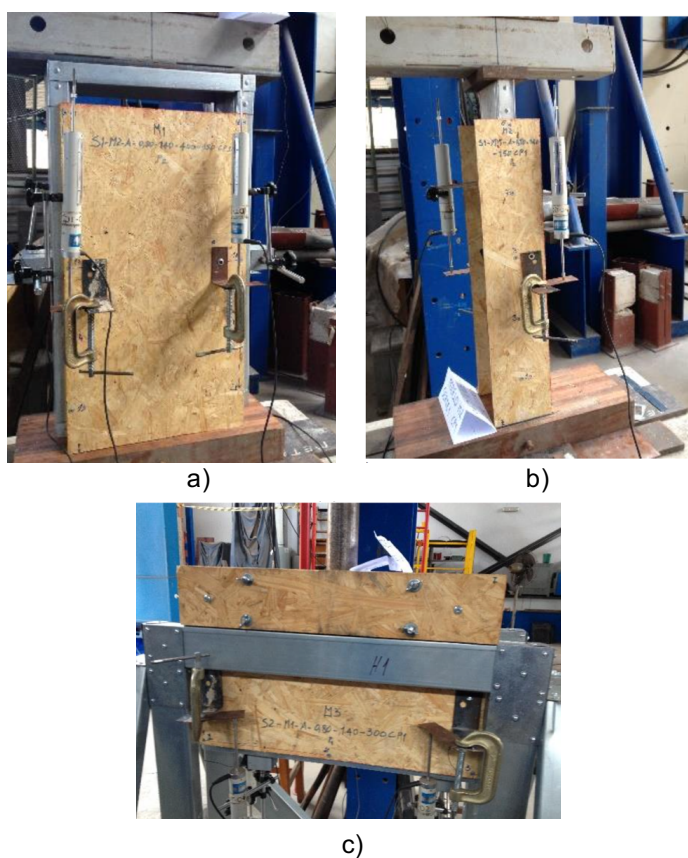


Figura 2.19: Modelos dos espécimes prontos para o ensaio *Push Test*. a) Modelo 1. b) Modelo 2. c) Modelo 3.
Fonte: Datchoua, 2018.

Foi observado pelo autor que a espessura dos painéis de OSB, o espaçamento entre os parafusos e a posição dos parafusos na placa foram determinantes para os resultados de força máxima alcançada por parafuso ($P_{m\acute{a}x}$), rigidez (k_e), energia dissipada (A) e ductilidade (μ) dos corpos de prova, constituídos por parafusos, placa OSB e perfis do sistema LSF. Ou seja, quanto maior o número de montantes e distância entre os parafusos, maior os valores de $P_{m\acute{a}x}$, de k_e , de A e de μ . Além disso, quanto maior a espessura da placa de OSB, maior o valor de A . Na Tabela 2.15 estão apresentados os valores obtidos pelo autor.

Tabela 2.15: Resultados relativos ao ensaio dos corpos de prova – Cisalhamento (*Push test*) (valores médios).
Fonte: Datchoua, 2018.

Nomenclatura	$P_{m\acute{a}x}$ (N)	Cv (%)	k_e (N/mm)	Cv (%)	A	Cv (%)	μ	Cv (%)
M1 S1-M2-A-0,80-140-400-150	1.807,72	5,84	1.422,29	10,00	13.465,16	20,25	8,48	8,54
M1 S2-M2-A-0,80-140-400-300	1.858,57	4,07	1.190,59	46,33	12.882,98	1,39	6,75	35,90
M1 S3-M2-A-0,95-140-400-150	1.580,27	9,41	1.237,23	32,83	7.906,39	71,43	5,23	13,54
M1 S4-M2-A-0,95-140-400-300	1.815,22	3,04	1.605,92	38,82	14.094,63	1,05	10,17	42,79
M1 S7-M2-B-0,80-140-400-150	1.852,83	5,54	1.301,20	24,24	13.478,91	11,47	7,32	8,37
M1 S8-M2-B-0,80-140-400-300	1.749,18	6,99	1.249,07	38,32	15.706,11	13,45	9,37	42,80
M1 S9-M2-B-0,95-140-400-150	1.791,44	11,63	1.273,24	24,60	13.068,55	22,65	7,68	27,25
M1 S10-M2-B-0,95-140-400-300	1.768,69	1,63	857,72	9,21	14.985,17	11,56	6,00	16,60
M2 S1-M1-A-0,80-140-150	1.997,84	7,39	1.659,31	46,88	17.731,30	17,73	11,48	54,72
M2 S2-M1-A-0,80-140-300	2.079,74	11,98	2.825,60	57,01	17.010,34	3,95	14,52	41,73
M2 S3-M1-A-0,95-140-150	1.974,55	12,50	4.050,20	44,20	9.885,11	23,35	14,58	45,88
M2 S4-M1-A-0,95-140-300	2.105,45	6,54	2.635,40	39,61	20.441,48	12,24	18,48	52,69
M2 S7-M1-B-0,80-140-150	1.939,71	9,53	3.528,63	68,11	10.274,37	87,91	10,77	37,25
M2 S8-M1-B-0,80-140-300	2.216,45	1,96	3.647,87	62,41	17.493,54	20,70	19,62	61,58
M2 S9-M1-B-0,95-140-150	2.112,46	4,95	4.100,33	100,24	16.723,08	38,83	18,31	70,11
M2 S10-M1-B-0,95-140-300	2.181,40	2,86	2.272,10	41,89	22.091,49	13,76	14,92	28,55
M3 S1-M1-A-0,80-140-150	726,62	14,09	241,29	29,68	2.234,43	15,98	1,60	12,37
M3 S2-M1-A-0,80-140-300	735,04	21,90	531,33	28,63	1.003,97	34,01	2,26	9,09
M3 S3-M1-A-0,95-140-150	661,33	8,02	187,10	12,47	1.692,38	-	1,23	-
M3 S4-M1-A-0,95-140-300	705,77	23,58	252,57	11,86	2.369,13	-	2,38	-
M3 S7-M1-B-0,80-140-150	647,14	13,46	297,75	24,29	1438,41	37,52	1,96	37,25
M3 S8-M1-B-0,80-140-300	646,33	35,08	329,85	26,75	1439,95	41,17	2,16	61,36
M3 S9-M1-B-0,95-140-150	807,72	21,25	213,23	24,14	4364,88	-	1,86	-
M3 S10-M1-B-0,95-140-300	699,77	24,40	248,94	34,18	3219,54	23,47	3,81	58,65

3

ENSAIO DE FLEXÃO

3.1 Materiais e métodos

Para os ensaios de flexão, que visam determinar o módulo de elasticidade (E) e a tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) ou seja, a resistência à tração na flexão estática, foram utilizadas as especificações da ABNT NBR 9533:2012 (ABNT, 2012). Conforme a norma, é preciso extrair aleatoriamente no mínimo quatro chapas de compensado de um mesmo lote. Além disto, é recomendado retirar de cada chapa de compensado no mínimo cinco corpos de prova (CP) de cada direção (paralela e perpendicular à orientação das fibras que constituem as laminas externas). Ainda segundo a norma, os CP's precisam ser extraídos a uma distância não menor do que 50 mm das bordas da chapa, procurando distribuí-los aleatoriamente em toda a sua extensão.

Foram fabricados 46 CP's para o ensaio de flexão em placas de compensado estrutural de espessuras de 11,1 mm e 46 CP's a partir de placas com espessura de 18,3 mm, sendo 46 CP's cortados na direção longitudinal das placas de compensado e 46 CP's na direção transversal das placas.

Conforme mostram as Figuras 3.1 e 3.2, as medidas dos CP's também foram determinadas de acordo com a ABNT NBR 9533:2012 (ABNT, 2012), sendo:

- a) largura: $l = 75 \text{ mm}$;
- b) comprimento (c) dado pela Equação 3.1:

$$c = 25 e + 50 \text{ mm} \geq 150 \text{ mm} \quad (3.1)$$

Onde " e " é a espessura do CP. Sendo assim, para o compensado com espessura de 11,1 mm, o comprimento do CP é igual a 327,5 mm (Equação "a" e "b"):

$$c = 25 \cdot 11,1 + 50 \text{ mm} \quad (\text{a})$$

$$c = 327,5 \text{ mm} \quad (\text{b})$$

Para o compensado com espessura de 18,3 mm, o comprimento do CP é igual a 507,5 mm (Equação "c" e "d"):

$$c = 25 \cdot 18,3 + 50 \text{ mm} \quad (\text{c})$$

$$c = 507,5 \text{ mm} \quad (\text{d})$$

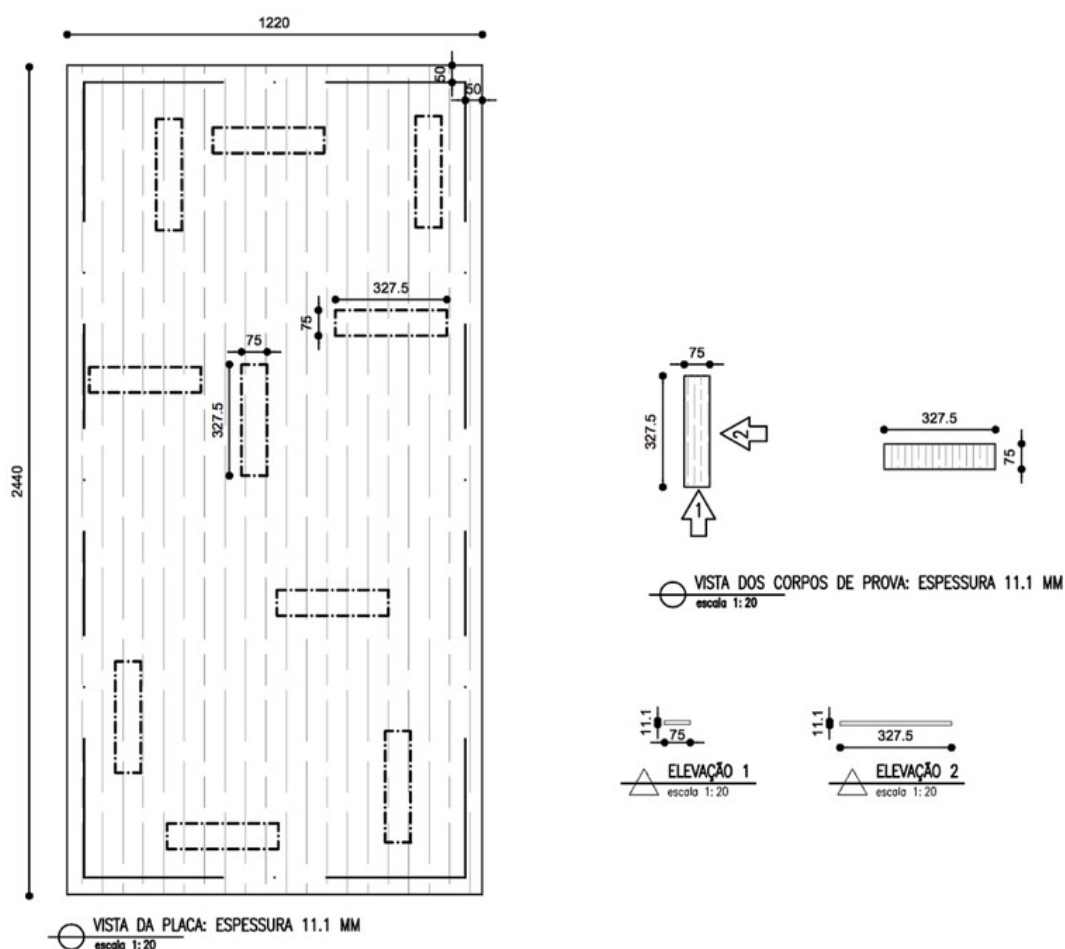


Figura 3.1: Desenho da retirada dos corpos de prova para a determinação da resistência à flexão estática e módulo de elasticidade na placa de compensado de espessura de 11,1 mm.

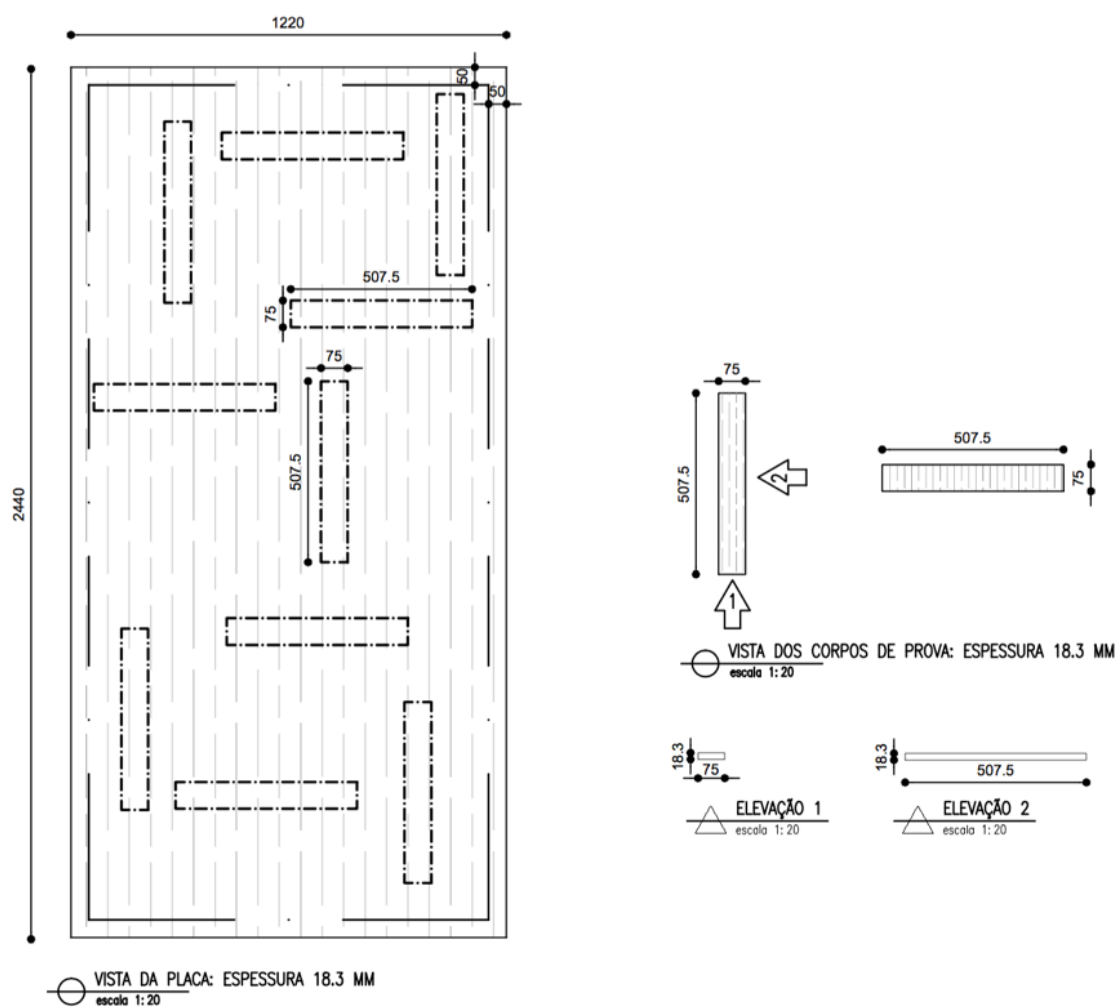


Figura 3.2: Desenho da retirada dos corpos de prova para a determinação da resistência à flexão estática e módulo de elasticidade da placa de compensado de espessura de 18,3 mm.

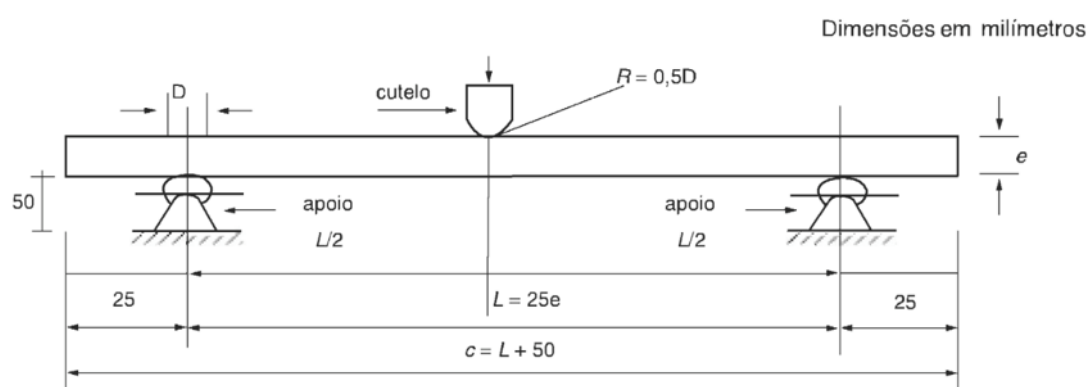
A Figura 3.3 mostra os CP's feitos com placas de compensado estrutural de 18,3 mm antes da realização dos ensaios de determinação da resistência à flexão estática e do módulo de elasticidade.



Figura 3.3: Corpos de prova de 18,3 mm antes do ensaio de flexão.

3.2 Ensaios e procedimentos

Os ensaios dos CP's também foram realizados conforme a ABNT NBR 9533:2012 (ABNT, 2012). Para a realização desses ensaios, foram montados sobre a viga da máquina de ensaio dois apoios paralelos, ajustáveis e alinháveis no plano horizontal, sendo que o comprimento dos apoios deveria exceder a largura do CP. Além disto, um cutelo para aplicação da força, com o mesmo comprimento e diâmetro dos apoios, foi posicionado de forma paralela e equidistante destes, conforme a Figura 3.4.



NOTA A distância (L) entre os apoios deve ser ajustável.

Figura 3.4: Arranjo esquemático da máquina de ensaio. Fonte: ABNT, 2012

Os ensaios de flexão foram realizados na máquina universal EMIC DL-30.000 com capacidade máxima de 300 kN e com a célula de força Trd 29 ligada ao cutelo de carregamento, conforme mostra a Figura 4. Para medir o deslocamento vertical da seção central do CP durante o ensaio, foi utilizado um transdutor de deslocamento ou *displacement transducer* (DT) do tipo DT-100A, marca KYOWA, com curso de 100 mm e precisão de 0,005 mm. A base magnética do DT foi acoplada em uma chapa de aço fixada em um pilarete de aço externo à máquina de ensaio e a parte móvel do DT, responsável pela leitura do deslocamento, foi apoiada em outra chapa de aço presa no cutelo de carregamento.

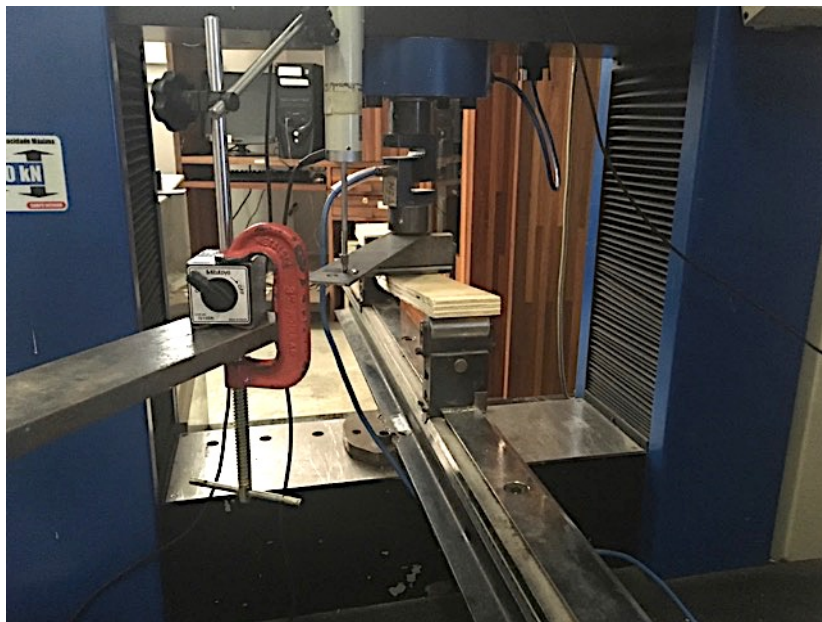


Figura 3.5: Máquina universal de ensaios EMIC DL-30.000 em realização de ensaio.



Figura 3.6: Máquina universal de ensaios EMIC DL-30.000 vista de cima e o DT durante a realização dos ensaios.

O sistema de aquisição de dados utilizado foi o modelo *Spider 8 600 Hz* de fabricação da *Hotting Baldwin Measurements* (HBM) junto ao *software Catman 4.5 Release 2 [Interactive]*. O DT e a célula de força foram conectados a esse sistema de aquisição de dados sendo possível, dessa maneira, monitorar e aquisitar os dados dos ensaios e, então, exportá-los para o *Microsoft Excel* para a produção de gráficos de força *versus* flecha. Para o controle da máquina universal de ensaios foi utilizado o *software Tesc versão 4.03*. (Figura 3.7).

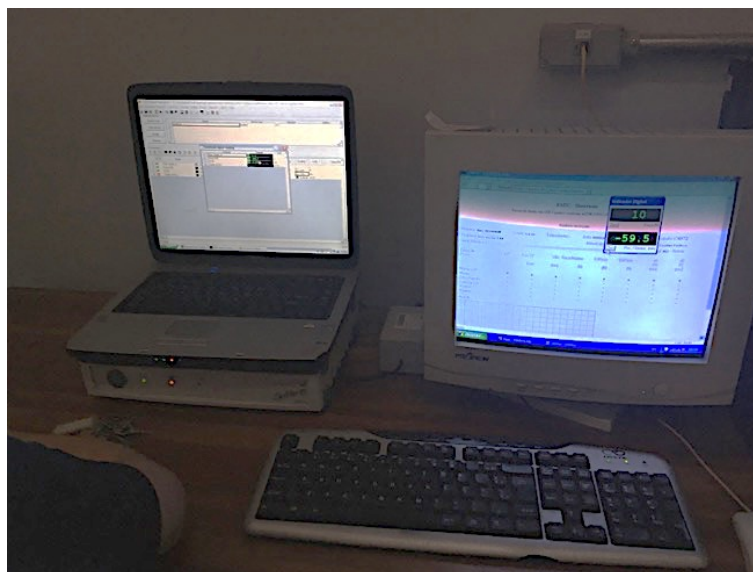


Figura 3.7: Sistema de aquisição de dados, juntos aos *software Catman 4.5 e Tesc*.

Durante os ensaios, 80 CP's foram posicionados na máquina conforme a norma recomenda, sendo o plano de maior superfície do CP disposto horizontalmente e perpendicular aos aparelhos de apoio, como mostra a Figura 3.8. Neste trabalho este ensaio é denominado, para simplificação, de ensaio de flexão horizontal. Além dos ensaios recomendados pela norma, com o restante dos CP's foram realizados ensaios de flexão com o plano de maior superfície do CP disposto verticalmente (Figura 3.9), doravante denominado de ensaio de flexão vertical. Esses ensaios adicionais foram idealizados a partir da análise da posição das placas de revestimento nas paredes de cisalhamento, que estão dispostas de maneira similar no sistema LSF.



Figura 3.8: CP disposto de forma horizontal na máquina de ensaios.

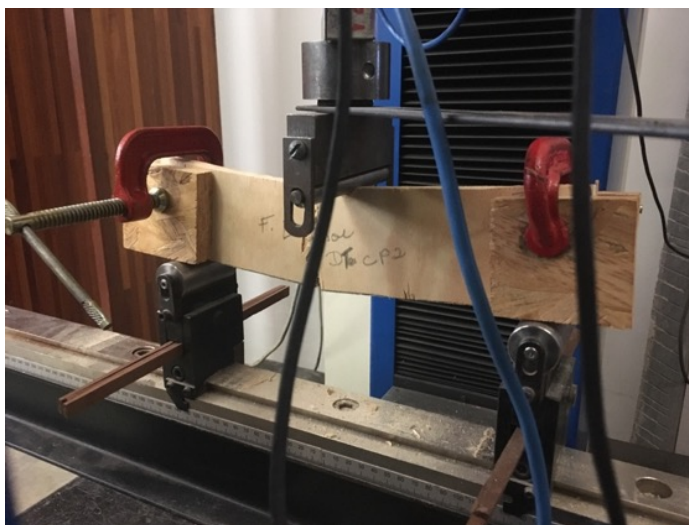


Figura 3.9: CP disposto de forma vertical na máquina de ensaios.

A força foi aplicada por meio do cutelo, continuamente, a uma velocidade constante e calculada pela Equação 3.2:

$$V = \frac{K \cdot L^2}{6 \cdot e} \quad (3.2)$$

Onde,

V é a velocidade de carregamento, expressa em milímetros por segundo (mm/s);

K é a taxa de deformação de fibra, a qual é igual a 0,00005;

L é a distância entre apoios (vão), expressa em milímetros (mm) e;

e é a espessura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm).

Desse modo, para os CP's de espessura nominal de 11,1 mm e vão de 277,5 mm, a velocidade utilizada durante os ensaios foi de 3,469 mm/s e, para os CP's de 18,3 mm de espessura e vão de 457,5 mm, a velocidade utilizada foi de 5,719 mm/s. Nos ensaios de flexão com o CP na posição vertical, a velocidade utilizada foi de 23,437 mm/s tanto para os CP's de 11,1 mm como para os CP's de 18,3 mm de espessura, uma vez que a espessura utilizada para o cálculo da velocidade de carregamento para os CP's com ambas espessuras de placa foi de 75 mm.

3.2.1 Tratamento de dados

Para calcular o módulo de elasticidade longitudinal (E) dos CP's, foi utilizada a Equação 3.3:

$$E_b = \frac{L^3 \cdot (F_2 - F_1)}{4 \cdot l \cdot e^3 (S_2 - S_1)} \quad (3.3)$$

Onde,

E_b é o módulo de elasticidade longitudinal, expresso em megapascals (MPa);

L é a distância entre os centros de apoios (vão), expressa em milímetros (mm);

l é a largura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

e é a espessura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

$F_2 - F_1$ é o incremento de força no trecho reto da curva força-deformação, expresso em newtons (N), com exatidão de 1 %;

$S_2 - S_1$ é o incremento de deflexão, no ponto central do vão, correspondente a $F_2 - F_1$, expresso em milímetros (mm), com exatidão de 0,01 mm.

Para calcular a tensão de ruptura à flexão estática, foi utilizada a Equação 3.4:

$$T_r = \frac{3 \cdot F_{m\acute{a}x} \cdot L}{2 \cdot l \cdot e^2} \quad (3.4)$$

T_r é a tensão de ruptura à flexão estática, expressa em megapascals (MPa) com exatidão de 0,5 MPa;

$F_{m\acute{a}x}$ é a força de ruptura, expressa em newtons (N) e;

L, l, e são, conforme definido anteriormente e expressas em milímetros (mm).

As séries de corpos de prova dos ensaios foram nomeadas de acordo com alguns parâmetros, sendo eles: o posicionamento da placa de compensado na máquina de ensaio (FH, flexão com a maior superfície do CP na horizontal e FV, flexão com a maior superfície do CP na vertical); a sua espessura nominal (11,1mm e 18,3mm); direção da extração do CP (L, na direção longitudinal das placas e T, na direção transversal das placas). A direção longitudinal é aquela paralela ao maior comprimento da placa de compensado estrutural e a direção transversal é perpendicular a esta. Os números dos corpos de prova de cada série variam de 1 a 20 (CP1 a CP20) para flexão horizontal e de 1 a 3 (CP1 a CP3) para flexão vertical.

As Tabelas 3.1 e 3.2 são uma compilação de dados dos CP's e indicam a nomenclatura do CP, a distância entre os centros dos apoios do CP (vão), a largura do CP, a velocidade utilizada nos ensaios, o comprimento do CP e a quantidade de CP.

Tabela 3.1: Parâmetros relativos aos CP's fabricados para os ensaios de flexão com a maior superfície do CP na horizontal

Série	Corpo de prova	Vão (mm)	Largura do CP (mm)	Velocidade de carregamento (mm/min)	Comprimento do CP (mm)	Quantidade de CP
FH 11,1 L	CP 1 a CP 20	277,5	75	3,469	327,5	20
FH 11,1 T	CP 1 a CP 20	277,5		3,469	327,5	20
FH 18,3 L	CP 1 a CP 20	457,5		5,719	507,5	20
FH 18,3 T	CP 1 a CP 20	457,5		5,719	507,5	20
Quantidade de CP						80

Tabela 3.2: Parâmetros relativos aos CP's fabricados para os ensaios de flexão com a maior superfície do CP na vertical

Série	Corpo de prova	Vão (mm)	Largura do CP (mm)	Velocidade de carregamento (mm/min)	Comprimento do CP (mm)	Quantidade de CP
FV 11,1 L	CP 1 a CP 3	277,5	75	23, 437	327,5	3
FV 11,1 T	CP 1 a CP 3	277,5		23, 437	327,5	3
FV 18,3 L	CP 1 a CP 3	457,5		23, 437	507,5	3
FV 18,3 T	CP 1 a CP 3	457,5		23, 437	507,5	3
Quantidade de CP						12

3.3 Apresentação dos resultados obtidos

A partir dos ensaios de flexão foram gerados os gráficos de força *versus* flecha, e, então, calculadas as tensões máximas de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) e módulos de elasticidade (E) de cada CP, no qual foram utilizadas as médias das larguras e das espessuras medidas.

Ademais, foram determinados os valores da variância (Var), do desvio padrão (DP) e do coeficiente de variação (C_v) dos ensaios realizados. A variância, indicada pela Equação 3.5 é a medida da dispersão estatística que indica quão distantes os valores estão da média (X_m). O desvio padrão, como mostra a Equação 3.6, é a medida que mostra o quanto de variação existe em relação à média. Assim sendo, um baixo valor de DP significa que os resultados tendem a estar próximos da média, enquanto que, um alto valor do DP significa que esses resultados estão dispersos. O coeficiente de variação, indicado pela Equação 3.7 é uma maneira de expressar a variabilidade dos dados, excluindo-se a ordem de grandeza da variável.

De um modo geral, tem-se resultados homogêneos (baixa dispersão) para $C_v \leq 15\%$, média dispersão para $15\% < C_v < 30\%$ e resultados heterogêneos (alta dispersão) para $C_v \geq 30\%$.

$$Var = \frac{\sum_{i=1}^n (CP_i - X_m)^2}{(n - 1)} \quad (3.5)$$

$$DP = \sqrt{Var} \quad (3.6)$$

$$Cv = \frac{DP}{X_m} \cdot 100 \quad (3.7)$$

3.3.1 Ensaios de Flexão: Posição Horizontal

Os ensaios de flexão na posição horizontal foram realizados em 80 CP's de 11,1 mm e 18,3 mm, sendo 40 CP's com corte na direção longitudinal da placa e 40 CP's com corte na direção transversal da placa, conforme recomenda a ABNT NBR 9533:2012 (ABNT, 2012), e explicado anteriormente neste trabalho. Os gráficos foram divididos segundo a espessura da placa de compensado e a orientação do corte.

Conforme a Figura 3.10, para os CP's da série "FH 11,1 L", as curvas mostram algumas características comuns entre elas. Na primeira etapa, é possível observar um comportamento linear da fase elástica dos CP's, seguido de um comportamento não linear até atingir a força máxima. Enquanto alguns CP's rompem subitamente, como o CP 6, outros passam por uma fase plástica até romperem totalmente, como o CP 10.

De acordo com a Tabela 3.3, o valor médio para a força máxima ($P_{m\acute{a}x}$) é de 1036,29 N, para a tensão de ruptura ($\sigma_{m\acute{a}x}$) é de 34,85 MPa, para o valor de rigidez (P/Δ) é de 109,70 N/mm e para o módulo de elasticidade (E) é de 3690,24 MPa. O maior valor da tensão de ruptura ($\sigma_{m\acute{a}x}$) é obtido pelo CP 6 devido ao alto valor da sua força máxima ($P_{m\acute{a}x}$) e o maior valor para o módulo de elasticidade (E) é obtido pelo CP 11, por causa do seu alto valor da rigidez (P/Δ). Os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados.

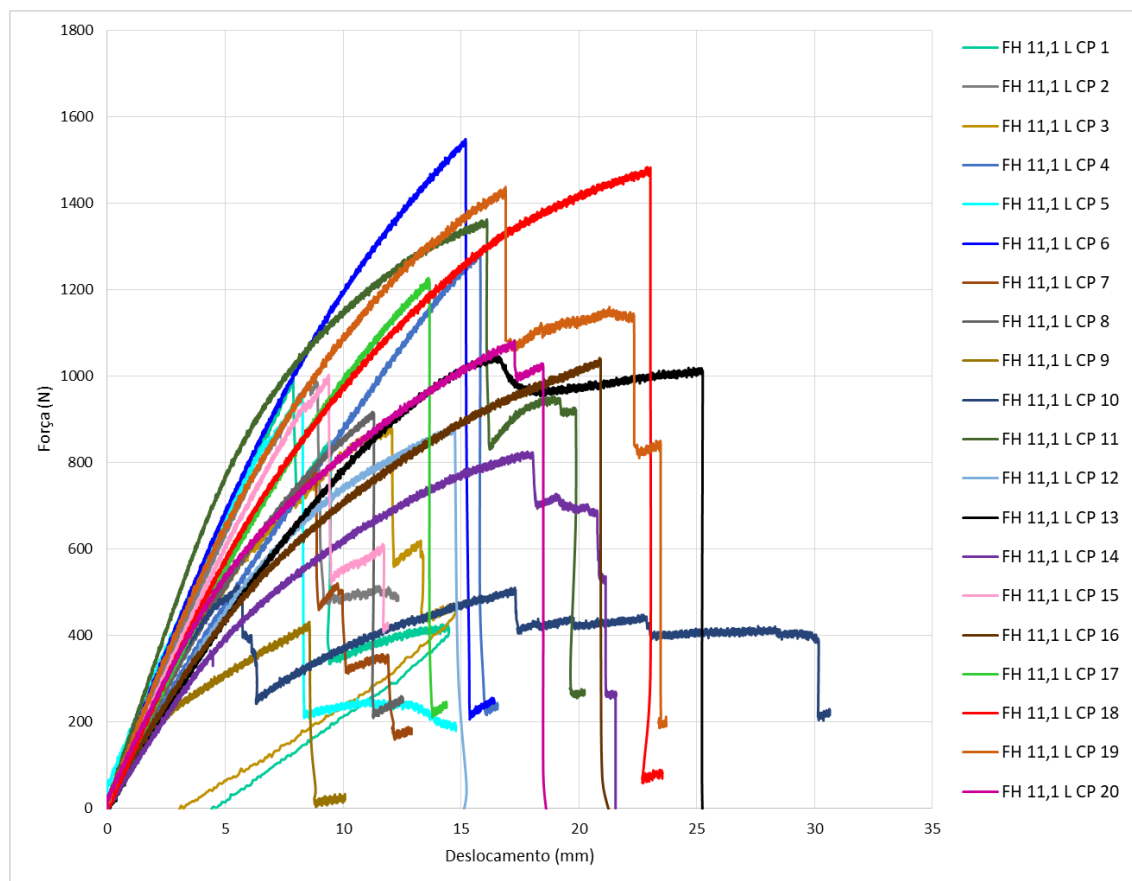


Figura 3.10: Gráfico força *versus* flecha dos CP's de 11,1 mm da série "FH 11,1 L"

Tabela 3.3: Resultados relativos aos CP's de 11,1 mm da série "FH 11,1 L"

Nome CP	P_{\max} (N)	σ_{\max} (Mpa)	P/Δ (N/mm)	E (MPa)
FH 11,1 L CP 1	1001,50	33,68	138,89	4672,07
FH 11,1 L CP 2	989,51	33,27	128,91	4336,35
FH 11,1 L CP 3	881,56	29,64	104,70	3521,79
FH 11,1 L CP 4	1286,36	43,26	85,61	2879,71
FH 11,1 L CP 5	960,52	32,30	125,90	4234,99
FH 11,1 L CP 6	1549,23	52,10	132,68	4463,05
FH 11,1 L CP 7	784,61	26,38	106,75	3590,76
FH 11,1 L CP 8	917,54	30,85	101,15	3402,37
FH 11,1 L CP 9	431,79	14,52	87,56	2945,45
FH 11,1 L CP 10	515,74	17,34	116,70	3925,54
FH 11,1 L CP 11	1363,32	45,84	156,72	5271,64
FH 11,1 L CP 12	885,56	29,78	91,08	3063,80
FH 11,1 L CP 13	1054,48	35,46	85,86	2888,16
FH 11,1 L CP 14	825,59	27,76	79,23	2665,05
FH 11,1 L CP 15	1003,50	33,74	123,97	4170,21
FH 11,1 L CP 16	1042,48	35,06	80,90	2721,31
FH 11,1 L CP 17	1227,39	41,27	110,86	3729,02
FH 11,1 L CP 18	1484,26	49,91	108,89	3662,96
FH 11,1 L CP 19	1438,29	48,36	125,68	4227,65
FH 11,1 L CP 20	1082,46	36,40	102,06	3432,95
Xm	1036,29	34,85	109,70	3690,24
Cv	25,09%	25,09%	19,08%	19,08%

Para os CP's da série "FH 11,1 T", a Figura 3.11 evidencia que entre as curvas também há características comuns, como um comportamento linear na fase elástica dos CP's, seguido de um comportamento não linear até atingirem a força máxima, e seu rompimento logo na sequência. Outros CP's passam por um terceiro tipo de comportamento, após alcançarem a força máxima, que é a fase plástica, e então, rompem totalmente. No entanto, há certa discrepância entre a força máxima atingida por alguns CP's, como o CP5 e o CP 3.

A Tabela 3.4 indica que o valor médio para a força máxima ($P_{\text{máx}}$) é de 629,94 N, para a tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) é de 22,47 MPa, para o valor de rigidez (P/Δ) é de 87,20 N/mm e para o módulo de elasticidade (E) é de 3211,39 MPa. O maior valor da tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) é obtido pelo CP 5 devido ao alto valor da sua força máxima ($P_{\text{máx}}$) e, o maior valor para o módulo de elasticidade (E) também é obtido pelo CP 5, por causa do seu alto valor da rigidez (P/Δ). Os valores de C_v entre 15 e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados para os valores de módulo de elasticidade (E) e valor de rigidez (P/Δ). Devido à grande variação da força máxima ($P_{\text{máx}}$) do CP 5 e CP 16 para os demais CP's, a força máxima ($P_{\text{máx}}$) e tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) apresentam valores de C_v acima de 30%. Excluindo esses CP's os valores de C_v ficam entre 15% e 30%.

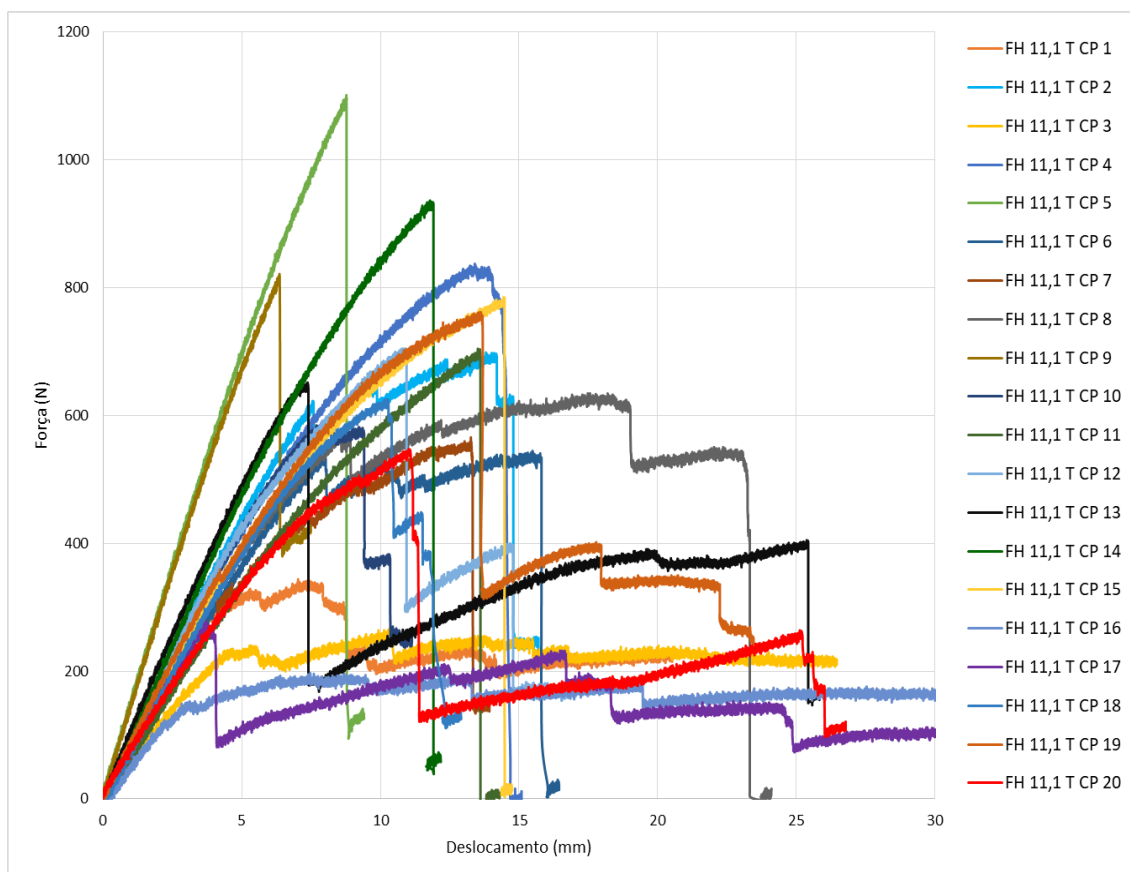


Figura 3.11: Gráfico força versus flecha dos CP's de 11,1 mm da série "FH 11,1 T"

Tabela 3.4: Resultados relativos aos CP's de 11,1 mm da série "FH 11,1 T"

Nome CP	$P_{\text{máx}}$ (N)	$\sigma_{\text{máx}}$ (Mpa)	P/Δ (N/mm)	E (MPa)
FH 11,1 T CP 1	343,83	12,26	81,22	2991,27
FH 11,1 T CP 2	698,65	24,92	87,83	3234,59
FH 11,1 T CP 3	265,87	9,48	58,92	2169,94
FH 11,1 T CP 4	837,58	29,88	82,21	3027,88
FH 11,1 T CP 5	1101,45	39,29	144,37	5317,11
FH 11,1 T CP 6	544,73	19,43	76,53	2818,66
FH 11,1 T CP 7	565,72	20,18	85,64	3154,03
FH 11,1 T CP 8	634,69	22,64	76,22	2807,11
FH 11,1 T CP 9	821,59	29,31	141,29	5203,55
FH 11,1 T CP 10	591,71	21,11	87,72	3230,67
FH 11,1 T CP 11	704,65	25,13	67,32	2479,39
FH 11,1 T CP 12	704,65	25,13	96,48	3553,27
FH 11,1 T CP 13	651,68	23,24	101,51	3738,58
FH 11,1 T CP 14	936,54	33,41	97,25	3581,85
FH 11,1 T CP 15	785,61	28,02	79,66	2933,76
FH 11,1 T CP 16	196,90	7,02	63,17	2326,64
FH 11,1 T CP 17	277,86	9,91	82,96	3055,28
FH 11,1 T CP 18	625,69	22,32	81,51	3002,12
FH 11,1 T CP 19	761,62	27,17	84,83	3124,18
FH 11,1 T CP 20	547,73	19,54	67,28	2477,88
Xm	629,94	22,47	87,20	3211,39
Cv	35,97%	35,97%	24,59%	24,59%

Segundo a Figura 3.12, para os CP's da série "FH 18,3 L", é notória a existência de algumas similaridades entre as curvas. Na primeira fase das curvas, percebe-se um comportamento praticamente linear na fase elástica dos CP's, seguido de um comportamento suavemente não linear até alcançar a força máxima. Enquanto alguns dos CP's rompem em seguida, tal como o CP 10, outros passam por uma fase plástica até o momento de sua ruptura, conforme o CP 11.

De acordo com a Tabela 3.5, para os CP's da série "FH 18,3 L", o valor médio para a força máxima ($P_{\text{máx}}$) é de 1317,25 N, para a tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) é de 34,45 MPa, para o valor de rigidez (P/Δ) é de 80,53 N/mm e para o módulo de elasticidade (E) é de 3911,57 MPa. O maior valor da tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) é obtido pelo CP 4 devido ao alto valor da sua força máxima ($P_{\text{máx}}$), ao passo que o maior valor para o módulo de elasticidade (E) é obtido pelo CP 4, por causa do seu alto valor da rigidez (P/Δ). Os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados.

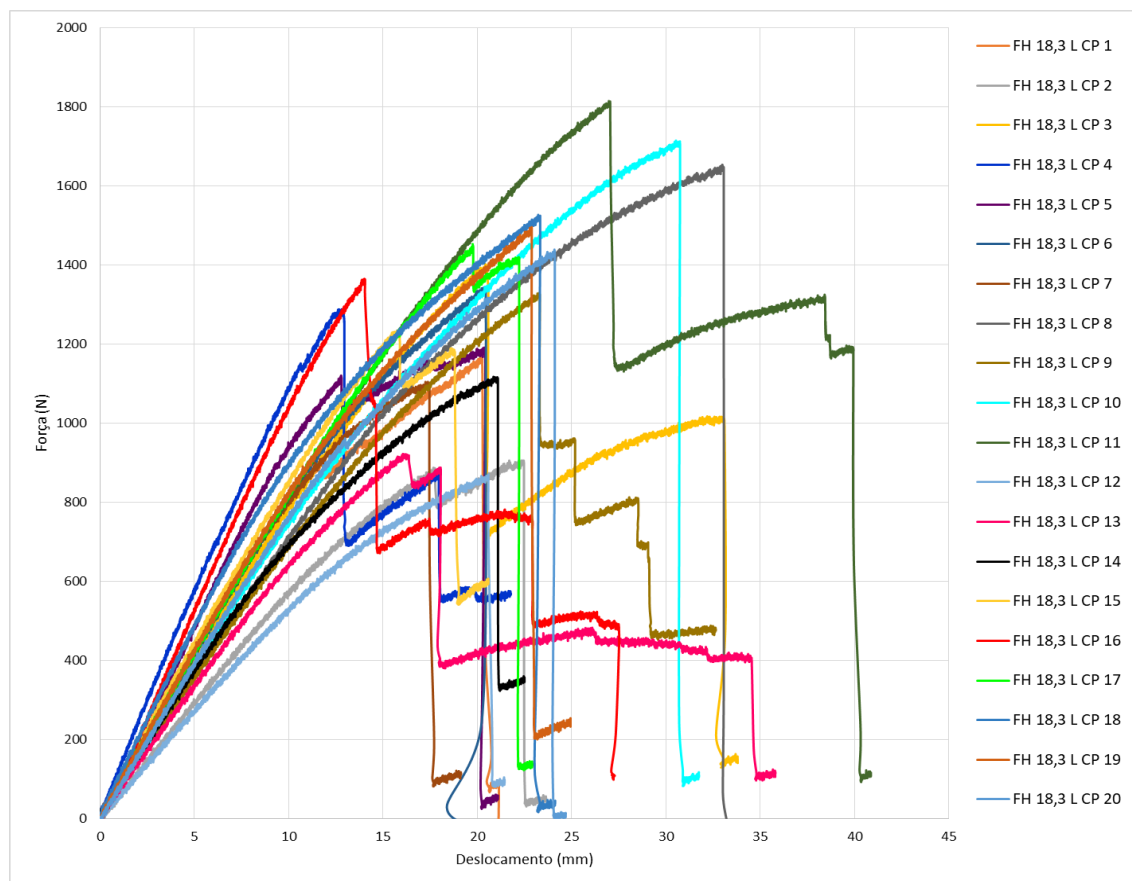


Figura 3.12: Gráfico força *versus* flecha dos CP's de 18,3 mm da série "FH 18,3 L"

Tabela 3.5: Resultados relativos aos CP's de 18,3 mm da série "FH 18,3 L"

Nome CP	P _{máx} (N)	$\sigma_{máx}$ (Mpa)	P/ Δ (N/mm)	E (MPa)
FH 18,3 L CP 1	1167,42	30,53	83,65	4063,11
FH 18,3 L CP 2	905,55	23,68	57,59	2797,36
FH 18,3 L CP 3	1402,30	36,67	77,29	3754,31
FH 18,3 L CP 4	1288,36	33,69	113,04	5490,66
FH 18,3 L CP 5	1191,41	31,15	101,63	4936,43
FH 18,3 L CP 6	1344,33	35,15	81,17	3942,84
FH 18,3 L CP 7	1104,45	28,88	85,40	4148,15
FH 18,3 L CP 8	1654,18	43,26	69,31	3366,81
FH 18,3 L CP 9	1329,34	34,76	68,69	3336,54
FH 18,3 L CP 10	1715,15	44,85	73,30	3560,30
FH 18,3 L CP 11	1815,10	47,46	79,30	3852,02
FH 18,3 L CP 12	870,57	22,76	52,42	2546,17
FH 18,3 L CP 13	922,54	24,12	63,36	3077,48
FH 18,3 L CP 14	1117,45	29,22	71,28	3462,18
FH 18,3 L CP 15	1235,39	32,30	87,07	4229,18
FH 18,3 L CP 16	1365,32	35,70	112,02	5441,10
FH 18,3 L CP 17	1453,28	38,00	81,14	3941,31
FH 18,3 L CP 18	1527,24	39,94	91,96	4466,76
FH 18,3 L CP 19	1496,26	39,13	84,20	4089,74
FH 18,3 L CP 20	1439,29	37,64	76,77	3729,02
Xm	1317,25	34,45	80,53	3911,57
Cv	19,11%	19,11%	19,32%	19,32%

A Figura 3.13 mostra que os CP's da série "FH 18,3 T" também apresentam algumas similaridades entre suas respostas. Ocorre um comportamento linear na fase elástica da maioria dos CP's, seguido de um comportamento suavemente não linear até alcançar a força máxima. Em seguida, enquanto alguns dos CP's rompem após atingirem a força máxima, assim como o CP 17, outros passam pela fase plástica até o instante de sua ruptura, conforme o CP 7.

A Tabela 3.6 mostra que a série "FH 18,3 T" apresenta valor médio para a força máxima ($P_{\text{máx}}$) de 969,94 N, para a tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) de 25,11 MPa, o valor de rigidez (P/Δ) de 59,21 N/mm e para o módulo de elasticidade (E) de 2826,33 MPa. O maior valor da tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) é obtido pelo CP 11 devido ao alto valor da sua força máxima ($P_{\text{máx}}$), enquanto o maior valor para o módulo de elasticidade (E) foi obtido pelo CP 1, por causa do seu alto valor da rigidez (P/Δ). Os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados.

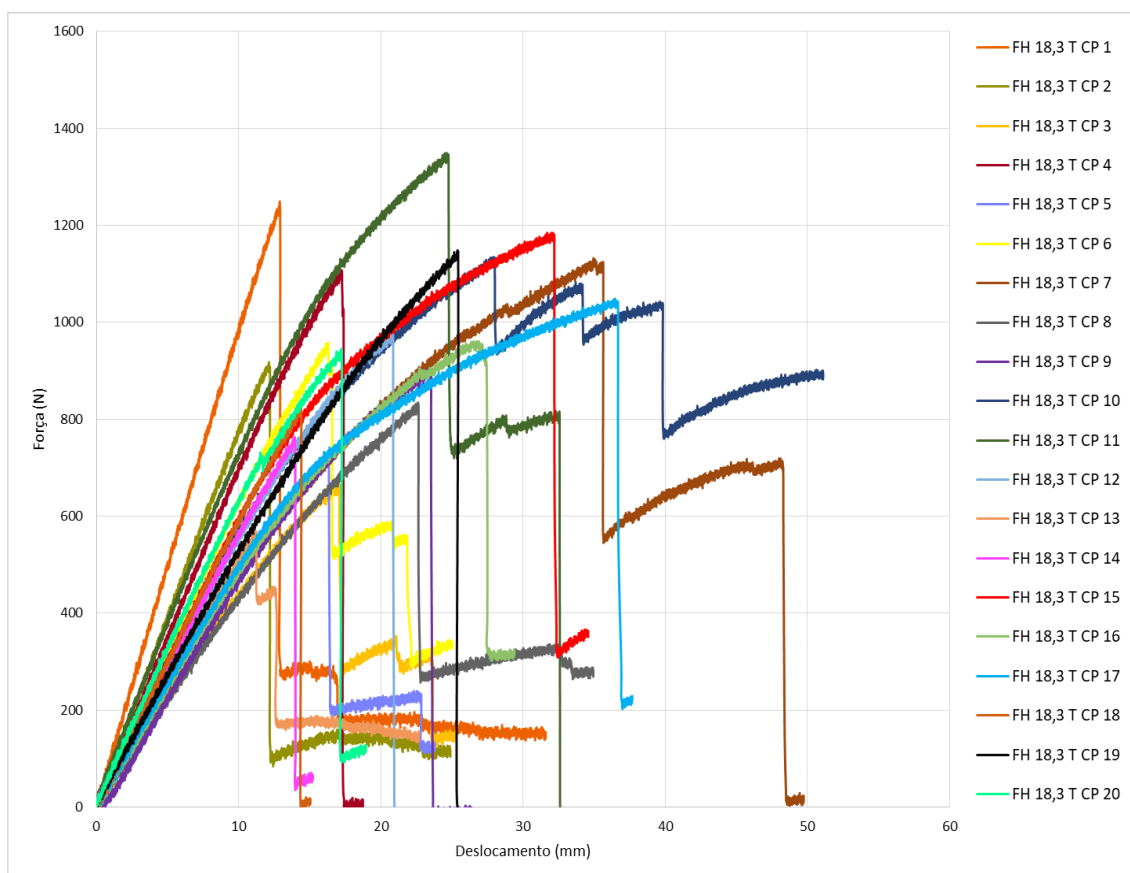


Figura 3.13: Gráfico força *versus* flecha dos CP's de 18,3 mm da série "FH 18,3 T"

Tabela 3.6: Resultados relativos aos CP's de 18,3 mm da série "FH 18,3 T"

Nome CP	$P_{\text{máx}}$ (N)	$\sigma_{\text{máx}}$ (Mpa)	P/Δ (N/mm)	E (MPa)
FH 18,3 T CP 1	1248,97	32,33	102,47	4891,41
FH 18,3 T CP 2	917,69	23,76	79,87	3812,26
FH 18,3 T CP 3	669,48	17,33	46,42	2215,94
FH 18,3 T CP 4	1107,56	28,67	71,07	3392,38
FH 18,3 T CP 5	725,85	18,79	49,53	2364,38
FH 18,3 T CP 6	957,25	24,78	62,93	3003,72
FH 18,3 T CP 7	1132,28	29,31	47,54	2269,17
FH 18,3 T CP 8	834,59	21,61	43,02	2053,61
FH 18,3 T CP 9	905,55	23,44	52,33	2497,77
FH 18,3 T CP 10	1134,44	29,37	54,19	2586,73
FH 18,3 T CP 11	1349,33	34,93	76,33	3643,49
FH 18,3 T CP 12	975,52	25,26	56,22	2683,54
FH 18,3 T CP 13	567,72	14,70	50,43	2407,13
FH 18,3 T CP 14	762,62	19,74	53,93	2574,06
FH 18,3 T CP 15	1184,41	30,66	60,62	2893,58
FH 18,3 T CP 16	960,52	24,87	50,86	2427,53
FH 18,3 T CP 17	1048,48	27,14	49,43	2359,27
FH 18,3 T CP 18	822,59	21,30	58,55	2794,86
FH 18,3 T CP 19	1148,43	29,73	53,55	2556,15
FH 18,3 T CP 20	945,53	24,48	64,94	3099,66
Xm	969,94	25,11	59,21	2826,33
Cv	20,16%	20,16%	23,74%	23,74%

Comparando entre si, de forma global, os resultados apresentados nas Figuras 3.10 a 3.13, nota-se que os CP's de 11,1 mm da série "FH 11,1 L" apresentam forças máximas maiores que os CP's de 11,1 mm da série "FH 11,1 T", isto é, os corpos de prova fabricados na direção longitudinal das placas apresentam forças máximas em geral superiores aos corpos de prova fabricados na direção transversal das placas de compensado estrutural. Estes comportamentos também podem ser observados quando se comparam entre si os resultados dos CP's das séries "FH 18,3 L" e "FH 18,3 T".

Comparando entre si os resultados de todos os CP's fabricados na direção longitudinal, verifica-se que, coerentemente, os CP's com espessura de 18,3 mm apresentam forças máximas maiores que as dos CP's com espessura de 11,1 mm. Estes comportamentos também podem ser observados quando se comparam entre si os resultados dos CP's com espessura de 18,3 mm quando comparados com os resultados dos CP's com espessura de 11,1 mm retirados na direção transversal das placas de compensado estrutural.

3.3.2 Ensaios de Flexão: Posição Vertical

Os ensaios de flexão na posição vertical, feitos adicionalmente à recomendação da ABNT NBR 9533:2012 (ABNT, 2012), foram realizados em 12 CP's com espessuras de 11,1 mm e de 18,3 mm, sendo 6 CP's com corte na direção longitudinal da placa e 6 CP's com corte na direção transversal. Os gráficos foram organizados segundo a espessura da placa de compensado e orientação do corte. No entanto, os resultados obtidos para esses ensaios não foram conclusivos devido ao afundamento nas placas feito pelo cutelo de aplicação da força.

A Figura 3.14 mostra os resultados dos CP's da série "FV 11,1 L". Nesses ensaios, com os CP's dispostos na posição vertical, as curvas obtiveram características diferentes das curvas dos ensaios anteriores, feitos com os CP's dispostos na posição horizontal. É possível perceber que todas as curvas têm, inicialmente, fases elásticas lineares até os picos de forças máximas, seguidos de outros picos de força, até atingirem os instantes de ruptura dos CP's.

A Tabela 3.7 mostra que a série "FV 11,1 L" apresenta valor médio para a força máxima ($P_{\text{máx}}$) de 3869,06 N, para a tensão de ruptura ($\sigma_{\text{máx}}$) de 23,06 MPa, para o valor de rigidez (P/Δ) de 1359,70 N/mm e para o módulo de elasticidade (E) de 1426,79 MPa. O maior valor da tensão de ruptura ($\sigma_{\text{máx}}$) é obtido pelo CP 2 devido ao alto valor da sua força máxima ($P_{\text{máx}}$), enquanto o maior valor para o módulo de Elasticidade (E) é obtido pelo CP 1, por causa do seu alto valor de rigidez (P/Δ). Os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados.

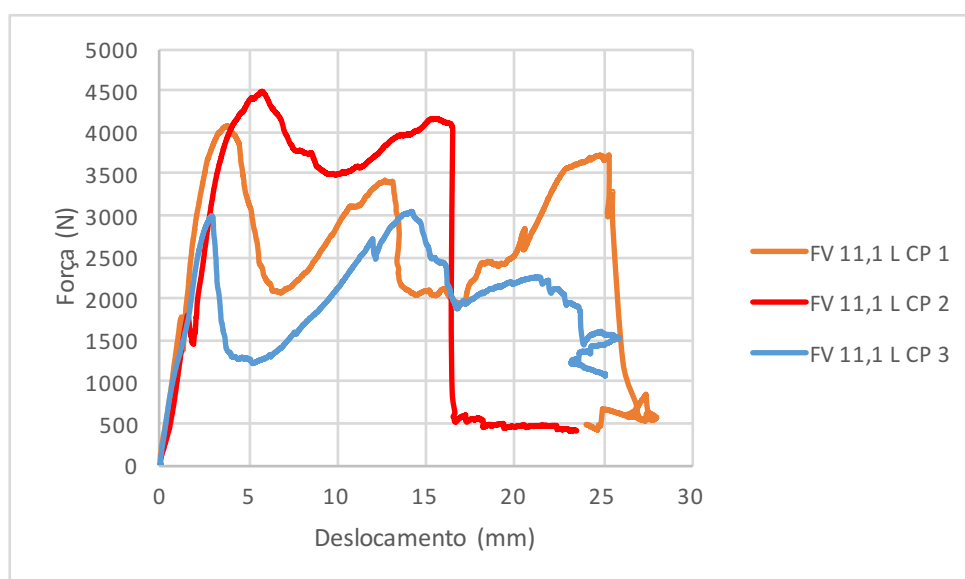


Figura 3.14: Gráfico força *versus* flecha dos CP's de 11,1 mm da série "FV 11,1 L"

Tabela 3.7: Resultados relativos aos CP's de 11,1 mm da série "FV 11,1 L"

Nome CP	$P_{\text{máx}}$ (N)	$\sigma_{\text{máx}}$ (Mpa)	P/Δ (N/mm)	E (MPa)
FV 11,1 L CP 1	4071,08	25,00	1591,13	1669,64
FV 11,1 L CP 2	4501,59	27,65	1382,37	1450,59
FV 11,1 L CP 3	3034,49	18,64	1105,58	1160,14
Xm	3869,06	23,76	1359,70	1426,79
Cv	19,49%	19,49%	17,91%	17,91%

A Figura 3.15 mostra o gráfico em termos de força *versus* flecha dos CP's da série "FV 11,1 T". Nesses ensaios, é possível perceber que as curvas de todos os CP's apresentam, inicialmente, fases elásticas lineares até os picos de forças máximas. Para os CP's 1 e 2, após esses picos de forças máximas, ocorrem as suas rupturas de forma súbita. Quanto ao CP 3, após atingida a força máxima, ocorreu uma perda de força resistente com ramo descendente em regime plástico.

A série "FV 11,1 T" apresenta valor médio para a força máxima ($P_{\text{máx}}$) de 4038,41 N, para a tensão de ruptura ($\sigma_{\text{máx}}$) de 24,23 MPa, para o valor de rigidez (P/Δ) de 990,89 N/mm e para o módulo de elasticidade (E) de 1005,90 MPa, conforme mostra a Tabela 3.8. O maior valor da tensão de ruptura ($\sigma_{\text{máx}}$) é obtido pelo CP 2 devido ao alto valor da sua força máxima ($P_{\text{máx}}$), ao passo que o maior valor para o módulo de Elasticidade (E) é obtido pelo CP 3, por causa do seu alto valor da rigidez (P/Δ). Os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados.

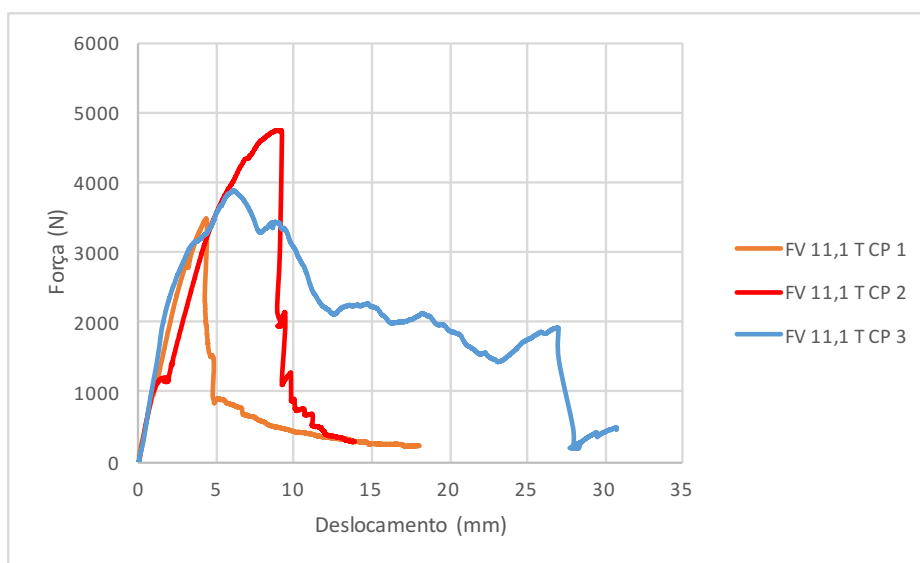
Figura 3.15: Gráfico força *versus* flecha dos CP's de 11,1 mm da série "FV 11,1 T"

Tabela 3.8: Resultados relativos aos CP's de 11,1 mm da série "FV 11,1 T"

Nome CP	$P_{\text{máx}}$ (N)	$\sigma_{\text{máx}}$ (Mpa)	P/Δ (N/mm)	E (MPa)
FV 11,1 T CP 1	3480,27	20,89	869,91	883,09
FV 11,1 T CP 2	4742,89	28,46	815,63	827,98
FV 11,1 T CP 3	3892,07	23,36	1287,14	1306,64
Xm	4038,41	24,23	990,89	1005,90
Cv	15,94%	15,94%	26,04%	26,04%

Os resultados dos ensaios dos CP's da série "FV 18,3 L" estão representados na Figura 3.16. No gráfico, é possível perceber que os ramos ascendentes das curvas demonstram comportamentos elásticos praticamente lineares até atingir a força máxima de cada CP. Em seguida, os CP's 1 e 3 apresentam curvas com ramos descendentes com característica de comportamento dúctil durante a ruptura, de forma diferente do ocorrido com o CP 2, que apresentou ruptura súbita. Nota-se também que há uma grande diferença entre as forças máximas atingidas por esses CP's, principalmente entre os CP's 1 e 2.

A Tabela 3.9 indica que o valor médio para a força máxima ($P_{\text{máx}}$) é de 6313,95 N, para a tensão de ruptura ($\sigma_{\text{máx}}$) é de 40,69 MPa, para o valor de rigidez (P/Δ) é de 2074,44 N/mm e para o módulo de elasticidade (E) é de 6312,13 MPa. O maior valor da tensão de ruptura ($\sigma_{\text{máx}}$) é obtido pelo CP 1 devido ao alto valor da sua força máxima ($P_{\text{máx}}$) e, o maior valor do módulo de elasticidade (E) é obtido pelo CP 2, por causa do seu alto valor da rigidez (P/Δ). Devido à grande variação da força máxima ($P_{\text{máx}}$) do CP 1 e da rigidez (P/Δ) do CP 2, os valores de C_v ficaram acima de 30% caracterizando uma alta dispersão dos resultados.

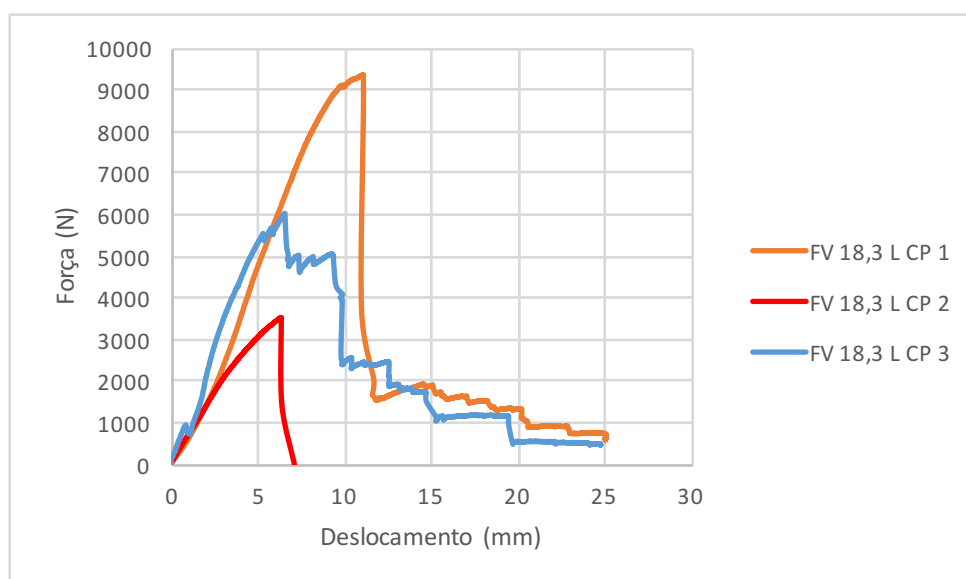


Figura 3.16: Gráfico força versus flecha dos CP's de 18,3 mm da série "FV 18,3 L"

Tabela 3.9: Resultados relativos aos CP's de 18,3 mm da série "FV 18,3 L"

Nome CP	$P_{\text{máx}}$ (N)	$\sigma_{\text{máx}}$ (Mpa)	P/Δ (N/mm)	E (Mpa)
FV 18,3 L CP 1	9371,95	60,40	1054,76	3209,44
FV 18,3 L CP 2	3523,25	22,70	3523,25	10720,60
FV 18,3 L CP 3	6046,64	38,97	1645,30	5006,34
Xm	6313,95	40,69	2074,44	6312,13
Var(x)	8605415,11	357,37	1661480,30	15383173,74
DP	2933,50	18,90	1288,98	3922,14
Cv	46,46%	46,46%	62,14%	62,14%

Para os CP's da série "FV 18,3 T", a Figura 3.17 apresenta os gráficos de força *versus* flecha dos ensaios desses CP's, sendo possível perceber que os ramos ascendentes das curvas demonstram comportamentos elásticos praticamente lineares até atingir a força máxima de cada CP. Em seguida, todos os CP's apresentam curvas com ramos descendentes com característica de comportamento de ruptura súbita.

A série "FV 18,3 T" mostra valor médio para a força máxima ($P_{\text{máx}}$) de 4740,93 N, para a tensão de ruptura ($\sigma_{\text{máx}}$) de 31,59 MPa, o valor de rigidez (P/Δ) de 1151,87 N/mm e para o módulo de elasticidade (E) de 3591,70 Mpa, conforme mostra a Tabela 3.10. O maior valor da tensão de ruptura ($\sigma_{\text{máx}}$) é obtido pelo CP 1 devido ao alto valor da sua força máxima ($P_{\text{máx}}$), enquanto o maior valor para o módulo de elasticidade (E) é obtido também pelo CP 1, por causa do seu alto valor da rigidez (P/Δ). Devido à grande variação da rigidez (P/Δ) do CP 2 para os demais CP's, os valores de C_v estão acima de 30% caracterizando uma alta dispersão dos resultados, ao passo que os valores de C_v estão abaixo de 15% para os valores de força máxima ($P_{\text{máx}}$) e tensão de ruptura ($\sigma_{\text{máx}}$), caracterizando um resultado homogêneo.

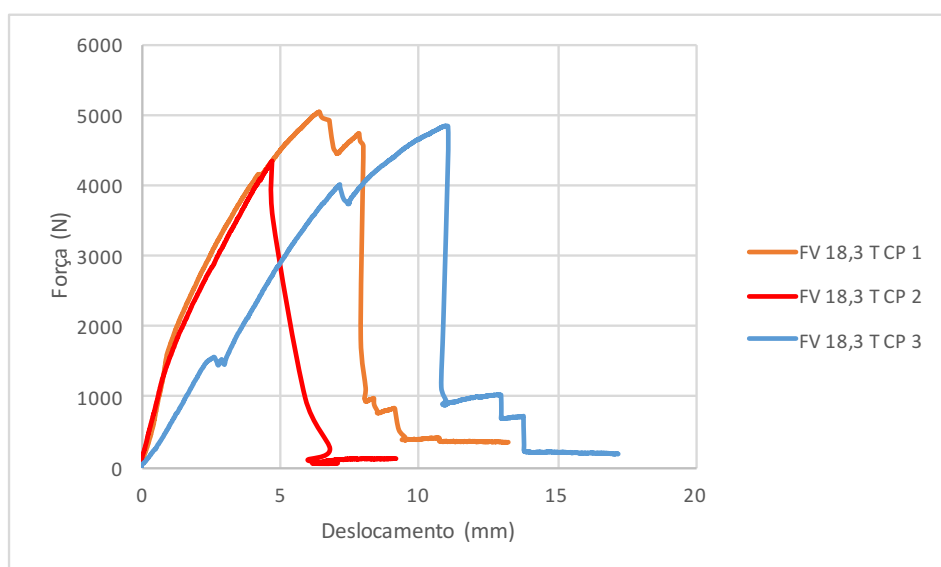
Figura 3.17: Gráfico força *versus* deslocamento dos CP's de 18,3 mm "FV 18,3 T"

Tabela 3.10: Resultados relativos aos CP's de 18,3 mm da série "FV 18,3 T"

Nome CP	P _{máx} (N)	$\sigma_{máx}$ (MPa)	P/ Δ (N/mm)	E (Mpa)
FV 18,3 T CP 1	5031,37	33,53	1502,14	4683,89
FV 18,3 T CP 2	4354,38	29,02	1264,89	3944,09
FV 18,3 T CP 3	4837,06	32,23	688,59	2147,12
Xm	4740,93	31,59	1151,87	3591,70
Var(x)	121509,73	5,40	175045,46	1701926,24
DP	348,58	2,32	418,38	1304,58
Cv	7,35%	7,35%	36,32%	36,32%

Comparando entre si, de forma global, os resultados apresentados nas Figuras 10 a 13, nota-se que os CP's de 11,1 mm da série "FV 11,1 L" apresentam forças máximas com valores próximos aos dos CP's de 11,1 mm da série "FV 11,1 T", isto é, os corpos de prova fabricados na direção longitudinal das placas apresentam forças máximas em geral com valores próximos aos corpos de prova fabricados na direção transversal das placas de compensado estrutural com espessura de 11,1 mm.

Nota-se ainda que os CP's de 18,3 mm da série "FV 18,3 L" apresentam forças máximas maiores que as dos CP's de 18,3 mm da série "FV 18,3 T", isto é, os corpos de prova fabricados na direção longitudinal das placas apresentam forças máximas em geral superiores às dos corpos de prova fabricados na direção transversal das placas de compensado estrutural com espessura de 18,3 mm.

Comparando entre si os resultados de todos os CP's fabricados na direção longitudinal, verifica-se que, coerentemente, os CP's com espessura de 18,3 mm apresentam forças máximas maiores que as dos CP's com espessura de 11,1 mm. Estes comportamentos também podem ser observados quando se comparam entre si os resultados dos CP's com espessura de 18,3 mm quando comparados com os resultados dos CP's com espessura de 11,1 mm retirados na direção transversal das placas de compensado estrutural.

A Tabela 3.11 é uma compilação de valores médios encontrados para o módulo de elasticidade (E) e a tensão de ruptura ($\sigma_{máx}$) e seus respectivos C_v , entre os CP's ensaiados com os mesmos parâmetros, ou seja, aqueles com mesma espessura, direção do corte na placa e posição do CP no ensaio, a fim de poder facilitar a análise dos resultados. Dessa forma, pôde-se perceber que tais parâmetros influenciaram nos valores médios encontrados.

Tabela 3.11: Valores médios encontrados para o módulo de elasticidade (E) e a tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) e, seus respectivos C_v .

Série	Corpo de Prova	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)	C_v (%)	E (MPa)	C_v (%)
FH 11,1 L	CP 1 a CP 20	34,85	25,09%	3690,24	19,08%
FH 11,1 T	CP 1 a CP 20	22,47	35,97%	3211,39	24,59%
FH 18,3 L	CP 1 a CP 20	34,45	19,11%	3911,57	19,32%
FH 18,3 T	CP 1 a CP 20	25,11	20,16%	2826,33	23,74%
FV 11,1 L	CP 1 a CP 3	23,76	19,49	1426,79	17,91%
FV 11,1 T	CP 1 a CP 3	24,23	15,94%	1005,90	26,04%
FV 18,3 L	CP 1 a CP 3	40,69	46,46%	6312,13	62,14%
FV 18,3 T	CP 1 a CP 3	31,59	7,35%	3591,70	36,32%

3.4 Análise dos resultados obtidos

3.4.1 Influência da direção de extração dos corpos de prova (longitudinal e transversal)

Conforme os dados constantes na Tabela 3.11 dos ensaios de flexão estática, pode-se observar que há influência da orientação das fibras que constituem as lâminas externas da placa de compensado quanto aos valores do módulo de elasticidade (E) e da tensão de ruptura ($\sigma_{\text{máx}}$) à flexão estática. A série “FH 11,1 L” apresentou valores de tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) e do módulo de elasticidade (E), respectivamente, iguais a 42,42% e 14,91% maiores que os valores dos corpos de prova da série “FH 11,1 T”.

A série “FH 18,3 L” apresentou valores de tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) e do módulo de elasticidade (E), respectivamente, iguais a 37,20% e 38,40% maiores que os valores dos corpos de prova da série “FH 18,3 T”.

A série “FV 11,1 T” apresentou valor médio de tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) igual 1,98% maior que o valor dos corpos de prova da série “FV 11,1 L”. No entanto, a série “FV 11,1 L” apresentou valor do módulo de elasticidade (E) igual a 41,84% maior que o valor médio dos corpos de prova da série “FV 11,1 T”.

A série “FV 18,3 L” apresentou valores de tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) e módulo de elasticidade (E), respectivamente, iguais a 28,81% e 75,74% maiores que os valores dos corpos de prova da série “FV 18,3 T”.

Devido à madeira ser um material anisotrópico, uma vez que suas propriedades variam de acordo com a direção considerada, as placas com corte longitudinal apresentaram uma elevada resistência elástica, já que suas fibras externas trabalham em flexão, favorecendo assim os ensaios à flexão estática. Em contrapartida, os CP's com corte transversal têm o módulo de elasticidade (E) e a tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) menores em virtude das fibras externas do compensado ter menor resistência a flexão quando solicitadas na direção transversal.

3.4.2 Influência da espessura dos corpos de prova.

Segundo os resultados dos ensaios constantes na Tabela 3.11, verifica-se que as espessuras dos CP's também constituem um fator determinante sobre os resultados obtidos. A partir dos valores médios determinados para o módulo de elasticidade (E) e para a tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$), podem ser feitas comparações entre as placas de espessura diferentes, porém com o mesmo tipo de ensaio (horizontal ou vertical) e a mesma direção de extração dos corpos de prova (longitudinal ou vertical). A série “FH 11,1 L” apresentou um valor médio de tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) igual a 0,29% superior ao da série “FH 18,3 L”. Quanto ao valor do módulo de elasticidade (E), a série “FH 18,3 L” apresentou um valor 6% superior ao da série “FH 11,1 L”.

A série “FH 18,3 T” apresentou um valor de tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) igual a 11,75% superior ao da série “FH 11,1 T”. Quanto ao valor do módulo de elasticidade (E), a série “FH 11,1 T” apresentou um valor 13,62% superior ao da série “FH 18,3 T”.

A série “FV 18,3 L” apresentou valores de tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) e de módulo de elasticidade (E), respectivamente, iguais a 71,25% e 342,40% maiores que os dos corpos de prova da série “FV 11,1 L”.

A série “FV 18,3 T” apresentou valores de tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) e de módulo de elasticidade (E), respectivamente, iguais a 30,38% e 257,06% maiores que os valores dos corpos de prova da série “FV 11,1 T”.

Assim, a partir da análise desses resultados, pode-se observar que há uma tendência de tais valores médios das placas de compensado com espessura de 18,3 mm serem maiores que os correspondentes valores médios das placas de 11,1 mm.

3.4.3 Influência da posição dos corpos de prova

Outra influência observada durante a análise dos resultados foi a posição dos CP's na máquina de ensaios, ou seja, o ensaio de flexão com a maior superfície do CP na posição horizontal ou na posição vertical. No entanto, como houve um esmagamento na placa durante os ensaios de flexão vertical, influenciando na flecha, a análise de tais resultados foi dificultada.

A série “FH 11,1 L” apresentou valores médios de tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) e de módulo de elasticidade (E), respectivamente, iguais a 46,78% e 158,64% maiores que os respectivos valores médios dos corpos de prova da série “FV 11,1 L”.

Enquanto a série “FV 11,1 T” apresentou valor médio de tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) igual a 7,83% maior que o valor médio dos corpos de prova da série “FH 11,1 T”, esta série apresentou o valor médio do módulo de elasticidade (E) igual a 219,26% maior que o dos corpos de prova da série “FV 11,1 T”.

A série “FV 18,3 L” apresentou valores de tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) e de módulo de elasticidade (E), respectivamente, iguais a 18,11% e 61,37% maiores que os dos corpos de prova da série “FH 18,3 L”.

A série “FV 18,3 T” apresentou valores de tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) e de módulo de elasticidade (E), respectivamente, iguais a 25,81% e 27,08% maiores que os dos corpos de prova da série “FH 18,3 T”.

Apesar de haver uma tendência da tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) na flexão horizontal ser maior em relação à do ensaio na posição vertical, devido ao momento de inércia ser menor na posição horizontal, neste trabalho a tensão de ruptura à flexão estática ($\sigma_{\text{máx}}$) média foi praticamente igual nos dois tipos de ensaio. Esse valor é consequência de uma

grande variação da força máxima ($P_{m\acute{a}x}$) do CP “FV 18,3 L CP 1” em relação aos demais CP’s.

Ainda conforme a Tabela 3.11, o módulo de elasticidade (E) médio encontrado nos ensaios de flexão horizontal foi, em geral, maior que o módulo de elasticidade médio encontrado nos ensaios de flexão vertical. Esse valor também é explicado devido ao menor momento de inércia da seção transversal dos CP’s nos ensaios de flexão horizontal, seguindo assim a tendência de a flexão horizontal apresentar maiores valores de módulo de elasticidade em relação a flexão vertical.

4

ENSAIOS DE DESLIZAMENTO, CISALHAMENTO OU *PUSH TEST*

4.1 Materiais

Conhecido também como ensaio de cisalhamento ou de deslizamento, o ensaio tipo *push test* é normalmente utilizado para a análise de conectores de cisalhamento na interface perfil metálico e concreto. Neste trabalho, foi realizada uma adaptação dos ensaios de cisalhamento, do tipo *Standard Push Test*, preconizado pelo *Eurocode 4* (EN 1994-1-1, 2004) com o intuito de avaliar o comportamento da ligação entre os parafusos autobrocantes e auto-atarraxantes com o perfil metálico e as placas de compensado estrutural. Durante o ensaio, é importante que haja uma ação conjunta entre os três elementos, o reticulado metálico, a placa de revestimento e os parafusos de fixação, pois é nesse conjunto que atuam as forças de cisalhamento, as quais são transmitidas pelos parafusos de fixação, para os elementos que compõem o reticulado metálico.

Para a realização dos ensaios do tipo *push test*, os espécimes foram fabricados com variações nas espessuras do compensado e no perfil metálico considerando ainda os espaçamentos entre os parafusos e o seu posicionamento na placa de revestimento, além de variações na direção do corte das placas de compensado em relação às fibras externas da madeira. Os espécimes foram fabricados com parafusos autobrocantes na ligação aço-aço da marca FISHER especificação cabeça Oval #10-16x3/4"; o compensado estrutural da espécie *pinnus elliotti*, utilizado nos espécimes, foi doado pela empresa Guararapes, enquanto todos os outros materiais utilizados para a fabricação dos espécimes foram doados pela empresa FLASAN; os parafusos utilizados nas ligações aço-placa foram os autobrocantes e auto-atarraxantes da marca WALSYWA com dimensões de 4,2 mm de diâmetro e de 32 mm de comprimento. O aço utilizado para a fabricação dos perfis produzido pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) foi o ZAR 280 com revestimento de zinco de 275 g/m² (Z275) para o aço de 0,95mm

de espessura e aço ZC (zincado comercial), com revestimento de zinco de 110 g/m² (Z100) para o aço de 0,80 mm de espessura. O perfil utilizado foi o U enrijecido (Ue) com dimensões nominais iguais a 140 mm (alma), 40 mm (mesa) e 10 mm (enrijecedor).

Nos ensaios foram consideradas as dimensões nominais mais utilizadas no sistema LSF, como placas de compensado estrutural de 11,1 mm e 18,3 mm de espessura, os perfis formados a frio com chapas de 0,80mm e 0,95mm, além dos espaçamentos entre os parafusos mais utilizados na construção das paredes do sistema LSF que podem ser de 150 mm e 300 mm. As placas foram cortadas na direção longitudinal (comprimento de 2440 mm) e transversal (largura de 1220 mm) em relação às suas fibras externas.

Para facilitar os ensaios, as séries dos espécimes ensaiados foram nomeadas segundo a expressão: “M(1 a 3)- A(0,80 mm ou 0,95m)- C (11,1 mm ou 18,3 mm) -L ou T -150 mm ou 300 mm” no qual “M” varia conforme o tipo de modelo a ser ensaiado; “A” representa a espessura da chapa de aço; “C” representa a espessura da placa de compensado; “L” e “T” representam a direção do corte da placa, sendo “L” as placas com corte na direção longitudinal às fibras externas da madeira e “T”, as placas na direção transversal; “150” e “300” são os espaçamentos entre os parafusos. Os números dos espécimes de cada série variam de 1 a 3 (E1 a E3).

Foram fabricados 144 espécimes, sendo 3 modelos diferentes para representar cada uma das posições do montante. Além do mais, para as mesmas variações foram produzidos 3 espécimes idênticos, formando uma série, ou seja, mesmo modelo, espessura de aço e placa de compensado, corte da placa e espaçamento dos parafusos, como mostram as Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3

Tabela 4.1: Espécimes referentes ao modelo 1 para os ensaios de *push test*.

Modelo	Série	Quantidade
M1	M1 A 0,80 C11,1 L 150	3
	M1 A 0,80 C11,1 T 150	3
	M1 A 0,80 C11,1 L 300	3
	M1 A 0,80 C11,1 T 300	3
	M1 A 0,95 C11,1 L 150	3
	M1 A 0,95 C11,1 T 150	3
	M1 A 0,95 C11,1 L 300	3
	M1 A 0,95 C11,1 T 300	3
	M1 A 0,80 C18,3 L 150	3
	M1 A 0,80 C18,3 T 150	3
	M1 A 0,80 C18,3 L 300	3
	M1 A 0,80 C18,3 T 300	3
	M1 A 0,95 C18,3 L 150	3
	M1 A 0,95 C18,3 T 150	3
	M1 A 0,95 C18,3 L 300	3
	M1 A 0,95 C18,3 T 300	3
	Quantidade total	48

Tabela 4.2: Espécimes referentes ao modelo 2 para os ensaios de *push test*.

Modelo	Série	Quantidade
M2	M2 A 0,80 C11,1 L 150	3
	M2 A 0,80 C11,1 T 150	3
	M2 A 0,80 C11,1 L 300	3
	M2 A 0,80 C11,1 T 300	3
	M2 A 0,95 C11,1 L 150	3
	M2 A 0,95 C11,1 T 150	3
	M2 A 0,95 C11,1 L 300	3
	M2 A 0,95 C11,1 T 300	3
	M2 A 0,80 C18,3 L 150	3
	M2 A 0,80 C18,3 T 150	3
	M2 A 0,80 C18,3 L 300	3
	M2 A 0,80 C18,3 T 300	3
	M2 A 0,95 C18,3 L 150	3
	M2 A 0,95 C18,3 T 150	3
	M2 A 0,95 C18,3 L 300	3
	M2 A 0,95 C18,3 T 300	3
	Quantidade total	48

Tabela 4.3: Espécimes referentes ao modelo 2 para os ensaios de *push test*.

Modelo	Série	Quantidade	
M3	M3 A 0,80 C11,1 L 150	3	
	M3 A 0,80 C11,1 T 150	3	
	M3 A 0,80 C11,1 L 300	3	
	M3 A 0,80 C11,1 T 300	3	
	M3 A 0,95 C11,1 L 150	3	
	M3 A 0,95 C11,1 T 150	3	
	M3 A 0,95 C11,1 L 300	3	
	M3 A 0,95 C11,1 T 300	3	
	M3 A 0,80 C18,3 L 150	3	
	M3 A 0,80 C18,3 T 150	3	
	M3 A 0,80 C18,3 L 300	3	
	M3 A 0,80 C18,3 T 300	3	
	M3 A 0,95 C18,3 L 150	3	
	M3 A 0,95 C18,3 T 150	3	
	M3 A 0,95 C18,3 L 300	3	
	M3 A 0,95 C18,3 T 300	3	
	Quantidade total		48

Como mostram as Figuras 4.1 e 4.2, o modelo 1 foi fabricado com montantes na extremidade com placas de compensado estrutural de 720 mm de comprimento e 400 mm de largura, com parafusos na borda da placa de compensado estrutural. Para esse modelo foram produzidos 48 espécimes.

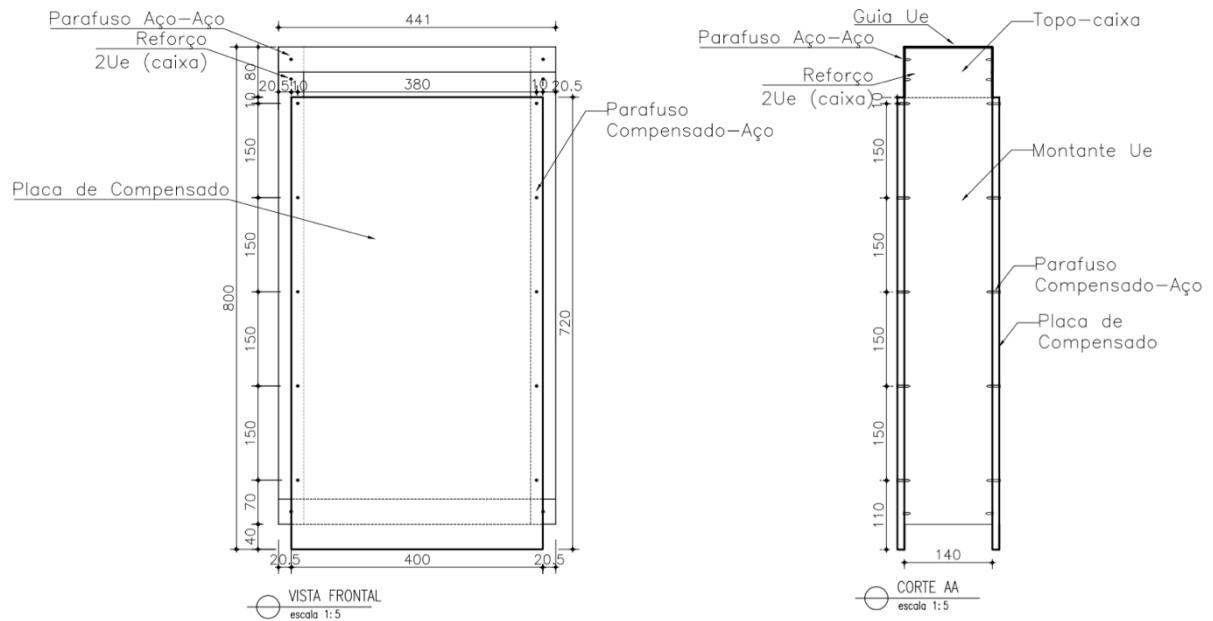


Figura 4.1: Modelo M1 com espaçamento de 150 mm entre os parafusos



Figura 4.2: Modelo M1 pronto para o ensaio *push test*

Como mostram as Figuras 4.3 e 4.4, o modelo 2 foi constituído por montantes intermediários, e placas de 720 mm de comprimento e 150 mm de largura, com parafusos no centro da placa de compensado estrutural. Para esse modelo foram produzidos 48 espécimes.

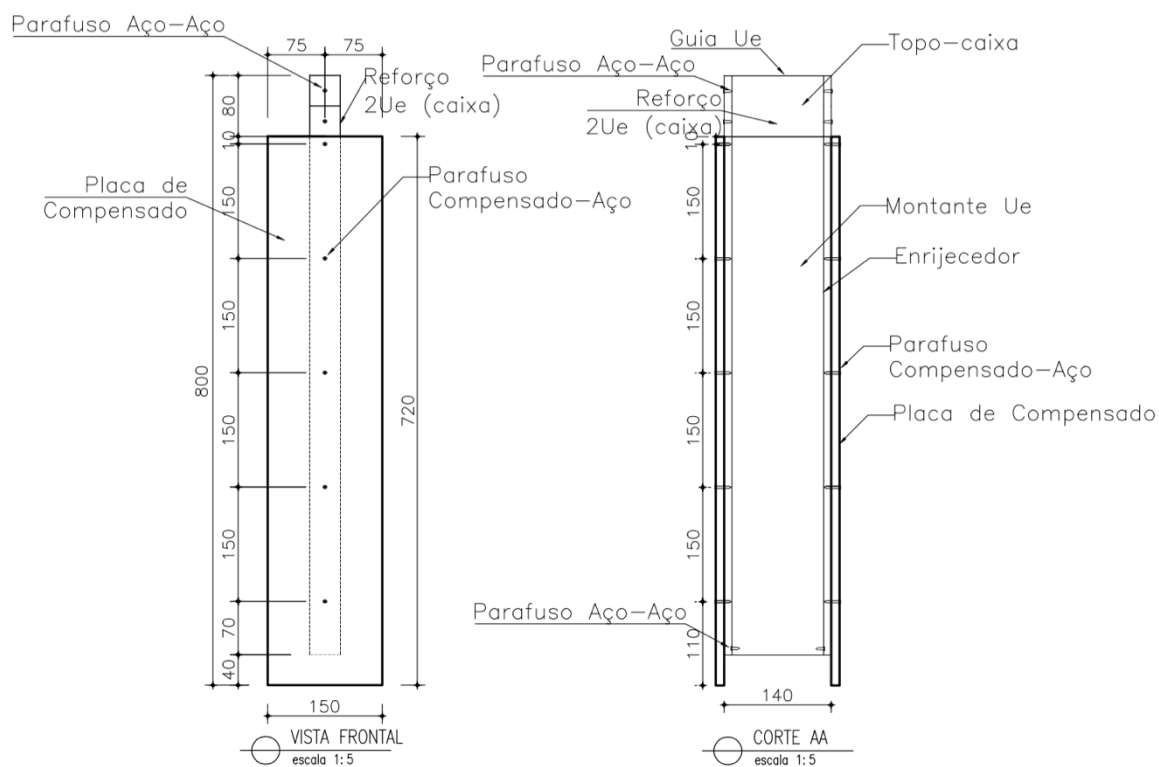


Figura 4.3: Modelo M2 com espaçamento de 150 mm entre os parafusos



Figura 4.4: Modelo M2 pronto para o ensaio *push test*

Como mostram as Figuras 4.5 e 4.6, o modelo 3 tem o montante na base, são compostos por placas de compensado de 620 mm de comprimento e 400 mm de largura, com parafusos na borda inferior da placa de compensado. Foram produzidos 48 espécimes para esse modelo.

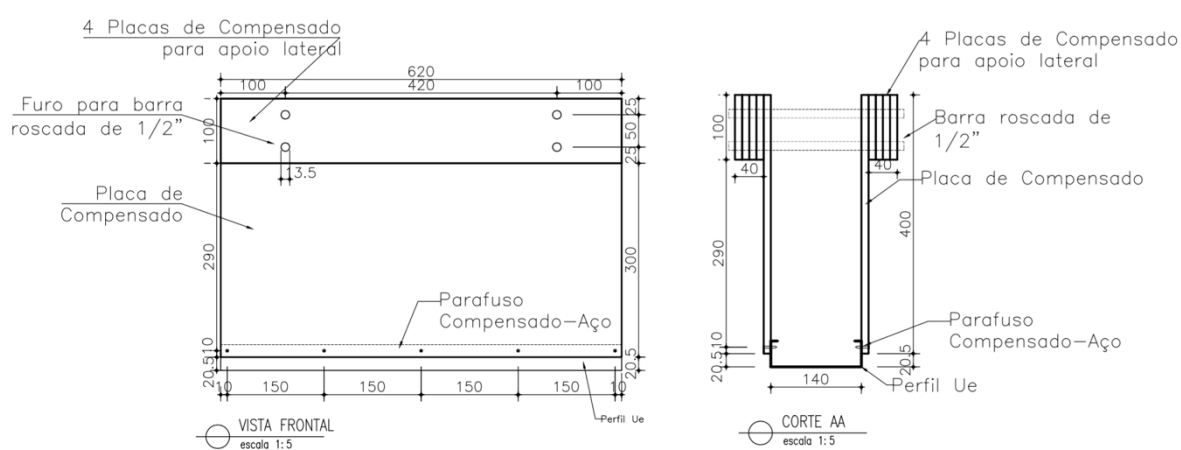


Figura 4.5: Modelo M3 com espaçamento de 150 mm entre os parafusos.



Figura 4.6: Modelo M3 pronto para o ensaio *push test*

4.2 Ensaio e procedimentos

No ensaio de cisalhamento (*push test*), a EN 1994-1-1:2004 recomenda aplicar incrementos de força até atingir 40% da força máxima esperada; em seguida, realizar 25 ciclos de aplicação de força entre 5% e 40% da força de ruptura, evitar que esses incrementos provoquem ruptura antes de um período de 15 minutos; monitorar, durante todo o ensaio, o deslizamento relativo entre os componentes principais do espécime, sendo este medido pelo menos até que a força aplicada decresça em 20% da máxima e, medir, próximo aos conectores, a separação transversal entre os componentes principais.

Para os ensaios realizados nesta pesquisa foi feita uma aplicação de incremento de força, uma pausa de 1 minuto para a estabilização do sistema, então novas aplicações de força foram realizadas até a ruptura das ligações do espécime, sempre com uma pausa de 1 minuto entre os carregamentos. O ensaio foi monitorado durante todo o tempo, observando principalmente a movimentação dos parafusos, bem como os modos de ruptura das placas de compensado estrutural.

Foi utilizado um anel dinamométrico de compressão e tração, da marca CONTENCO modelo I- 1068-N com capacidade de 500 kN, para a leitura da aplicação de incremento força, acoplado a um pórtico de reação. Uma bomba hidráulica manual da TORVEL, tipo pistão e modelo PT-464 também foi utilizada para aplicação dos incrementos de força. Na bomba

também estava instalado um transdutor de pressão (DP) da marca TRANSTEC com capacidade de 700 bar, como mostra a Figura 4.7.



Figura 4.7: Foto da bomba hidráulica da marca Torvel ao fundo da imagem e do anel dinamométrico acima do espécime.

Para medir o deslocamento vertical entre a placa de compensado e o reticulado metálico, foram utilizados quatro transdutores de deslocamento ou *displacement transducer* (DT) do tipo DT-100A, marca KYOWA com curso de 100 mm e precisão de 0,005 mm. Nos espécimes dos modelos M1 e M3 dois DT's foram dispostos em cada lado do espécime, como mostram as Figuras 4.2 e 4.6. Nos espécimes do modelo M2, foram utilizados dois DT's, sendo instalado um em cada lado do espécime, como mostra a Figura 4.4 e 4.7. Os DT's foram conectados ao sistema de aquisição de dados da marca Lynx, com os *softwares Lynx AqDados 7.2* e *Lynx AqDanalysis 7.2*. Dessa maneira, foi possível monitorar e aquiritar os dados dos ensaios e, então, exportá-los para o *Microsoft Excel* para a produção de gráficos de força *versus* deslocamento.

Durante os ensaios foram identificados os modos de ruptura na ligação dos espécimes, sendo eles o modo *pull over* (Figuras 4.8 e 4.9) e *pull out* (Figuras 4.10 e 4.11). No ensaio feito no espécime “M1 0,80 C11,1 L150 – E3”, pode-se observar o modo de ruptura denominado de *pull over* no parafuso chamado de 6B, no qual ocorre o puncionamento da placa de compensado estrutural, assim como no parafuso 1B, no espécime “M1 0,80 C11,1 L300 –

E2”. Esse foi o tipo de ruptura mais comum identificado durante os ensaios, como mostram as Figuras 4.8 e 4.9.

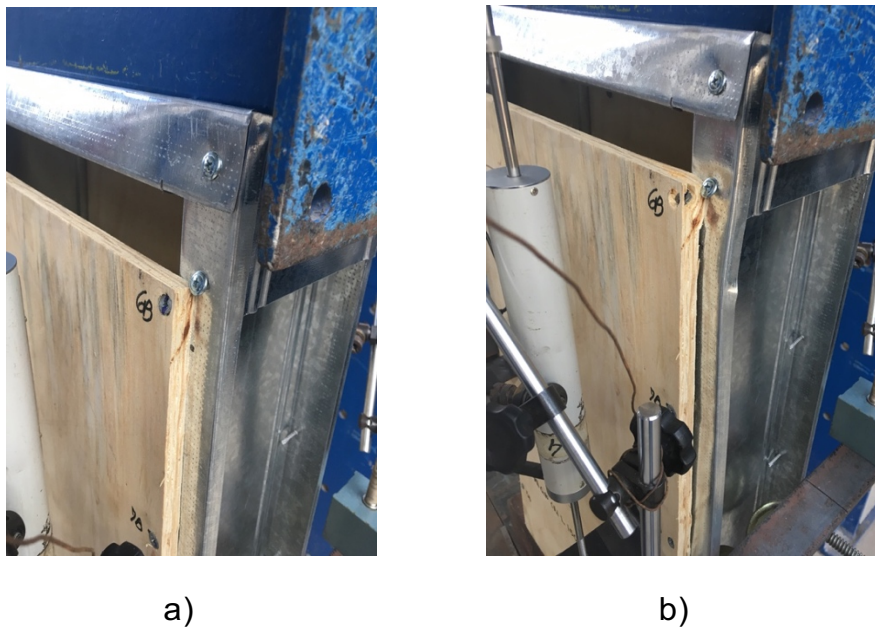


Figura 4.8: Exemplo de *pull over* no espécime “M1 0,80 C11,1 L150 – E3”. a) parafuso 6B antes do ensaio. b) *pull over* no parafuso 6B, durante o ensaio.

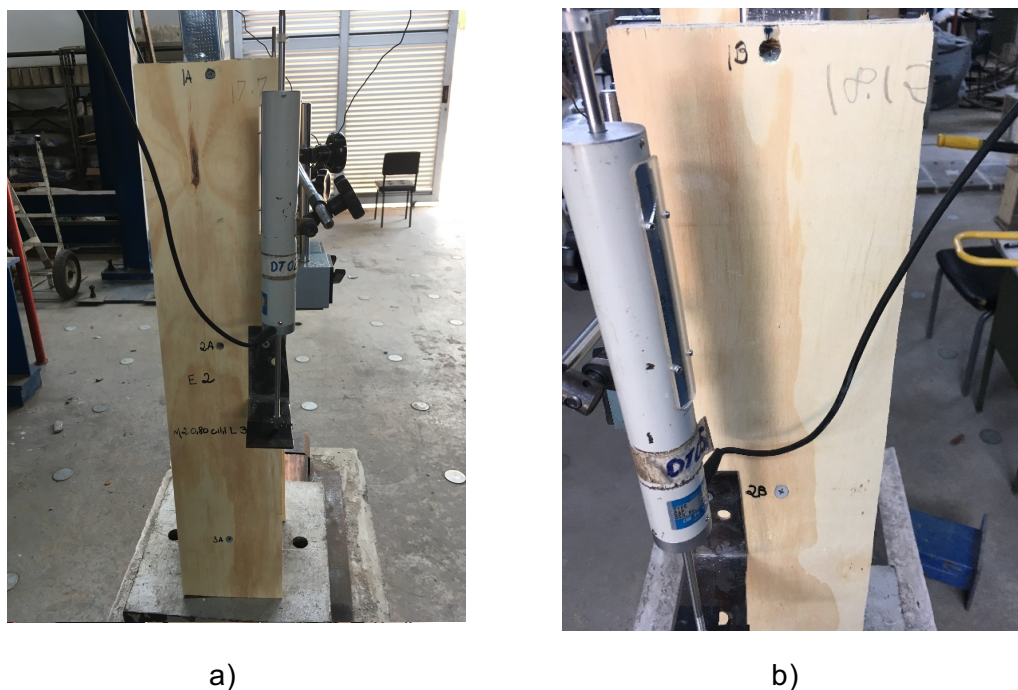


Figura 4.9: Exemplo de *pull over* no espécime “M1 0,80 C11,1 L300 – E2”. a) espécime antes do ensaio; b) *pull over* no parafuso “1B”, durante o ensaio.

No ensaio feito no espécime “M1 0,95 C18,3 L300 – E2” e espécime “M2 0,80 C18,3 T 150 – E2” foi identificado o modo de ruptura *pull out*, muito comum nos espécimes fabricados com

placas de 18,3 mm. Nesse caso, os parafusos são arrancados da chapa de aço junto às placas de compensado, como evidenciado na Figura 4.10 e 4.11.

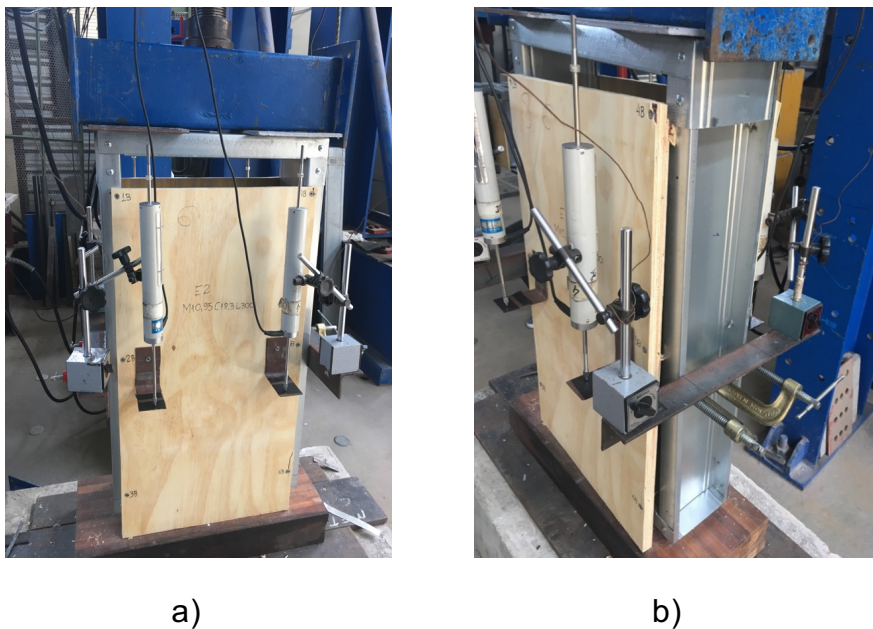


Figura 4.10: Exemplo de *pull out* no espécime M1 0,95 C18,3 L300 – E2. a) espécime antes do ensaio; b) *pull out* nas ligações, durante o ensaio.

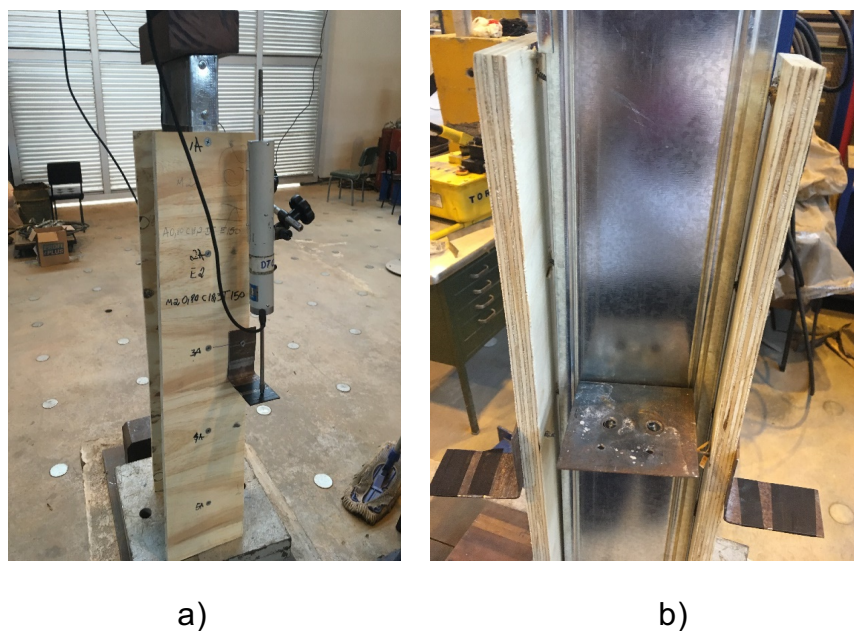


Figura 4.11: Exemplo de *pull out* no espécime “M2 0,80 C18,3 T 150 – E2”. a) espécime antes do ensaio; b) *pull out* nas ligações, durante o ensaio.

Nos modelos M3 pôde-se observar durante os ensaios o rasgamento da placa de compensado. Nesse tipo de ensaio, as ligações entre o montante e a placa foram capazes de rasgar o

compensado durante a aplicação de força sobre o perfil metálico. Esse exemplo é ilustrado na Figura 4.12, no espécime “M3 0,95 C11,1 T150 – E1”.



Figura 4.12: Exemplo de cisalhamento com rasgamento na placa de compensado no espécime M3 0,95 C11,1 T150 – E1. a) modelo antes do ensaio; b) cisalhamento com rasgamento nas placas, durante o ensaio.

4.2.1 Tratamento de dados

A partir dos ensaios de *push test*, foram determinadas a rigidez inicial (K_e), a energia dissipada (A) e a ductilidade (μ) das ligações em cada espécime, conforme as recomendações da norma AISI S213-07/S1-09:2012 da *American Iron and Steel Institute* (AISI, 2012). Segundo a norma, é possível determinar tais valores por meio do gráfico força *versus* deslocamento, já que o modelo elasto-plástico de energia equivalente baseia-se na consideração de que a energia dissipada durante o ensaio monotômico do espécime é equivalente à energia dissipada pela curva bilinear. A inclinação da primeira linha representa a rigidez da ligação, ou seja, o comportamento elástico, e a segunda linha representa o patamar de escoamento, ou seja, o comportamento plástico, até que haja a ruptura do espécime, conforme mostra a Figura 4.13, cuja área 1 (A_1) tem que ser igual à área 2 (A_2). Dessa forma, para cada gráfico de força *versus* deslocamento elaborado, foi feita uma curva de aproximação bilinear, conhecida como Energia Equivalente Elasto-Plástica (EEEP), para a determinação dos parâmetros abordados, conforme a Figura 4.14. Os gráficos de força *versus* deslocamento com a curva teórica (EEEP), além da curva suavizada de densidade reduzida de todos os espécimes ensaiados estão no Apêndice A.

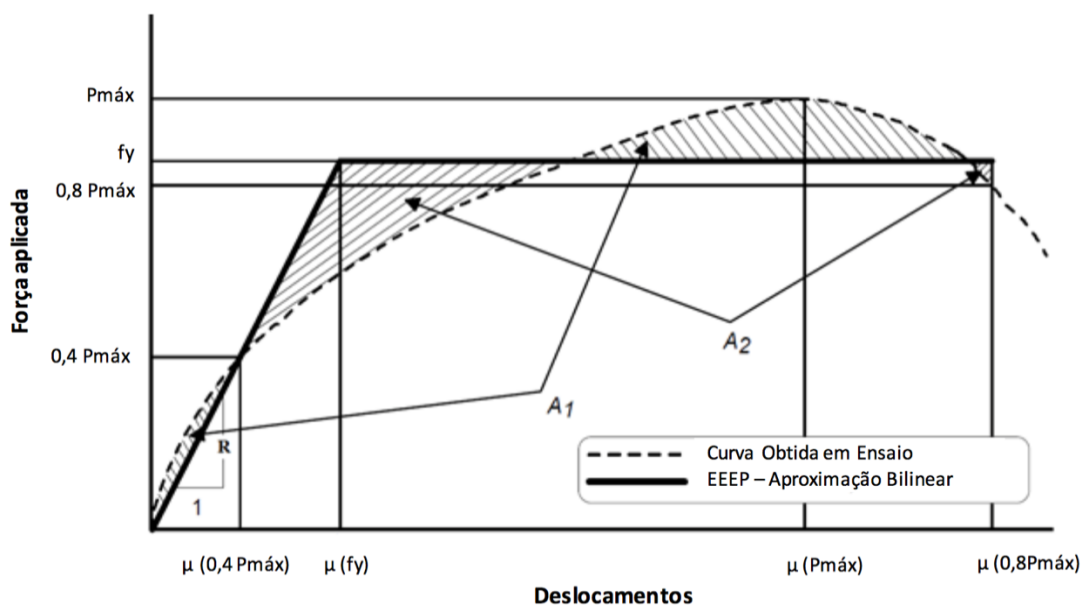


Figura 4.13 - Gráfico com a aproximação bilinear da curva de Energia Equivalente Elasto-Plástica -EEEEP. (Fonte: American Iron and Steel Institute, 2012 – Adaptado pela autora)

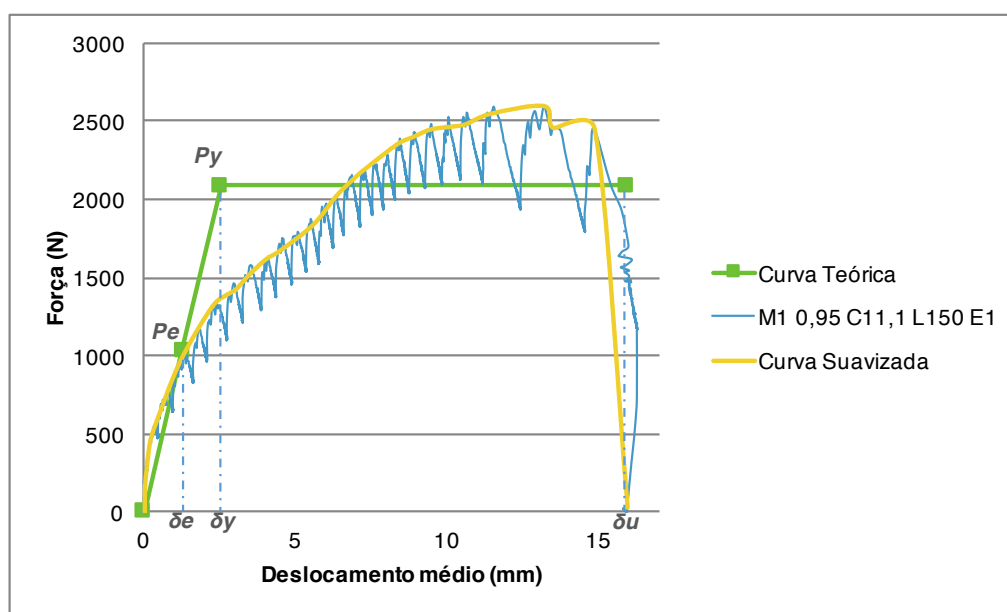


Figura 4.14 - Exemplo de gráfico força versus deslocamento do modelo “M1 0,95 C11,1 L150-E1”, curva teórica (EEEEP) e curva suavizada

Os deslocamentos médios utilizados nos gráficos durante os ensaios foram obtidos pela média entre os deslocamentos com os 4 DT's. Assim sendo, por meio da elaboração dos gráficos força *versus* deslocamento e da Equação 4.1, obteve-se a rigidez da ligação (K_e) de cada espécime. Além disso, a energia dissipada (A) foi determinada por intermédio do cálculo da área do gráfico obtido em cada ensaio e o patamar EEEP obtido por meio da Equação 4.2, desenvolvida por Datchoua (2018). O δu é o valor de deslocamento correspondente a 0,8 de

$P_{\text{máx}}$, mas esse deslocamento é determinado após a força máxima atingida ($P_{\text{máx}}$), ou seja, corresponde a força de ruptura, conforme explicam as Figuras 4.13 e 4.14.

$$Ke = \frac{Pe}{\delta_e} \quad (4.1)$$

$$Py = \frac{-\delta_u \pm \left(\sqrt{\delta_u^2 - \frac{2A}{ke}} \right)}{-\frac{1}{ke}} \quad (4.2)$$

Onde:

Ke é o valor da rigidez da ligação;

Pe (mm) é o valor de 0,4 da força máxima atingida pelo parafuso;

δ_e (mm) é o deslocamento correspondente ao valor de Pe ;

Py (N) é o valor da força inicial de escoamento;

A (N.mm) é o valor da energia dissipada e;

δ_u (mm) é o deslocamento correspondente à força de ruptura.

Para determinar a ductilidade (μ) da ligação dos espécimes, que é a capacidade que um material tem de se deformar antes da sua ruptura, foi utilizada a Equação 4.3. Quanto maior o patamar de escoamento (EEEP), maior a ductilidade obtida.

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (4.3)$$

Sendo:

μ é a ductilidade;

δ_u (mm) é o deslocamento correspondente à força de ruptura e;

δ_y (mm) é o deslocamento correspondente à força do início de escoamento.

O δ_y foi obtido pela Equação 4.4:

$$\delta_y = \frac{P_y}{K_e} \quad (4.4)$$

Onde:

δ_y (mm) é a força do início de escoamento;

P_y (N) força inicial de escoamento e;

K_e (N/mm) é o valor da rigidez da ligação.

Além de tais parâmetros determinados, a força máxima atingida por cada parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) foi encontrada por meio da relação entre a força máxima total ($P_{\text{máx}}$ Total) obtida pelo espécime e a respectiva quantidade de parafusos. Também foram determinados os valores médios (X_m) dos parâmetros obtidos, bem como o coeficiente de variação (C_v) dos espécimes.

4.3 Apresentação dos resultados

Os resultados obtidos para os ensaios de *push test* foram agrupados conforme os 3 espécimes ensaiados com os mesmos parâmetros e características, ou seja, a mesma série, sendo o mesmo modelo, o mesmo tipo de aço, a mesma espessura da placa de compensado estrutural e o mesmo espaçamento entre os parafusos. Além disso, em uma mesma tabela e gráfico de força *versus* deslocamento foram agrupados os espécimes com tais características, porém com as duas direções de cortes na placa, sendo elas: na direção longitudinal e transversal (T e L) em relação às fibras externas da placa. A força utilizada no gráfico foi a atingida por cada parafuso em cada espécime.

4.3.1 Modelo M1

A Figura 4.9 mostra o gráfico força por deslocamento das séries “M1 0,80 C11,1 (T e L) 150”, em que as curvas dos espécimes com corte longitudinal na placa apresentam uma menor área sob os gráficos em relação aos espécimes com corte transversal, devido às menores forças máximas alcançadas e aos menores deslocamentos atingidos por esses espécimes. Além disso, em geral, as curvas apresentam um breve comportamento linear da fase elástica, seguida de um comportamento não linear até atingirem a força máxima e, logo em seguida,

uma fase plástica até ocorrer a ruptura da ligação dos espécimes. No entanto, os espécimes “M1 0,80 C11,1 L150 – E1” e “M1 0,80 C11,1 L150 – E2” não apresentam uma fase plástica e rompem suas ligações subitamente após atingirem a força máxima.

Na Tabela 4.4, pode-se observar que o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx Total}}$) é de 36728,27 N para os espécimes com corte longitudinal e 42156,93 N para os de corte transversal. Já o valor médio da força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx Parafuso}}$) é de 1836,41 N para os espécimes com corte longitudinal e de 2107,85 N para os de corte transversal. A rigidez (K_e) média alcançada para os espécimes com corte longitudinal nas placas é de 1901,28 N/mm e de 1565,89 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) média é de 9138,90 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 18049,92 N.mm para os de corte transversal. Por fim, a ductilidade (μ) média alcançada é de 8,01 para os espécimes de corte longitudinal e de 9,91 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, já os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados, enquanto os valores acima de 30% representam uma alta dispersão dos resultados.

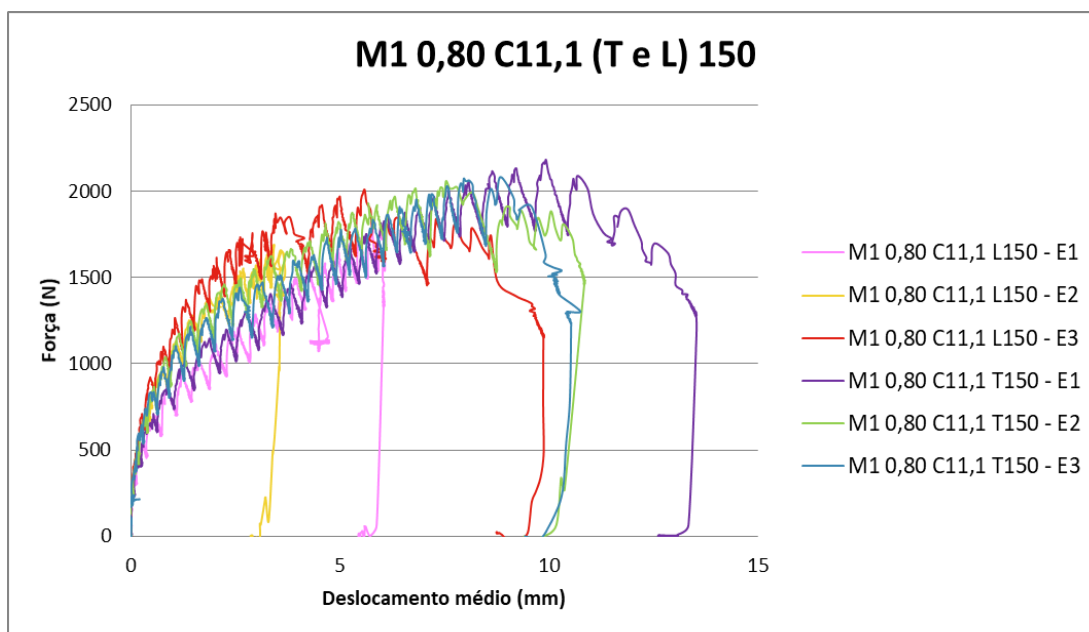


Figura 4.15: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M1 0,80 C11,1 (T e L) 150”

Tabela 4.4: Resultados relativos às séries de “M1 0,80 C11,1 (T e L) 150”

Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	Ke (N/mm)	A (N.mm)	μ
M1 0,80 C 11,1 L 150 - E1	36219,34	1810,97	1017,47	7423,61	4,40
M1 0,80 C 11,1 L 150 - E2	33787,75	1689,39	2637,42	4189,95	8,01
M1 0,80 C 11,1 L 150 - E3	40177,73	2008,89	2048,96	15803,14	11,62
Xm	36728,27	1836,41	1901,28	9138,90	8,01
Cv	8,78%	8,78%	43,13%	65,58%	45,04%
Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	Ke (N/mm)	A (N.mm)	μ
M1 0,80 C 11,1 T 150 - E1	43655,46	2182,77	1107,35	21331,11	8,35
M1 0,80 C 11,1 T 150 - E2	41167,33	2058,37	1702,94	16880,78	10,25
M1 0,80 C 11,1 T 150 - E3	41647,99	2082,40	1887,37	15937,87	11,12
Xm	42156,93	2107,85	1565,89	18049,92	9,91
Cv	3,13%	3,13%	26,03%	15,96%	14,29%

Os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M1 0,80 C11,1 (T e L) 300” estão representados na Figura 4.16, nos quais tais espécimes com corte longitudinal e transversal na placa apresentam, em geral, áreas similares sob as curvas. Além disso, as curvas apresentam na primeira etapa uma breve fase elástica linear, seguida de um comportamento não linear até alcançarem as forças máximas e, logo em seguida, uma fase plástica até acontecer a ruptura dos espécimes. O espécime “M1 0,80 C11,1 L300 – E2” tem um comportamento atípico em relação aos demais espécimes, pois ocorre uma queda brusca na força imposta após atingir a força máxima.

A Tabela 4.5 mostra que o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx}}$ Total) é de 25861,53 N para os espécimes com corte longitudinal e de 25748,43 N para os de corte transversal. Já a média da força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) é de 2155,13 N para os espécimes com corte longitudinal e de 2145,70 N para os de corte transversal. A rigidez (Ke) média alcançada para os espécimes com corte longitudinal nas placas é de 1173,71 N/mm e de 868,73 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) média é de 18521,88 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 21547,33 N.mm para os de corte transversal. Por fim, a ductilidade (μ) média alcançada é de 8,09 para os espécimes de corte longitudinal e de 6,19 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, enquanto os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados.

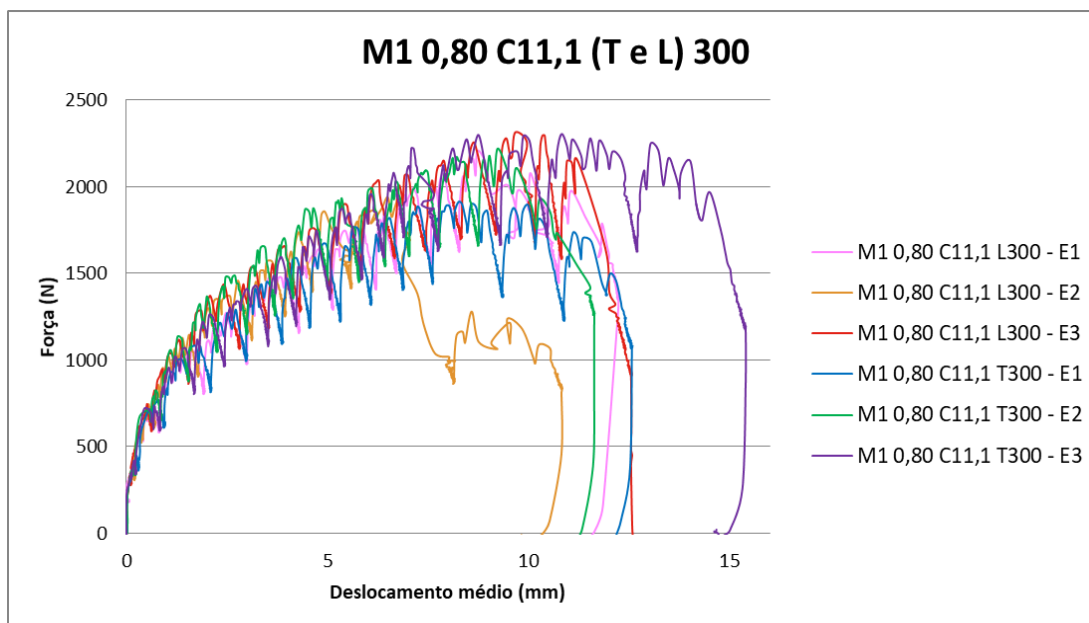


Figura 4.16: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M1 0,80 C11,1 (T e L) 300”

Tabela 4.5: Resultados relativos às séries “M1 0,80 C11,1 (T e L) 300”

Espécime	$P_{\text{máx}} \text{ Total (N)}$	$P_{\text{máx}} \text{ Parafuso (N)}$	$Ke \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N.mm)}$	μ
M1 0,80 C 11,1 L 300 - E1	26492,98	2207,75	915,07	19133,21	5,98
M1 0,80 C 11,1 L 300 - E2	23326,27	1943,86	1466,39	14769,15	10,47
M1 0,80 C 11,1 L 300 - E3	27765,33	2313,78	1139,66	21663,30	7,81
Xm	25861,53	2155,13	1173,71	18521,88	8,09
Cv	8,84%	8,84%	23,62%	18,83%	27,91%
Espécime	$P_{\text{máx}} \text{ Total (N)}$	$P_{\text{máx}} \text{ Parafuso (N)}$	$Ke \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N.mm)}$	μ
M1 0,80 C 11,1 T 300 - E1	22958,70	1913,23	862,22	18538,12	6,49
M1 0,80 C 11,1 T 300 - E2	26634,36	2219,53	993,72	19318,72	6,32
M1 0,80 C 11,1 T 300 - E3	27652,23	2304,35	750,24	26785,15	5,76
Xm	25748,43	2145,70	868,73	21547,33	6,19
Cv	9,59%	9,59%	14,03%	21,13%	6,21%

A Figura 4.17 mostra os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M1 0,95 C11,1 (T e L) 150”. Nesses gráficos os espécimes com corte de placa longitudinal apresentam maiores áreas sob os gráficos em relação aos espécimes com corte transversal, devido às maiores forças máximas alcançadas, bem como maiores deslocamentos médios atingidos por esses espécimes. Além disso, os espécimes apresentam em um primeiro momento uma fase elástica, em seguida ocorre um comportamento não linear até atingirem a força máxima e então, os espécimes com corte longitudinal apresentam uma fase plástica até a ruptura. Já os outros espécimes têm suas ligações rompidas de forma abrupta após atingirem a força máxima.

Na Tabela 4.6, o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx}} \text{ Total}$) é de 53202,74 N para os espécimes com corte longitudinal e de 49102,97 N para os de corte transversal. Enquanto a

força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx}} \text{ Parafuso}$) é de 2660,14 N para os espécimes com corte longitudinal e de 2455,15 N para os de corte transversal. A rigidez (Ke) alcançada para os espécimes com corte longitudinal na placa é de 790,81N/mm e de 973,77 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) é de 28740,67 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 20585,79 N.mm para os de corte transversal. Por fim, a ductilidade (μ) alcançada é de 5,58 para os espécimes de corte longitudinal e de 5,22 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, já os de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados.

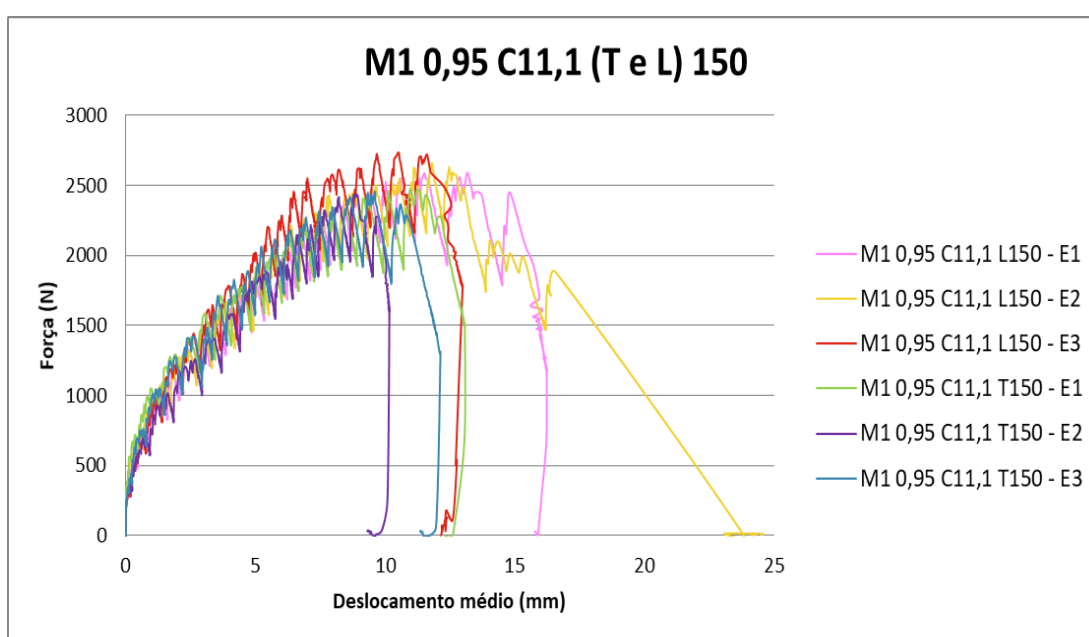


Figura 4.17: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M1 0,95 C11,1 (T e L) 150”

Tabela 4.6: Resultados relativos às séries “M1 0,95 C11,1 (T e L) 150”

Espécime	$P_{\text{máx}} \text{ Total (N)}$	$P_{\text{máx}} \text{ Parafuso (N)}$	$Ke \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N.mm)}$	μ
M1 0,95 C 11,1 L 150 - E1	51798,45	2589,92	826,58	30585,27	6,30
M1 0,95 C 11,1 L 150 - E2	53155,61	2657,78	822,15	30630,35	6,61
M1 0,95 C 11,1 L 150 - E3	54654,15	2732,71	723,71	25006,39	3,83
Xm	53202,74	2660,14	790,81	28740,67	5,58
Cv	2,68%	2,68%	7,35%	11,25%	27,36%
Espécime	$P_{\text{máx}} \text{ Total (N)}$	$P_{\text{máx}} \text{ Parafuso (N)}$	$Ke \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N.mm)}$	μ
M1 0,95 C 11,1 T 150 - E1	49508,24	2475,41	1208,61	23418,29	5,84
M1 0,95 C 11,1 T 150 - E2	48688,28	2434,41	756,17	16904,31	3,99
M1 0,95 C 11,1 T 150 - E3	49112,40	2455,62	956,53	21434,78	5,84
Xm	49102,97	2455,15	973,77	20585,79	5,22
Cv	0,84%	0,84%	23,28%	16,22%	20,52%

Na Figura 4.18 estão representados os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M1 0,95 C11,1 (T e L) 300”, nos quais os espécimes com corte de placa longitudinal e corte transversal apresentam curvas sob os gráficos com áreas similares em suas respostas. Além disso, as curvas apresentam na primeira etapa uma breve fase elástica, seguida de um comportamento suavemente não linear até atingirem a força máxima. Em seguida, ocorre uma breve fase plástica com a ruptura dos espécimes. O espécime “M1 0,95 C11,1 T300 – E2” apresenta um comportamento atípico em relação aos demais espécimes, pois um de seus parafusos não foi instalado de maneira correta, impactando diretamente na sua força máxima e na ruptura brusca de suas ligações.

A Tabela 4.7 mostra que o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx Total}}$) é de 29904,74 N para os espécimes com corte longitudinal e de 28283,69 N para os de corte transversal. Já a força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx Parafuso}}$) apresenta um valor médio de 2492,06 N para os espécimes com corte longitudinal e de 2356,97 N para os de corte transversal. A rigidez (K_e) média alcançada para os espécimes com corte longitudinal nas placas é de 712,17 N/mm e de 810,55 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) é de 19300,60 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 17703,51 N.mm para os de corte transversal. Por fim, a ductilidade (μ) média alcançada é de 3,93 para os espécimes de corte longitudinal e de 3,96 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, enquanto os de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados, já os valores acima de 30%, representam uma alta dispersão dos resultados.

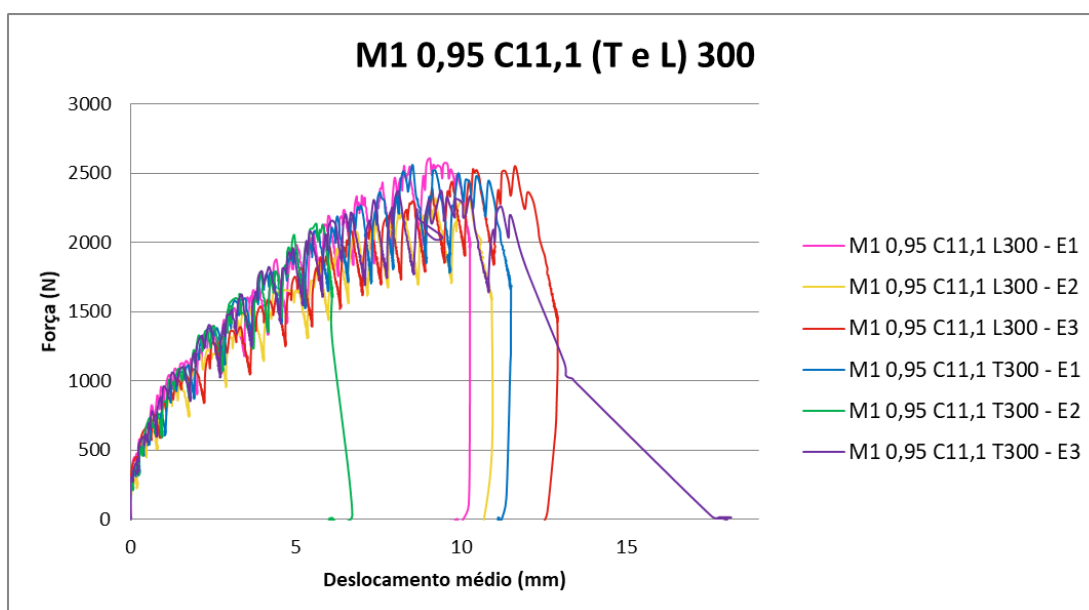


Figura 4.18: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M1 0,95 C11,1 (T e L) 300”

Tabela 4.7: Resultados relativos às séries “M1 0,95 C11,1 (T e L) 300”

Espécime	$P_{\text{máx Total}} \text{ (N)}$	$P_{\text{máx Parafuso}} \text{ (N)}$	$K_e \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N.mm)}$	μ
M1 0,95 C 11,1 L 300 - E1	31271,33	2605,94	896,00	18134,72	4,45
M1 0,95 C 11,1 L 300 - E2	27821,87	2318,49	699,68	16829,40	4,06
M1 0,95 C 11,1 L 300 - E3	30621,02	2551,75	540,83	22937,69	3,28
Xm	29904,74	2492,06	712,17	19300,60	3,93
Cv	6,13%	6,13%	24,98%	16,67%	15,14%
Espécime	$P_{\text{máx Total}} \text{ (N)}$	$P_{\text{máx Parafuso}} \text{ (N)}$	$K_e \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N,mm)}$	μ
M1 0,95 C 11,1 T 300 - E1	30734,12	2561,18	612,57	21140,28	3,21
M1 0,95 C 11,1 T 300 - E2	25616,49	2134,71	856,31	8381,46	3,03
M1 0,95 C 11,1 T 300 - E3	28500,46	2375,04	962,76	23588,80	5,64
Xm	28283,69	2356,97	810,55	17703,51	3,96
Cv	9,07%	9,07%	22,15%	46,12%	36,73%

A Figura 4.19 mostra os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M1 0,80 C18,3 (T e L) 150”, nos quais as curvas dos espécimes com corte longitudinal na placa apresentam, em geral, uma maior área sob os gráficos em relação aos espécimes com corte transversal, devido às maiores forças máximas alcançadas e aos maiores deslocamentos atingidos por esses espécimes. Além disso, em geral, as curvas apresentam uma breve fase elástica linear, seguida de um comportamento não linear até alcançarem a força máxima e, logo em seguida, uma fase plástica até acontecer a ruptura da ligação dos espécimes. No entanto, os espécimes “M1 0,80 C18,3 L150 – E1” e “M1 0,80 18,3 T150 – E3” não apresentam uma fase plástica, rompendo suas ligações após atingirem a força máxima. Durante o ensaio, houve uma perda da aquisição de dados do espécime “M1 0,80 C18,3 T150 – E2”.

A Tabela 4.8 mostra que o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx Total}}$) é de 38047,74 N para os espécimes com corte longitudinal e 36784,81 N para os de corte transversal. Já o valor médio da força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx Parafuso}}$) é de 1902,39 N para os espécimes com corte longitudinal e de 1839,24 N para os de corte transversal. Enquanto o valor médio da rigidez (K_e) alcançado para os espécimes com corte longitudinal nas placas é de 1721,90 N/mm e de 1340,25 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) média é de 14070,71 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 11128,29 N.mm para os de corte transversal. Finalmente, a ductilidade (μ) média alcançada é de 9,97 para os espécimes de corte longitudinal e de 6,44 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, já os valores de C_v entre

15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados, enquanto os valores acima de 30%, representam uma alta dispersão dos resultados

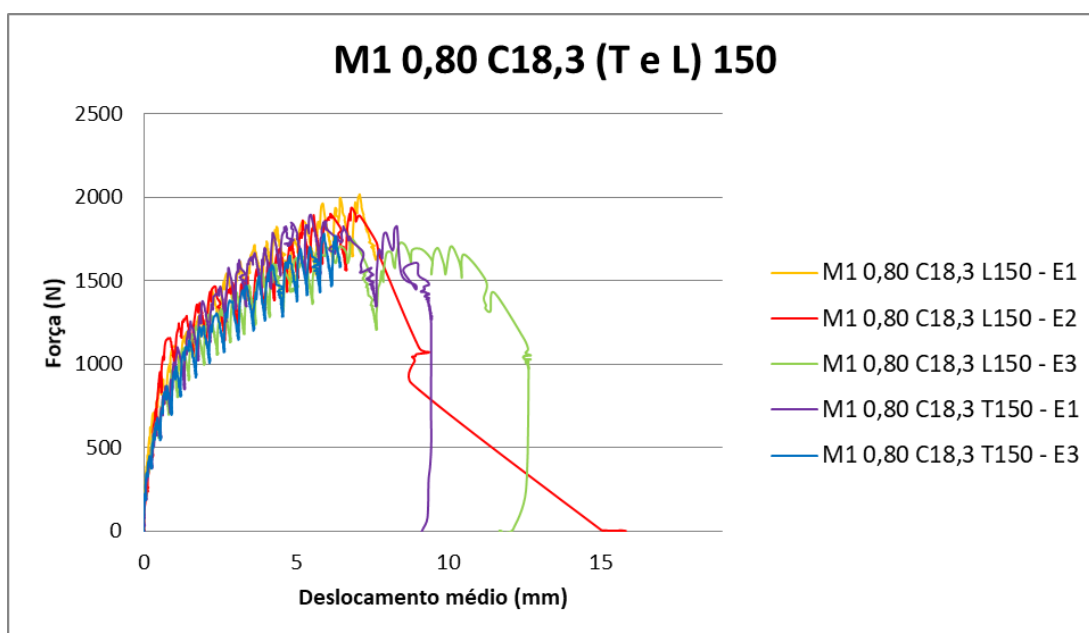


Figura 4.19: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M1 0,80 C18,3 (T e L) 150”

Tabela 4.8: Resultados relativos às séries “M1 0,80 C18,3 (T e L) 150”

Espécime	$P_{\text{máx}} \text{ Total (N)}$	$P_{\text{máx}} \text{ Parafuso (N)}$	$Ke \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N.mm)}$	μ
M1 0,80 C 18,3 L 150 - E1	40375,64	2018,78	1728,50	11797,02	7,76
M1 0,80 C 18,3 L 150 - E2	38764,02	1938,20	1781,73	13399,21	10,33
M1 0,80 C 18,3 L 150 - E3	35003,54	1750,18	1655,45	17015,91	11,83
Xm	38047,74	1902,39	1721,90	14070,71	9,97
Cv	7,25%	7,25%	3,68%	19,00%	20,61%
Espécime	$P_{\text{máx}} \text{ Total (N)}$	$P_{\text{máx}} \text{ Parafuso (N)}$	$Ke \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N.mm)}$	μ
M1 0,80 C 18,3 T 150 - E1	37915,78	1895,79	1449,97	13719,96	7,43
M1 0,80 C 18,3 T 150 - E3	35653,84	1782,69	1230,54	8536,62	5,45
Xm	36784,81	1839,24	1340,25	11128,29	6,44
Cv	4,35%	4,35%	11,58%	32,94%	21,75%

A Figura 4.20 mostra os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M1 0,80 C18,3 (T e L) 300”. Nos gráficos as curvas dos espécimes com corte longitudinal e transversal da placa apresentam áreas no gráfico com valores aproximados, exceto o espécime “M1 0,80 C18,3 L300 -E1”, que tem uma curva representada por uma grande área devido à maior força máxima alcançada e pelo maior deslocamento atingido. Em geral, as curvas apresentam uma fase elástica linear, seguida de um comportamento suavemente não linear, até atingir a força máxima. Em seguida, passam por uma fase plástica até ocorrer a ruptura das ligações dos espécimes.

A Tabela 4.9 mostra que o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx}}$ Total) é de 23656,13 N para os espécimes com corte longitudinal e de 23420,51 N para os de corte transversal. Já o valor médio da força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) é de 1971,34 N para os espécimes com corte longitudinal e de 1951,71 N para os de corte transversal. O valor médio da rigidez (K_e) alcançado para os espécimes com corte longitudinal nas placas é de 1393,98 N/mm e de 1681,06 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) média é de 14086,13 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 10265,71 N.mm para os de corte transversal. Por fim, a ductilidade média (μ) alcançada é de 7,29 para os espécimes de corte longitudinal e de 6,53 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, já os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados, enquanto os valores acima de 30%, representam uma alta dispersão dos resultados.

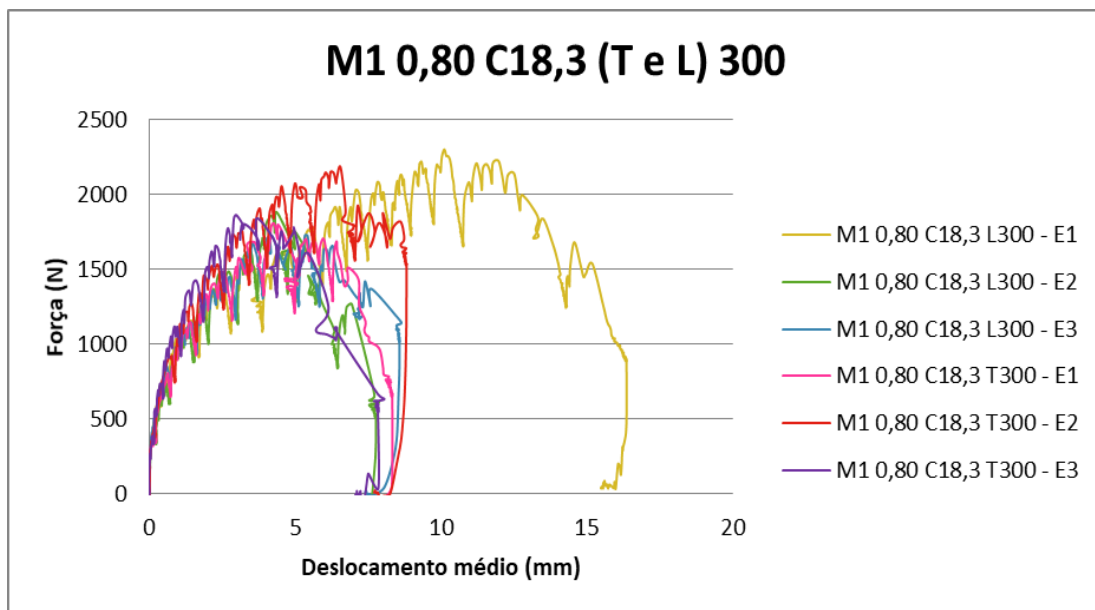


Figura 4.20: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M1 0,80 C18,3 (T e L) 300”

Tabela 4.9: Resultados relativos às séries “M1 0,80 C18,3 (T e L) 300”

Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	K_e (N/mm)	A (N.mm)	μ
M1 0,80 C 18,3 L 300 - E1	27623,95	2302,00	1167,97	23580,92	8,51
M1 0,80 C 18,3 L 300 - E2	22619,41	1884,95	1328,28	8273,38	5,54
M1 0,80 C 18,3 L 300 - E3	20725,03	1727,09	1685,70	10404,07	7,84
Xm	23656,13	1971,34	1393,98	14086,13	7,29
Cv	15,07%	15,07%	19,01%	58,86%	21,38%
Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	K_e (N/mm)	A (N.mm)	μ
M1 0,80 C 18,3 T 300 - E1	21714,63	1809,55	1373,37	9509,91	6,15
M1 0,80 C 18,3 T 300 - E2	26181,97	2181,83	1577,08	13166,75	6,36
M1 0,80 C 18,3 T 300 - E3	22364,95	1863,75	2092,72	8120,48	7,08
Xm	23420,51	1951,71	1681,06	10265,71	6,53
Cv	10,31%	10,31%	22,06%	25,39%	7,47%

Na Figura 4.21 e na Tabela 4.10 são apresentados os resultados encontrados para os ensaios das séries “M1 0,95 C18,3 (T e L) 150”. Nesses gráficos, as curvas dos espécimes com corte longitudinal na placa apresentam, em sua maioria, áreas sob as curvas maiores que as dos espécimes com corte de placa transversal, exceto o espécime “M1 0,95 C18,3 T150 – E3” que também tem uma curva com uma grande área no gráfico, devido à força máxima alcançada e a maiores deslocamentos atingidos. Em geral, as curvas apresentam primeiramente uma breve fase elástica linear, seguida de um comportamento não linear, até alcançarem a força máxima, e então, ocorre uma fase plástica até a ruptura da ligação dos espécimes, com exceção do espécime “M1 0,95 C18,3 T150 – E2, que teve ruptura súbita. Durante o ensaio, ocorreu uma perda da aquisição de dados do espécime “M1 0,95 C18,3 L150 – E3”.

Pode-se observar, na Tabela 4.10, que o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx Total}}$) é de 46751,49 N para os espécimes com corte longitudinal e de 39847,86 N para os de corte transversal. O valor médio da força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx Parafuso}}$) é de 2337,57 N para os espécimes com corte longitudinal e de 1992,39 N para os de corte transversal. O valor médio da rigidez (K_e) alcançado para os espécimes com corte longitudinal é de 1422,54 N/mm e de 1467,71 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) média é de 22722,53 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 13398,92 8 N.mm para os de corte transversal. Finalmente, a ductilidade (μ) média alcançada é de 8,55 para os espécimes de corte longitudinal e de 7,51 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, já os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados, enquanto os valores acima de 30%, representam uma alta dispersão dos resultados.

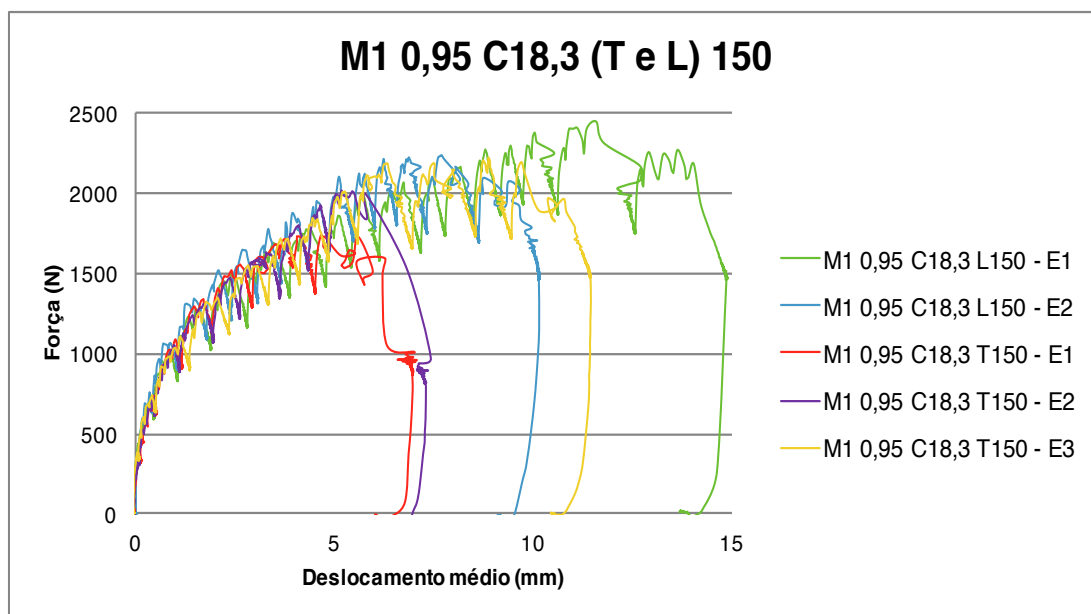


Figura 4.21: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M1 0,95 C18,3 (T e L) 150”

Tabela 4.10: Resultados relativos às séries “M1 0,95 C18,3 (T e L) 150”

Espécime	$P_{\text{máx Total}}$ (N)	$P_{\text{máx Parafuso}}$ (N)	Ke (N/mm)	A (N.mm)	μ
M1 0,95 C 18,3 L 150 - E1	48773,11	2438,66	1122,85	27308,80	7,90
M1 0,95 C 18,3 L 150 - E2	44729,88	2236,49	1722,23	18136,26	9,21
X_m	46751,49	2337,57	1422,54	22722,53	8,55
C_v	6,12%	6,12%	29,79%	28,54%	10,85%
Espécime	$P_{\text{máx Total}}$ (N)	$P_{\text{máx Parafuso}}$ (N)	Ke (N/mm)	A (N.mm)	μ
M1 0,95 C 18,3 T 150 - E1	34692,52	1734,63	1717,58	9456,94	8,22
M1 0,95 C 18,3 T 150 - E2	40262,55	2013,13	1313,85	10712,76	5,92
M1 0,95 C 18,3 T 150 - E3	44588,52	2229,43	1371,71	20027,07	8,39
X_m	39847,86	1992,39	1467,71	13398,92	7,51
C_v	12,45%	12,45%	14,87%	43,10%	18,37%

Na Figura 4.22, estão representados os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M1 0,95 C18,3 (T e L) 300”, nos quais as curvas dos espécimes com corte longitudinal na placa apresentam áreas sob as curvas nos gráficos maiores que as dos espécimes com corte transversal na placa, devido à maior força máxima e deslocamento atingidos. No início das curvas, percebe-se uma fase elástica linear, seguida de um comportamento não linear até atingir a força máxima e, logo em seguida, uma fase plástica com a ruptura dos espécimes, exceto para o espécime “M1 0,95 C18,3 L300 – E1”, que teve ruptura súbita quando atingiu a força máxima. Nas séries com corte transversal nas placas ocorre uma breve fase plástica.

Na Tabela 4.11, pode-se observar que o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx Total}}$) é de 30526,78 N para os espécimes com corte longitudinal e de 23825,78N para os de corte

transversal. A força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) tem um valor médio de 2543,90 N para os espécimes com corte longitudinal e de 1985,4 N para os de corte transversal. Já a rigidez (K_e) média alcançada para os espécimes com corte longitudinal na placa é de 1272,70 N/mm e de 1274,29 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) é de 20042,29 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 11044,85 N.mm para os de corte transversal. E por fim, a ductilidade (μ) média alcançada é de 7,65 para os espécimes de corte longitudinal e de 6,07 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, enquanto os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados, já os valores acima de 30%, representam uma alta dispersão dos resultados.

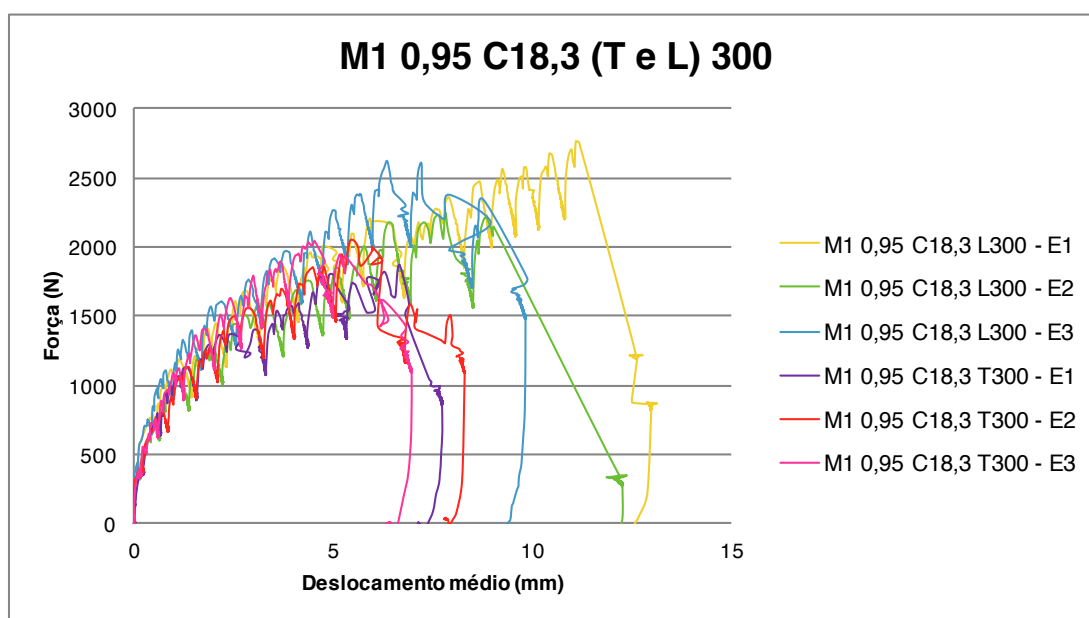


Figura 4.22: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M1 0,95 C18,3 (T e L) 300”

Tabela 4.11: Resultados relativos às séries “M1 0,95 C18,3 (T e L) 300”

Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	K_e (N/mm)	A (N.mm)	μ
M1 0,95 C 18,3 L 300 - E1	33193,98	2766,17	1270,02	23572,36	7,96
M1 0,95 C 18,3 L 300 - E2	26945,38	2245,45	1077,83	17873,87	8,11
M1 0,95 C 18,3 L 300 - E3	31440,98	2620,08	1470,24	18680,63	6,87
Xm	30526,78	2543,90	1272,70	20042,29	7,65
Cv	10,56%	10,56%	15,42%	15,39%	8,80%
Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	K_e (N/mm)	A (N.mm)	μ
M1 0,95 C 18,3 T 300 - E1	22534,59	1877,88	1532,24	10790,06	7,86
M1 0,95 C 18,3 T 300 - E2	24485,52	2040,46	976,05	11898,05	4,95
M1 0,95 C 18,3 T 300 - E3	24457,24	2038,10	1314,58	10446,43	5,39
Xm	23825,78	1985,48	1274,29	11044,85	6,07
Cv	4,69%	4,69%	21,99%	6,87%	25,86%

4.3.2 Modelo M2

A Figura 4.23 mostra os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M2 0,80 C11,1 (T e L) 150”, nos quais as curvas de dois espécimes com corte longitudinal na placa apresentam maiores áreas sob as curvas em relação aos espécimes com corte transversal, devido à maior força máxima alcançada e ao maior deslocamento atingido por esses espécimes. Além disso, as curvas apresentam uma breve fase elástica linear, seguida de um comportamento não linear até atingirem a força máxima e, então, ocorre o rompimento das ligações dos espécimes após alcançarem a força máxima. Apenas o espécime “M1 0,80 C11,1 T150 – E3” apresenta uma fase plástica após alcançar a sua força máxima. O espécime “M2 0,80 C11,1 T150 – E2” apresenta uma menor área sob a curva em relação aos outros espécimes, devido à menor força máxima e deslocamento atingidos.

Na Tabela 4.12, pode-se observar que o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx}} \text{ Total}$) é de 19791,98 N para os espécimes com corte longitudinal e de 19782,56 N para os de corte transversal. Já o valor médio da força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx}} \text{ Parafuso}$) é de 1979,20 N para os espécimes com corte longitudinal e de 1978,26 N para os de corte transversal, enquanto que o valor médio da rigidez das ligações (K_e) para os espécimes com corte longitudinal nas placas é de 857,56 N/mm e de 1785,30 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) média é de 11254,19 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 11490,93 N.mm para os de corte transversal. Por fim, a ductilidade (μ) média alcançada é de 4,15 para os espécimes de corte longitudinal e de 6,27 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, já os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados, enquanto os valores acima de 30%, representam uma alta dispersão dos resultados.

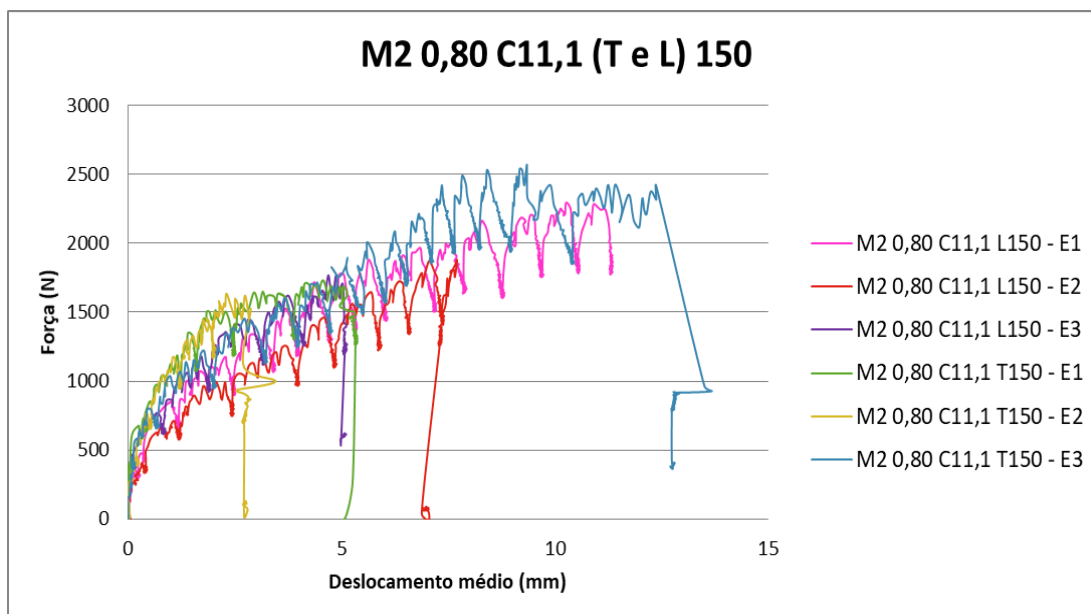


Figura 4.23: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M2 0,80 C11,1 (T e L) 150”

Tabela 4.12: Resultados relativos às séries “M2 0,80 C11,1 (T e L) 150”

Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	Ke (N/mm)	A (N.mm)	μ
M2 0,80 C 11,1 L 150 - E1	22930,43	2293,04	736,03	18946,38	4,31
M2 0,80 C 11,1 L 150 - E2	18774,11	1877,41	599,89	8621,97	3,56
M2 0,80 C 11,1 L 150 - E3	17671,42	1767,14	1236,75	6194,24	4,59
Xm	19791,98	1979,20	857,56	11254,19	4,15
Cv	14,01%	14,01%	39,11%	60,17%	12,89%
Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	Ke (N/mm)	A (N.mm)	μ
M2 0,80 C 11,1 T 150 - E1	17303,85	1730,39	2098,31	7136,61	7,62
M2 0,80 C 11,1 T 150 - E2	16342,53	1634,25	2196,58	3203,37	4,58
M2 0,80 C 11,1 T 150 - E3	25701,31	2570,13	1061,02	24132,79	6,60
Xm	19782,56	1978,26	1785,30	11490,93	6,27
Cv	26,02%	26,02%	35,24%	96,80%	24,69%

A Figura 4.24 mostra os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M2 0,80 C11,1 (T e L) 300”. Nesses gráficos, as curvas dos espécimes com corte longitudinal na placa apresentam maiores áreas sob as curvas em relação aos espécimes com corte transversal, devido à maior força máxima alcançada e ao maior deslocamento atingido por esses espécimes. Além disso, as curvas apresentam uma breve fase elástica linear, seguida de um comportamento não linear até atingirem a força máxima e, logo depois, uma fase plástica até a ruptura das ligações dos espécimes. No entanto, o espécime “M2 0,80 C11,1 T300 – E2” não apresenta fase plástica e rompe suas ligações após alcançar a sua força máxima.

Na Tabela 4.13, pode-se observar que o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx Total}}$) é 16201,15 N para os espécimes com corte longitudinal e de 14523,54 N para os de corte transversal. O valor médio da força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx Parafuso}}$) é de 2700,19 N para os espécimes com corte longitudinal e de 2420,59 N para os de corte transversal. O valor médio da rigidez das ligações (K_e) alcançado para os espécimes com corte longitudinal nas placas é de 741,45 N/mm e de 1551,29 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) média é de 25585,70 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 13899,34 N.mm para os de corte transversal. Finalmente, a ductilidade (μ) média alcançada é de 4,34 para os espécimes de corte longitudinal e de 5,58 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, já os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados, enquanto os valores acima de 30% representam uma alta dispersão dos resultados.

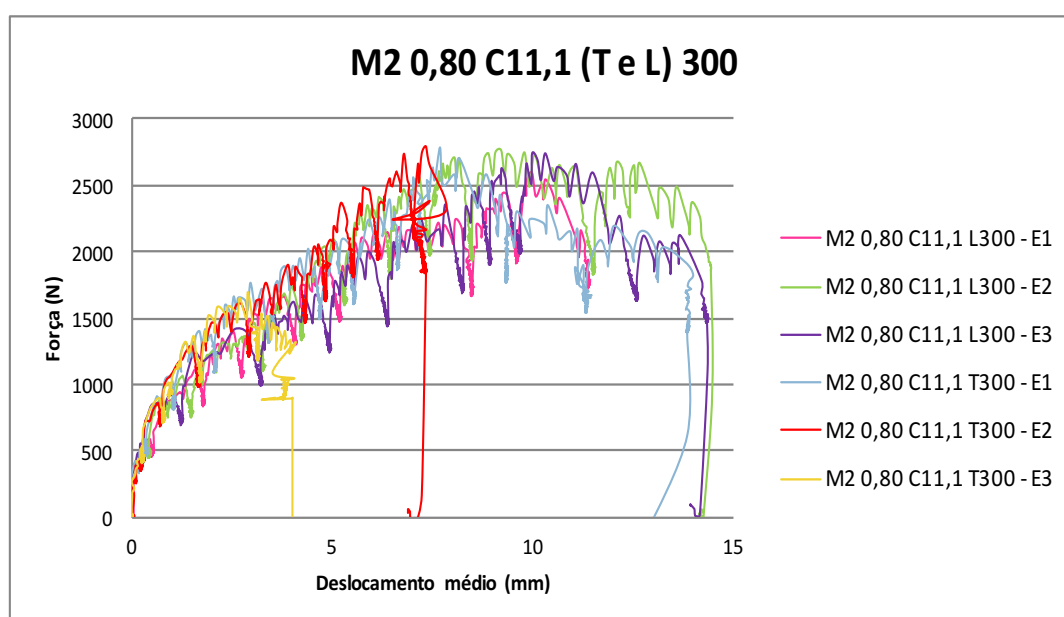


Figura 4.24: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M2 0,80 C11,1 (T e L) 300”

Tabela 4.13: Resultados relativos às séries “M2 0,80 C11,1 (T e L) 300”

Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	K_e (N/mm)	A (N.mm)	μ
M2 0,80 C 11,1 L 300 - E1	15579,11	2596,52	727,95	20544,24	4,07
M2 0,80 C 11,1 L 300 - E2	16568,72	2761,45	725,65	29814,61	4,41
M2 0,80 C 11,1 L 300 - E3	16455,62	2742,60	770,75	26398,24	4,54
Xm	16201,15	2700,19	741,45	25585,70	4,34
Cv	3,34%	3,34%	3,43%	18,32%	5,55%
Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	K_e (N/mm)	A (N.mm)	μ
M2 0,80 C 11,1 T 300 - E1	16681,81	2780,30	1246,89	24071,58	6,21
M2 0,80 C 11,1 T 300 - E2	16738,37	2789,73	1239,15	12865,27	4,63
M2 0,80 C 11,1 T 300 - E3	10150,46	1691,74	2167,82	4761,18	5,91
Xm	14523,54	2420,59	1551,29	13899,34	5,58
Cv	26,08%	26,08%	34,42%	69,76%	14,98%

Na Figura 4.25 estão representados os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M2 0,95 C11,1(T e L) 150”, nos quais os espécimes com corte longitudinal e transversal na placa apresentam áreas similares sob suas curvas, exceto o espécime “M2 0,95 C11,1 L150 – E2”, que apresenta maior área sob sua curva, indicando maior deslocamento médio em relação aos outros espécimes. Ademais, as curvas têm, no início, uma breve fase elástica linear até atingirem a força máxima, seguida de um comportamento moderadamente não linear e, logo em seguida, ocorre a ruptura dos espécimes sem apresentar uma fase plástica, exceto quanto ao espécime “M2 0,95 C11,1 L150 – E2”.

A Tabela 4.14 mostra que o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx}}$ Total) é de 26313,91 N para os espécimes com corte longitudinal e de 28351,35 N para os de corte transversal. Já a força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) apresenta um valor médio de 2631,39 N para os espécimes com corte longitudinal e de 2835,14 N para os de corte transversal. Já a rigidez (K_e) média determinada para os espécimes com corte longitudinal é de 922,03 N/mm e de 916,20 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) é de 19385,59 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 18611,73 N.mm para os de corte transversal. Por fim, a ductilidade (μ) média alcançada é de 4,46 para os espécimes de corte longitudinal e de 3,90 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, enquanto os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados, já os valores acima de 30%, representam uma alta dispersão dos resultados.

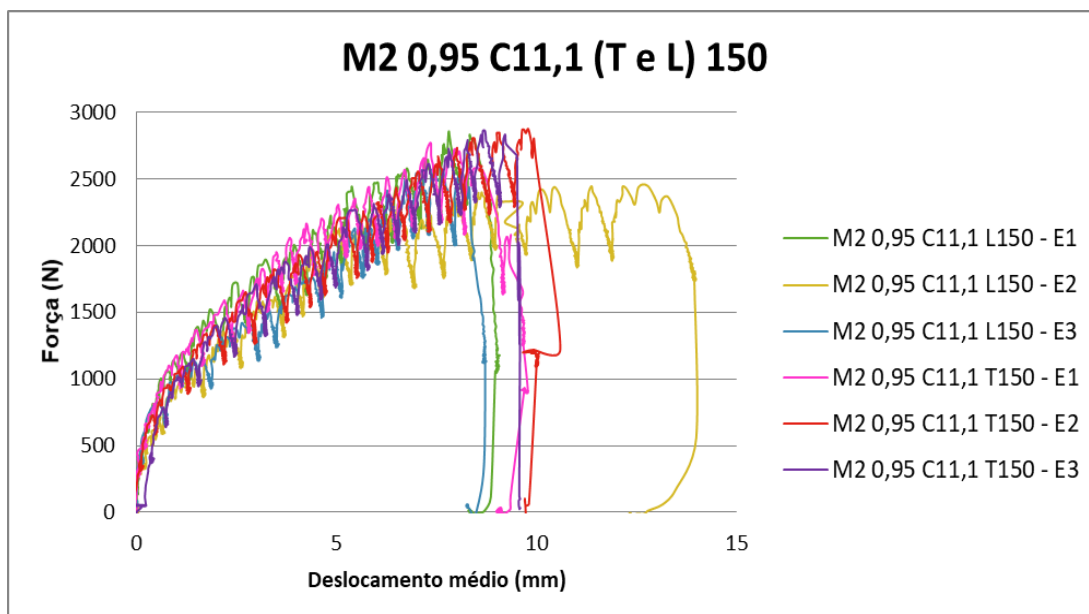


Figura 4.25: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M2 0,95 C11,1 (T e L) 150”

Tabela 4.14: Resultados relativos às séries “M2 0,95 C11,1 (T e L) 150”

Espécime	$P_{\text{máx}} \text{ Total (N)}$	$P_{\text{máx}} \text{ Parafuso (N)}$	$Ke \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N.mm)}$	μ
M2 0,95 C 11,1 L 150 - E1	28528,73	2852,87	1061,00	17551,40	4,17
M2 0,95 C 11,1 L 150 - E2	24485,51	2448,55	888,97	26251,91	5,70
M2 0,95 C 11,1 L 150 - E3	25927,50	2592,75	816,12	14353,45	3,51
X_m	26313,91	2631,39	922,03	19385,59	4,46
C_v	7,79%	7,79%	13,64%	31,76%	25,23%
Espécime	$P_{\text{máx}} \text{ Total (N)}$	$P_{\text{máx}} \text{ Parafuso (N)}$	$Ke \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N.mm)}$	μ
M2 0,95 C 11,1 T 150 - E1	27708,77	2770,88	1205,19	18569,73	5,12
M2 0,95 C 11,1 T 150 - E2	28726,65	2872,67	800,36	19048,62	3,45
M2 0,95 C 11,1 T 150 - E3	28618,63	2861,86	743,06	18216,85	3,14
X_m	28351,35	2835,14	916,20	18611,73	3,90
C_v	1,97%	1,97%	27,49%	2,24%	27,33%

A Figura 4.26 mostra os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M2 0,95 C11,1 (T e L) 300”. Nesses gráficos, as curvas dos espécimes com corte de placa longitudinal e transversal apresentam comportamentos similares. As curvas indicam inicialmente uma breve fase elástica linear, em seguida ocorre um comportamento não linear até atingir a força máxima e então, ocorre uma fase plástica, até a ruptura das ligações dos espécimes. No entanto, os espécimes “M2 0,95 C11,1 L300 – E2” e “M2 0,95 C11,1 T300 – E2” não apresentam fase plástica, pois atingem um menor deslocamento médio e rompem suas ligações após alcançarem a sua força máxima. As áreas sob as curvas no gráfico tende a serem maiores nos espécimes com corte longitudinal.

Na Tabela 4.15, pode-se observar que o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx}} \text{ Total}$) é de 17124,78 N para os espécimes com corte longitudinal e de 15842,33 N para os de corte

transversal. Já o valor médio da força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) é de 2854,13 N para os espécimes com corte longitudinal e de 2640,39 N para os de corte transversal. O valor médio da rigidez das ligações (K_e) obtido para os espécimes com corte longitudinal nas placas é de 802,54 N/mm e de 1579,99 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) média é de 27241,20 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 23807,36 N.mm para os de corte transversal. Finalmente, a ductilidade média (μ) determinada é de 4,58 para os espécimes de corte longitudinal e de 6,85 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, já os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados, enquanto os valores acima de 30%, representam uma alta dispersão dos resultados.

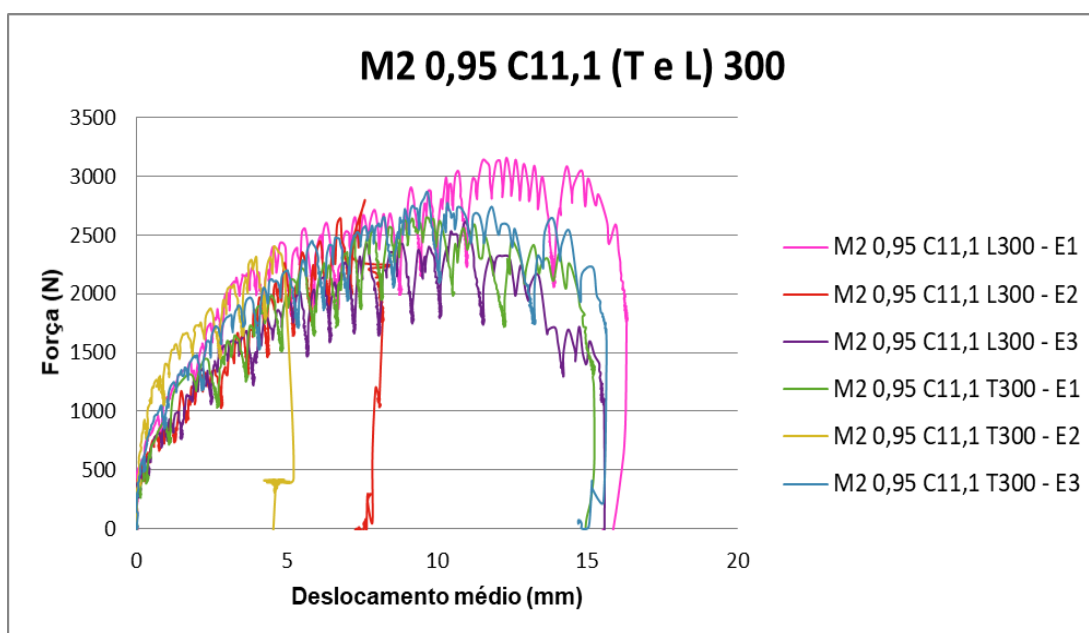


Figura 4.26: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M2 0,95 C11,1 (T e L) 300”

Tabela 4.15: Resultados relativos às séries “M2 0,95 C11,1 (T e L) 300”

Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	K_e (N/mm)	A (N.mm)	μ
M2 0,95 C 11,1 L 300 - E1	18943,76	3157,29	1003,99	38719,21	6,06
M2 0,95 C 11,1 L 300 - E2	16738,36	2789,73	727,36	14101,07	2,81
M2 0,95 C 11,1 L 300 - E3	15692,22	2615,37	676,28	28903,32	4,89
Xm	17124,78	2854,13	802,54	27241,20	4,58
Cv	9,69%	9,69%	21,97%	45,49%	35,92%
Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	K_e (N/mm)	A (N.mm)	μ
M2 0,95 C 11,1 T 300 - E1	15888,09	2648,01	895,56	29843,37	6,17
M2 0,95 C 11,1 T 300 - E2	14448,14	2408,02	2780,65	8268,51	7,43
M2 0,95 C 11,1 T 300 - E3	17190,75	2865,12	1063,76	33310,20	6,96
Xm	15842,33	2640,39	1579,99	23807,36	6,85
Cv	8,66%	8,66%	66,03%	56,99%	9,32%

A Figura 4.27 e a Tabela 4.16 mostram os resultados encontrados para as séries “M2 0,80 C18,3 (T e L) 150”. A Figura 4.27 mostra os gráficos força *versus* deslocamento de tais séries, nos quais as curvas dos espécimes com corte de placa longitudinal apresentam, em geral, menores áreas sob os gráficos em relação aos espécimes com corte transversal, devido à menor força máxima alcançada e pelo menor deslocamento médio atingido por esses espécimes. Além disso, as curvas apresentam uma breve fase elástica linear, seguida de um comportamento não linear até alcançarem a força máxima e, logo em seguida, uma fase plástica até acontecer a ruptura da ligação dos espécimes. Entretanto, o espécime “M2 0,80 C18,3 T150 – E1” não apresenta uma fase plástica, rompendo suas ligações após atingir a força máxima.

A Tabela 4.16 apresenta o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx}} \text{ Total}$), que é de 17369,82 N para os espécimes com corte longitudinal e de 19339,60 N para os de corte transversal. O valor médio da força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx}} \text{ Parafuso}$) é de 1736,98 N para os espécimes com corte longitudinal e de 1933,96 N para os de corte transversal, enquanto o valor médio da rigidez (K_e) determinado para os espécimes com corte longitudinal nas placas é de 1931,53 N/mm e de 1491,85 N/mm para os de corte transversal. Já para a energia dissipada (A) média é de 13712,60 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 16594,41 N.mm para os de corte transversal. Por fim, a ductilidade (μ) média alcançada é de 11,62 para os espécimes de corte longitudinal e de 9,98 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, já os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados, enquanto os valores acima de 30%, representam uma alta dispersão dos resultados.

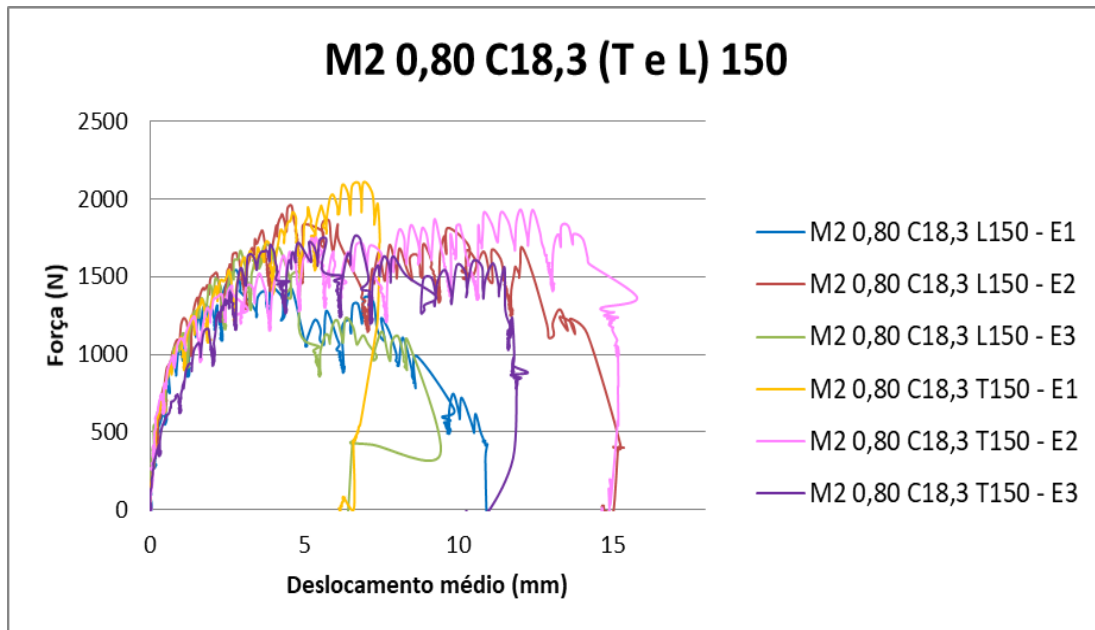


Figura 4.27: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M2 0,80 C18,3 (T e L) 150”

Tabela 4.16: Resultados relativos às séries “M2 0,80 C18,3 (T e L) 150”

Espécime	$P_{\text{máx}} \text{ Total (N)}$	$P_{\text{máx}} \text{ Parafuso (N)}$	$K_e \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N.mm)}$	μ
M2 0,80 C 18,3 L 150 - E1	15437,75	1543,77	1693,69	11554,86	11,66
M2 0,80 C 18,3 L 150 - E2	19594,07	1959,41	1811,54	19473,00	12,58
M2 0,80 C 18,3 L 150 - E3	17077,66	1707,77	2289,38	10109,94	10,62
X_m	17369,82	1736,98	1931,53	13712,60	11,62
C_v	12,05%	12,05%	16,33%	36,76%	8,45%
Espécime	$P_{\text{máx}} \text{ Total (N)}$	$P_{\text{máx}} \text{ Parafuso (N)}$	$K_e \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N.mm)}$	μ
M2 0,80 C 18,3 T 150 - E1	21064,33	2106,43	1657,48	11204,67	7,51
M2 0,80 C 18,3 T 150 - E2	19311,32	1931,13	1797,04	21879,77	14,89
M2 0,80 C 18,3 T 150 - E3	17643,14	1764,31	1021,04	16698,78	7,53
X_m	19339,60	1933,96	1491,85	16594,41	9,98
C_v	8,85%	8,85%	27,73%	32,17%	42,68%

A Figura 4.28 e a Tabela 4.17 mostram os resultados encontrados para as séries “M2 0,80 C18,3 (T e L) 300”. A Figura 4.28 mostra os gráficos força *versus* deslocamento de tais séries. Nesses gráficos, as curvas dos espécimes com cortes longitudinal e transversal mostram áreas sob as curvas e comportamentos semelhantes. No entanto, o espécime “M2 0,80 C18,3 T300 – E2” tem maior deslocamento médio e força máxima alcançados em relação aos outros espécimes. As curvas apresentam uma fase elástica linear, seguida de comportamento não linear até alcançarem a força máxima, e logo em seguida, uma fase plástica até ocorrer a ruptura da ligação dos espécimes

O valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx}} \text{ Total}$) é de 12110,81 N para os espécimes com corte longitudinal e de 13345,45 N para os de corte transversal, como apresenta a Tabela 4.17.

Já para o valor médio da força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) é de 2018,47 N para os espécimes com corte longitudinal e de 2224,24 N para os de corte transversal. O valor médio da rigidez (K_e) alcançado para os espécimes com corte longitudinal nas placas é de 2122,35 N/mm e de 1299,02 N/mm para os de corte transversal. Já a energia dissipada (A) média é de 13917,50 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 14830,32 N.mm para os de corte transversal. Por fim, a ductilidade (μ) média alcançada é de 11,22 para os espécimes de corte longitudinal e de 6,08 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, já os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados, enquanto os valores acima de 30%, representam uma alta dispersão dos resultados.

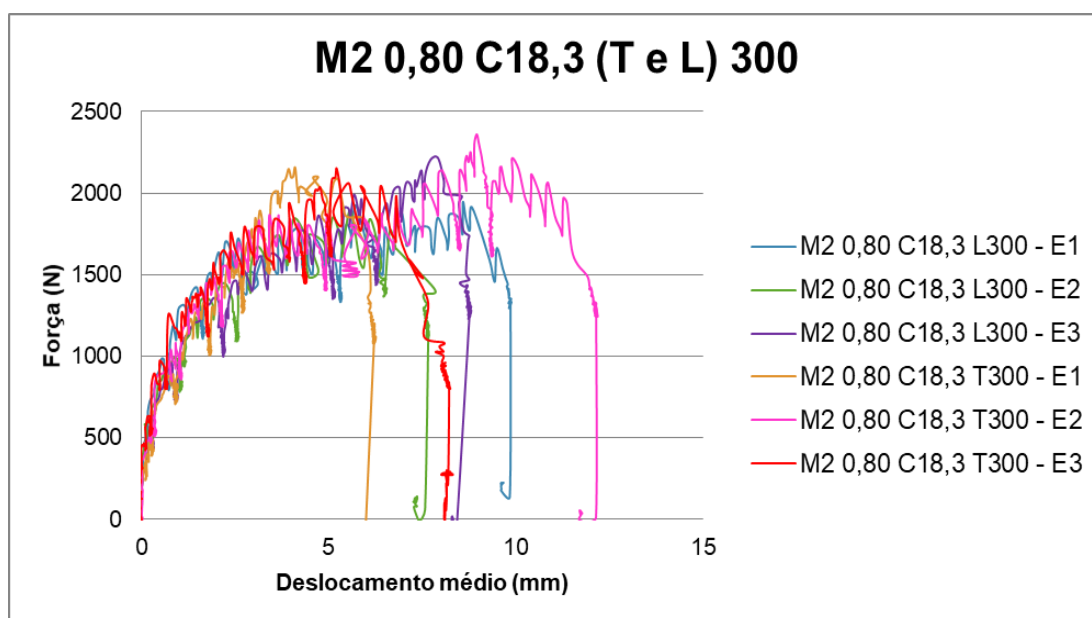


Figura 4.28: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M2 0,80 C18,3 (T e L) 300”

Tabela 4.17: Resultados relativos às séries “M2 0,80 C18,3 (T e L) 300”

Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	K_e (N/mm)	A (N.mm)	μ
M2 0,80 C 18,3 L 300 - E1	11677,28	1946,21	3147,85	16401,91	18,07
M2 0,80 C 18,3 L 300 - E2	11366,25	1894,37	1838,90	11537,65	8,73
M2 0,80 C 18,3 L 300 - E3	13288,91	2214,82	1380,29	13812,93	6,86
Xm	12110,81	2018,47	2122,35	13917,50	11,22
Cv	8,52%	8,52%	43,22%	17,49%	53,53%
Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	K_e (N/mm)	A (N.mm)	μ
M2 0,80 C 18,3 T 300 - E1	12949,61	2158,27	919,04	9520,57	2,93
M2 0,80 C 18,3 T 300 - E2	14165,41	2360,90	1014,40	21611,32	6,38
M2 0,80 C 18,3 T 300 - E3	12921,34	2153,56	1963,61	13359,06	8,94
Xm	13345,45	2224,24	1299,02	14830,32	6,08
Cv	5,32%	5,32%	44,46%	41,66%	49,58%

A Figura 4.29 mostra os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M2 0,95 C18,3 (T e L) 150”. Nesses gráficos, as curvas dos espécimes com cortes longitudinal e transversal apresentam áreas similares sob as curvas, exceto o espécime “M2 0,95 C 18,3 T150 - E1” que alcança menor deslocamento e força máxima em relação aos demais espécimes. Além disso, as curvas têm uma breve fase elástica linear, seguida de um comportamento não linear até atingirem a força máxima e, logo depois, uma fase plástica até a ruptura das ligações dos espécimes. No entanto, os espécimes “M2 0,95 C18,3 L150 – E2” e “M2 0,95 C18,3 T150 – E2” não apresentam fase plástica e rompem suas ligações após alcançarem a sua força máxima.

Na Tabela 4.18, pode-se observar que o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx Total}}$) é de 23250,87 N para os espécimes com corte longitudinal e de 20838,13 N para os de corte transversal. O valor médio da força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx Parafuso}}$) é de 2325,09 N para os espécimes com corte longitudinal e de 2083,81 N para os de corte transversal. O valor médio da rigidez das ligações (K_e) alcançado para os espécimes com corte longitudinal nas placas é de 1196,93 N/mm e de 1285,63 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) média é de 16184,96 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 14954,80 N.mm para os de corte transversal. Por fim, a ductilidade (μ) média alcançada é de 6,30 para os espécimes de corte longitudinal e de 6,61 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, já os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados, enquanto os valores acima de 30%, representam uma alta dispersão dos resultados.

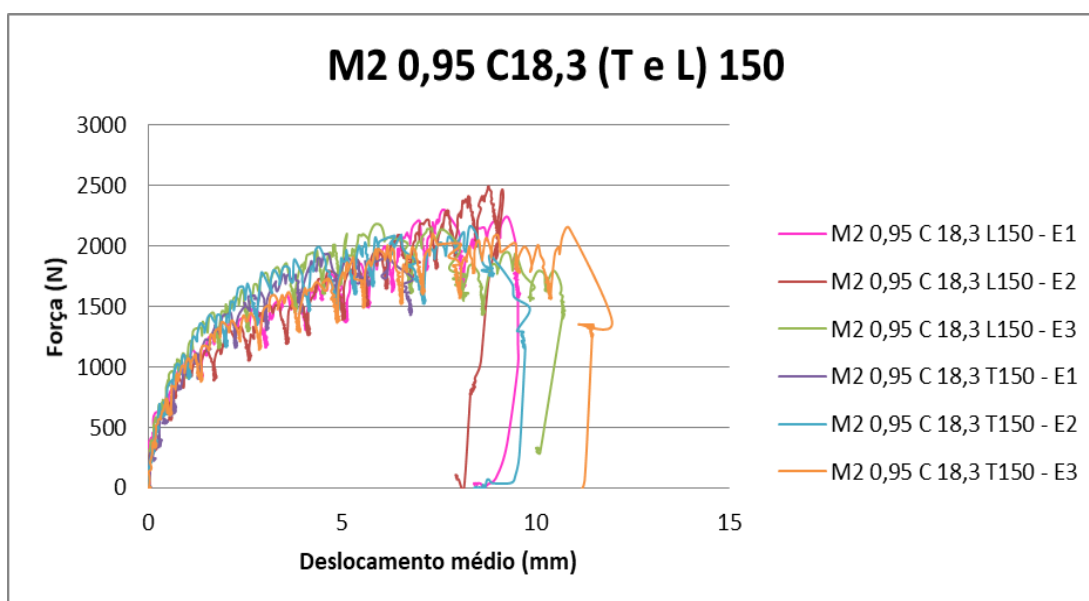


Figura 4.29: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M2 0,95 C18,3 (T e L) 150”

Tabela 4.18: Resultados relativos às séries “M2 0,95 C18,3 (T e L) 150”

Espécime	$P_{\text{máx Total}} \text{ (N)}$	$P_{\text{máx Parafuso}} \text{ (N)}$	$K_e \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N.mm)}$	μ
M2 0,95 C 18,3 L 150 - E1	23015,26	2301,53	1256,82	15779,51	6,71
M2 0,95 C 18,3 L 150 - E2	24966,17	2496,62	1031,64	14397,99	4,99
M2 0,95 C 18,3 L 150 - E3	21771,19	2177,12	1302,35	18377,37	7,21
Xm	23250,87	2325,09	1196,93	16184,96	6,30
Cv	6,93%	6,93%	12,11%	12,48%	18,46%
Espécime	$P_{\text{máx Total}} \text{ (N)}$	$P_{\text{máx Parafuso}} \text{ (N)}$	$K_e \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N.mm)}$	μ
M2 0,95 C 18,3 T 150 - E1	19367,87	1936,79	1124,80	10142,87	4,55
M2 0,95 C 18,3 T 150 - E2	21629,81	2162,98	1445,31	15890,06	7,49
M2 0,95 C 18,3 T 150 - E3	21516,72	2151,67	1286,77	18831,47	7,80
Xm	20838,13	2083,81	1285,63	14954,80	6,61
Cv	6,12%	6,12%	12,47%	29,55%	27,16%

A Figura 4.30 mostra os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M2 0,95 C18,3 (T e L) 300”, nos quais as curvas dos espécimes com corte longitudinal apresentam, de forma nítida, maiores áreas sob as curvas em relação aos espécimes com corte transversal, devido à maior força máxima alcançada e ao maior deslocamento atingido por esses espécimes. Além disso, as curvas apresentam uma fase elástica linear, seguida de um comportamento não linear, até atingirem a força máxima e, logo em seguida, a fase plástica até o rompimento das suas ligações dos espécimes. O espécime “M2 0,95 C18,3 T300 – E2” não apresenta uma fase plástica, indicando assim o rompimento das suas ligações logo após alcançar a força máxima.

Na Tabela 4.19, pode-se observar que o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx Total}}$) é de 19160,53 N para os espécimes com corte longitudinal e de 11158,91 N para os de corte transversal. Já o valor médio da força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx Parafuso}}$) é de 3193,42 N para os espécimes com corte longitudinal e de 1859,82 N para os de corte transversal, enquanto o valor médio da rigidez das ligações (K_e) alcançado para os espécimes com corte longitudinal é de 1453,91 N/mm e de 2233,31 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) média é de 23204,46 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 12034,72 N.mm para os de corte transversal. Por fim, a ductilidade (μ) média alcançada é de 5,69 para os espécimes de corte longitudinal e de 11,07 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, já os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados, enquanto os valores acima de 30%, representam uma alta dispersão dos resultados.

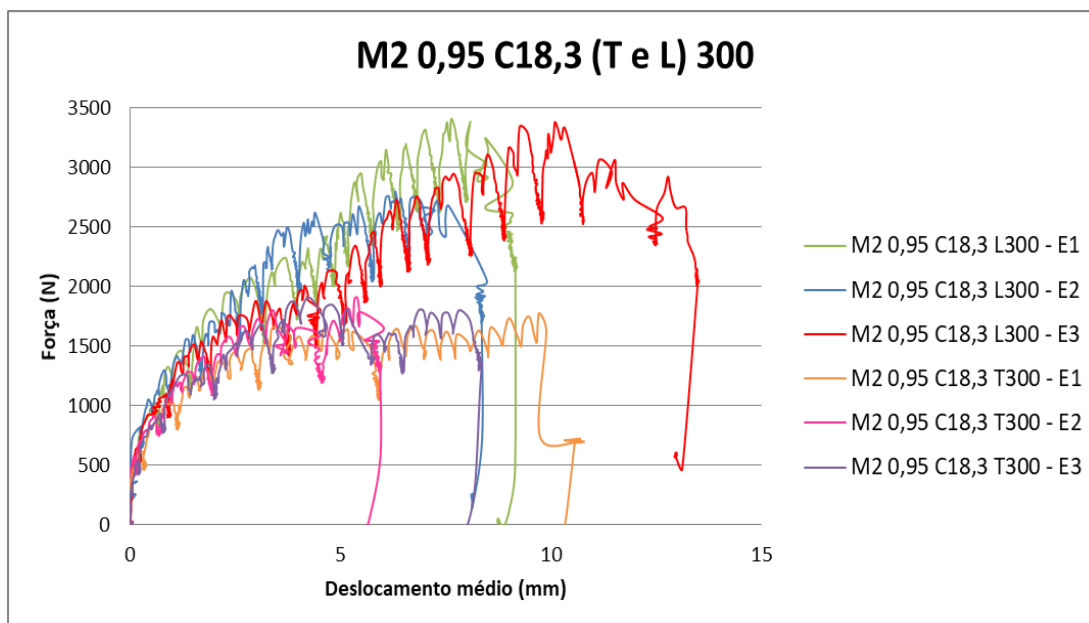


Figura 4.30: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M2 0,95 C18,3 (T e L) 300”

Tabela 4.19: Resultados relativos às séries “M2 0,95 C18,3 (T e L) 300”

Espécime	$P_{\text{máx}} \text{ Total (N)}$	$P_{\text{máx}} \text{ Parafuso (N)}$	$K_e \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N.mm)}$	μ
M2 0,95 C 18,3 L 300 - E1	20414,02	3402,34	1464,72	20448,85	4,95
M2 0,95 C 18,3 L 300 - E2	16794,91	2799,15	1688,68	17740,45	6,03
M2 0,95 C 18,3 L 300 - E3	20272,65	3378,77	1208,32	31424,06	6,08
Xm	19160,53	3193,42	1453,91	23204,46	5,69
Cv	10,70%	10,70%	16,53%	31,23%	11,24%
Espécime	$P_{\text{máx}} \text{ Total (N)}$	$P_{\text{máx}} \text{ Parafuso (N)}$	$K_e \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N.mm)}$	μ
M2 0,95 C 18,3 T 300 - E1	10659,39	1776,57	1673,21	14980,74	11,75
M2 0,95 C 18,3 T 300 - E2	11422,80	1903,80	3157,51	8549,30	11,98
M2 0,95 C 18,3 T 300 - E3	11394,53	1899,09	1869,22	12574,13	9,47
Xm	11158,91	1859,82	2233,31	12034,72	11,07
Cv	3,88%	3,88%	36,11%	27,00%	12,52%

4.3.3 Modelo M3

A Figura 4.17 mostra os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M3 0,80 C11,1 (T e L) 150”. Nesses gráficos os espécimes com corte longitudinal na placa apresentam maiores áreas sob as curvas em relação aos espécimes com corte transversal, com exceção do espécime “M1 0,80 C11,1 L150 – E3”, que apresenta menor força máxima alcançada, bem como menor deslocamento médio atingido, em relação aos outros espécimes com corte longitudinal na placa. Além disso, os espécimes “M3 0,80 C11,1 L150 – E2”, “M3 0,80 C11,1 T150 – E2” e “M3 0,80 C11,1 T150 – E3” apresentam uma fase elástica linear até atingirem a força máxima e, logo em seguida, uma breve fase plástica até acontecer a ruptura

das ligações dos espécimes, enquanto os outros espécimes têm suas ligações rompidas após atingirem a força máxima.

Na Tabela 4.20, o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx Total}}$) é de 10518,02 N para os espécimes com corte longitudinal e de 9547,28 N para os de corte transversal. Enquanto a força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx Parafuso}}$) é de 1051,80 N para os espécimes com corte longitudinal e de 954,73 N para os de corte transversal. A rigidez (K_e) alcançada para os espécimes com corte longitudinal é de 115,71 N/mm e de 117,78 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) é de 13005,11 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 8610,53 N.mm para os de corte transversal. Por fim, a ductilidade (μ) determinada é igual a 2,49 para os espécimes de corte longitudinal e igual a 1,90 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, já os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados, enquanto os valores acima de 30%, representam uma alta dispersão dos resultados.

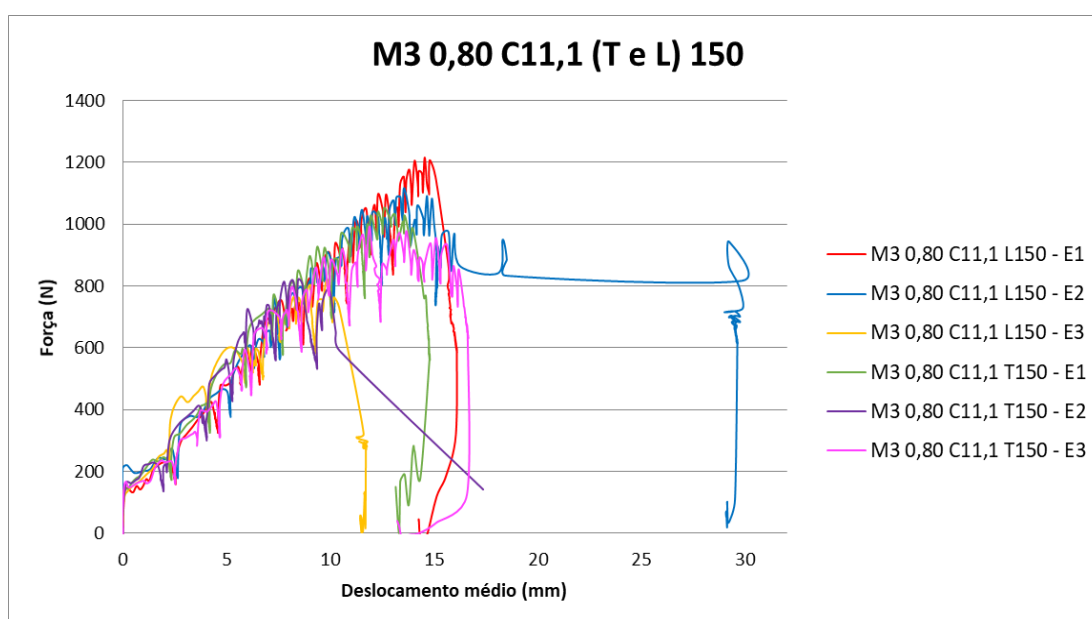


Figura 4.31: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M3 0,80 C11,1 (T e L) 150”

Tabela 4.20: Resultados relativos às séries “M3 0,80 C11,1 (T e L) 150”

Espécime	$P_{\text{máx Total}} \text{ (N)}$	$P_{\text{máx Parafuso}} \text{ (N)}$	$Ke \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N.mm)}$	μ
M3 0,80 C 11,1 L 150 - E1	12157,93	1215,79	94,10	10809,48	1,34
M3 0,80 C 11,1 L 150 - E2	11168,33	1116,83	93,10	22298,64	3,08
M3 0,80 C 11,1 L 150 - E3	8227,81	822,78	159,93	5907,21	3,03
Xm	10518,02	1051,80	115,71	13005,11	2,49
Cv	19,43%	19,43%	33,10%	64,69%	39,75%
Espécime	$P_{\text{máx Total}} \text{ (N)}$	$P_{\text{máx Parafuso}} \text{ (N)}$	$Ke \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N.mm)}$	μ
M3 0,80 C 11,1 T 150 - E1	10518,03	1051,80	114,19	9512,19	1,77
M3 0,80 C 11,1 T 150 - E2	8199,54	819,95	133,31	5419,16	1,97
M3 0,80 C 11,1 T 150 - E3	9924,27	992,43	105,83	10900,24	1,94
Xm	9547,28	954,73	117,78	8610,53	1,90
Cv	12,61%	12,61%	11,96%	33,09%	5,62%

A Figura 4.32 mostra os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M3 0,80 C11,1 (T e L) 300”. Nesses gráficos, os espécimes com cortes longitudinal e transversal na placa apresentam as áreas abaixo das curvas similares. Em um primeiro momento, os gráficos apresentam uma fase elástica linear até atingirem a força máxima e, logo em seguida, uma breve fase plástica até acontecer a ruptura da ligação dos espécimes.

Na Tabela 4.21, pode-se observar que o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx Total}}$) é de 5598,3 N para os espécimes com corte longitudinal e de 5749,10 N para os de corte transversal, enquanto a força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx Parafuso}}$) é de 933,05 N para os espécimes com corte longitudinal e de 958,18 N para os de corte transversal. A rigidez (Ke) alcançada para os espécimes com corte longitudinal nas placas é de 200,87 N/mm e de 194,86 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) é de 8623,82 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 6639,52 N.mm para os de corte transversal. Por fim, a ductilidade (μ) alcançada é de 3,39 para os espécimes de corte longitudinal e de 2,99 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% demonstram uma baixa dispersão dos resultados, já os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados, enquanto os valores acima de 30% representam uma alta dispersão dos resultados.

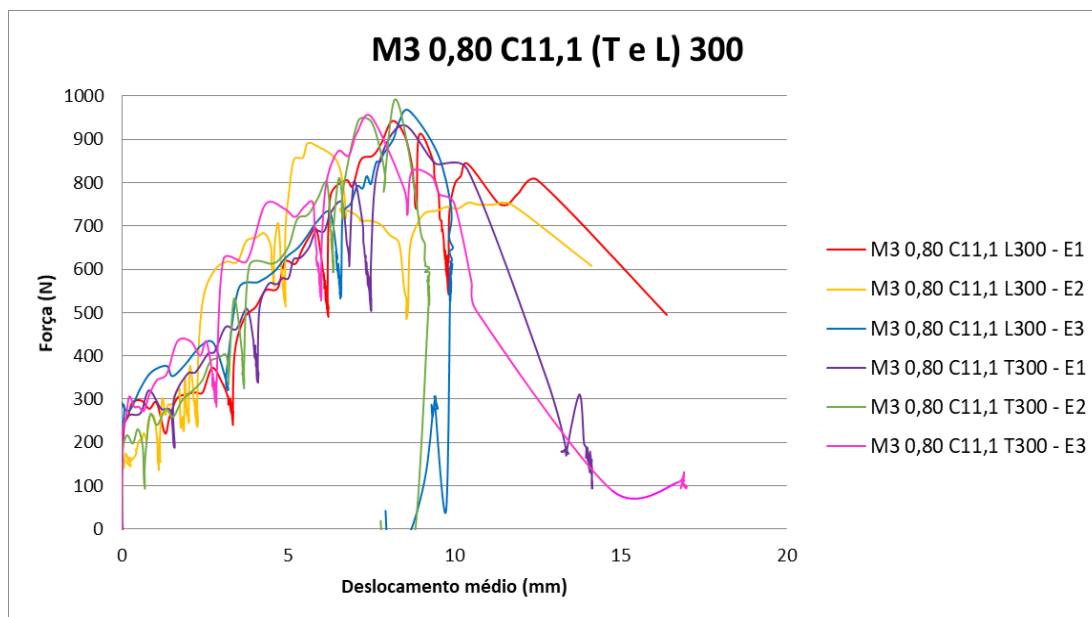


Figura 4.32: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M3 0,80 C11,1 (T e L) 300”

Tabela 4.21: Resultados relativos às séries “M3 0,80 C11,1 (T e L) 300”

Espécime	$P_{\text{máx Total}}$ (N)	$P_{\text{máx Parafuso}}$ (N)	Ke (N/mm)	A (N.mm)	μ
M3 0,80 C 11,1 L 300 - E1	5654,85	942,48	137,25	10424,72	2,94
M3 0,80 C 11,1 L 300 - E2	5343,84	890,64	184,01	9202,86	3,41
M3 0,80 C 11,1 L 300 - E3	5796,22	966,04	281,35	6243,88	3,82
X_m	5598,30	933,05	200,87	8623,82	3,39
C_v	4,13%	4,13%	36,60%	24,93%	12,99%
Espécime	$P_{\text{máx Total}}$ (N)	$P_{\text{máx Parafuso}}$ (N)	Ke (N/mm)	A (N.mm)	μ
M3 0,80 C 11,1 T 300 - E1	5598,30	933,05	182,21	8030,39	3,93
M3 0,80 C 11,1 T 300 - E2	5937,59	989,60	142,21	4995,77	1,43
M3 0,80 C 11,1 T 300 - E3	5711,40	951,90	260,16	6892,41	3,60
X_m	5749,10	958,18	194,86	6639,52	2,99
C_v	3,00%	3,00%	30,78%	23,09%	45,35%

A Figura 4.33 mostra os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M3 0,95 C11,1 (T e L) 150”, nos quais as curvas dos espécimes com corte transversal na placa apresentam, em geral, maiores áreas sob as curvas em relação aos espécimes com corte longitudinal, devido à maior força máxima alcançada e ao maior deslocamento atingido por esses espécimes. As curvas mostram uma fase elástica linear até atingirem a força máxima, e logo em seguida, uma fase plástica até o rompimento das ligações dos espécimes. O espécime “M3 0,95 C11,1 L150 – E2” não apresenta uma fase plástica, indicando assim o rompimento das suas ligações logo após atingir a força máxima.

Na Tabela 4.22, pode-se observar que o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx Total}}$) é de 9801,74 N para os espécimes com corte longitudinal e de 10649,97 N para os de corte

transversal. Já o valor médio da força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) é de 980,17 N para os espécimes com corte longitudinal e de 1065,00 N para os de corte transversal. O valor médio da rigidez das ligações (K_e) alcançado para os espécimes com corte longitudinal na placa é de 129,42 N/mm e de 133,39 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) média é de 7138,57 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 7788,88 N.mm para os de corte transversal. Por fim, a ductilidade (μ) média alcançada é de 1,73 para os espécimes de corte longitudinal e de 1,65 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, já os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados, enquanto os valores acima de 30%, representam uma alta dispersão dos resultados

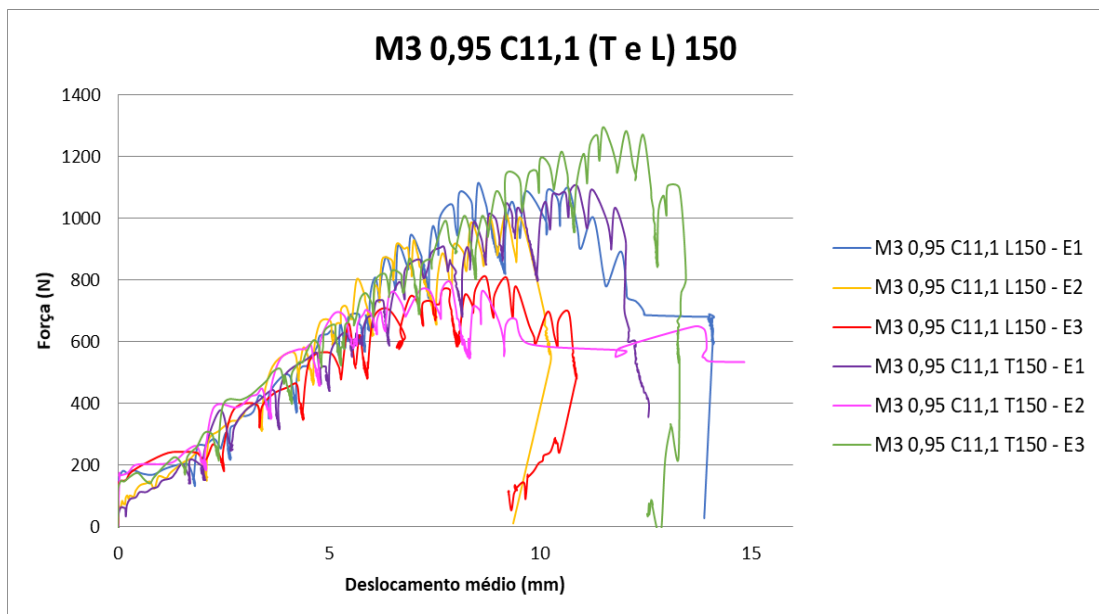


Figura 4.33: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M3 0,95 C11,1 (T e L) 150”

Tabela 4.22: Resultados relativos às séries “M3 0,95 C11,1 (T e L) 150”

Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	K_e (N/mm)	A (N.mm)	μ
M3 0,95 C 11,1 L 150 - E1	11140,06	1114,01	127,12	9922,18	1,84
M3 0,95 C 11,1 L 150 - E2	10150,46	1015,05	122,19	5893,69	1,31
M3 0,95 C 11,1 L 150 - E3	8114,71	811,47	138,96	5599,85	2,04
Xm	9801,74	980,17	129,42	7138,57	1,73
Cv	15,74%	15,74%	6,66%	33,83%	21,92%
Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	K_e (N/mm)	A (N.mm)	μ
M3 0,95 C 11,1 T 150 - E1	11055,24	1105,52	124,72	8109,65	1,58
M3 0,95 C 11,1 T 150 - E2	7945,07	794,51	142,58	5287,26	1,88
M3 0,95 C 11,1 T 150 - E3	12949,61	1294,96	132,86	9969,73	1,50
Xm	10649,97	1065,00	133,39	7788,88	1,65
Cv	23,73%	23,73%	6,71%	30,27%	11,86%

A Figura 4.34 mostra os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M3 0,95 C11,1 (T e L) 300”. Nesses gráficos, os espécimes com corte longitudinal na placa apresentam as áreas sob as curvas similares às dos espécimes com corte transversal. Ademais, os espécimes mostram, em um primeiro momento, uma breve fase elástica linear, seguida de outra fase elástica linear até atingirem a força máxima e, logo em seguida, uma breve fase plástica, até acontecer a ruptura das ligações dos espécimes. No entanto, os espécimes “M3 0,95 C11,1 T300 – E1” e “M3 0,95 C11,1 T300 – E2” têm suas ligações rompidas logo após atingirem a força máxima.

Na Tabela 4.20, pode-se observar que o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx Total}}$) é de 7737,72 N para os espécimes com corte longitudinal e de 7756,57 N para os de corte transversal. A força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx Parafuso}}$) é de 1289,62 N para os espécimes com corte longitudinal e de 1206,37 N para os de corte transversal. A rigidez (K_e) alcançada para os espécimes com corte longitudinal na placa é de 170,81 N/mm e de 183,69 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) é de 9741,05 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 9629,84 N.mm para os de corte transversal. Por fim, a ductilidade (μ) alcançada é de 1,89 para os espécimes de corte longitudinal e de 2,18 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados e os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados.

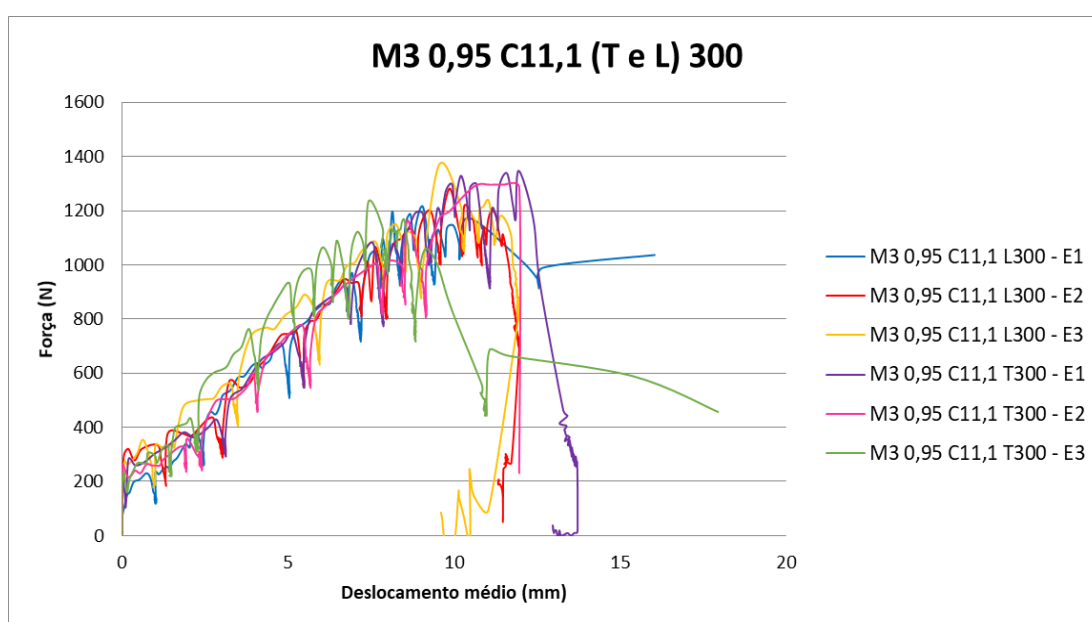


Figura 4.34: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M3 0,95 C11,1 (T e L) 300”

Tabela 4.23: Resultados relativos às séries “M3 0,95 C11,1 (T e L) 300”

Espécime	$P_{m\acute{a}x}$ Total (N)	$P_{m\acute{a}x}$ Parafuso (N)	Ke (N/mm)	A (N.mm)	μ
M3 0,95 C 11,1 L 300 - E1	7294,76	1215,79	164,80	10117,06	1,95
M3 0,95 C 11,1 L 300 - E2	7690,60	1281,77	176,35	9422,98	1,92
M3 0,95 C 11,1 L 300 - E3	8227,81	1371,30	171,27	9683,12	1,79
Xm	7737,72	1289,62	170,81	9741,05	1,89
Cv	6,05%	6,05%	3,39%	3,60%	4,46%
Espécime	$P_{m\acute{a}x}$ Total (N)	$P_{m\acute{a}x}$ Parafuso (N)	Ke (N/mm)	A (N.mm)	μ
M3 0,95 C 11,1 T 300 - E1	8086,44	1347,74	154,88	11191,58	1,91
M3 0,95 C 11,1 T 300 - E2	7775,42	1295,90	175,59	8958,47	2,16
M3 0,95 C 11,1 T 300 - E3	7407,86	1234,64	220,62	8739,46	2,48
Xm	7756,57	1292,76	183,69	9629,84	2,18
Cv	4,38%	13,05%	18,30%	14,09%	13,04%

A Figura 4.35 mostra os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M3 0,80 C18,3 (T e L) 150”. Nesses gráficos, as curvas dos espécimes com corte transversal na placa têm, em geral, maiores áreas sob as curvas em comparação as dos espécimes com corte longitudinal, exceto o espécime “M3 0,80 C18,3 T150 – E3”, que alcança menor deslocamento médio e menor força máxima. Os espécimes apresentam uma fase elástica não linear até atingirem a força máxima, e, logo em seguida, uma curta fase plástica até ocorrer a ruptura de suas ligações. Os espécimes “M3 0,80 C18,3 L150 – E2” e “M3 0,80 C18,3 T150 – E3” têm suas ligações rompidas logo após atingirem a força máxima.

Na Tabela 4.24, o valor médio da força máxima total ($P_{m\acute{a}x}$ Total) é de 13043,86 N para os espécimes com corte longitudinal e de 13873,24 N para os de corte transversal. A força máxima alcançada por parafuso ($P_{m\acute{a}x}$ Parafuso) é de 1304,39 N para os espécimes com corte longitudinal e de 1387,32 N para os de corte transversal. A rigidez (Ke) alcançada para os espécimes com corte longitudinal na placa é de 135,97 N/mm e de 116,89 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) é de 13880,05 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 17236,05 N.mm para os de corte transversal. Finalmente, a ductilidade (μ) alcançada é de 2,13 para os espécimes de corte longitudinal e de 1,92 para os de corte transversal. Os valores de C_v , menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, já os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados e os valores acima de 30%, representam uma alta dispersão dos resultados.

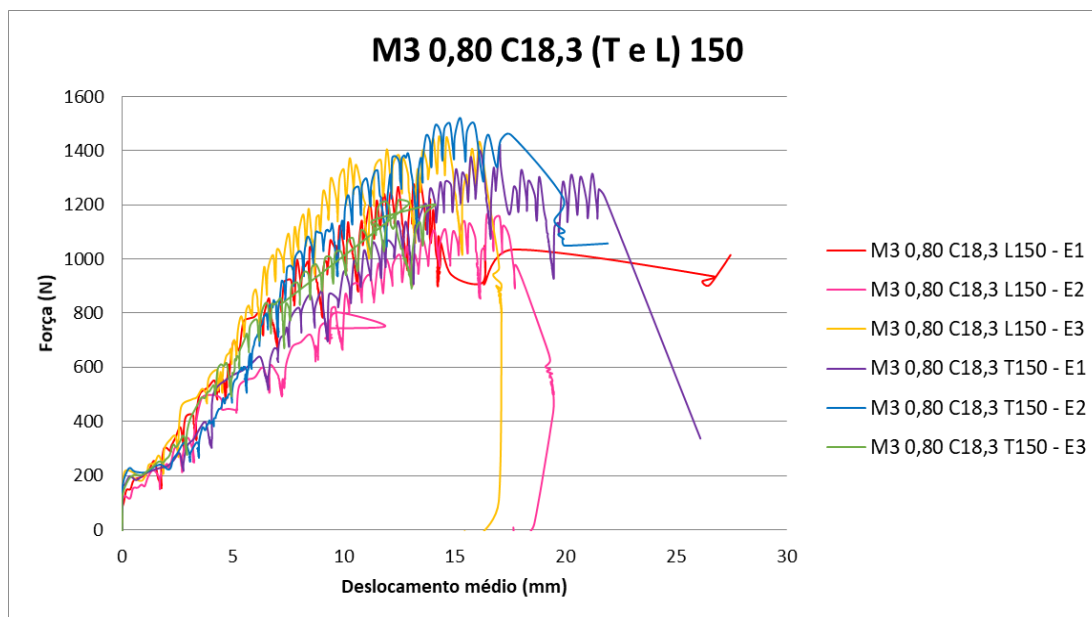


Figura 4.35: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M3 0,80 C18,3 (T e L) 150”

Tabela 4.24: Resultados relativos às séries “M3 0,80 C18,3 (T e L) 150”

Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	K_e (N/mm)	A (N.mm)	μ
M3 0,80 C 18,3 L 150 - E1	12949,61	1294,96	142,40	11368,35	1,87
M3 0,80 C 18,3 L 150 - E2	11648,99	1164,90	134,94	14112,72	2,85
M3 0,80 C 18,3 L 150 - E3	14532,98	1453,30	130,59	16159,08	1,67
X_m	13043,86	1304,39	135,97	13880,05	2,13
C_v	11,07%	11,07%	4,39%	17,32%	29,64%
Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	K_e (N/mm)	A (N.mm)	μ
M3 0,80 C 18,3 T 150 - E1	14221,95	1422,20	104,72	22654,50	2,53
M3 0,80 C 18,3 T 150 - E2	15211,56	1521,16	111,27	19538,99	1,51
M3 0,80 C 18,3 T 150 - E3	12186,21	1218,62	134,68	9514,64	1,72
X_m	13873,24	1387,32	116,89	17236,05	1,92
C_v	11,12%	11,12%	13,47%	39,84%	28,10%

A Figura 4.36 apresenta os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M3 0,80 C18,3 (T e L) 300”, nos quais os espécimes com corte transversal nas placas apresentam, em geral, curvas com maiores áreas em comparação com as dos espécimes com corte longitudinal, exceto o espécime “M3 0,80 C18,3 T150 – E1”, que atinge menor deslocamento médio e menor força máxima. Além disso, as curvas mostram uma fase elástica até atingirem a força máxima e, logo em seguida, uma curta fase plástica até acontecer a ruptura das ligações dos espécimes. Os espécimes “M3 0,80 C18,3 L300 – E2”, “M3 0,80 C18,3 L300 – E3” e “M3 0,80 C18,3 T300 – E2” rompem suas ligações após atingirem a força máxima e não apresentam fase plástica.

Na Tabela 4.25, o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx Total}}$) é de 7558,65 N para os espécimes com corte longitudinal e de 7275,91 N para os de corte transversal. A força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx Parafuso}}$) é de 1259,78 N para os espécimes com corte longitudinal e de 1212,65 N para os de corte transversal. A rigidez (K_e) alcançada para os espécimes com corte longitudinal nas placas é de 181,08 N/mm e de 177,80 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) é de 11735,15 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 13419,52 N.mm para os de corte transversal. Finalmente, a ductilidade (μ) alcançada é de 2,26 para os espécimes de corte longitudinal e de 2,47 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, já os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados, enquanto os valores acima de 30%, representam uma alta dispersão dos resultados.

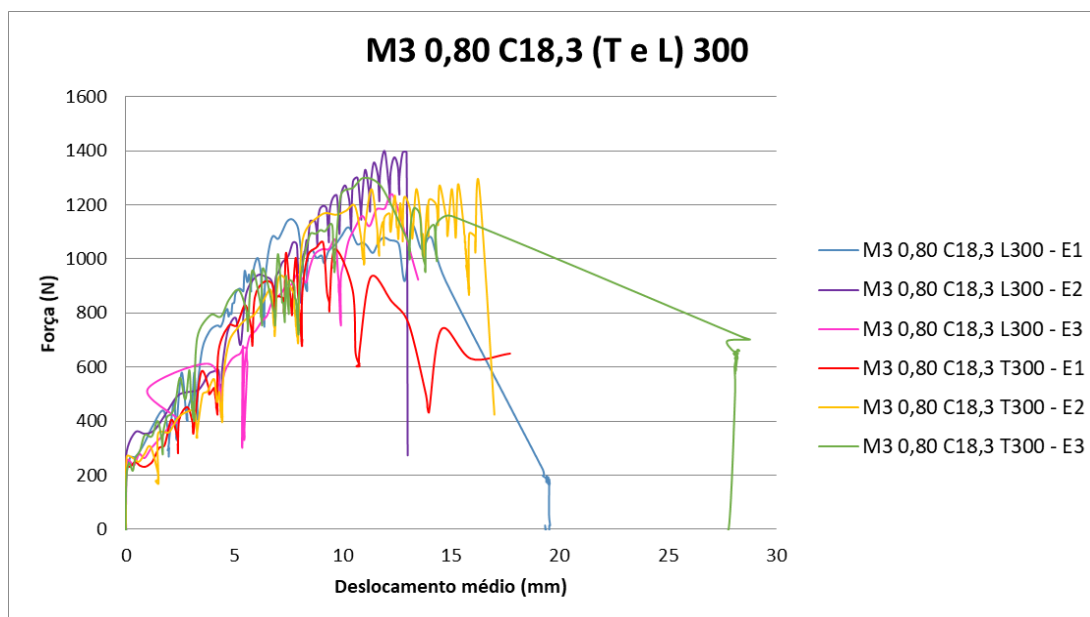


Figura 4.36: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M3 0,80 C18,3 (T e L) 300”

Tabela 4.25: Resultados relativos às séries “M3 0,80 C18,3 (T e L) 300”

Espécime	$P_{\text{máx Total}}$ (N)	$P_{\text{máx Parafuso}}$ (N)	K_e (N/mm)	A (N.mm)	μ
M3 0,80 C 18,3 L 300 - E1	6870,65	1145,11	225,76	13299,13	3,07
M3 0,80 C 18,3 L 300 - E2	8397,46	1399,58	150,71	11384,41	1,48
M3 0,80 C 18,3 L 300 - E3	7407,86	1234,64	166,76	10521,92	2,24
Xm	7558,65	1259,78	181,08	11735,15	2,26
Cv	10,25%	10,25%	21,82%	12,11%	35,16%
Espécime	$P_{\text{máx Total}}$ (N)	$P_{\text{máx Parafuso}}$ (N)	K_e (N/mm)	A (N.mm)	μ
M3 0,80 C 18,3 T 300 - E1	6361,71	1060,28	167,36	10930,61	2,59
M3 0,80 C 18,3 T 300 - E2	7662,33	1277,05	141,25	15496,25	1,96
M3 0,80 C 18,3 T 300 - E3	7803,70	1300,62	224,80	13831,71	2,87
Xm	7275,91	1212,65	177,80	13419,52	2,47
Cv	10,92%	10,92%	24,04%	17,22%	18,75%

A Figura 4.35 mostra os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M3 0,80 C18,3 (T e L) 150”. Nesses gráficos, as curvas dos espécimes com corte transversal na placa apresentam, em geral, maiores áreas sob as curvas em comparação com as dos espécimes com corte longitudinal, devido à maior força máxima alcançada e ao maior deslocamento médio atingido. Os espécimes apresentam, primeiramente, uma fase elástica linear seguida de uma fase não linear até atingirem a força máxima. Em seguida, apresentam uma breve fase plástica até acontecer a ruptura das ligações dos espécimes.

Na Tabela 4.26, o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx Total}}$) é de 13392,57 N para os espécimes com corte longitudinal e de 14325,63 N para os de corte transversal, enquanto a força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx Parafuso}}$) é de 1339,26 N para os espécimes com corte longitudinal e de 1432,56 N para os de corte transversal. O valor médio da rigidez (K_e) determinada para os espécimes com corte longitudinal nas placas é de 135,45 N/mm e de 136,33 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) é de 12046,86 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 14062,87 N.mm para os de corte transversal. Finalmente, a ductilidade (μ) determinada é de 1,53 para os espécimes de corte longitudinal e de 1,66 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados e os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados.

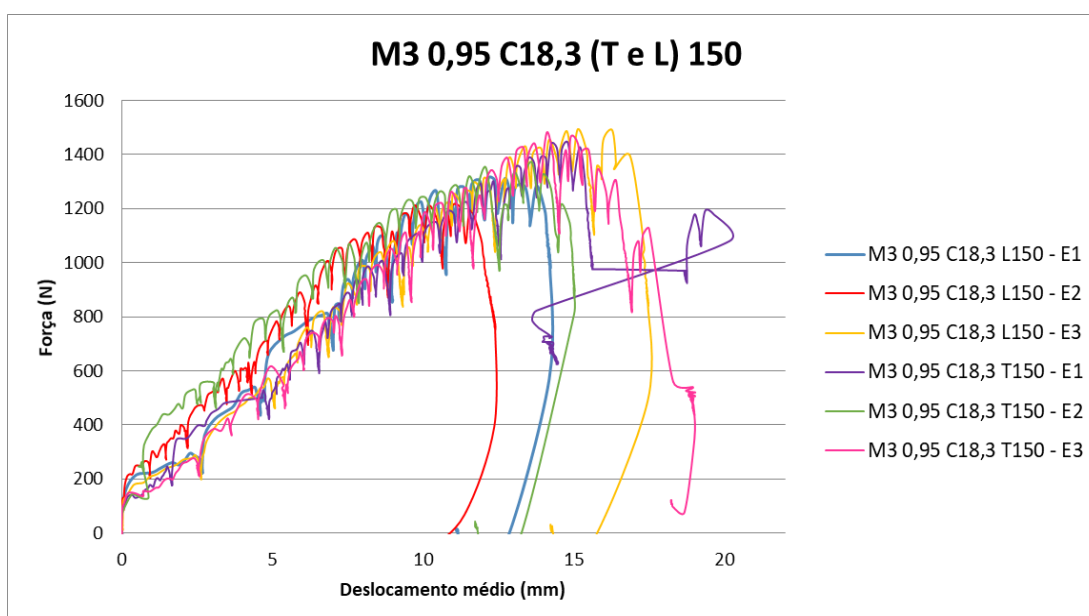


Figura 4.37: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M3 0,95 C18,3 (T e L) 150”

Tabela 4.26: Resultados relativos às séries “M3 0,95 C18,3 (T e L) 150”

Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	Ke (N/mm)	A (N.mm)	μ
M3 0,95 C 18,3 L 150 - E1	13119,26	1311,93	125,53	11554,08	1,41
M3 0,95 C 18,3 L 150 - E2	12129,66	1212,97	162,86	9959,92	1,81
M3 0,95 C 18,3 L 150 - E3	14928,81	1492,88	117,94	14626,57	1,39
Xm	13392,57	1339,26	135,45	12046,86	1,53
Cv	10,60%	10,60%	17,75%	19,69%	15,41%
Espécime	$P_{\text{máx}}$ Total (N)	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	Ke (N/mm)	A (N.mm)	μ
M3 0,95 C 18,3 T 150 - E1	14448,15	1444,82	113,67	12782,78	1,38
M3 0,95 C 18,3 T 150 - E2	13713,02	1371,30	170,41	14333,80	2,01
M3 0,95 C 18,3 T 150 - E3	14815,71	1481,57	124,92	15072,04	1,58
Xm	14325,63	1432,56	136,33	14062,87	1,66
Cv	3,92%	3,92%	22,03%	8,31%	19,46%

A Figura 4.38 apresenta os gráficos força *versus* deslocamento das séries “M3 0,95 C18,3 (T e L) 300”. Nesses gráficos, os espécimes com corte longitudinal nas placas têm áreas sob as curvas similares as dos espécimes com corte transversal, com exceção do espécime “M3 0,95 C11,1 T300 – E1”, que apresenta menor força máxima e menor deslocamento médio atingidos em relação aos outros espécimes. Além disso, os espécimes apresentam uma fase elástica até atingirem a força máxima e, em seguida, acontece a ruptura de suas ligações. Os espécimes “M3 0,95 C18,3 L300 – E3” e “M3 0,95 C18,3 T300 – E3” apresentam uma breve fase plástica após atingirem a força máxima.

Na Tabela 4.27, o valor médio da força máxima total ($P_{\text{máx}}$ Total) é de 7577,50 N para os espécimes com corte longitudinal e de 6955,47 N para os de corte transversal, enquanto a força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) é de 1262,92 N para os espécimes com corte longitudinal e de 1159,24 N para os de corte transversal. O valor médio da rigidez (Ke) determinada para os espécimes com corte longitudinal nas placas é de 195,10 N/mm e de 153,16 N/mm para os de corte transversal. A energia dissipada (A) é de 10906,56 N.mm para os espécimes de corte longitudinal e de 11063,90 N.mm para os de corte transversal. Por fim, a ductilidade (μ) alcançada é de 2,38 para os espécimes de corte longitudinal e de 2,03 para os de corte transversal. Os valores de C_v menores que 15% representam uma baixa dispersão dos resultados, já os valores de C_v entre 15% e 30% caracterizam uma média dispersão dos resultados, enquanto os valores acima de 30%, representam uma alta dispersão dos resultados.

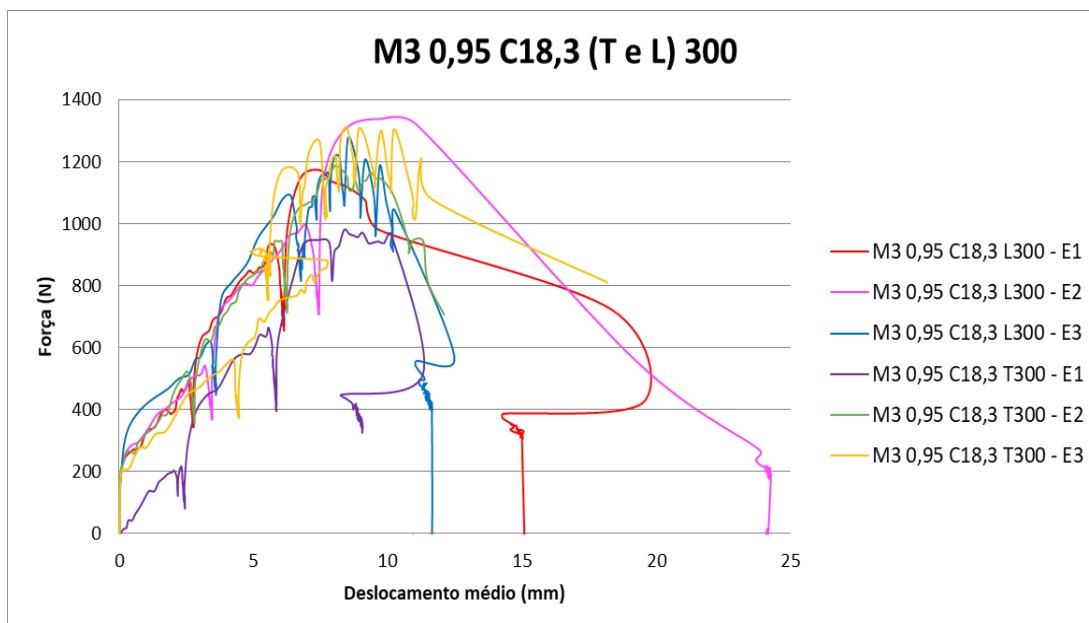


Figura 4.38: Gráfico força *versus* deslocamento das séries “M3 0,95 C18,3 (T e L) 300”

Tabela 4.27: Resultados relativos às séries “M3 0,95 C18,3 (T e L) 300”

Espécime	$P_{\text{máx Total}}$ (N)	$P_{\text{máx Parafuso}}$ (N)	Ke (N/mm)	A (N.mm)	μ
M3 0,95 C 18,3 L 300 - E1	7040,29	1173,38	190,32	7009,80	1,55
M3 0,95 C 18,3 L 300 - E2	8029,89	1338,32	169,63	16674,33	3,18
M3 0,95 C 18,3 L 300 - E3	7662,33	1277,05	225,35	9035,54	2,40
Xm	7577,50	1262,92	195,10	10906,56	2,38
Cv	6,60%	6,60%	14,44%	46,73%	34,40%
Espécime	$P_{\text{máx Total}}$ (N)	$P_{\text{máx Parafuso}}$ (N)	Ke (N/mm)	A (N.mm)	μ
M3 0,95 C 18,3 T 300 - E1	5881,05	980,17	138,10	6837,80	1,91
M3 0,95 C 18,3 T 300 - E2	7125,11	1187,52	181,43	9878,97	2,03
M3 0,95 C 18,3 T 300 - E3	7860,25	1310,04	139,95	16474,93	2,16
Xm	6955,47	1159,24	153,16	11063,90	2,03
Cv	14,38%	14,38%	15,99%	44,53%	6,15%

4.3.4 Compilação dos valores médios de cada modelo

Nas Tabelas 4.28, 4.29 e 4.30 estão compiladas as médias dos valores obtidos em cada série para cada modelo, a fim de facilitar a análise dos resultados encontrados.

Tabela 4.28: Valores médios para os resultados encontrados nos modelos M1.

Série	$P_{\text{máx}} \text{ Total (N)}$	$P_{\text{máx}} \text{ Parafuso (N)}$	$K_e \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N.mm)}$	μ
M1 0,80 C11,1 L 150	36728,27	1836,41	1901,28	9138,90	8,01
M1 0,80 C11,1 T 150	42156,93	2107,85	1565,89	18049,92	9,91
M1 0,80 C11,1 L 300	25861,53	2155,13	1173,71	18521,88	8,09
M1 0,80 C11,1 T 300	25748,43	2145,70	868,73	21547,33	6,19
M1 0,95 C11,1 L 150	53202,74	2660,14	790,81	28740,67	5,58
M1 0,95 C11,1 T 150	49102,97	2455,15	973,77	20585,79	5,22
M1 0,95 C11,1 L 300	29904,74	2492,06	712,17	19300,60	3,93
M1 0,95 C11,1 T 300	28283,69	2356,97	810,55	17703,51	3,96
M1 0,80 C18,3 L 150	38047,74	1902,39	1721,90	14070,71	9,97
M1 0,80 C18,3 T 150	36784,81	1839,24	1340,25	11128,29	6,44
M1 0,80 C18,3 L 300	23656,13	1971,34	1393,98	14086,13	7,29
M1 0,80 C18,3 T 300	23420,51	1951,71	1681,06	10265,71	6,53
M1 0,95 C18,3 L 150	46751,49	2337,57	1422,54	22722,53	8,55
M1 0,95 C18,3 T 150	39847,86	1992,39	1467,71	13398,92	7,51
M1 0,95 C18,3 L 300	30526,78	2543,90	1272,70	20042,29	7,65
M1 0,95 C18,3 T 300	23825,78	1985,48	1274,29	11044,85	6,07

Tabela 4.29: Valores médios para os resultados encontrados nos modelos M2.

Série	$P_{\text{máx}} \text{ Total (N)}$	$P_{\text{máx}} \text{ Parafuso (N)}$	$K_e \text{ (N/mm)}$	$A \text{ (N.mm)}$	μ
M2 0,80 C11,1 L 150	19791,98	1979,20	857,56	11254,19	4,15
M2 0,80 C11,1 T 150	19782,56	1978,26	1785,30	11490,93	6,27
M2 0,80 C11,1 L 300	16201,15	2700,19	741,45	25585,70	4,34
M2 0,80 C11,1 T 300	14523,54	2420,59	1551,29	13899,34	5,58
M2 0,95 C11,1 L 150	26313,91	2631,39	922,03	19385,59	4,46
M2 0,95 C11,1 T 150	28351,35	2835,14	916,20	18611,73	3,90
M2 0,95 C11,1 L 300	17124,78	2854,13	802,54	27241,20	4,58
M2 0,95 C11,1 T 300	15842,33	2640,39	1579,99	23807,36	6,85
M2 0,80 C18,3 L 150	17369,82	1736,98	1931,53	13712,60	11,62
M2 0,80 C18,3 T 150	19339,60	1933,96	1491,85	16594,41	9,98
M2 0,80 C18,3 L 300	12110,81	2018,47	2122,35	13917,50	11,22
M2 0,80 C18,3 T 300	13345,45	2224,24	1299,02	14830,32	6,08
M2 0,95 C18,3 L 150	23250,87	2325,09	1196,93	16184,96	6,30
M2 0,95 C18,3 T 150	20838,13	2083,81	1285,63	14954,80	6,61
M2 0,95 C18,3 L 300	19160,53	3193,42	1453,91	23204,46	5,69
M2 0,95 C18,3 T 300	11158,91	1859,82	2233,31	12034,72	11,07

Tabela 4.30: Valores médios para os resultados encontrados nos modelos M3.

Série	$P_{\text{máx Total}}$ (N)	$P_{\text{máx Parafuso}}$ (N)	Ke (N/mm)	A (N.mm)	μ
M3 0,80 C11,1 L 150	10518,02	1051,80	115,71	13005,11	2,49
M3 0,80 C11,1 T 150	9547,28	954,73	117,78	8610,53	1,90
M3 0,80 C11,1 L 300	5598,30	933,05	200,87	8623,82	3,39
M3 0,80 C11,1 T 300	5749,10	958,18	194,86	6639,52	2,99
M3 0,95 C11,1 L 150	9801,74	980,17	129,42	7138,57	1,73
M3 0,95 C11,1 T 150	10649,97	1065,00	133,39	7788,88	1,65
M3 0,95 C11,1 L 300	7737,72	1289,62	170,81	9741,05	1,89
M3 0,95 C11,1 T 300	7756,57	1292,76	183,69	9629,84	2,18
M3 0,80 C18,3 L 150	13043,86	1304,39	135,97	13880,05	2,13
M3 0,80 C18,3 T 150	13873,24	1387,32	116,89	17236,05	1,92
M3 0,80 C18,3 L 300	7558,65	1259,78	181,08	11735,15	2,26
M3 0,80 C18,3 T 300	7275,91	1212,65	177,80	13419,52	2,47
M3 0,95 C18,3 L 150	13392,57	1339,26	135,45	12046,86	1,53
M3 0,95 C18,3 T 150	14325,63	1432,56	136,33	14062,87	1,66
M3 0,95 C18,3 L 300	7577,50	1262,92	195,10	10906,56	2,38
M3 0,95 C18,3 T 300	6955,47	1159,24	153,16	11063,90	2,03

4.4 Análise dos resultados obtidos

Para analisar as influências das variáveis nos resultados obtidos durante os ensaios, foram feitas tabelas comparando os resultados da força máxima por parafuso ($P_{\text{máx Parafuso}}$) e a rigidez da ligação (Ke) entre as séries iguais, porém com a variável analisada diferente. A razão entre os resultados das séries analisadas foi feita e então, uma média das razões foi calculada para posterior análise, junto ao cálculo de desvio padrão.

4.4.1 Análise da influência da direção do corte das placas dos espécimes (longitudinal e transversal)

Na análise feita dos resultados do modelo M1 percebeu-se que as séries com corte longitudinal nas placas de compensado estrutural apresentaram em média 6% a mais de força máxima por parafuso ($P_{\text{máx Parafuso}}$) e 4% a mais de rigidez por ligação (Ke) em relação aos espécimes com corte na direção transversal da placa, conforme mostra a Tabela 4.31.

Tabela 4.31: Análise da influência da direção do corte das placas dos espécimes no modelo M1.

Séries	P _{máx} Parafuso (N)	Cv (%)	L/T	Ke (N/mm)	Cv (%)	L/T
M1 0,80 C11,1 L 150	1836,41	8,78	0,87	1901,28	43,13	1,21
M1 0,80 C11,1 T 150	2107,85	3,13		1565,89	26,03	
M1 0,80 C11,1 L 300	2155,13	8,84	1,00	1173,71	23,62	1,35
M1 0,80 C11,1 T 300	2145,7	9,59		868,73	14,03	
M1 0,95 C11,1 L 150	2660,14	2,68	1,08	790,81	7,35	0,81
M1 0,95 C11,1 T 150	2455,15	0,84		973,77	23,28	
M1 0,95 C11,1 L 300	2492,06	6,13	1,05	712,17	24,98	0,87
M1 0,95 C11,1 T 300	2356,97	9,07		810,55	22,15	
M1 0,80 C18,3 L 150	1902,39	7,25	1,03	1721,90	3,68	1,28
M1 0,80 C18,3 T 150	1839,24	4,35		1340,25	11,58	
M1 0,80 C18,3 L 300	1971,34	15,07	1,01	1393,98	19,01	0,82
M1 0,80 C18,3 T 300	1951,71	10,31		1681,06	22,06	
M1 0,95 C18,3 L 150	2337,57	6,12	1,17	1422,54	29,79	0,96
M1 0,95 C18,3 T 150	1992,39	12,45		1467,71	14,87	
M1 0,95 C18,3 L 300	2543,9	10,56	1,28	1272,70	15,42	0,99
M1 0,95 C18,3 T 300	1985,48	4,69		1274,29	21,99	
		Xm	1,06			1,04
		Var(x)	1,29			1,24
		DP	1,14			1,11

No modelo M2 as séries com corte longitudinal nas placas de compensado estrutural apresentaram 10% a mais de força máxima por parafuso ($P_{máx}$ Parafuso) em relação às séries com corte na direção transversal. Já as séries com corte transversal nas placas indicaram 13% a mais de rigidez por ligação (Ke) em relação às placas com corte na direção longitudinal, conforme a Tabela 4.32.

Tabela 4.32: Análise da influência da direção do corte das placas dos espécimes no modelo M2.

Séries	P _{máx} Parafuso (N)	Cv (%)	L/T	Ke (N/mm)	Cv (%)	L/T
M2 0,80 C11,1 L 150	1979,2	14,01	1,00	857,56	39,11	0,48
M2 0,80 C11,1 T 150	1978,26	26,02		1785,30	35,24	
M2 0,80 C11,1 L 300	2700,19	3,34	1,12	741,45	3,43	0,48
M2 0,80 C11,1 T 300	2420,59	26,08		1551,29	34,42	
M2 0,95 C11,1 L 150	2631,39	7,79	0,93	922,03	13,64	1,01
M2 0,95 C11,1 T 150	2835,14	1,97		916,20	27,49	
M2 0,95 C11,1 L 300	2854,13	9,69	1,08	802,54	21,97	0,51
M2 0,95 C11,1 T 300	2640,39	8,66		1579,99	66,03	
M2 0,80 C18,3 L 150	1736,98	12,05	0,90	1931,53	16,33	1,29
M2 0,80 C18,3 T 150	1933,96	8,85		1491,85	27,73	
M2 0,80 C18,3 L 300	2018,47	8,52	0,91	2122,35	43,22	1,63
M2 0,80 C18,3 T 300	2224,24	5,32		1299,02	44,46	
M2 0,95 C18,3 L 150	2325,09	6,93	1,12	1196,93	12,11	0,93
M2 0,95 C18,3 T 150	2083,81	6,12		1285,63	12,47	
M2 0,95 C18,3 L 300	3193,42	10,7	1,72	1453,91	16,53	0,65
M2 0,95 C18,3 T 300	1859,82	3,88		2233,31	36,11	
		Xm	1,10			0,87
		Var(x)	1,37			0,87
		DP	1,17			0,93

As séries que constituem o modelo M3 apresentaram uma média das razões equivalentes entre as séries com cortes longitudinal e transversal nas placas em relação à força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso). No entanto, a rigidez por ligação (K_e) das séries com corte na direção longitudinal nas placas foi 5% maior que as séries com corte transversal nas placas, conforme mostra a Tabela 4.33.

Tabela 4.33: Análise da influência da direção do corte das placas dos espécimes no modelo M3.

Séries	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	Cv (%)	L/T	Ke (N/mm)	Cv (%)	L/T
M3 0,80 C11,1 L 150	1051,8	19,43	1,10	115,71	33,10	0,98
M3 0,80 C11,1 T 150	954,73	12,61		117,78	11,96	
M3 0,80 C11,1 L 300	933,05	4,13	0,97	200,87	36,60	1,03
M3 0,80 C11,1 T 300	958,18	3		194,86	30,78	
M3 0,95 C11,1 L 150	980,17	15,74	0,92	129,42	6,66	0,97
M3 0,95 C11,1 T 150	1065	23,73		133,39	6,71	
M3 0,95 C11,1 L 300	1289,62	6,05	1,00	170,81	3,39	0,93
M3 0,95 C11,1 T 300	1292,76	13,05		183,69	18,30	
M3 0,80 C18,3 L 150	1304,39	11,07	0,94	135,97	4,39	1,16
M3 0,80 C18,3 T 150	1387,32	11,12		116,89	13,47	
M3 0,80 C18,3 L 300	1259,78	10,25	1,04	181,08	21,82	1,02
M3 0,80 C18,3 T 300	1212,65	10,92		177,80	24,04	
M3 0,95 C18,3 L 150	1339,26	10,6	0,93	135,45	17,75	0,99
M3 0,95 C18,3 T 150	1432,56	3,92		136,33	22,03	
M3 0,95 C18,3 L 300	1262,92	6,6	1,09	195,10	14,44	1,27
M3 0,95 C18,3 T 300	1159,24	14,38		153,16	15,99	
		Xm	1,00			1,05
		Var(x)	1,14			1,25
		DP	1,07			1,12

Dessa forma pôde-se perceber a partir das análises da influência da direção do corte das placas para a fabricação dos espécimes (longitudinal e transversal) que as séries com corte longitudinal nas placas, nos modelos M1 e M2, apresentaram uma tendência das forças máximas por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) serem superiores às séries com corte transversal. No modelo M3 essa diferença não ocorreu. Em relação à rigidez por ligação (Ke), apenas as séries com corte transversal nas placas do modelo M2 apresentaram maior rigidez por ligação (Ke) em relação às séries com corte na direção longitudinal. As séries dos Modelos M1 e M3 apresentaram a rigidez por ligação (Ke) maior para as séries com corte longitudinal nas placas.

4.4.2 Análise da influência da espessura das placas de compensado estrutural

Na análise feita no Modelo M1, em relação à espessura das placas de compensado estrutural, pode-se perceber que as séries com placas de compensado estrutural de 11,1 mm apresentaram 11% a mais de força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) em relação às séries com placas de 18,3 mm. Já a rigidez por ligação (Ke) das séries com placas de 18,3 mm foi 24% maior que as séries com placas de 11,1 mm, segundo mostra a Tabela 4.34.

Tabela 4.34: Análise da influência da espessura das placas de compensado estrutural no modelo M1.

Séries	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	Cv (%)	11,1/18,3	Ke (N/mm)	Cv (%)	11,1/18,3
M1 0,80 C11,1 L 150	1836,41	8,78	0,97	1901,28	43,13	1,10
M1 0,80 C18,3 L 150	1902,39	7,25		1565,89	3,68	
M1 0,80 C11,1 T 150	2107,85	3,13	1,15	1340,25	11,58	1,17
M1 0,80 C18,3 T 150	1839,24	4,35		1173,71	23,62	
M1 0,80 C11,1 L 300	2155,13	8,84	1,09	1393,98	19,01	0,84
M1 0,80 C18,3 L 300	1971,34	15,07		868,73	14,03	
M1 0,80 C11,1 T 300	2145,70	9,59	1,10	1681,06	22,06	0,52
M1 0,80 C18,3 T 300	1951,71	10,31		790,81	7,35	
M1 0,95 C11,1 L 150	2660,14	2,68	1,14	1422,54	29,79	0,56
M1 0,95 C18,3 L 150	2337,57	6,12		973,77	23,28	
M1 0,95 C11,1 T 150	2455,15	0,84	1,23	1467,71	14,87	0,66
M1 0,95 C18,3 T 150	1992,39	12,45		712,17	24,98	
M1 0,95 C11,1 L 300	2492,06	6,13	0,98	1272,70	15,42	0,56
M1 0,95 C18,3 L 300	2543,90	10,56		810,55	22,15	
M1 0,95 C11,1 T 300	2356,97	9,07	1,19	1274,29	21,99	0,64
M1 0,95 C18,3 T 300	1985,48	4,69				
		Xm	1,11			0,76
		Var(x)	1,40			0,65
		DP	1,18			0,81

Na análise feita no Modelo M2 acerca da espessura das placas de compensado estrutural, pode-se perceber que as séries com placas de compensado estrutural de 11,1 mm apresentaram 17% a mais de força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) em relação às séries com placas de 18,3 mm, enquanto a rigidez por ligação (K_e) das séries com placas de 18,3 mm foi 26% maior que as séries com placas de 11,1 mm, como evidencia a Tabela 4.35.

Tabela 4.35: Análise da influência da espessura das placas de compensado estrutural no modelo M2.

Séries	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	Cv (%)	11,1/18,3	K_e (N/mm)	Cv (%)	11,1/18,3
M2 0,80 C11,1 L 150	1979,20	14,01	1,14	857,56	39,11	0,44
M2 0,80 C18,3 L 150	1736,98	12,05		1931,53	16,33	
M2 0,80 C11,1 T 150	1978,26	26,02	1,02	1785,30	35,24	1,20
M2 0,80 C18,3 T 150	1933,96	8,85		1491,85	27,73	
M2 0,80 C11,1 L 300	2700,19	3,34	1,34	741,45	3,43	0,35
M2 0,80 C18,3 L 300	2018,47	8,52		2122,35	43,22	
M2 0,80 C11,1 T 300	2420,59	26,08	1,09	1551,29	34,42	1,19
M2 0,80 C18,3 T 300	2224,24	5,32		1299,02	44,46	
M2 0,95 C11,1 L 150	2631,39	7,79	1,13	922,03	13,64	0,77
M2 0,95 C18,3 L 150	2325,09	6,93		1196,93	12,11	
M2 0,95 C11,1 T 150	2835,14	1,97	1,36	916,20	27,49	0,71
M2 0,95 C18,3 T 150	2083,81	6,12		1285,63	12,47	
M2 0,95 C11,1 L 300	2854,13	9,69	0,89	802,54	21,97	0,55
M2 0,95 C18,3 L 300	3193,42	10,70		1453,91	16,53	
M2 0,95 C11,1 T 300	2640,39	8,66	1,42	1579,99	66,03	0,71
M2 0,95 C18,3 T 300	1859,82	3,88		2233,31	36,11	
		Xm	1,17			0,74
		Var(x)	1,58			0,63
		DP	1,26			0,79

Conforme mostra a Tabela 4.36, na análise feita no modelo M3, foi observado que as séries com placas de compensado estrutural de 18,3 mm apresentaram 17% a mais de força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) em relação às séries com placas de 11,1 mm. Quanto à rigidez por ligação (K_e), as séries com placas de 18,3 mm e com placas de 11,1 mm apresentaram uma média das razões igual a 1.

Tabela 4.36: Análise da influência da espessura das placas de compensado estrutural no modelo M3.

Séries	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	Cv (%)	11,1/18,3	Ke (N/mm)	Cv (%)	11,1/18,3
M3 0,80 C11,1 L 150	1051,8	19,43	0,81	115,71	33,10	0,85
M3 0,80 C18,3 L 150	1304,39	11,07		135,97	4,39	
M3 0,80 C11,1 T 150	954,73	12,61	0,69	117,78	11,96	1,01
M3 0,80 C18,3 T 150	1387,32	11,12		116,89	13,47	
M3 0,80 C11,1 L 300	933,05	4,13	0,74	200,87	36,60	1,11
M3 0,80 C18,3 L 300	1259,78	10,25		181,08	21,82	
M3 0,80 C11,1 T 300	958,18	3	0,79	194,86	30,78	1,10
M3 0,80 C18,3 T 300	1212,65	10,92		177,80	24,04	
M3 0,95 C11,1 L 150	980,17	15,74	0,73	129,42	6,66	0,96
M3 0,95 C18,3 L 150	1339,26	10,6		135,45	17,75	
M3 0,95 C11,1 T 150	1065	23,73	0,74	133,39	6,71	0,98
M3 0,95 C18,3 T 150	1432,56	3,92		136,33	22,03	
M3 0,95 C11,1 L 300	1289,62	6,05	1,02	170,81	3,39	0,88
M3 0,95 C18,3 L 300	1262,92	6,6		195,10	14,44	
M3 0,95 C11,1 T 300	1292,76	13,05	1,12	183,69	18,30	1,20
M3 0,95 C18,3 T 300	1159,24	14,38		153,16	15,99	
		Xm	0,83			1,00
		Var(x)	0,79			1,16
		DP	0,89			1,08

Assim sendo, a partir dos resultados analisados em relação à espessura das placas de compensado estrutural, foi possível perceber que as séries formadas por placas de 11,1 mm suportaram maior força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) que as séries com placas de 18,3 mm, apenas as séries do modelo M3 apresentaram maior força máxima para as séries com placa de 18,3mm. Quanto à rigidez por ligação (Ke), as séries dos modelos M1 e M2 com placas de 18,3 mm apresentaram maior rigidez em relação às séries com placas de 11,1 mm. No modelo M3 essa diferença não ocorreu.

4.4.3 Análise da influência do espaçamento entre os parafusos

Na análise feita acerca do modelo M1, em relação a influência do espaçamento entre os parafusos sobre os resultados, percebeu-se que as séries com espaçamento de 300 mm apresentaram em média 3% a mais de força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) em relação as séries com espaçamento de 150 mm. Enquanto as séries com espaçamento de 150 mm apresentaram 25% a mais de rigidez por ligação (Ke) que as séries com espaçamento de 300 mm, conforme mostra a Tabela 4.37.

Tabela 4.37: Análise da influência do espaçamento entre os parafusos no modelo M1.

Séries	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	C_v (%)	150/300	K_e (N/mm)	C_v (%)	150/300
M1 0,80 C11,1 L 150	1836,41	8,78	0,85	1901,28	43,13	1,62
M1 0,80 C11,1 L 300	2155,13	8,84		1173,71	23,62	
M1 0,80 C11,1 T 150	2107,85	3,13	0,98	1565,89	26,03	1,80
M1 0,80 C11,1 T 300	2145,7	9,59		868,73	14,03	
M1 0,95 C11,1 L 150	2660,14	2,68	1,07	790,81	7,35	1,11
M1 0,95 C11,1 L 300	2492,06	6,13		712,17	24,98	
M1 0,95 C11,1 T 150	2455,15	0,84	1,04	973,77	23,28	1,20
M1 0,95 C11,1 T 300	2356,97	9,07		810,55	22,15	
M1 0,80 C18,3 L 150	1902,39	7,25	0,97	1721,90	3,68	1,24
M1 0,80 C18,3 L 300	1971,34	15,07		1393,98	19,01	
M1 0,80 C18,3 T 150	1839,24	4,35	0,94	1340,25	11,58	0,80
M1 0,80 C18,3 T 300	1951,71	10,31		1681,06	22,06	
M1 0,95 C18,3 L 150	2337,57	6,12	0,92	1422,54	29,79	1,12
M1 0,95 C18,3 L 300	2543,9	10,56		1272,70	15,42	
M1 0,95 C18,3 T 150	1992,39	12,45	1,00	1467,71	14,87	1,15
M1 0,95 C18,3 T 300	1985,48	4,69		1274,29	21,99	
		Xm	0,97			1,25
		Var(x)	1,08			1,80
		DP	1,04			1,34

Na análise relativa ao modelo M2, percebeu-se que as séries com espaçamento de 300 mm entre os parafusos apresentaram em média 16% a mais de força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) e 6% a mais de rigidez por ligação (K_e) em relação as séries com espaçamento de 150 mm, conforme mostra a Tabela 4.38.

Tabela 4.38: Análise da influência do espaçamento entre os parafusos no modelo M2.

Séries	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	C_v (%)	150/300	K_e (N/mm)	C_v (%)	150/300
M2 0,80 C11,1 L 150	1979,20	14,01	0,73	857,56	39,11	1,16
M2 0,80 C11,1 L 300	2700,19	3,34		741,45	3,43	
M2 0,80 C11,1 T 150	1978,26	26,02	0,82	1785,30	35,24	1,15
M2 0,80 C11,1 T 300	2420,59	9,59		1551,29	34,42	
M2 0,95 C11,1 L 150	2631,39	7,79	0,92	922,03	13,64	1,15
M2 0,95 C11,1 L 300	2854,13	9,69		802,54	21,97	
M2 0,95 C11,1 T 150	2835,14	1,97	1,07	916,20	27,49	0,58
M2 0,95 C11,1 T 300	2640,39	8,66		1579,99	66,03	
M2 0,80 C18,3 L 150	1736,98	12,05	0,86	1931,53	16,33	0,91
M2 0,80 C18,3 L 300	2018,47	8,52		2122,35	43,22	
M2 0,80 C18,3 T 150	1933,96	8,85	0,43	1491,85	27,73	1,15
M2 0,80 C18,3 T 300	4448,48	5,32		1299,02	44,46	
M2 0,95 C18,3 L 150	2325,09	6,93	0,73	1196,93	12,11	0,82
M2 0,95 C18,3 L 300	3193,42	10,70		1453,91	16,53	
M2 0,95 C18,3 T 150	2083,81	6,12	1,12	1285,63	12,47	0,58
M2 0,95 C18,3 T 300	1859,82	3,88		2233,31	36,11	
		Xm	0,84			0,94
		Var(x)	0,80			1,00
		DP	0,89			1,00

Na análise feita acerca do modelo M3, percebeu-se que as séries com espaçamento de 150 mm entre os parafusos apresentaram 2% a mais de força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) em relação às séries com espaçamento de 300 mm, enquanto as séries com espaçamento de 300 mm apresentaram 29% a mais de rigidez por ligação (K_e) que as séries com espaçamento de 150 mm entre os parafusos, conforme mostra a Tabela 4.39.

Tabela 4.39: Análise da influência do espaçamento entre os parafusos no modelo M3.

Séries	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	Cv (%)	150/300	Ke (N/mm)	Cv (%)	150/300
M3 0,80 C11,1 L 150	1051,8	19,43	1,13	115,71	33,10	0,58
M3 0,80 C11,1 L 300	933,05	4,13		200,87	36,60	
M3 0,80 C11,1 T 150	954,73	12,61	1,00	117,78	11,96	0,60
M3 0,80 C11,1 T 300	958,18	3		194,86	30,78	
M3 0,95 C11,1 L 150	980,17	15,74	0,76	129,42	6,66	0,76
M3 0,95 C11,1 L 300	1289,62	6,05		170,81	3,39	
M3 0,95 C11,1 T 150	1065	23,73	0,82	133,39	6,71	0,73
M3 0,95 C11,1 T 300	1292,76	13,05		183,69	18,30	
M3 0,80 C18,3 L 150	1304,39	11,07	1,04	135,97	4,39	0,75
M3 0,80 C18,3 L 300	1259,78	10,25		181,08	21,82	
M3 0,80 C18,3 T 150	1387,32	11,12	1,14	116,89	13,47	0,66
M3 0,80 C18,3 T 300	1212,65	10,92		177,80	24,04	
M3 0,95 C18,3 L 150	1339,26	10,6	1,06	135,45	17,75	0,69
M3 0,95 C18,3 L 300	1262,92	6,6		195,10	14,44	
M3 0,95 C18,3 T 150	1432,56	3,92	1,24	136,33	22,03	0,89
M3 0,95 C18,3 T 300	1159,24	14,38		153,16	15,99	
		Xm	1,02			0,71
		Var(x)	1,20			0,57
		DP	1,09			0,76

Com base na análise dos resultados, foi observado pouca influência do espaçamento entre os parafusos sobre os resultados em relação a força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) nos modelos M1 e M3. No modelo M2 as séries com espaçamento de 300 mm entre os parafusos apresentaram maior força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) em relação às séries com espaçamento de 150 mm. Quanto à rigidez por ligação (Ke), às séries com espaçamento de 150 mm entre os parafusos do modelo M1 apresentaram maior rigidez (Ke) em relação ao espaçamento de 300 mm; já as séries com espaçamento de 300 mm, que compõe o modelo M3, apresentaram maior rigidez (Ke) em relação às séries com espaçamento de 150 mm. Quanto ao modelo M2, houve pouca influência do espaçamento dos parafusos em relação à rigidez por ligação (Ke)

4.4.4 Análise da influência da espessura da chapa dos perfis de aço

Na análise relativa ao modelo M1, quanto à influência da espessura da chapa dos perfis de aço sobre os resultados, percebeu-se que as séries com perfis de aço com chapa de espessura de 0,95 mm apresentaram em média 15% a mais de força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) em relação às séries com aço de 0,80 mm. As séries com aço de 0,80 mm apresentaram 41% a

mais de rigidez por ligação (K_e) que as séries com perfis de aço com chapas de 0,95 mm, conforme mostra a Tabela 4.40.

Tabela 4.40: Análise da influência da espessura da chapa dos perfis de aço do modelo M1.

Séries	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	Cv (%)	0,80/0,95	K_e (N/mm)	Cv (%)	0,80/0,95
M1 0,80 C11,1 L 150	1836,41	8,78	0,69	1901,28	43,13	2,40
M1 0,95 C11,1 L 150	2660,14	2,68		790,81	7,35	
M1 0,80 C11,1 T 150	2107,85	3,13	0,86	1565,89	26,03	1,61
M1 0,95 C11,1 T 150	2455,15	0,84		973,77	23,28	
M1 0,80 C11,1 L 300	2155,13	8,84	0,86	1173,71	23,62	1,65
M1 0,95 C11,1 L 300	2492,06	6,13		712,17	24,98	
M1 0,80 C11,1 T 300	2145,70	9,59	0,91	868,73	14,03	1,07
M1 0,95 C11,1 T 300	2356,97	9,07		810,55	22,15	
M1 0,80 C18,3 L 150	1902,39	7,25	0,81	1721,90	3,68	1,21
M1 0,95 C18,3 L 150	2337,57	6,12		1422,54	29,79	
M1 0,80 C18,3 T 150	1839,24	4,35	0,92	1340,25	11,58	0,91
M1 0,95 C18,3 T 150	1992,39	12,45		1467,71	14,87	
M1 0,80 C18,3 L 300	1971,34	15,07	0,77	1393,98	19,01	1,10
M1 0,95 C18,3 L 300	2543,90	10,56		1272,70	15,42	
M1 0,80 C18,3 T 300	1951,71	10,31	0,98	1681,06	22,06	1,32
M1 0,95 C18,3 T 300	1985,48	4,69		1274,29	21,99	
		Xm	0,85			1,41
		Var(x)	0,83			2,27
		DP	0,91			1,51

Na análise feita acerca do modelo M2, percebeu-se que as séries com perfis de aço com chapa de espessura de 0,95 mm também apresentaram 15% a mais de força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) em relação às séries com aço de 0,80 mm. As séries com chapa de aço de 0,80 mm apresentaram 20% a mais de rigidez por ligação (K_e) que as séries com perfis de aço de 0,95 mm, conforme mostra a Tabela 4.41.

Tabela 4.41: Análise da influência da espessura da chapa dos perfis de aço do modelo M2.

Séries	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	Cv (%)	0,80/0,95	Ke (N/mm)	Cv (%)	0,80/0,95
M2 0,80 C11,1 L 150	1979,20	14,01	0,75	857,56	39,11	0,93
M2 0,95 C11,1 L 150	2631,39	7,79		922,03	13,64	
M2 0,80 C11,1 T 150	1978,26	26,02	0,70	1785,30	35,24	1,95
M2 0,95 C11,1 T 150	2835,14	1,97		916,20	27,49	
M2 0,80 C11,1 L 300	2700,19	3,34	0,95	741,45	3,43	0,92
M2 0,95 C11,1 L 300	2854,13	9,69		802,54	21,97	
M2 0,80 C11,1 T 300	2420,59	26,08	0,92	1551,29	34,42	0,98
M2 0,95 C11,1 T 300	2640,39	8,66		1579,99	66,03	
M2 0,80 C18,3 L 150	1736,98	12,05	0,75	1931,53	16,33	1,61
M2 0,95 C18,3 L 150	2325,09	6,93		1196,93	12,11	
M2 0,80 C18,3 T 150	1933,96	8,85	0,93	1491,85	27,73	1,16
M2 0,95 C18,3 T 150	2083,81	6,12		1285,63	12,47	
M2 0,80 C18,3 L 300	2018,47	8,52	0,63	2122,35	43,22	1,46
M2 0,95 C18,3 L 300	3193,42	10,70		1453,91	16,53	
M2 0,80 C18,3 T 300	2224,24	5,32	1,20	1299,02	44,46	0,58
M2 0,95 C18,3 T 300	1859,82	3,88		2233,31	36,11	
		Xm	0,85			1,20
		Var(x)	0,83			1,65
		DP	0,91			1,28

Conforme mostra a Tabela 4.42, na análise feita sobre o modelo M3, percebeu-se que as séries com perfis de aço com chapas de espessura de 0,95 mm apresentaram 7% a mais de força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) que as séries com perfis de aço com chapas de 0,80 mm. Quanto à rigidez por ligação (Ke), as séries com perfis de aço com chapas de 0,80 mm e 0,95 mm apresentaram uma média das razões equivalente a 1.

Tabela 4.42: Análise da influência da espessura da chapa dos perfis de aço do modelo M3.

Séries	$P_{\text{máx}}$ Parafuso (N)	Cv (%)	0,80/0,95	Ke (N/mm)	Cv (%)	0,80/0,95
M3 0,80 C11,1 L 150	1051,8	19,43	1,07	115,71	33,10	0,89
M3 0,95 C11,1 L 150	980,17	15,74		129,42	6,66	
M3 0,80 C11,1 T 150	954,73	12,61	0,90	117,78	11,96	0,88
M3 0,95 C11,1 T 150	1065	23,73		133,39	6,71	
M3 0,80 C11,1 L 300	933,05	4,13	0,72	200,87	36,60	1,18
M3 0,95 C11,1 L 300	1289,62	6,05		170,81	3,39	
M3 0,80 C11,1 T 300	958,18	3	0,74	194,86	30,78	1,06
M3 0,95 C11,1 T 300	1292,76	13,05		183,69	18,30	
M3 0,80 C18,3 L 150	1304,39	11,07	0,97	135,97	4,39	1,00
M3 0,95 C18,3 L 150	1339,26	10,6		135,45	17,75	
M3 0,80 C18,3 T 150	1387,32	11,12	0,97	116,89	13,47	0,86
M3 0,95 C18,3 T 150	1432,56	3,92		136,33	22,03	
M3 0,80 C18,3 L 300	1259,78	10,25	1,00	181,08	21,82	0,93
M3 0,95 C18,3 L 300	1262,92	6,6		195,10	14,44	
M3 0,80 C18,3 T 300	1212,65	10,92	1,05	177,80	24,04	1,16
M3 0,95 C18,3 T 300	1159,24	14,38		153,16	15,99	
		Xm	0,93			1,00
		Var(x)	0,98			1,13
		DP	0,99			1,06

A partir das análises feitas em relação a influência da espessura dos perfis de aço sobre os resultados obtidos, foi observado que as séries compostas por perfis de aço com chapas de 0,95 mm suportaram maior força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) em comparação com as séries com perfis de aço com chapas de 0,80 mm. Além disso, os perfis de aço com chapas de 0,80 mm indicaram maior rigidez por ligação (Ke) em relação às séries com perfis de aço com chapas de 0,95 mm, exceto no modelo M3 no qual essa diferença não ocorreu.

4.4.5 Análise da influência da posição dos parafusos nos modelos

Foi observada também uma influência da posição dos parafusos nos modelos sobre os resultados, ou seja, em cada modelo (M1, M2 ou M3) percebeu-se um resultado diferente. No modelo M1, no qual havia parafusos na borda da placa do compensado estrutural e dois montantes, foi verificado um valor máximo de 2660,14 N para força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso), encontrado na série “M1 0,95 C11,1 L150”. No modelo M2, composto por parafusos no meio da placa de compensado e com apenas um montante, esse valor máximo foi de 3193,42 N, na série “M2 0,95 C18,3 L300”. No modelo M3, que foi constituído por parafuso na borda da placa e um montante de extremidade, esse valor máximo alcançado foi de 1432,56 N, pela série “M3 0,80 C11,1 L300”.

Para os valores de rigidez por ligação (K_e) o modelo que atingiu o maior valor foi o modelo M2, que apresentou o valor de 2233,31 N/mm, obtido pela série “M2 0,95 C18,3 T 300”. O modelo M1 apresentou o valor de 1901,28 N/mm para esse parâmetro, atingido pela série “M1 0,80 C11,1 L 150”, enquanto no modelo M3 o valor da rigidez (K_e) foi de 200,87 N/mm, obtido pela série “M3 0,80 C11,1 L 300”. Dessa forma, é possível perceber que o modelo M2 apresentou maior valor de força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}}$ Parafuso) e rigidez por ligação (K_e).

5

CONCLUSÃO

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o comportamento das ligações entre os perfis do sistema construtivo *Light Steel Framing* e as placas de compensado estrutural. Para isso foram realizados ensaios de flexão de três pontos e ensaios do tipo *push test*. Diante disso, foram elaborados gráficos de força *versus* deslocamento e então, encontrados valores de módulo de elasticidade (E) e da resistência à tração na flexão estática ($\sigma_{m\acute{a}x}$) por meio de ensaios de flexão, bem como valores de força máxima por parafuso ($P_{m\acute{a}x}$ Parafuso) e de rigidez da ligação (Ke) entre os perfis de aço e as placas de compensado estrutural, mediante ensaios do tipo *push test*.

Pôde-se perceber, na análise dos resultados dos 92 ensaios de resistência à tração na flexão estática, que a espessura da placa, a orientação do corte dos CP's em relação às fibras externas do compensado e a posição do CP na máquina de ensaio foram determinantes para influenciar nos resultados obtidos. Os CP's de placas com maior espessura (18,3 mm) e extraídos com cortes longitudinais, ou seja, paralelo às suas fibras externas na direção do comprimento de 2440 mm da placa, apresentaram maior resistência à flexão. Os resultados desses ensaios corroboram as conclusões de Iwakiri *et al.* (2012) que apresentaram resultados superiores para a resistência à tração na flexão estática ($\sigma_{m\acute{a}x}$) e o módulo de elasticidade (E) para as placas com corte longitudinal quando comparados com os resultados das placas com corte transversal às fibras externas da madeira. No entanto, Silva (2017) apresentou resultados com valores maiores de tais parâmetros para as placas de compensado naval com corte transversal em relação às placas com corte longitudinal.

Nos 144 ensaios de espécimes realizados para determinar o comportamento das ligações do sistema *Light Steel Framing* e as placas de compensado estrutural, por intermédio de ensaios do tipo *push test*, foi observado que houve certa influência da direção do corte da placa de compensado em relação às suas fibras externas. As séries com corte longitudinal nas placas apresentaram, em geral, maior força máxima por parafuso ($P_{m\acute{a}x}$ Parafuso) e rigidez por ligação (Ke), assim como Fuentes *et al.* (2014) comprovaram em sua pesquisa. As séries com

placas de 18,3 mm de espessura apresentaram maior rigidez (K_e) e as séries com placas de 11,1 mm apresentaram maior força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}} \text{ Parafuso}$), isso pode ser devido ao modo de ruptura denominado *pull out*, muito frequente nos ensaios com placas de compensado estrutural com 18,3 mm de espessura, que, com esta dimensão, não permitiam uma maior capacidade de deformação (ductilidade) das ligações entre os perfis de aço e as referidas placas. Além disso, os parafusos utilizados tinham o mesmo comprimento total, tanto nos ensaios dos espécimes com placas de 11,1 mm quanto nos ensaios com placas de 18,3 mm. Isso fez com que tais parafusos instalados nas placas de 18,3 mm apresentassem menor comprimento após traspasse pelas chapas de aço e, desta forma, eram arrancados com maior facilidade dos perfis, fazendo com que a força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}} \text{ Parafuso}$) fosse menor que a das séries com placas de 11,1 mm. Diante disso, recomenda-se que as placas de 18,3 mm sejam utilizadas com parafusos de maior comprimento e maior resistência à tração.

As séries com perfis de aço com espessura de chapa de 0,95 mm suportaram maior força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}} \text{ Parafuso}$) e as com chapa de 0,80 mm de espessura apresentaram maior rigidez por ligação (K_e). Quanto ao espaçamento entre os parafusos é possível perceber que quanto mais ligações são utilizadas, maior a capacidade do sistema em suportar incrementos de força, como mostram Tian *et al.* (2004), Fuentes *et al.* (2014), Hatami *et al.* (2014) e Shahi *et al.* (2014) em suas pesquisas. No entanto, quanto menor a quantidade de ligações, maior é a solicitação por parafuso em suportar maiores valores de força, como observado na pesquisa realizada por Datchoua (2018). Além disso, os espécimes que compunham o modelo M2 atingiram maiores valores de força máxima por parafuso ($P_{\text{máx}} \text{ Parafuso}$) e maior rigidez por ligação (K_e).

Os valores de força máxima total ($P_{\text{máx}} \text{ Total}$) e da energia dissipada (A) foram, em geral, diretamente relacionados aos valores da força máxima alcançada por parafuso ($P_{\text{máx}} \text{ Parafuso}$), enquanto os valores da ductilidade (μ) foram diretamente relacionados aos valores de rigidez (K_e).

Por ser um material em que há assimetria em suas propriedades e devido à qualidade do compensado estrutural estudado, os resultados analisados foram muitas vezes dispersos, dificultando a análise dos resultados obtidos. Apesar disso, as técnicas utilizadas para a realização dos ensaios foram eficientes, com exceção do ensaio de flexão feito com o corpo

de prova na posição vertical, no qual houve um afundamento na placa de compensado sob o efeito do aparelho de aplicação de carga, e do ensaio de *push test* utilizado para o Modelo M3, em que se recomenda aprimorar o dispositivo utilizado nas futuras pesquisas.

Diante disso, tais resultados servirão de contribuição para futuras pesquisas acerca do efeito diafragma dos painéis de cisalhamento utilizando neles o compensado estrutural para o contraventamento das paredes, uma vez que a resistência do painel de cisalhamento está relacionada, dentre outros parâmetros, com a força máxima atingida por parafuso e a rigidez da ligação do sistema, bem como com a flexão do painel, ou seja, o módulo de elasticidade (E). Além disso, promover o uso de placas de compensado estrutural no sistema construtivo LSF contribui para uma construção mais sustentável em relação ao uso de outros materiais.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com o intuito de dar continuidade às pesquisas relacionadas ao comportamento das paredes de cisalhamento do sistema construtivo *Light Steel Framing* e promover o uso desse sistema no País, principalmente em edifícios de interesse social, têm-se as seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- a) Realizar ensaios de cisalhamento nas placas de compensado estrutural a fim de determinar o módulo de elasticidade transversal (G) e o coeficiente de Poisson (ν);
- b) Realizar ensaios em painéis de cisalhamento com placas de compensado estrutural em escala real para a verificação da força lateral suportada, bem como a realização de estudos computacionais, para a realização de estudos paramétricos visando à proposição de soluções analíticas para o dimensionamento prático das paredes de cisalhamento e sua inclusão em futuras normas técnicas brasileiras.
- c) Analisar o comportamento do painel de cisalhamento com placas de compensado estrutural em situação de incêndio.
- d) Realizar uma comparação entre o comportamento da ligação do sistema *Light Steel Framing* com diversos tipos de placas de revestimento.

6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, R. *Lavrasul S/A - Compensados e laminados*. 2018. Disponível em: <http://www.lavrasul.com.br/sustentabilidade/> Acesso em: 23 fev. 2018.

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE, A. S213-07/S1-09 - *North American Standard for Cold-Formed Steel Framing - Lateral Design 2007 Edition with Supplement No. 1*. Washington, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. *Compensado de Pinus* – Catálogo Técnico nº 1. Curitiba, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE. *Estudo Setorial 2004*. Curitiba, 2005.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 9488. *Amostragem de compensado para ensaio - Requisitos*. 2a. ed. Rio de Janeiro, 2011. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 9533. *Compensado: Determinação da resistência à flexão estática*. 2a. ed. Rio de Janeiro, 2012. 5 p.

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.

BASTOS, E.F. *Caracterização Física e Mecânica de Pannel de OSB do Tipo FORM*. Dissertação de Mestrado. 2009. 131p. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - Departamento de Estruturas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.

BEVILAQUA, R. *Estudo Comparativo do Desempenho Estrutural de Prédios Estruturados em Perfis Formados a Frio Segundo os Sistemas Aporticado e "Light Steel Framing"*. Dissertação de Mestrado. 2005. 247p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas - Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

BREDEL, D.H. JR. *Performance Capabilities of Light-Frame Shear Walls Sheathed With Long OSB Panels*. Dissertação de Mestrado. 2003. 228p. Polytechnic Institute and State University, Virginia, Estados Unidos (EUA).

COMPENSADOS GUARAPLY GUARARAPES. 2018. Disponível em: <http://www.guararapes.com.br/compensados-guaraply/#certificacoes>. Acesso em: 23 fev. 2018.

CONSULSTEEL. *Manual de Procedimiento: Construcción con Steel Framing*. Buenos Aires: ConsulSteel, 2002. 303p.

CRASTO, R.C.M; FREITAS, A.M.S.; SANTIAGO, A.K. *Steel Framing: Arquitetura*. 2ª edição. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia - Centro Brasileiro da Construção em Aço (CBCA), 2012. 151p.

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*. Dissertação de Mestrado. 2018. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas - Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

DEL MENEZZI, C.H.S. *Estabilização dimensional por meio do tratamento térmico e seus efeitos sobre as propriedades de painéis de partículas orientadas (OSB)*. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), UFPR, Curitiba-PR, 2004, 226p.

- DIAS, F. M. *Aplicação de Resina Poliuretana à Base de Mamona na Fabricação de Painéis de Madeira Aglomerada*. Tese Doutorado (Ciência e Engenharia de Materiais). 2005. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.
- DIAS, G. L. *Estudo Experimental de Paredes Estruturais de Sistema Leve em Madeira (Sistema Plataforma) Submetidas a Força Horizontal no seu Plano*. Tese de Doutorado. 2005. 165p. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
- EISFELD, C. L.; BERGER, R. Análise das Estruturas de Mercado das Indústrias de Painéis de Madeira (Compensado, MDF e OSB) no Estado do Paraná. *Revista Floresta*, Curitiba, v. 42, n. 1, p. 21-34, jan./mar. 2012.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION EN 1994-1-1. *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings*. Bruxelas, Bélgica, 2004.
- FUENTES, S.; FOURNELLY, E.; PITTI, R.M.; BOUCHAR, A. Impact of Semi-rigidity of Joint on Timber Composite Truss Beam. In: Tandon, G.P. *et. al. Experimental Mechanics of Composite, Hybrid, and Multifunctional Materials*. United States, Vol. 6. 2014. p. 9-16.
- HATAMI, S.; RAHMANI, A.; PARVANEH, A.; RONAGH, H.; (2014). A Parametric Study On Seismic Characteristics of Cold-Formed Steel Shear Walls by Finite Element Modeling. *Advanced Steel Construction – an International Journal*, Hong Kong Institute of Steel Construction, Hong Kong, v. 10, p. 53-71. 2014.
- IWAKIRI, S.; KEINERT, S.; PRATA, J. G.; ROSSO, S. Produção De Paineis Compensados Estruturais De *Eucalyptus Grandis* e *Eucalyptus Dumnii*. *Revista Floresta*, Curitiba, v. 37, n. 3, set. /dez. 2007.
- MELO, R. R. Estabilidade dimensional de compostos de madeira. *Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*. Pelotas, Rio Grande do Sul, v. 4, n. 2, p. 152-175, nov. 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/cienciadamadeira/article/viewFile/4060/3204>. Acesso em: 17 julho de 2018.
- MONTEIRO, P. J. M.; MILLER, S. A.; HORVATH, A. Towards sustainable concrete. *Nature Materials*, v.16, Davis, USA, julho 2017.
- RODRIGUES, F.C.; CALDAS, R.B. *Steel Framing: Engenharia*. 2a edição revisada. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia - Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2016. 224p.
- REMADE. *Revista da Madeira: OSB Oferece Resistência Para Múltiplos Usos*. Edição no 97. Junho, 2006.
- SERRETTE, R.; ENCALADA, J.; JUADINES, M.; NGUYEN, H. Static racking behavior of plywood, OSB, gypsum, and fiberboard walls with metal framing. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, número 8. ASCE, Reston, USA, 1997.
- SHAHI, R.; LAM, N.; GAD, E.; SAIFULLAH, I.; WILSON, J. *In-Plane Behavior of Cold-Formed Steel-Framed Shear Wall Panels Sheathed with Fibre Cement Board*. 22nd International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. Saint Louis: Missouri University of Science and Technology. USA 2014. p. 809-823.
- SILVA, R. L. *Comparativo da placa de OSB Home Plus com a placa de compensado naval como contraventamento e fechamento vertical externo do sistema Light Steel Framing*, 2017, 81f, Centro Universitário Planalto do Distrito Federal (UNIPLAN), Brasília, 2017.
- TIAN, Y. S.; WANG, J.; LU, T. J. Racking Strength and Stiffness of Cold-Formed Wall Frames. *Journal of Constructional Steel Research*. Cambridge, v. 60, p. 1069-1093. 2004.
- 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*. Dissertação de Mestrado. 2015. 176p. Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Estruturas - Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- VITOR, R. O. *Modelagem Numérica de Diagonais Equivalentes em Painéis de Cisalhamento do Sistema Light Steel Framing*. Belo Horizonte: Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais – Escola de Engenharia, 111 p, 2012.

APÊNDICE A

GRÁFICOS DE FORÇA *VERSUS* DESLOCAMENTO, CURVA TEÓRICA E CURVA SUAVIZADA

Os gráficos de força *versus* deslocamento com a curva teórica (EEEP) de todos os espécimes ensaiados por meio de ensaios do tipo *push test* estão contidos neste apêndice, assim como as curvas suavizadas obtidas por meio da redução de densidade e da suavização pelo topo da curva original de cada espécime. Os gráficos foram utilizados para os cálculos dos parâmetros discutidos neste trabalho.

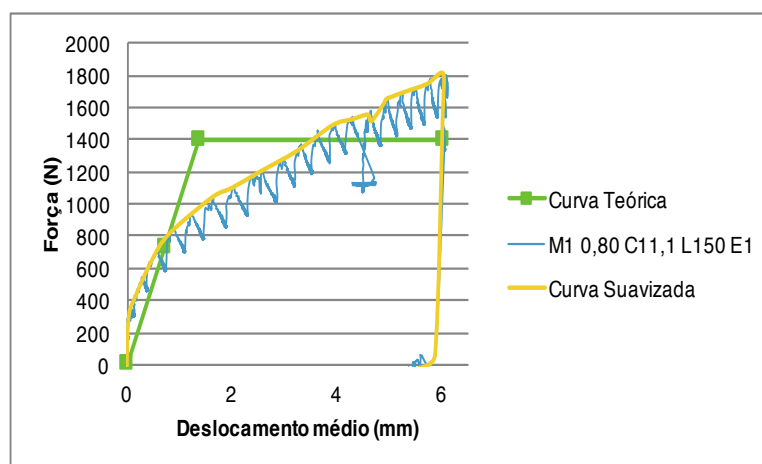


Figura 1 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C11,1 L150 E1” e curva teórica (EEEP)

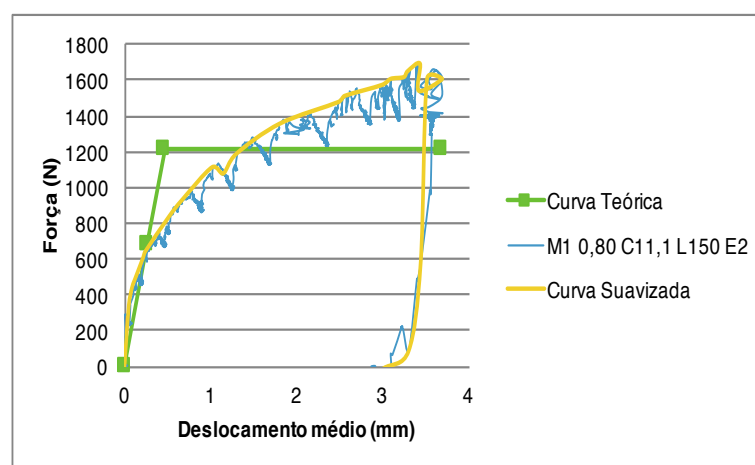


Figura 2 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C11,1 L150 E2” e curva teórica (EEEP)

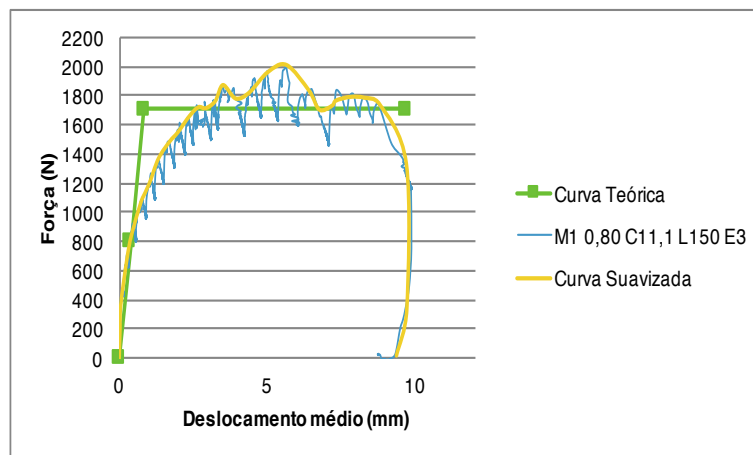


Figura 3 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C11,1 L150 E3” e curva teórica (EEEP)

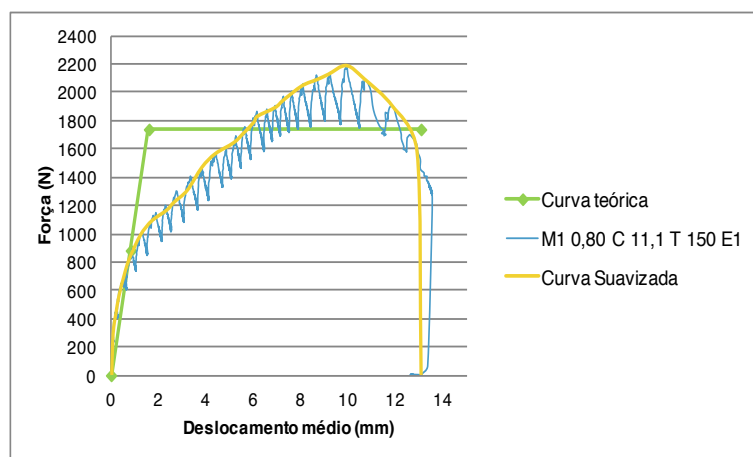


Figura 4 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C 11,1 T 150 E1” e curva teórica (EEEP)

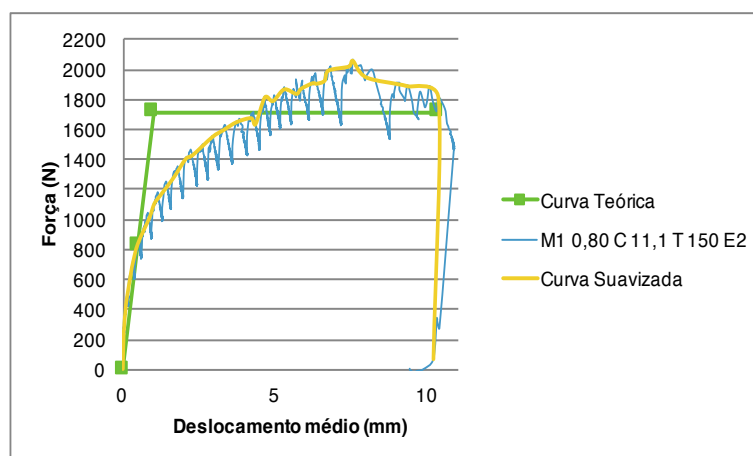


Figura 5 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C11,1 T150 E2” e curva teórica (EEEP)

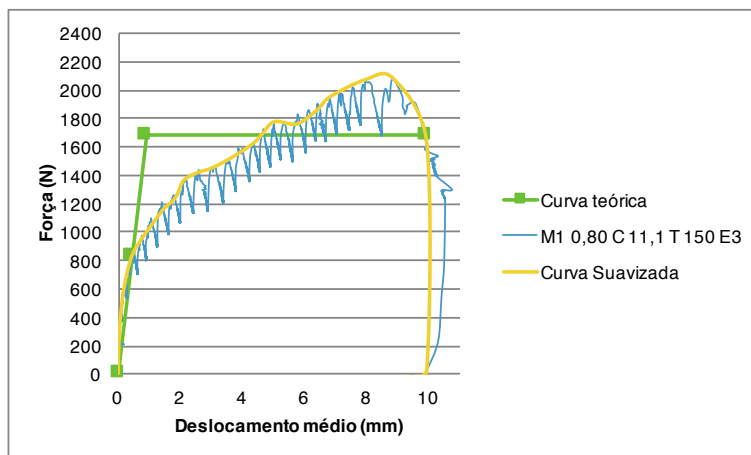


Figura 6 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C11,1 T150 E3” e curva teórica (EEEEP)

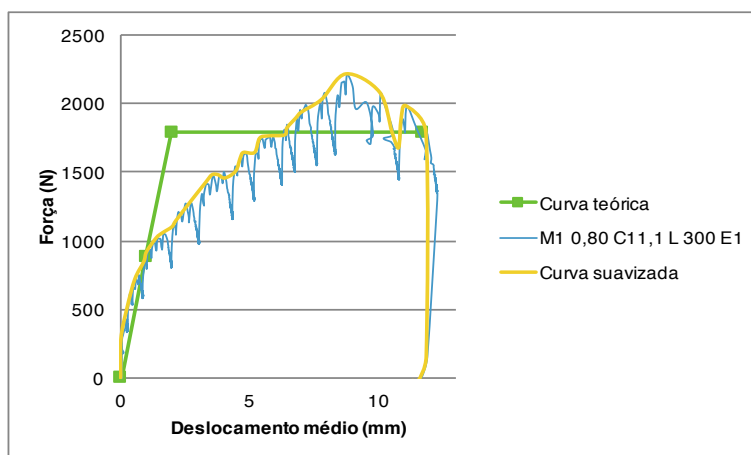


Figura 7 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C11,1 L300 E1” e curva teórica (EEEEP)

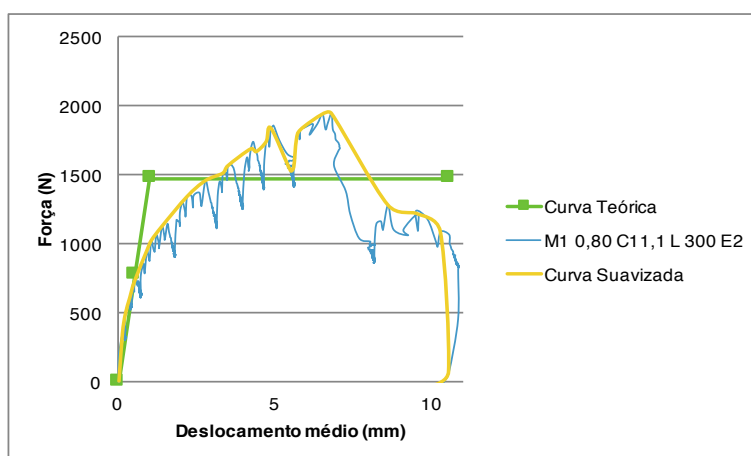


Figura 8 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C11,1 L300 E2” e curva teórica (EEEEP)

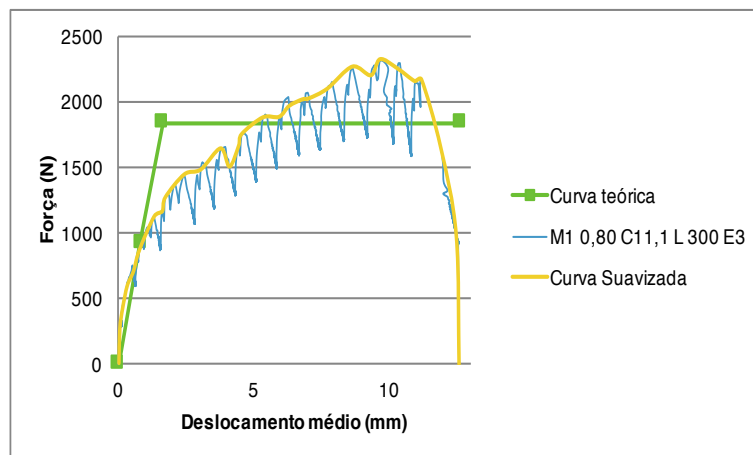


Figura 9 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C11,1 L300 E3” e curva teórica (EEEP)

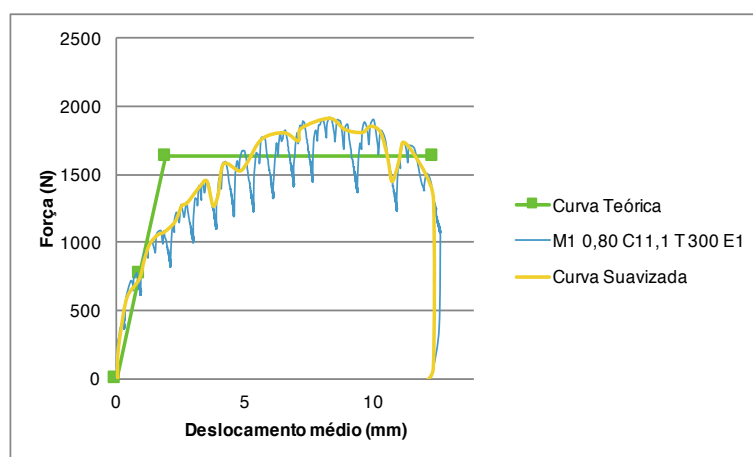


Figura 10 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C11,1 T300 E1” e curva teórica (EEEP)

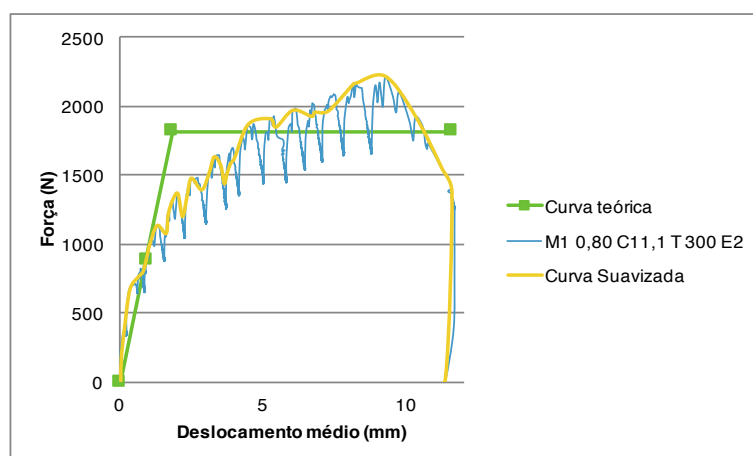


Figura 11 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C11,1 T300 E2” e curva teórica (EEEP)

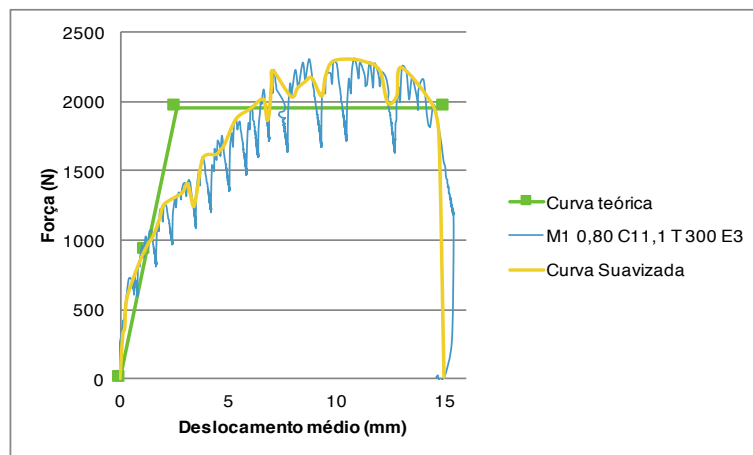


Figura 12 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C11,1 T300 E3” e curva teórica (EEEP)

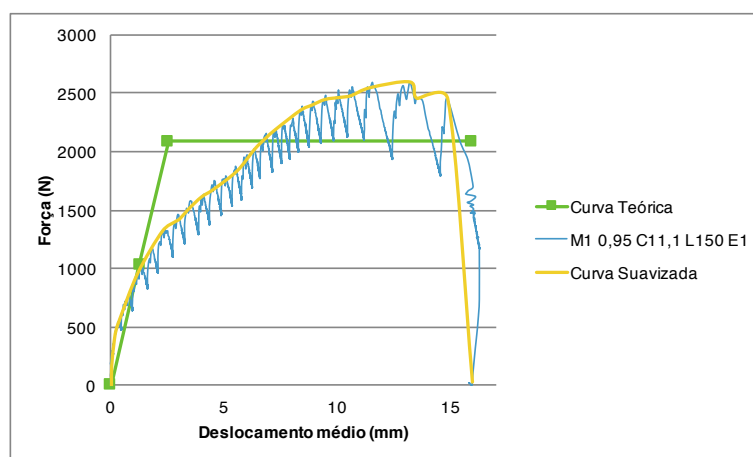


Figura 13 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C11,1 L150 E1” e curva teórica (EEEP)

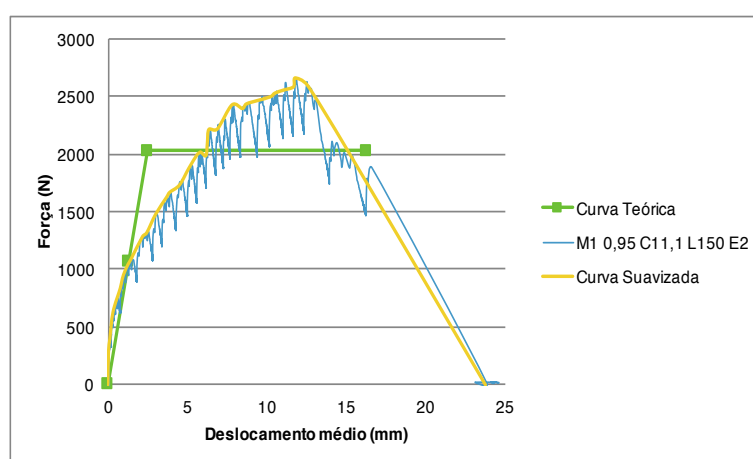


Figura 14 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C11,1 L150 E2” e curva teórica (EEEP)

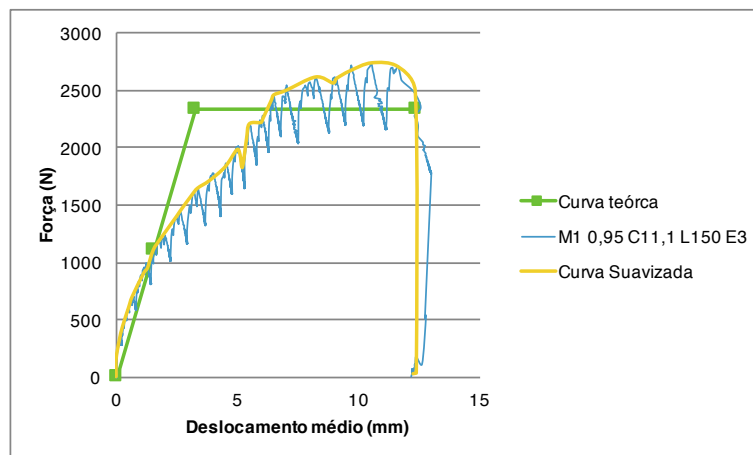


Figura 15 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C11,1 L150 E3” e curva teórica (EEEP)

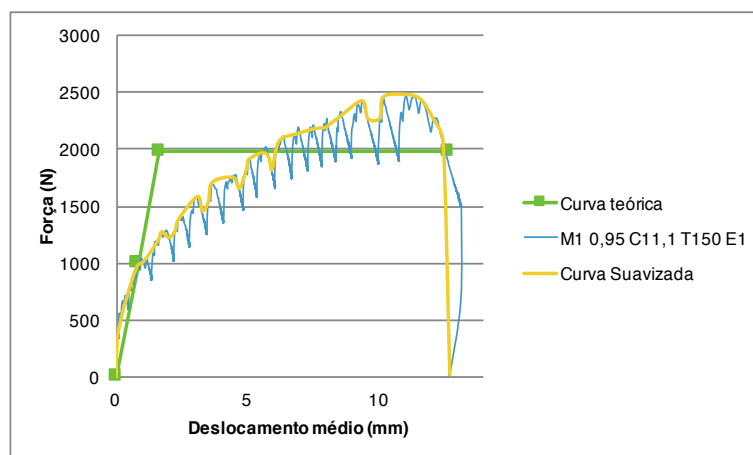


Figura 16 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C11,1 T150 E1” e curva teórica (EEEP)

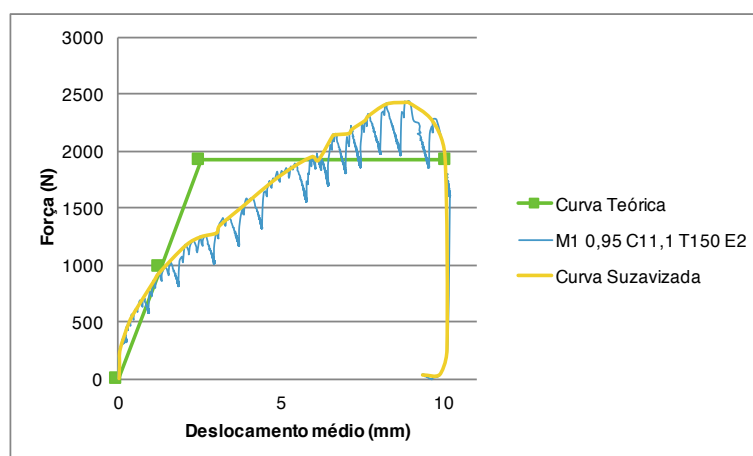


Figura 17 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C11,1 T150 E2” e curva teórica (EEEP)

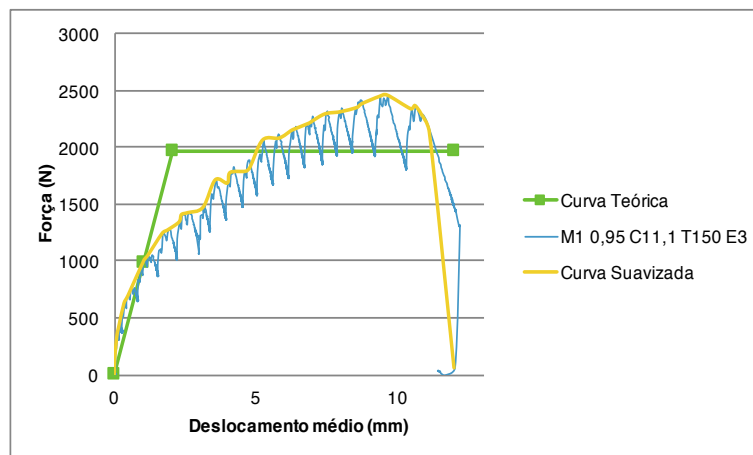


Figura 18 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C11,1 T150 E3” e curva teórica (EEEP)

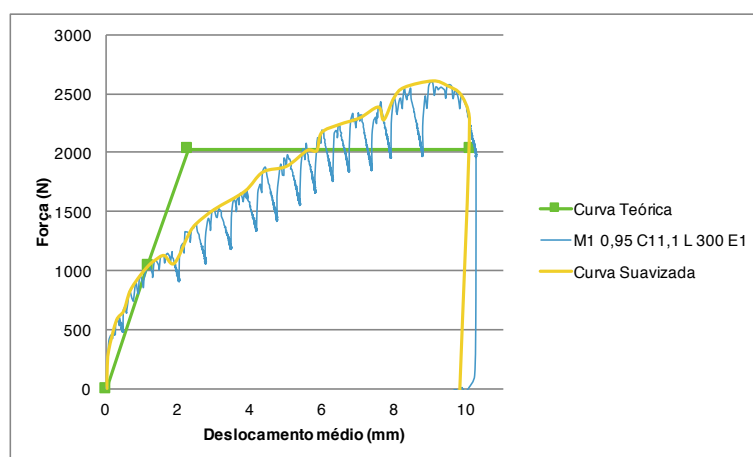


Figura 19 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C11,1 L300 E1” e curva teórica (EEEP)

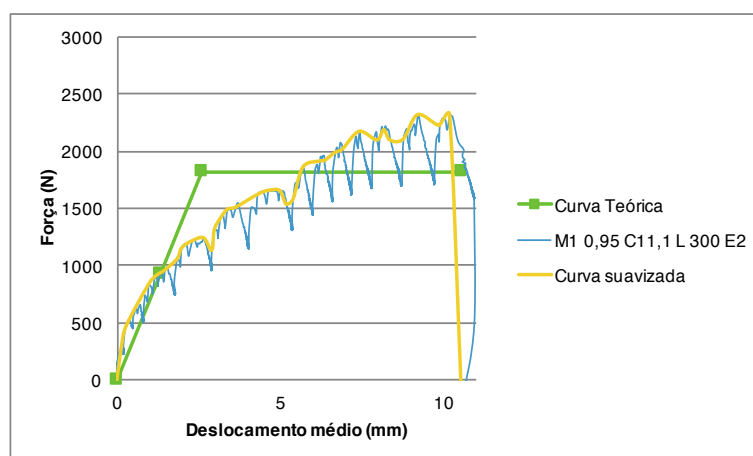


Figura 20 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C11,1 L300 E2” e curva teórica (EEEP)

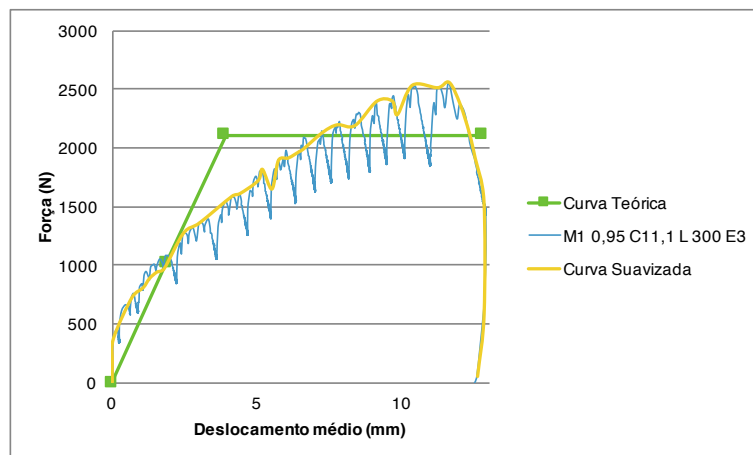


Figura 21 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C11,1 L300 E3” e curva teórica (EEEP)

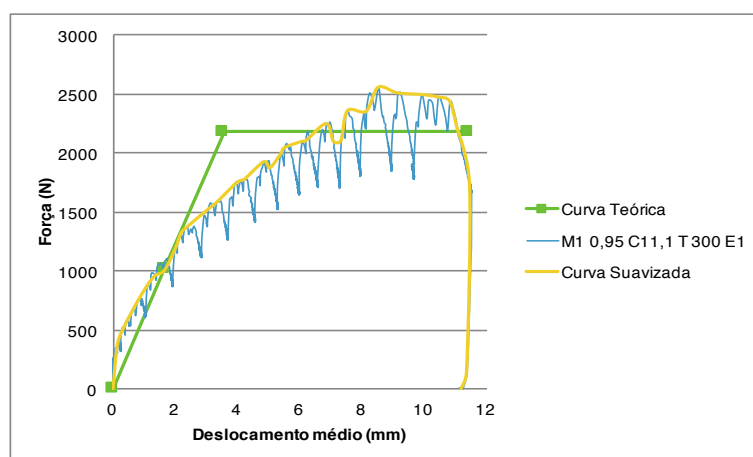


Figura 22 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C11,1 T300 E1” e curva teórica (EEEP)

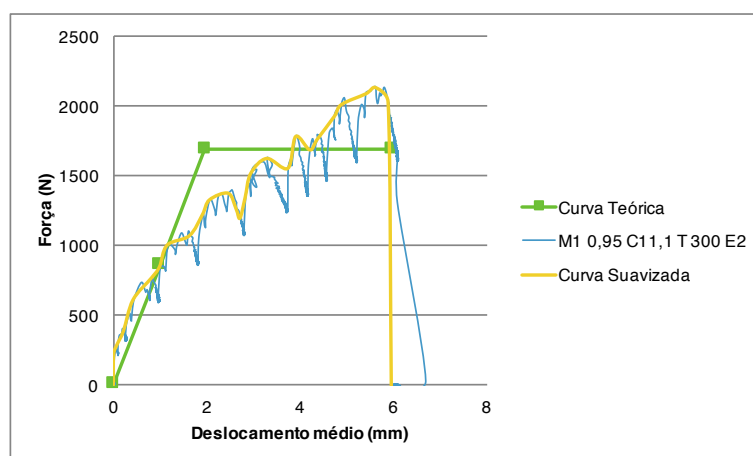


Figura 23 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C11,1 T300 E2” e curva teórica (EEEP)

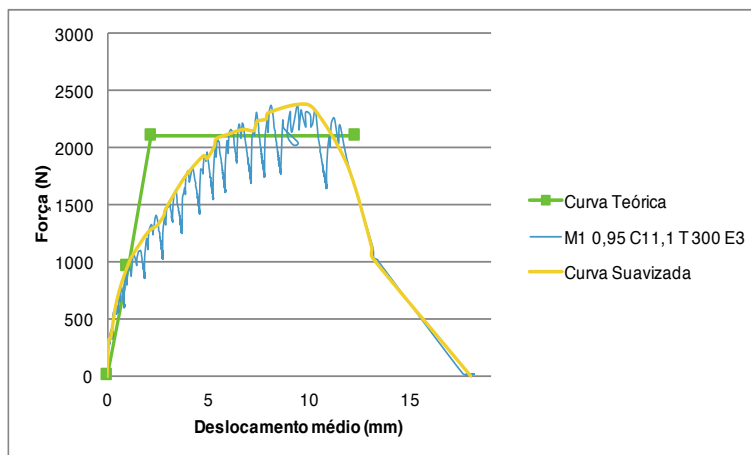


Figura 24 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C11,1 T300 E3” e curva teórica (EEEP)

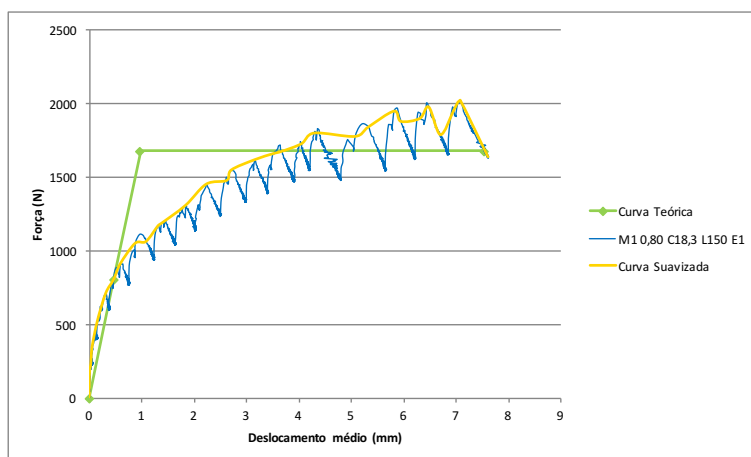


Figura 25 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C18,3 L150 E1” e curva teórica (EEEP)

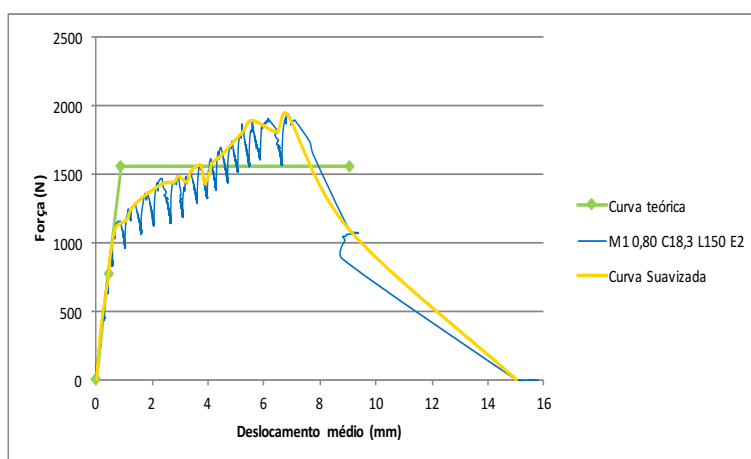


Figura 26 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C18,3 L150 E2” e curva teórica (EEEP)

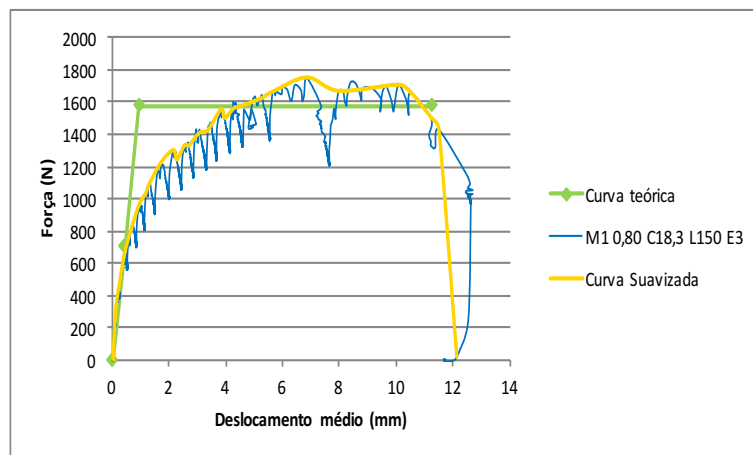


Figura 27 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C18,3 L150 E3” e curva teórica (EEEP)

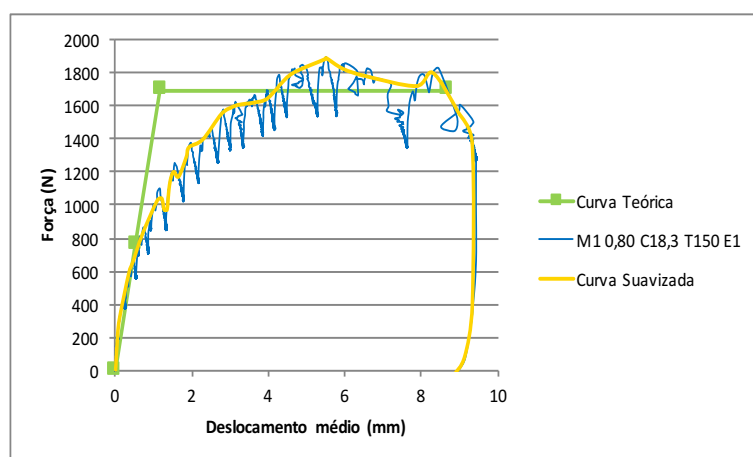


Figura 28 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C18,3 T150 E1” e curva teórica (EEEP)

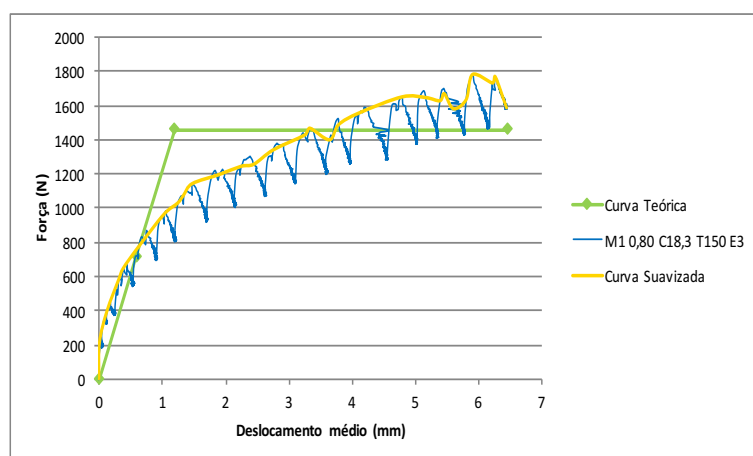


Figura 29 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C18,3 T150 E3” e curva teórica (EEEP)

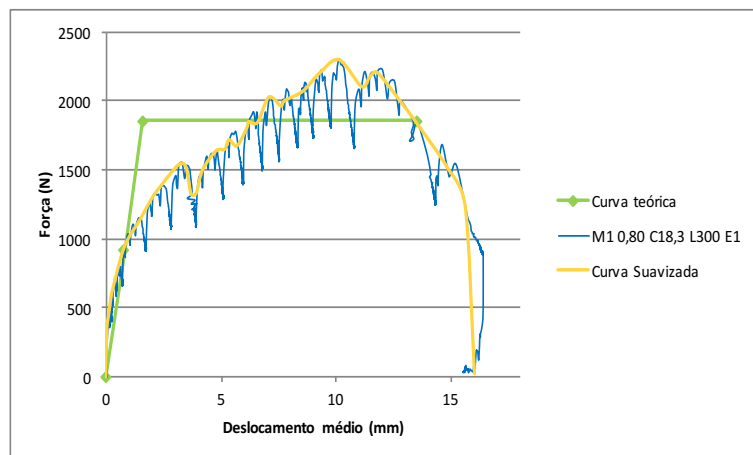


Figura 30 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C18,3 L300 E1” e curva teórica (EEEP)

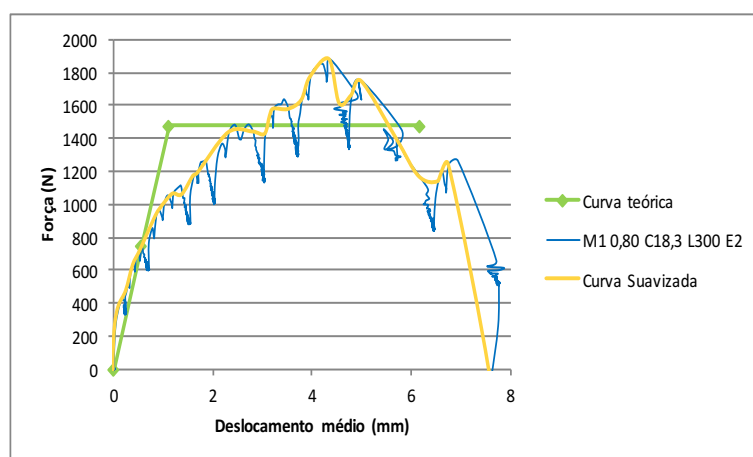


Figura 31 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C18,3 L300 E2” e curva teórica (EEEP)

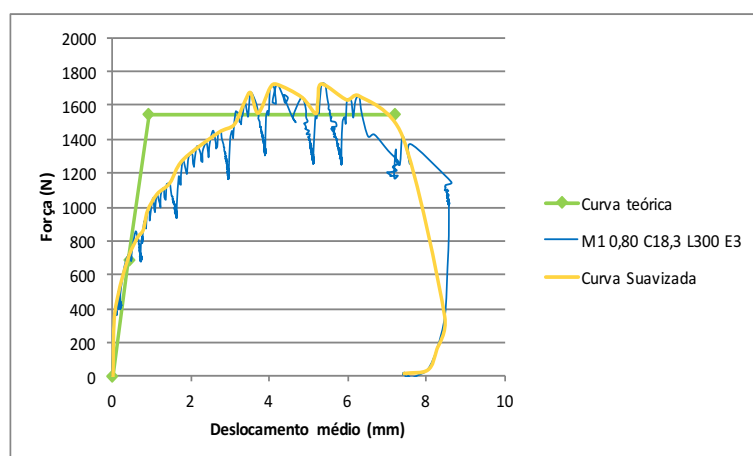


Figura 32 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C18,3 L300 E3” e curva teórica (EEEP)

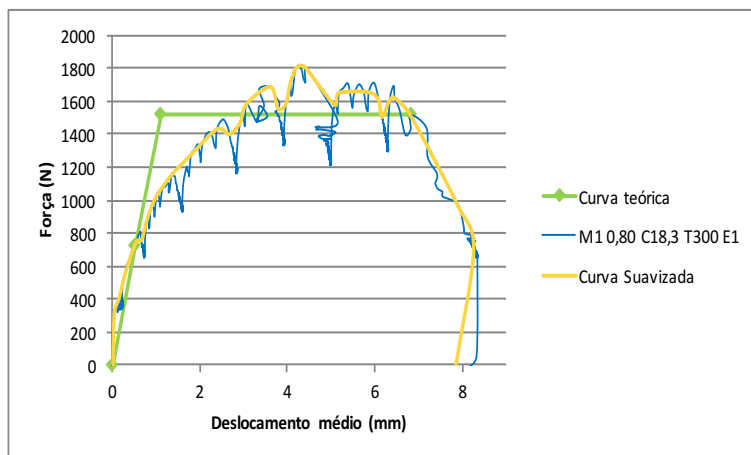


Figura 33 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C18,3 T300 E1” e curva teórica (EEEP)

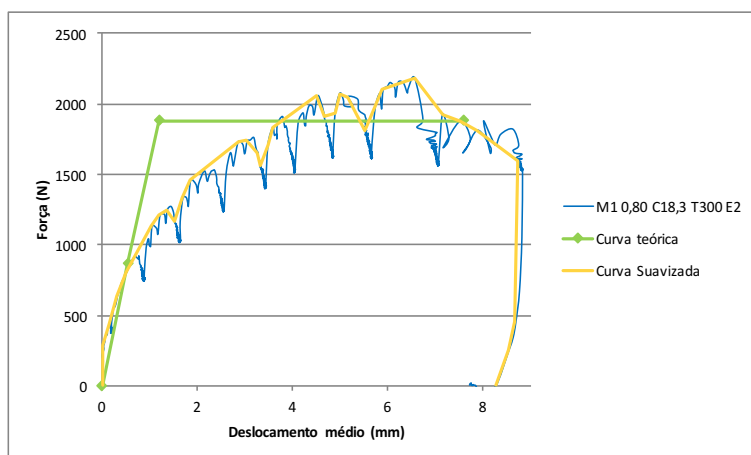


Figura 34 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C18,3 T300 E2” e curva teórica (EEEP)

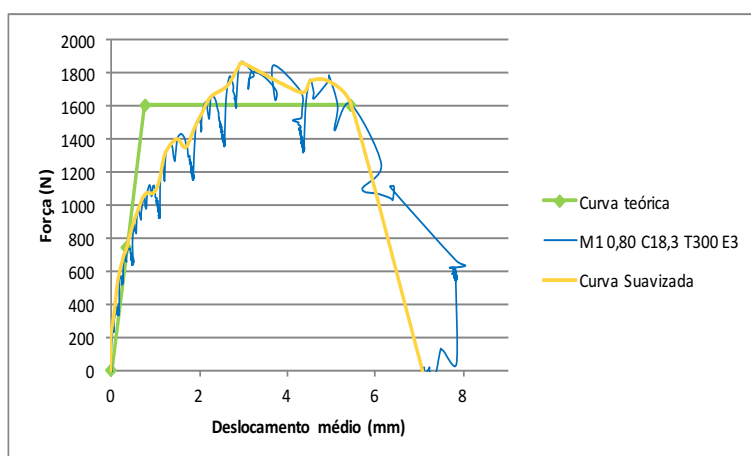


Figura 35 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,80 C18,3 T300 E3” e curva teórica (EEEP)

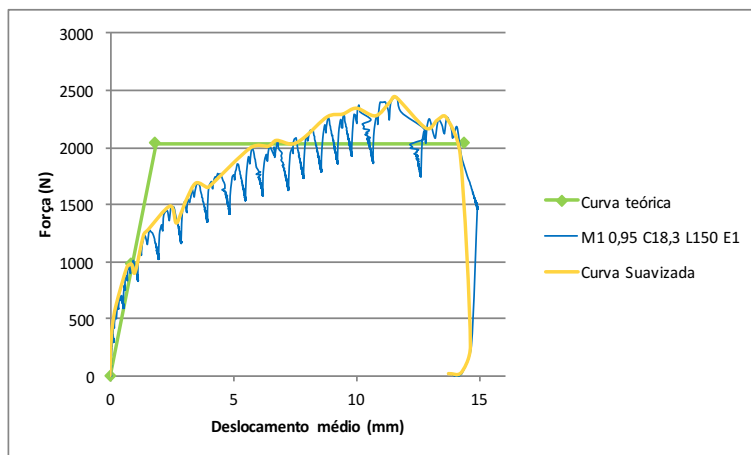


Figura 36 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C18,3 L150 E1” e curva teórica (EEEP)

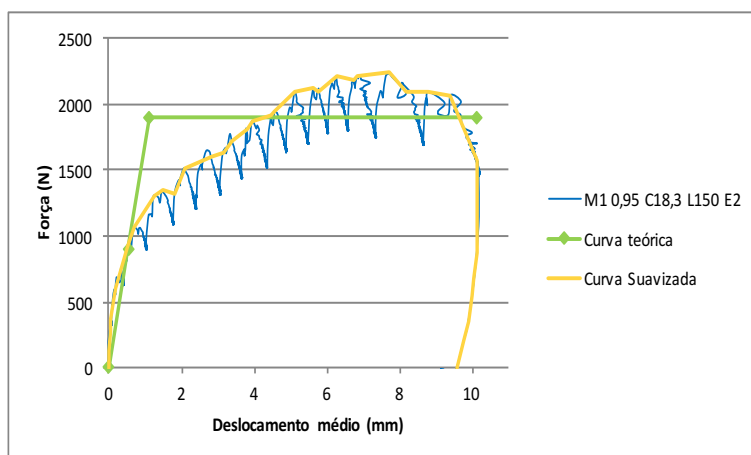


Figura 37 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C18,3 L150 E2” e curva teórica (EEEP)

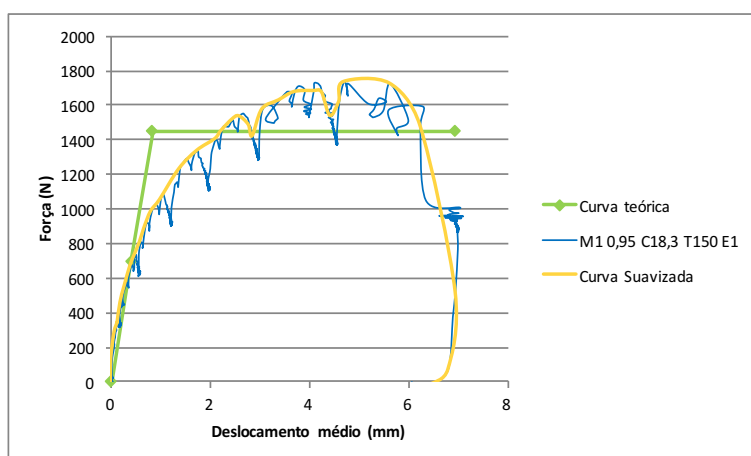


Figura 38 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C18,3 T150 E1” e curva teórica (EEEP)

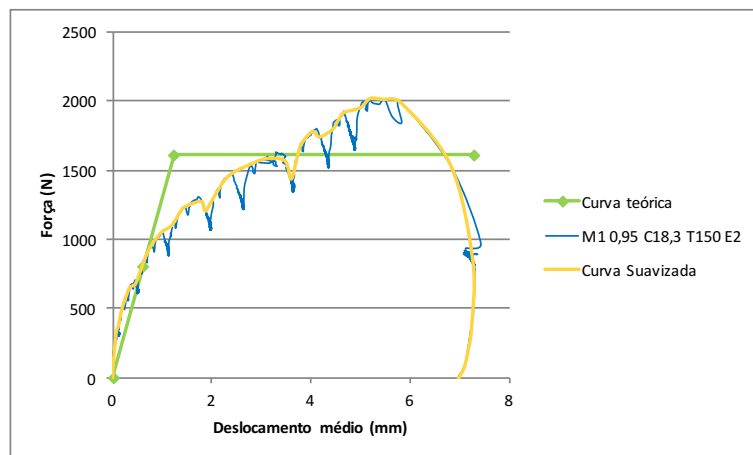


Figura 39 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C18,3 T150 E2” e curva teórica (EEEP)

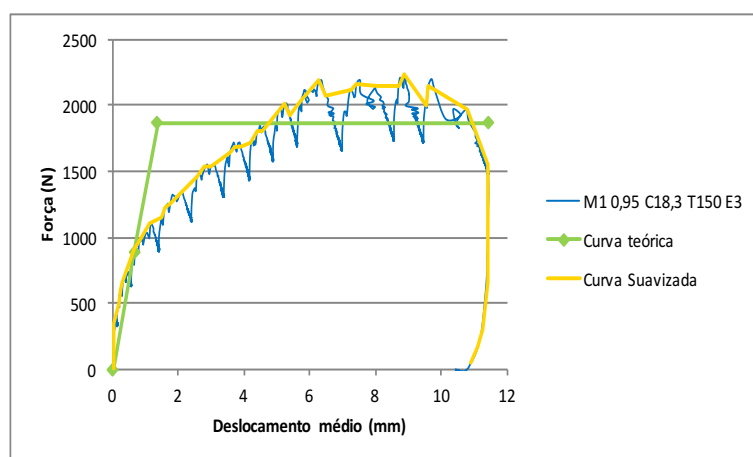


Figura 40 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C18,3 T150 E3” e curva teórica (EEEP)

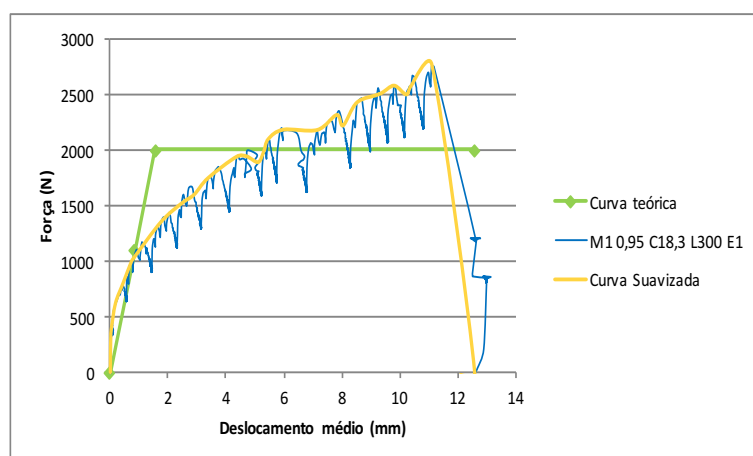


Figura 41 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C18,3 L300 E1” e curva teórica (EEEP)

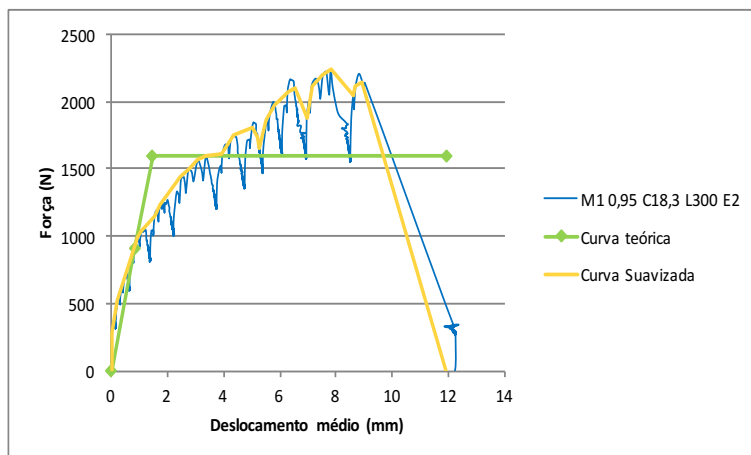


Figura 42 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C18,3 L300 E2” e curva teórica (EEEP)

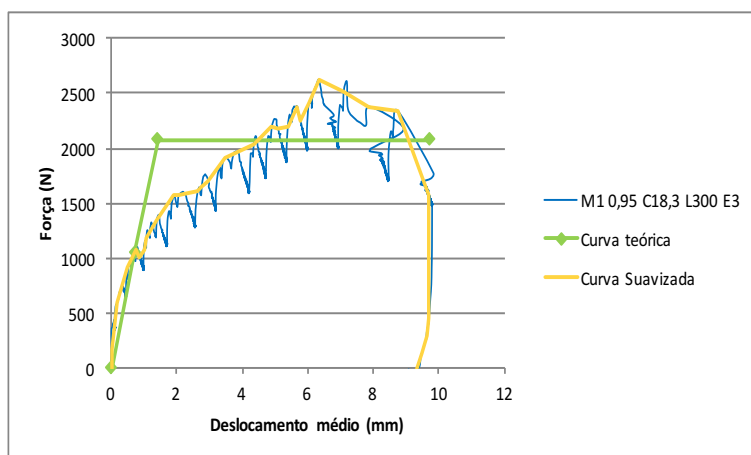


Figura 43 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C18,3 L300 E3” e curva teórica (EEEP)

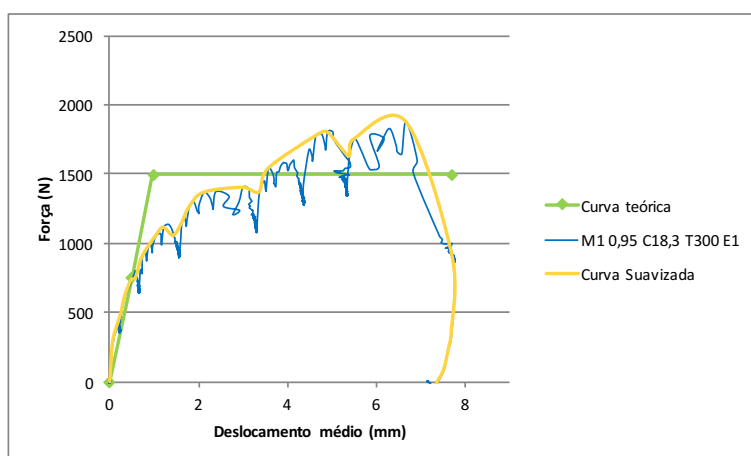


Figura 44 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C18,3 T300 E1” e curva teórica (EEEP)

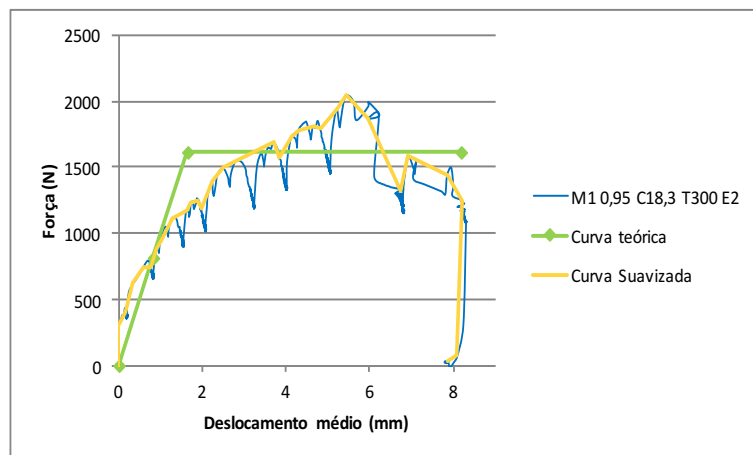


Figura 45 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C18,3 T300 E2” e curva teórica (EEEP)

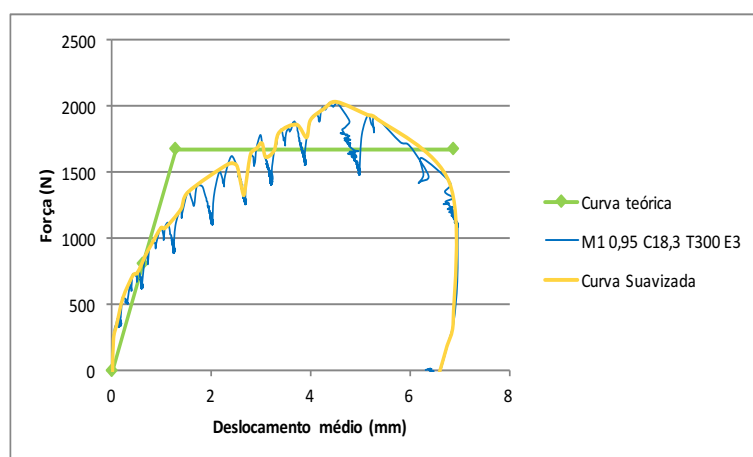


Figura 46 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M1 0,95 C18,3 T300 E3” e curva teórica (EEEP)

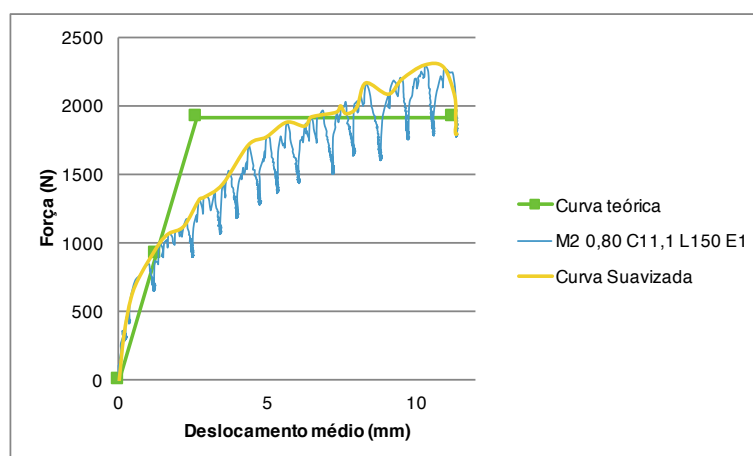


Figura 47 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C11,1 L150 E1” e curva teórica (EEEP)

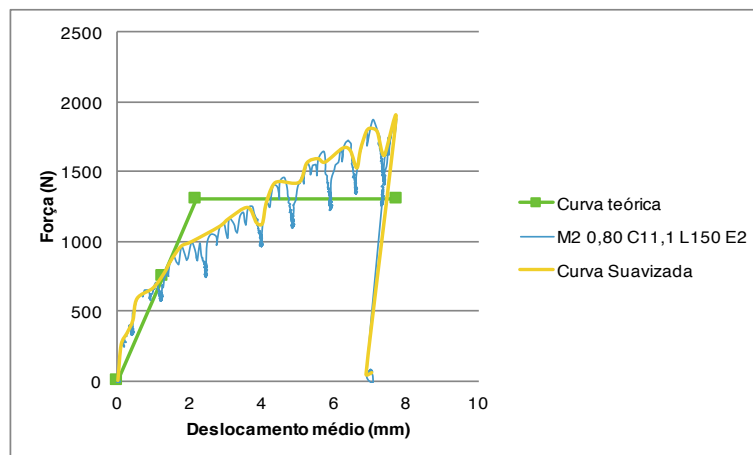


Figura 48 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C11,1 L150 E2” e curva teórica (EEEP)

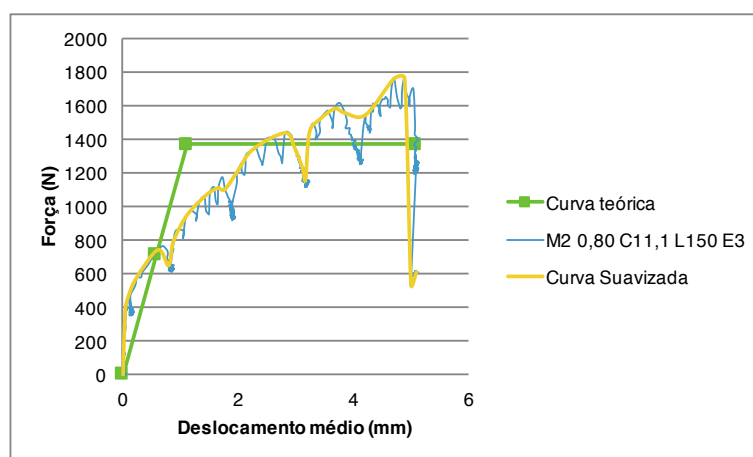


Figura 49 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C11,1 L150 E3” e curva teórica (EEEP)

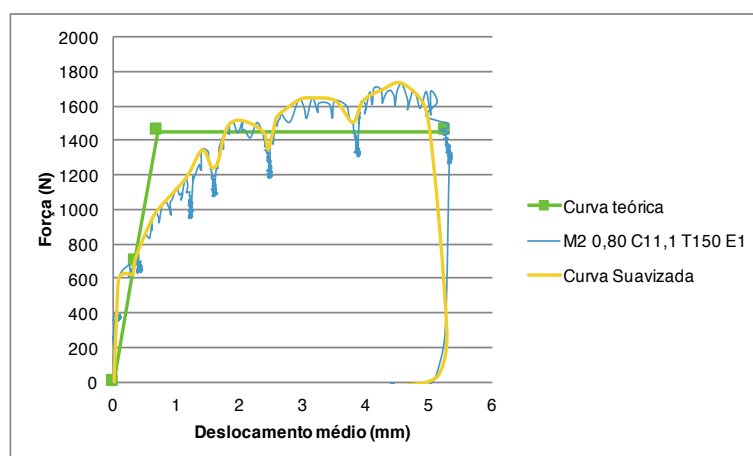


Figura 50 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C11,1 T150 E1” e curva teórica (EEEP)

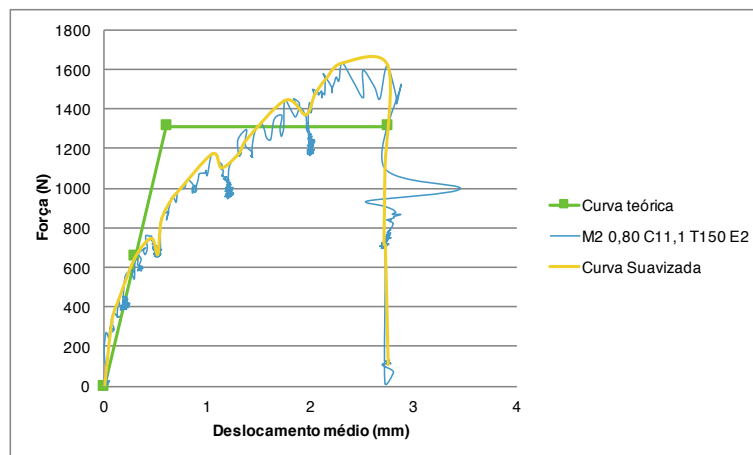


Figura 51 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C11,1 T150 E2” e curva teórica (EEEP)

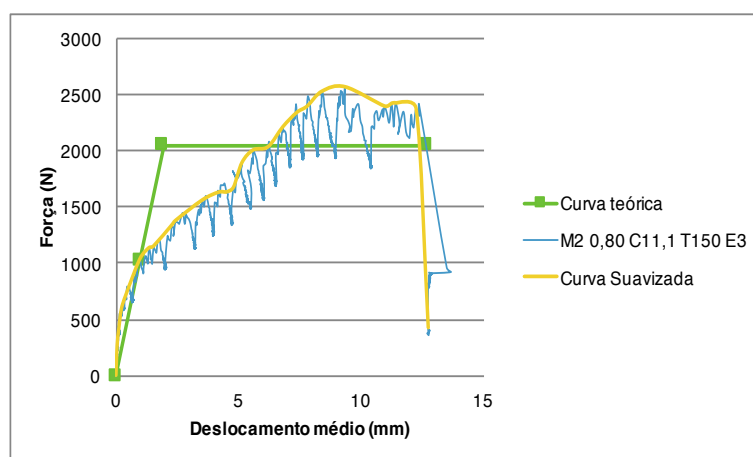


Figura 52 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C11,1 T150 E3” e curva teórica (EEEP)

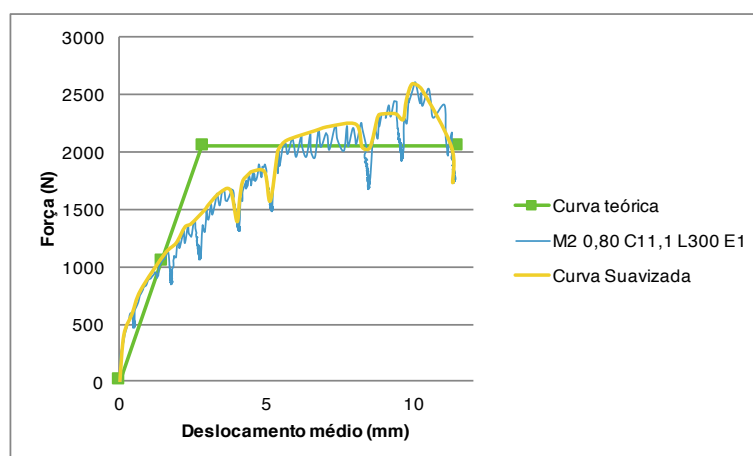


Figura 53 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C11,1 L300 E1” e curva teórica (EEEP)

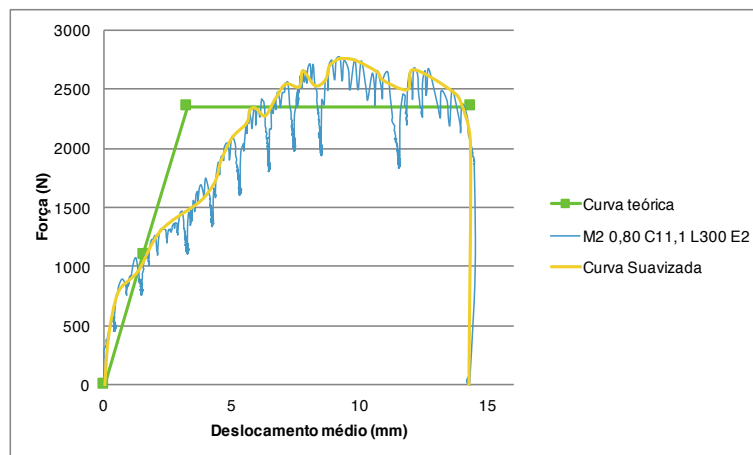


Figura 54 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C11,1 L300 E2” e curva teórica (EEEP)

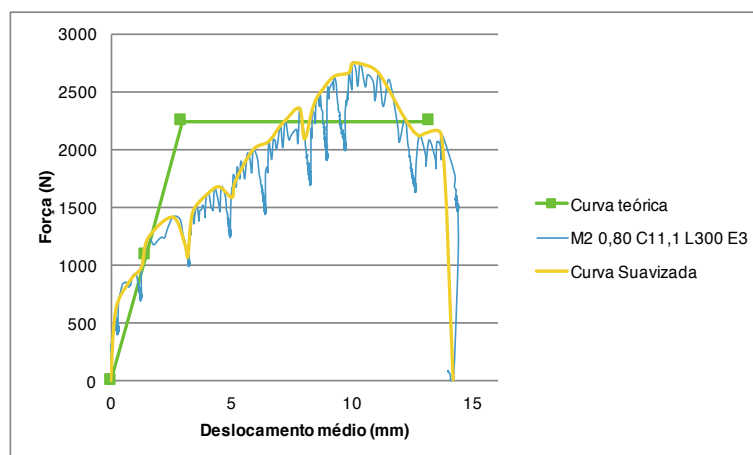


Figura 55 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C11,1 L300 E3” e curva teórica (EEEP)

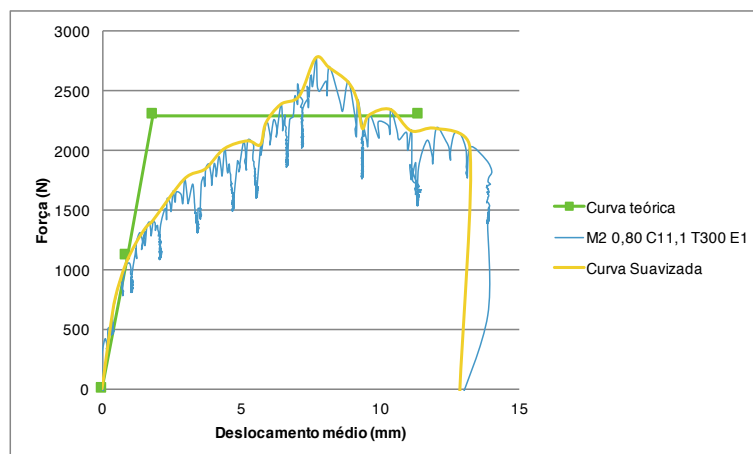


Figura 56 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C11,1 T300 E1” e curva teórica (EEEP)

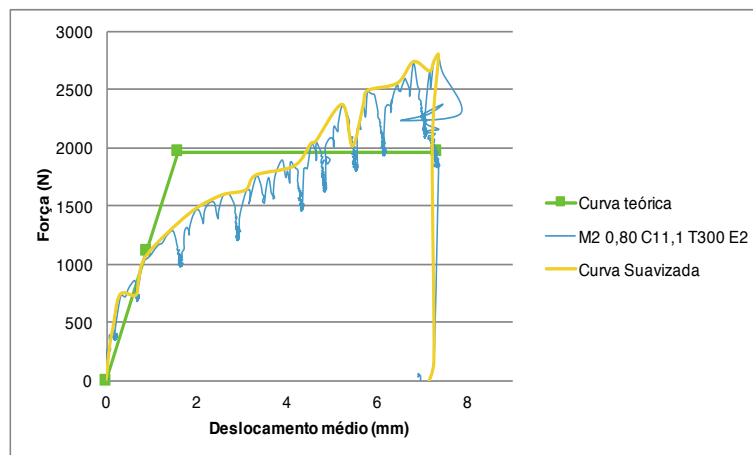


Figura 57 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C11,1 T300 E2” e curva teórica (EEEP)

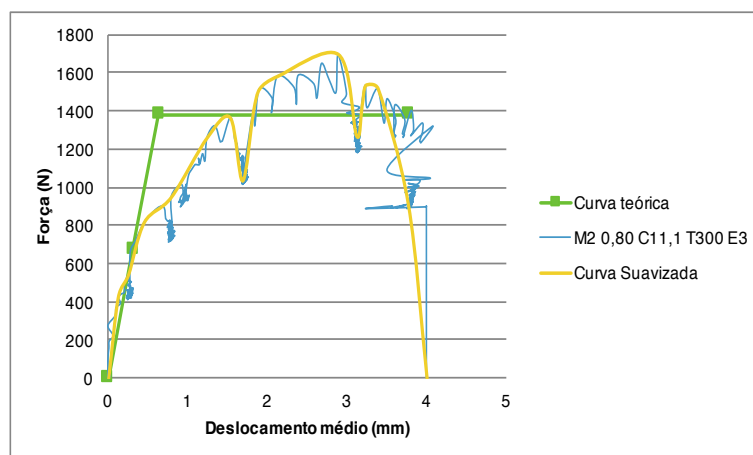


Figura 58 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C11,1 T300 E3” e curva teórica (EEEP)

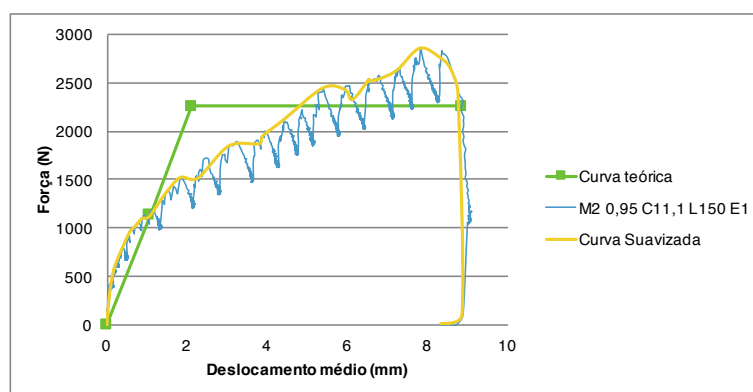


Figura 59 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C11,1 L150 E1” e curva teórica (EEEP)

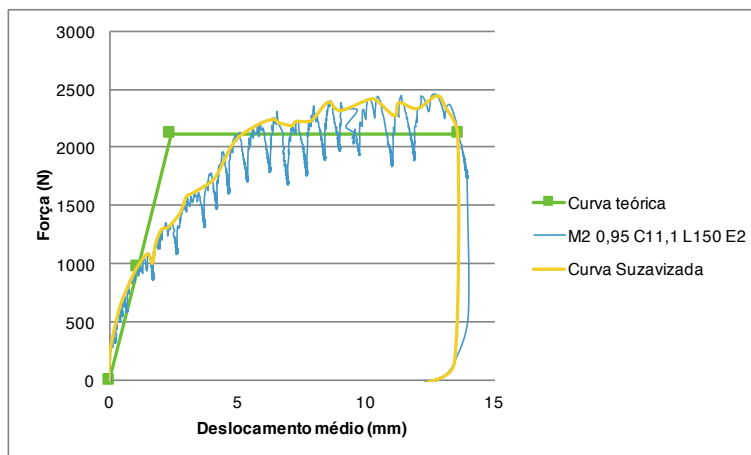


Figura 60 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C11,1 L150 E2” e curva teórica (EEEP)

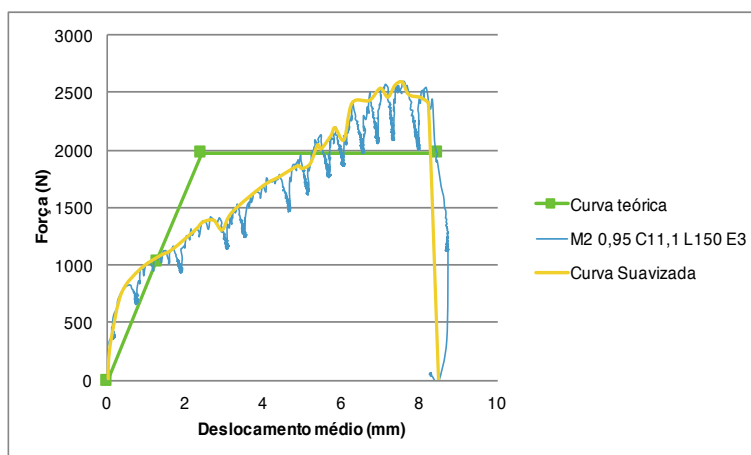


Figura 61 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C11,1 L150 E3” e curva teórica (EEEP)

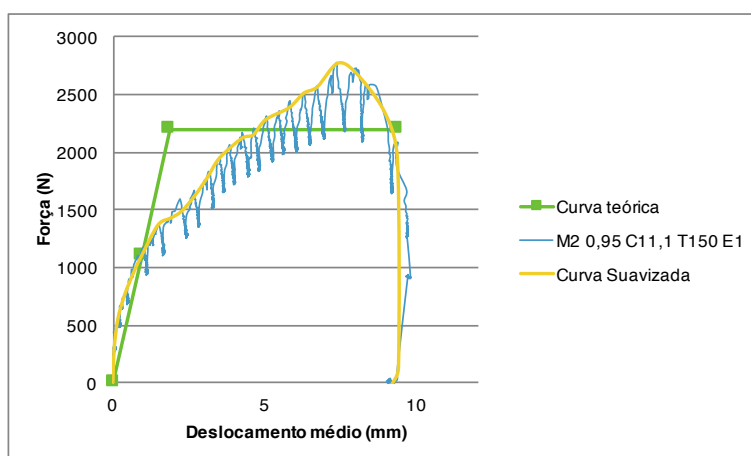


Figura 62 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C11,1 T150 E1” e curva teórica (EEEP)

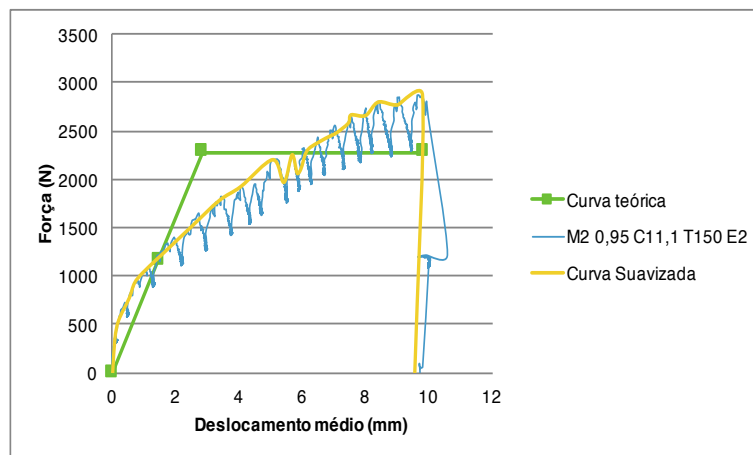


Figura 63 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C11,1 T150 E2” e curva teórica (EEEP)

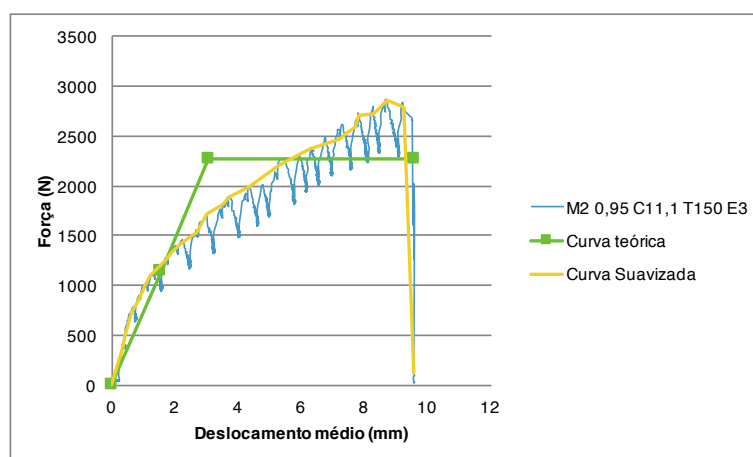


Figura 64 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C11,1 T150 E3” e curva teórica (EEEP)

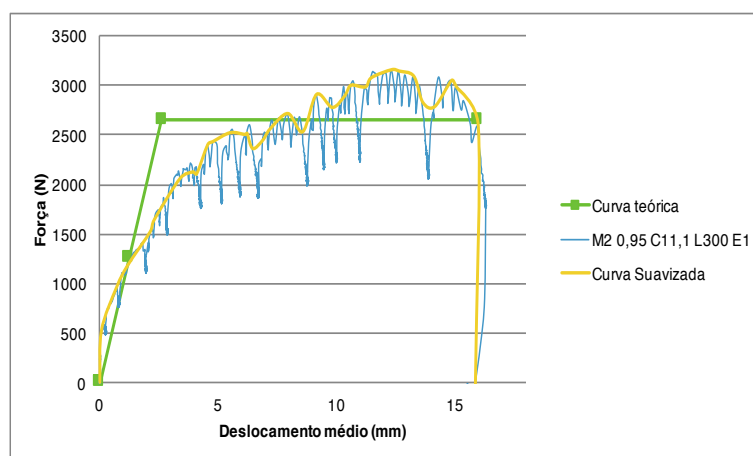


Figura 65 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C11,1 L300 E1” e curva teórica (EEEP)

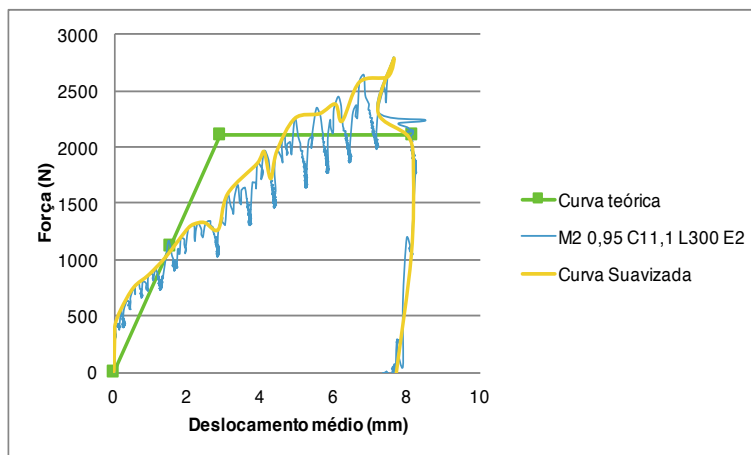


Figura 66 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C11,1 L300 E2” e curva teórica (EEEP)

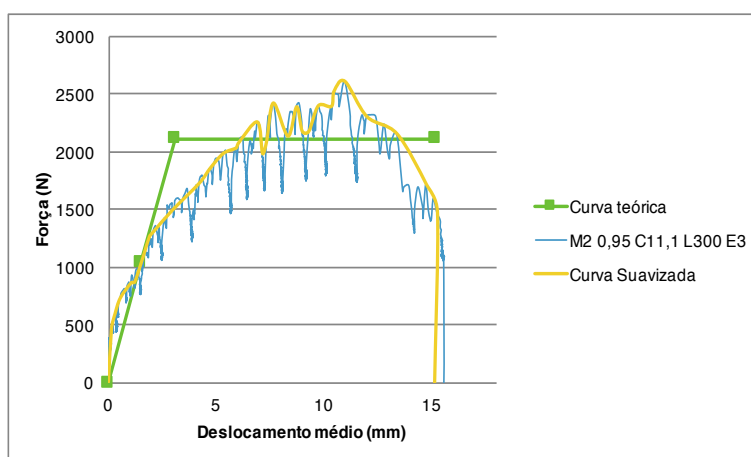


Figura 67 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C11,1 L300 E3” e curva teórica (EEEP)

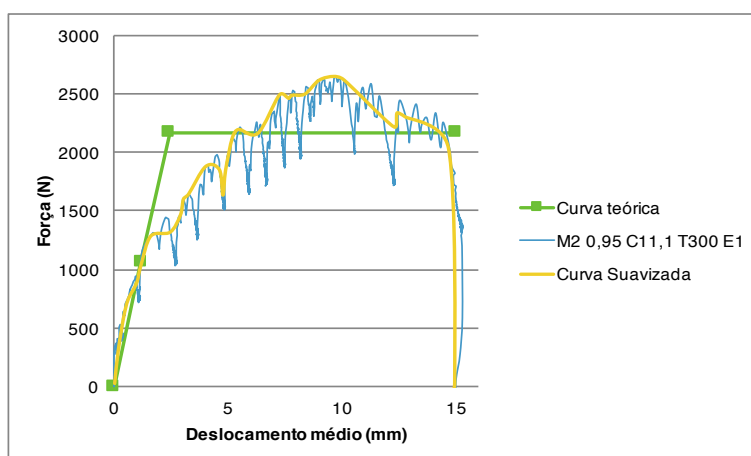


Figura 68 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C11,1 T300 E1” e curva teórica (EEEP)

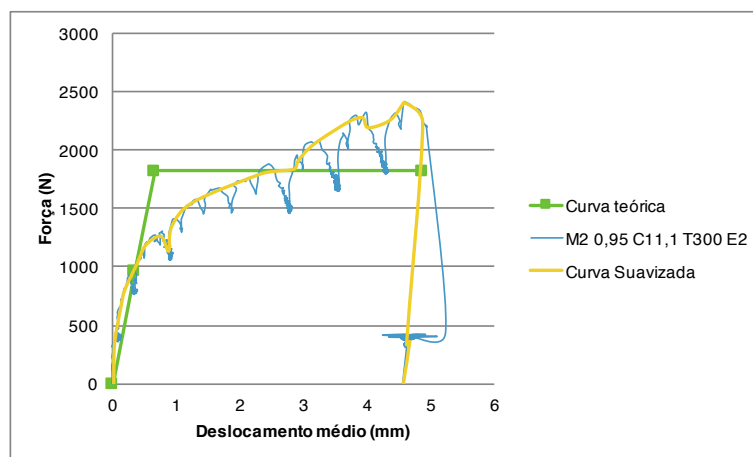


Figura 69 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C11,1 T300 E2” e curva teórica (EEEP)

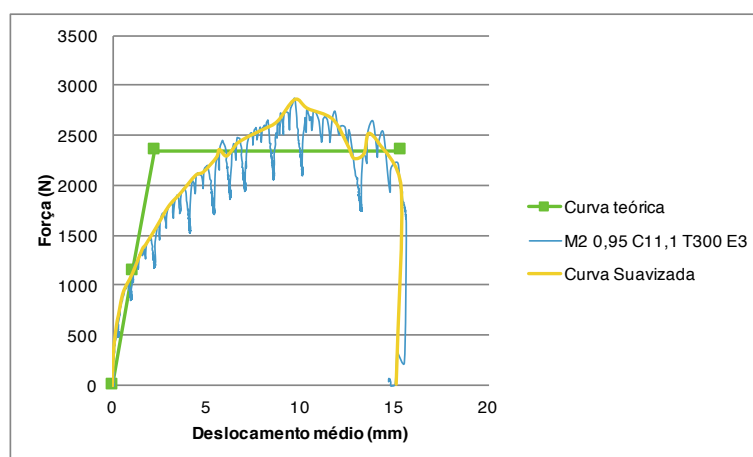


Figura 70 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C11,1 T300 E3” e curva teórica (EEEP)

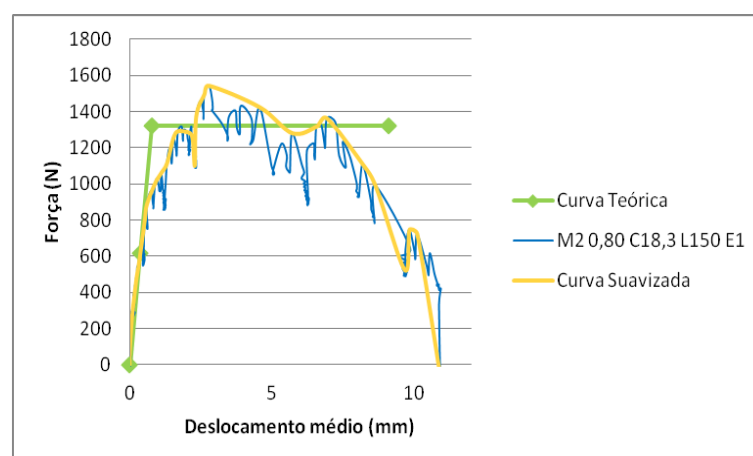


Figura 71 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C18,3 L150 E1” e curva teórica (EEEP)

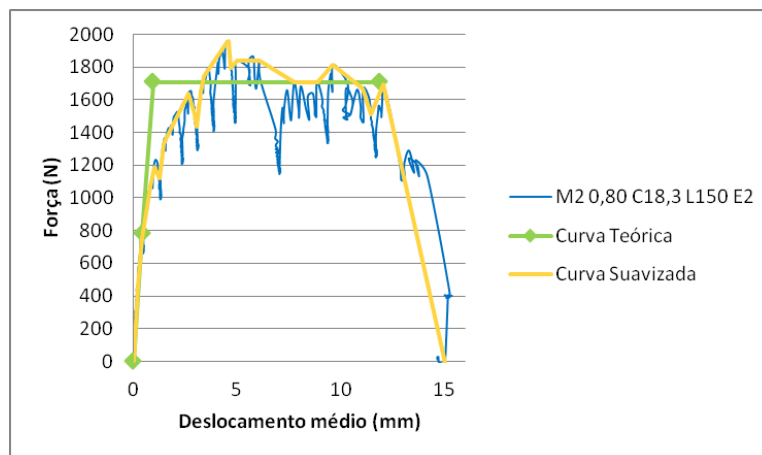


Figura 72 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C18,3 L150 E2” e curva teórica (EEEP)

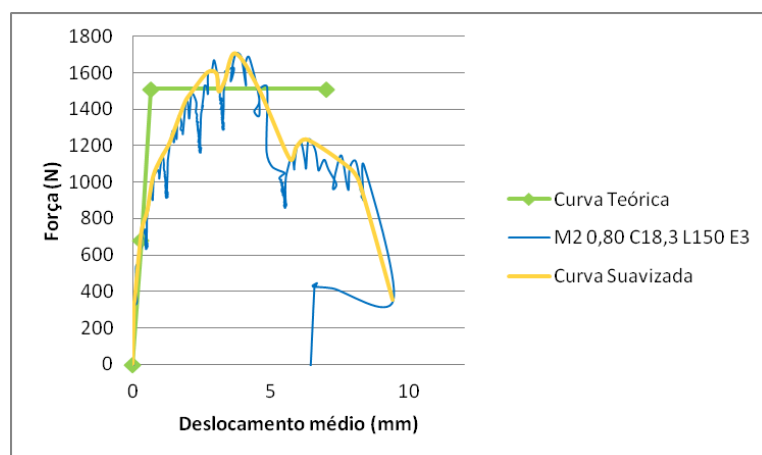


Figura 73 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C18,3 L150 E3” e curva teórica (EEEP)

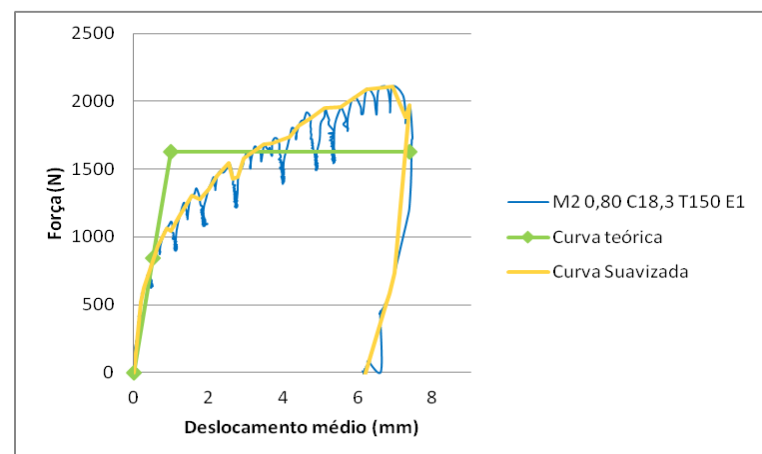


Figura 74 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C18,3 T150 E1” e curva teórica (EEEP)

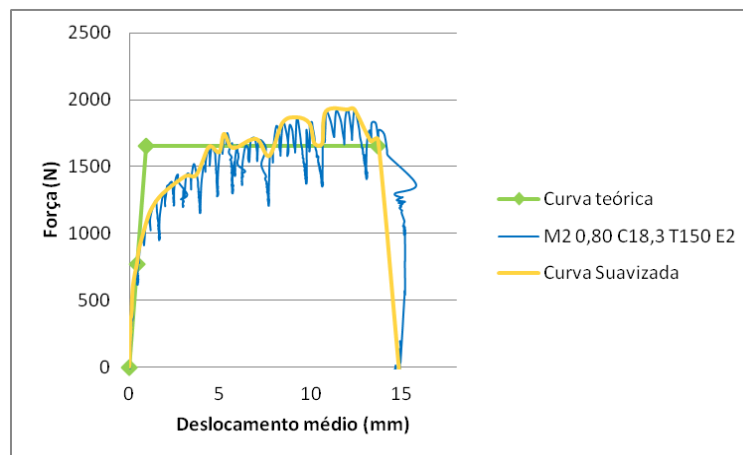


Figura 75 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C18,3 T150 E2” e curva teórica (EEEP)

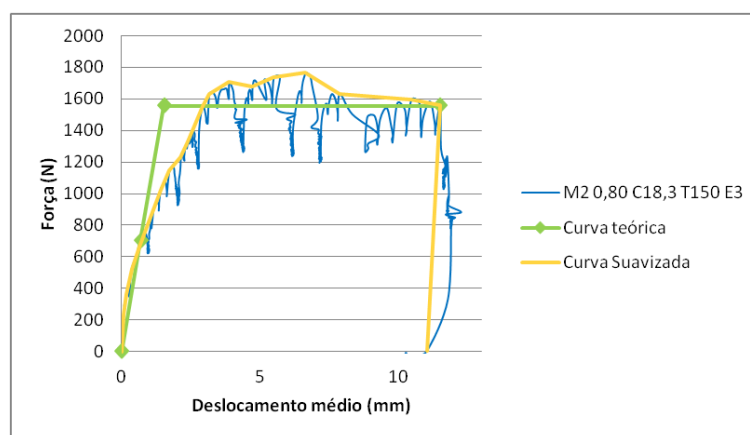


Figura 76 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C18,3 T150 E3” e curva teórica (EEEP)

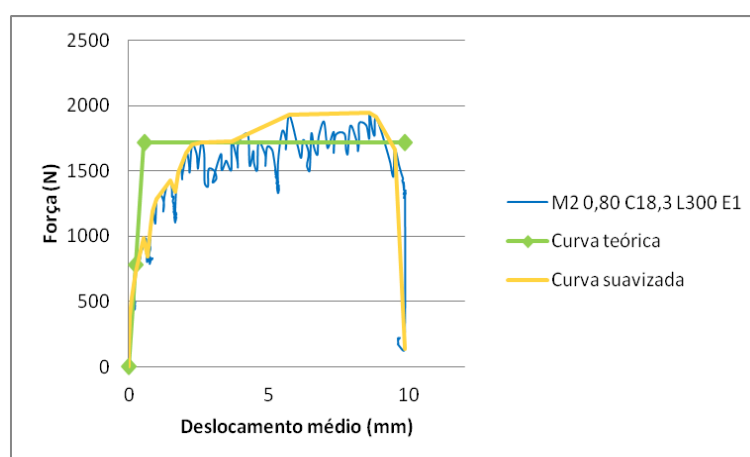


Figura 77 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C18,3 L300 E1” e curva teórica (EEEP)

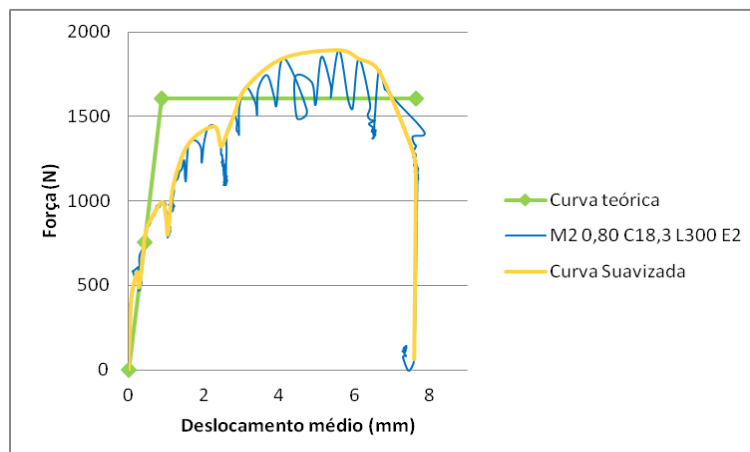


Figura 78 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C18,3 L300 E2” e curva teórica (EEEP)

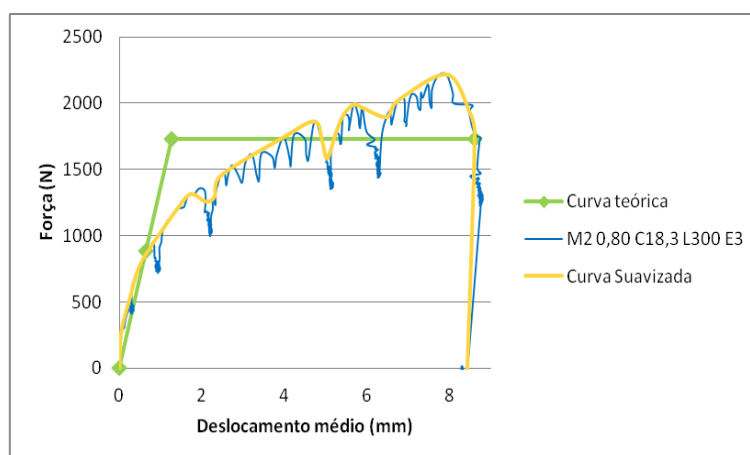


Figura 79 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C18,3 L300 E3” e curva teórica (EEEP)

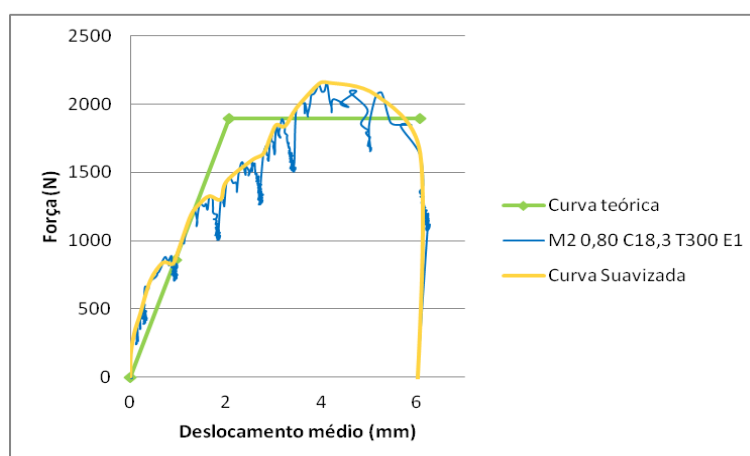


Figura 80 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C18,3 T300 E1” e curva teórica (EEEP)

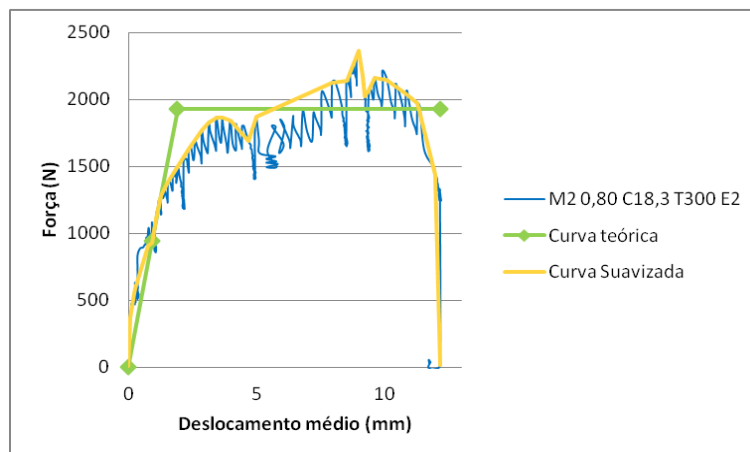


Figura 81 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C18,3 T300 E2” e curva teórica (EEEP)

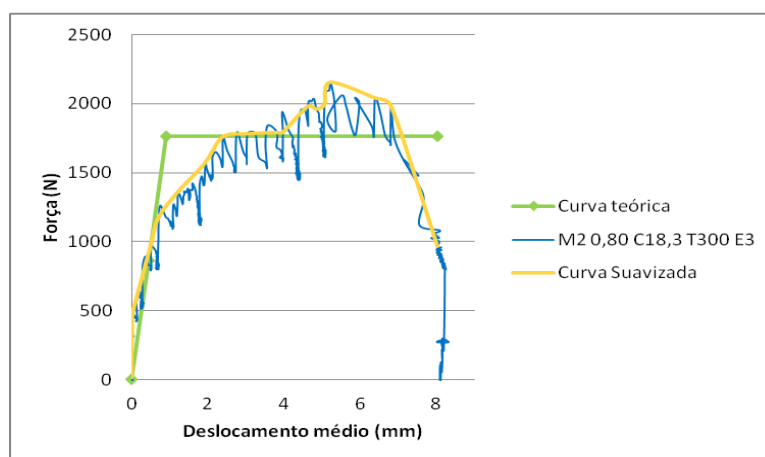


Figura 82 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,80 C18,3 T300 E3” e curva teórica (EEEP)

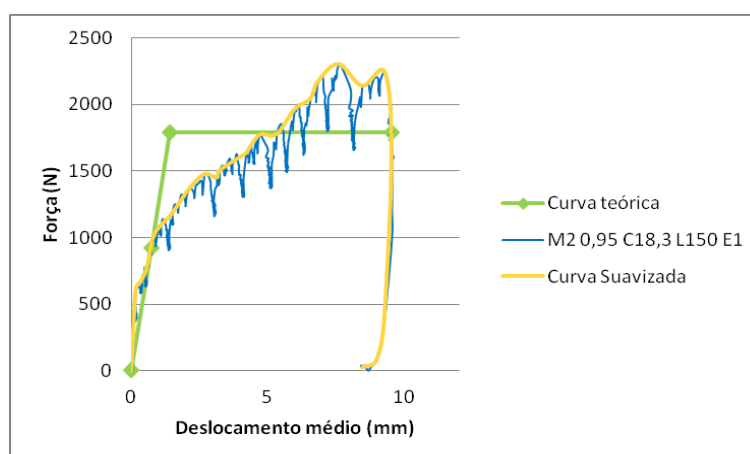


Figura 83 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C18,3 L150 E1” e curva teórica (EEEP)

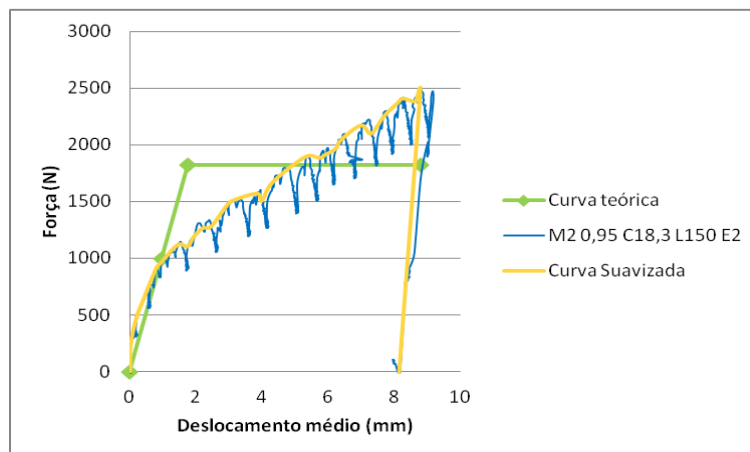


Figura 84 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C18,3 L150 E2” e curva teórica (EEEP)

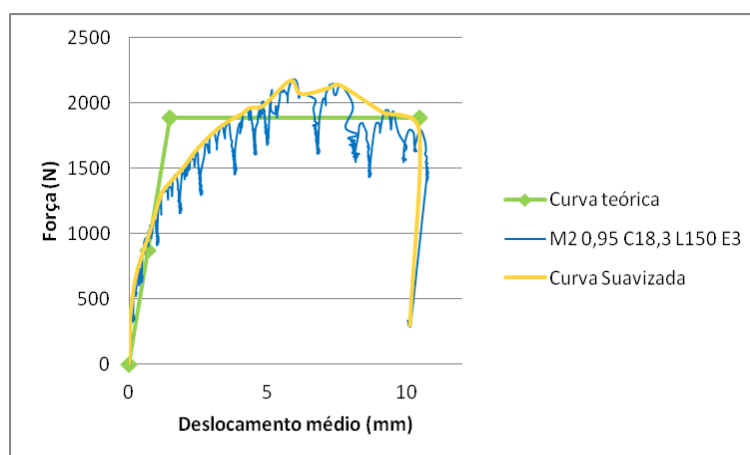


Figura 85 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C18,3 L150 E3” e curva teórica (EEEP)

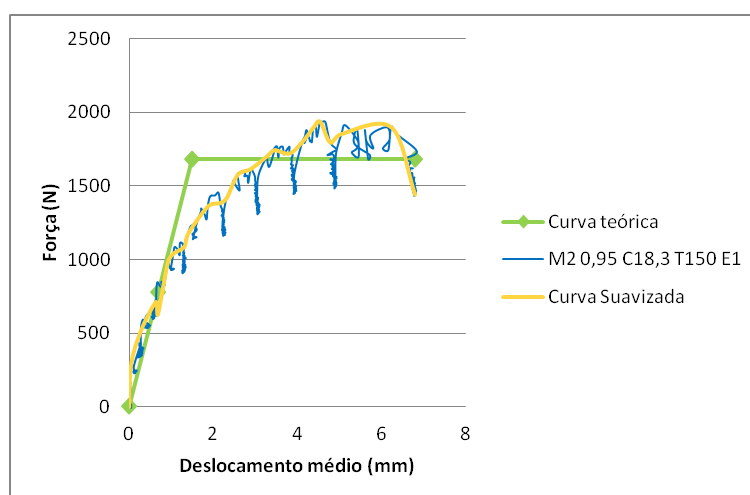


Figura 86 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C18,3 T150 E1” e curva teórica (EEEP)

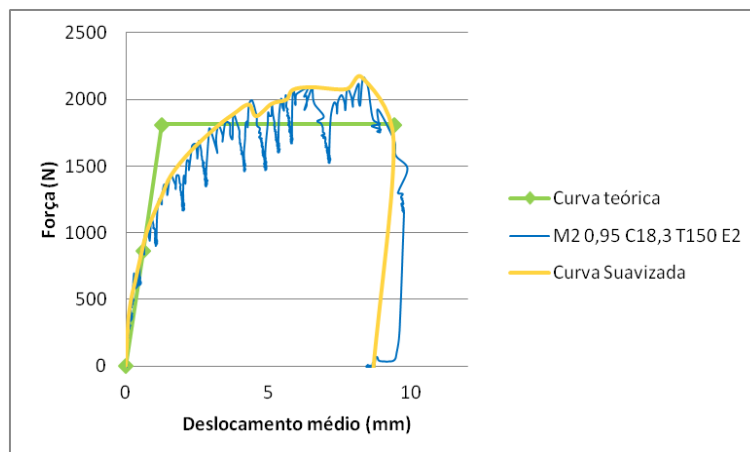


Figura 87 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C18,3 T150 E2” e curva teórica (EEEP)

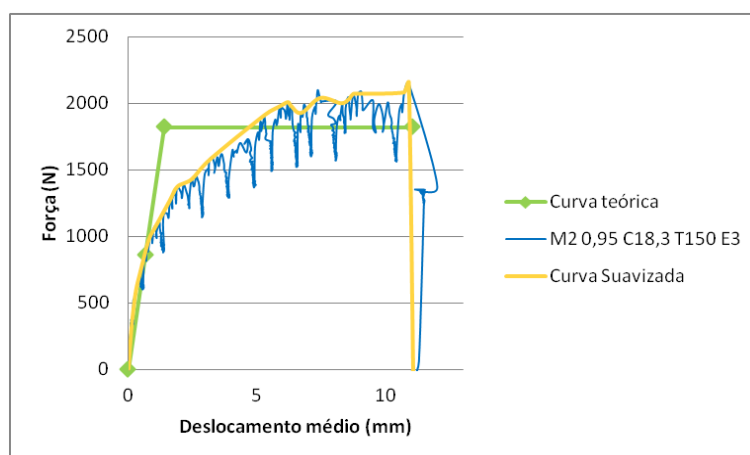


Figura 88 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C18,3 T150 E3” e curva teórica (EEEP)

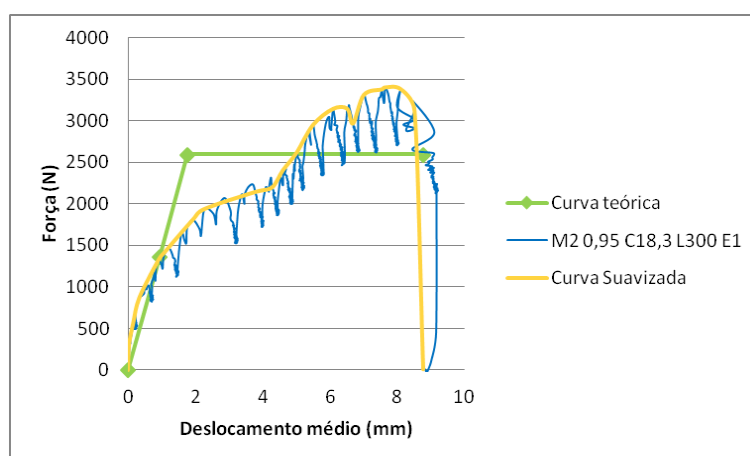


Figura 89 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C18,3 L300 E1” e curva teórica (EEEP)

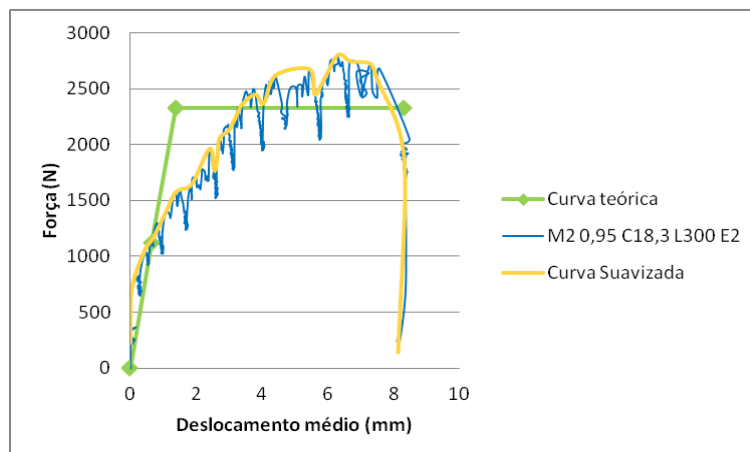


Figura 90 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C18,3 L300 E2” e curva teórica (EEEP)

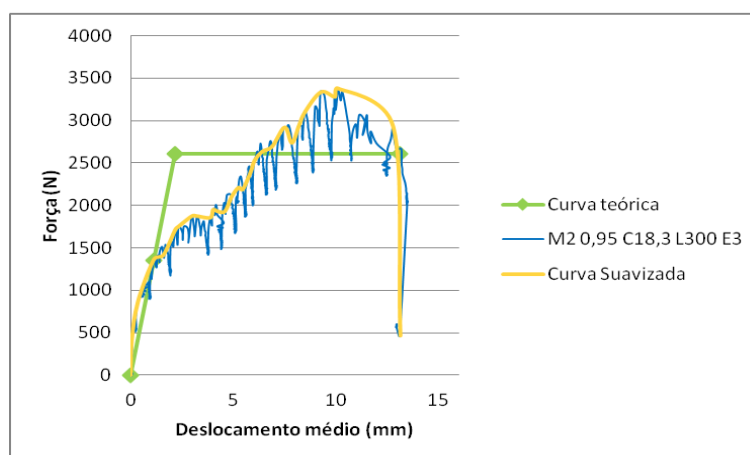


Figura 91 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C18,3 L300 E3” e curva teórica (EEEP)

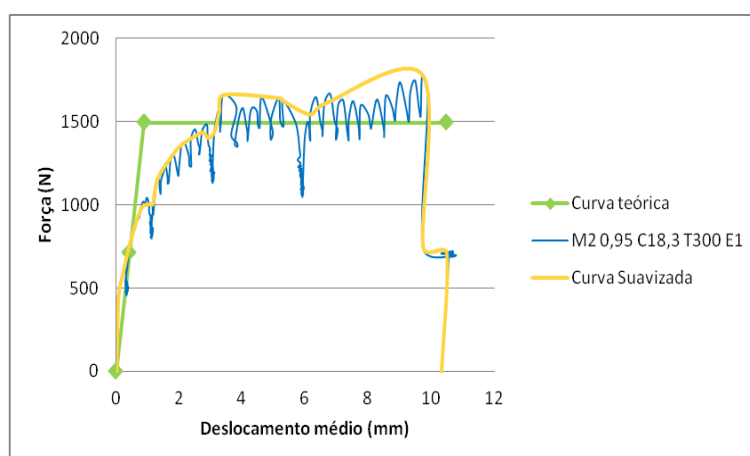


Figura 92 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C18,3 T300 E1” e curva teórica (EEEP)

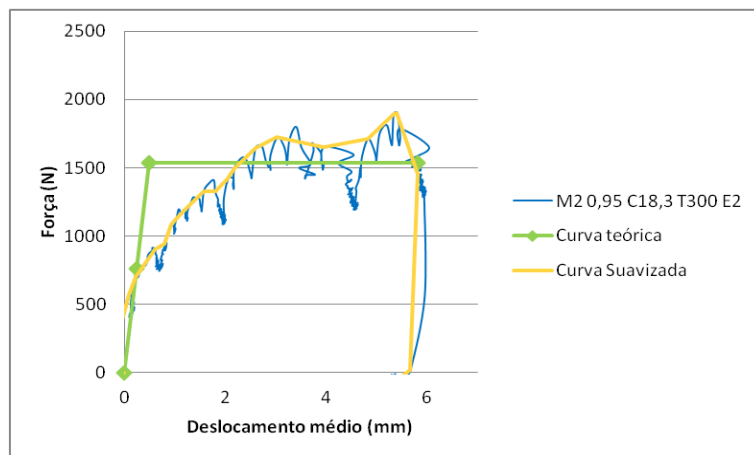


Figura 93 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C18,3 T300 E2” e curva teórica (EEEP)

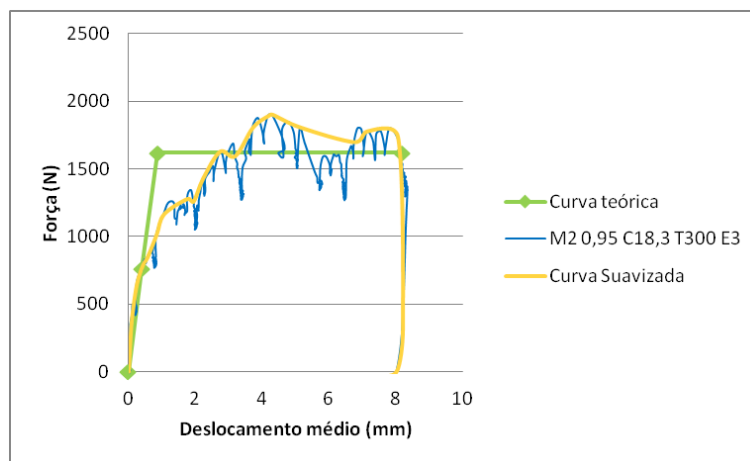


Figura 94 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M2 0,95 C18,3 T300 E3” e curva teórica (EEEP)

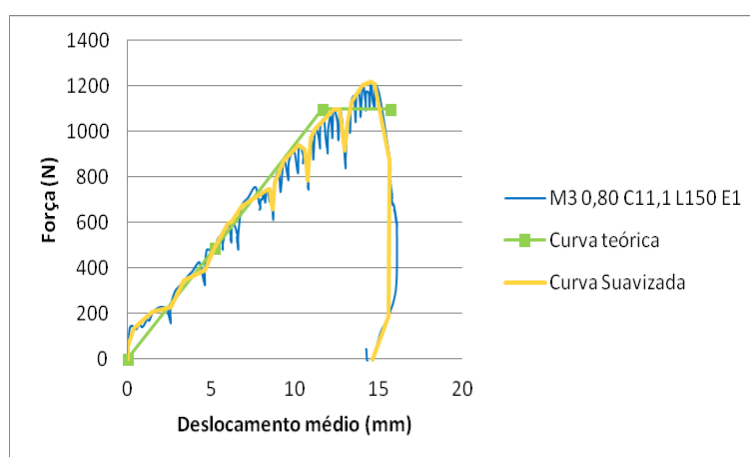


Figura 95 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C11,1 L150 E1” e curva teórica (EEEP)

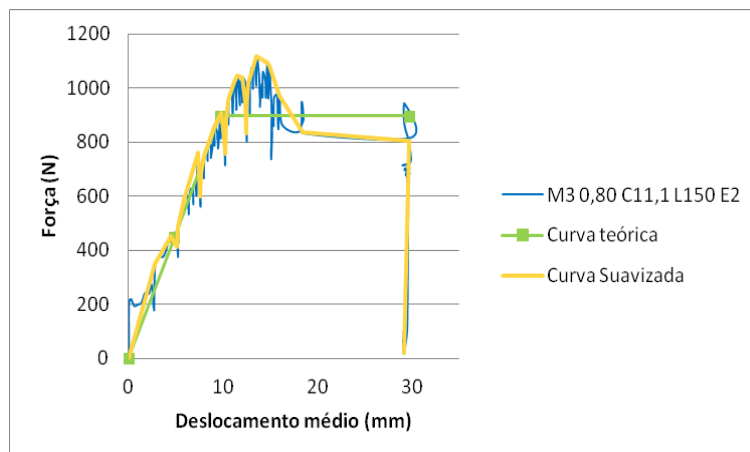


Figura 96 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C11,1 L150 E2” e curva teórica (EEEP)

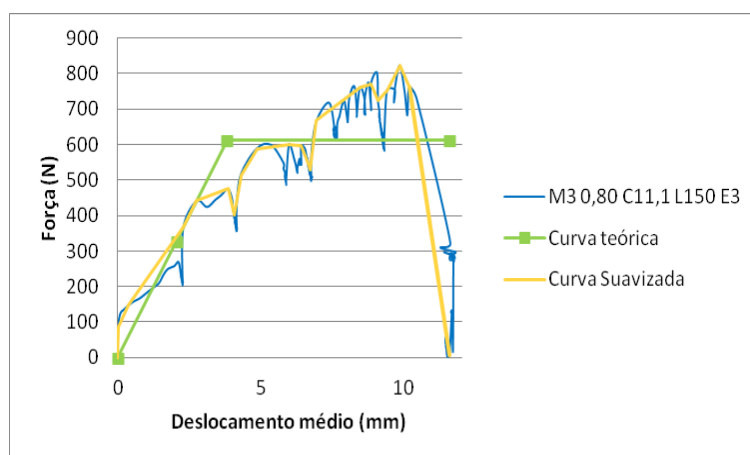


Figura 97 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C11,1 L150 E3” e curva teórica (EEEP)

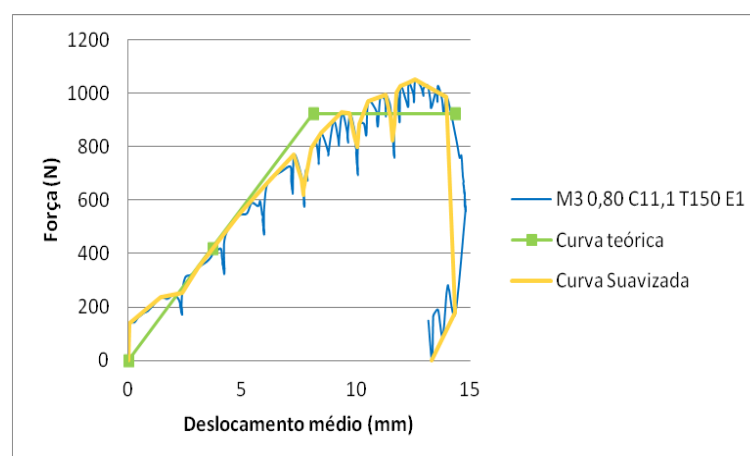


Figura 98 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C11,1 T150 E1” e curva teórica (EEEP)

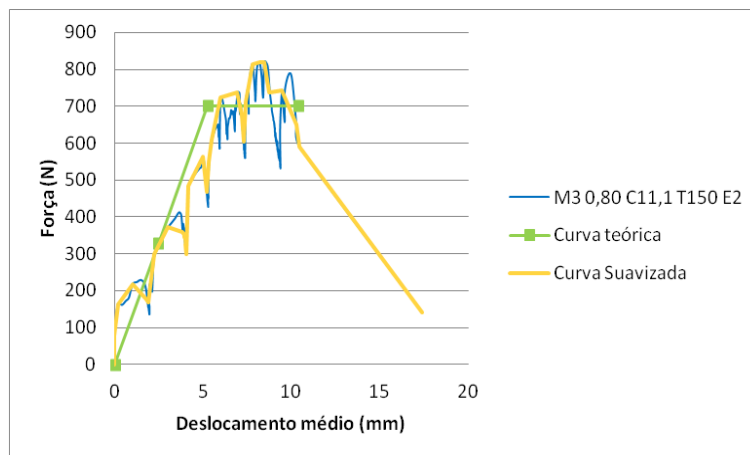


Figura 99 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C11,1 T150 E2” e curva teórica (EEEP)

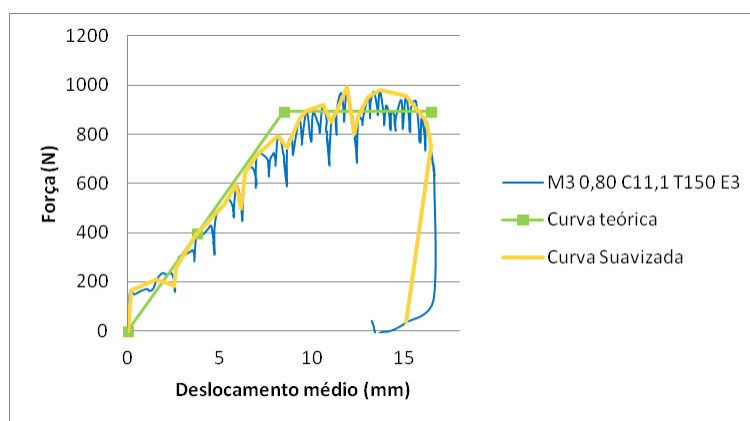


Figura 100 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C11,1 T150 E3” e curva teórica (EEEP)

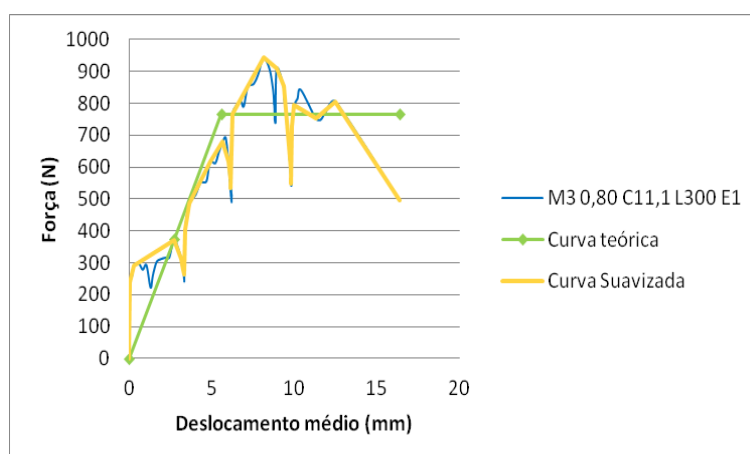


Figura 101 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C11,1 L300 E1” e curva teórica (EEEP)

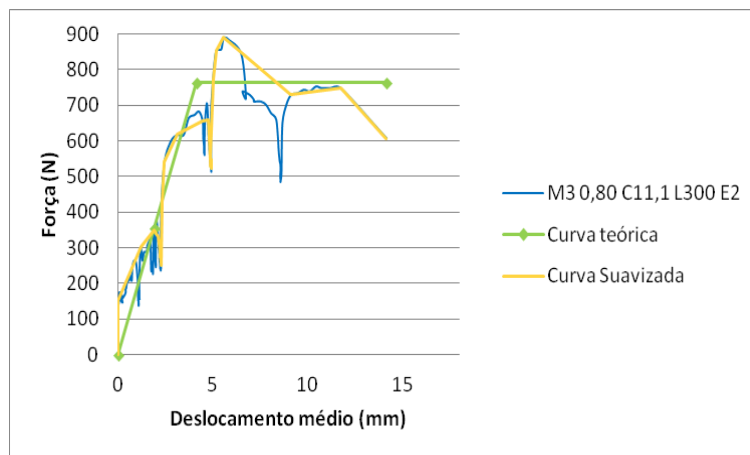


Figura 102 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C11,1 L300 E2” e curva teórica (EEEEP)

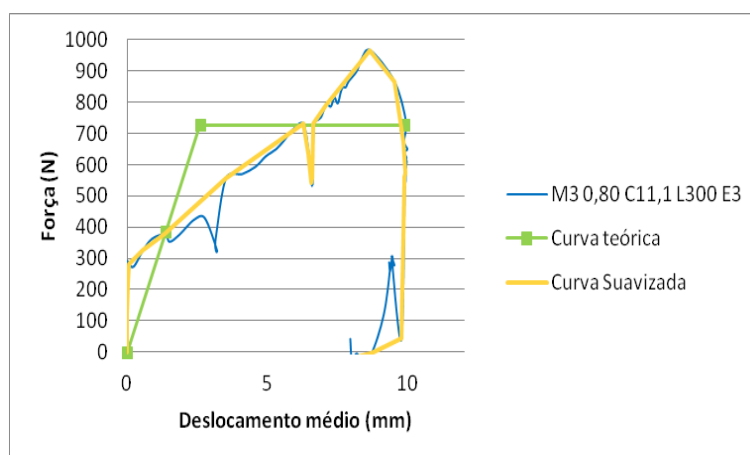


Figura 103 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C11,1 L300 E3” e curva teórica (EEEEP)

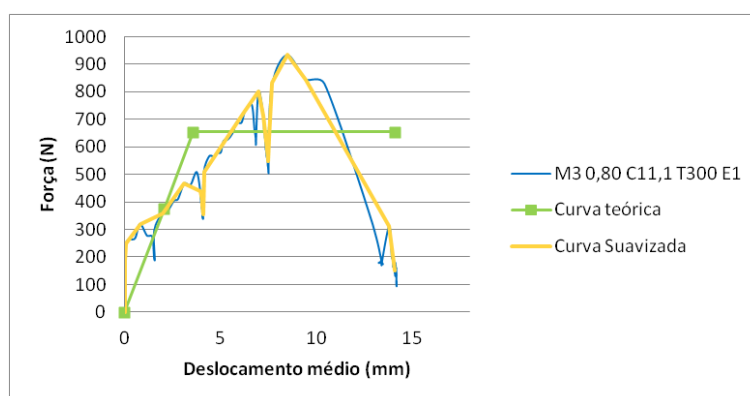


Figura 104 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C11,1 T300 E1” e curva teórica (EEEEP)

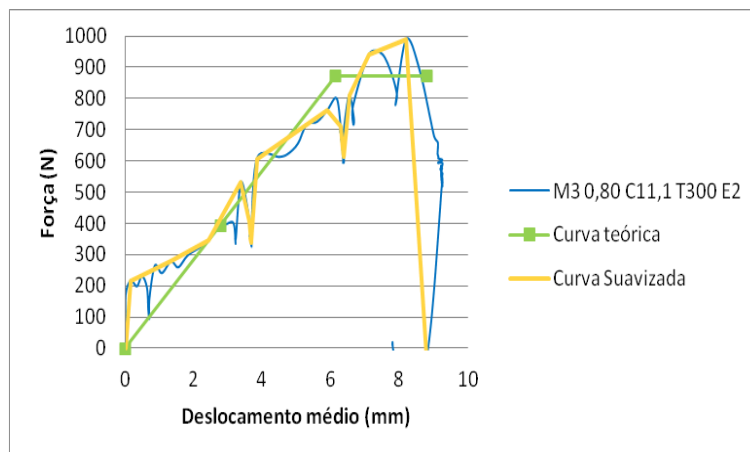


Figura 105 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C11,1 T300 E2” e curva teórica (EEEEP)

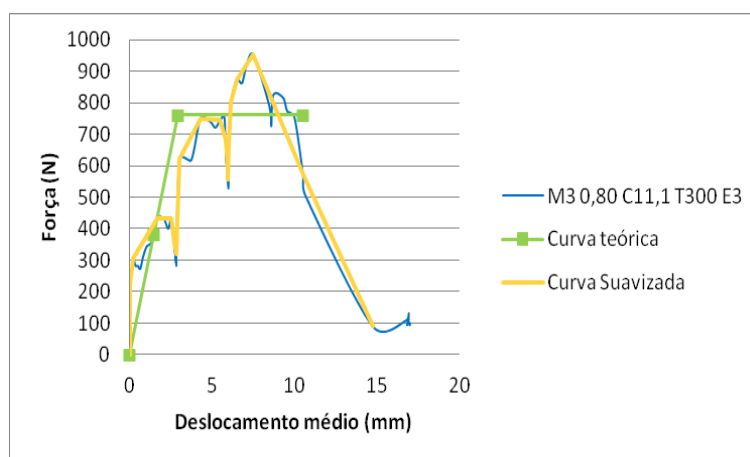


Figura 106 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C11,1 T300 E3” e curva teórica (EEEEP)

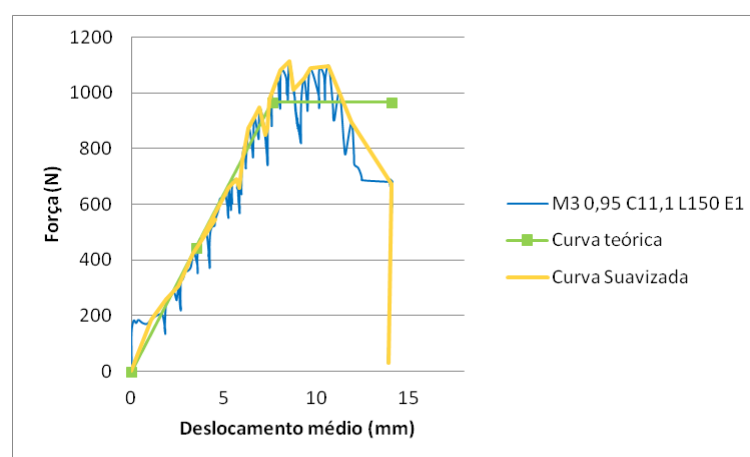


Figura 107 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C11,1 L150 E1” e curva teórica (EEEEP)

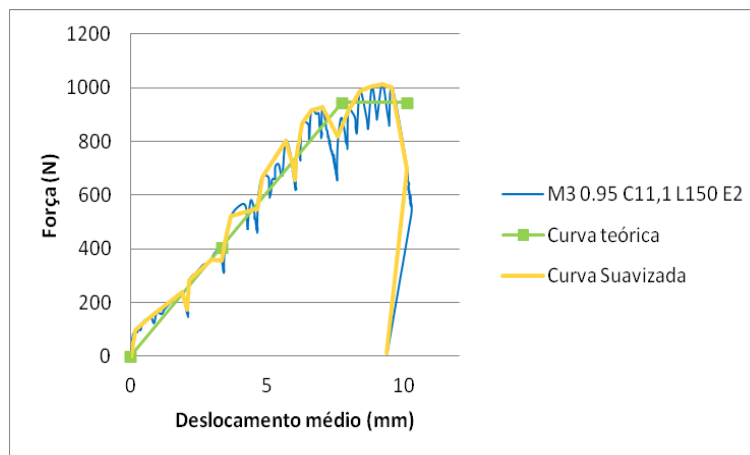


Figura 108 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C11,1 L150 E2” e curva teórica (EEEEP)

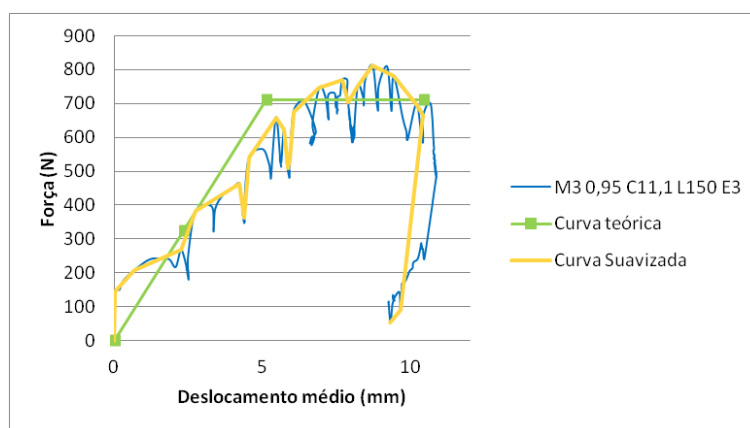


Figura 109 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C11,1 L150 E3” e curva teórica (EEEEP)

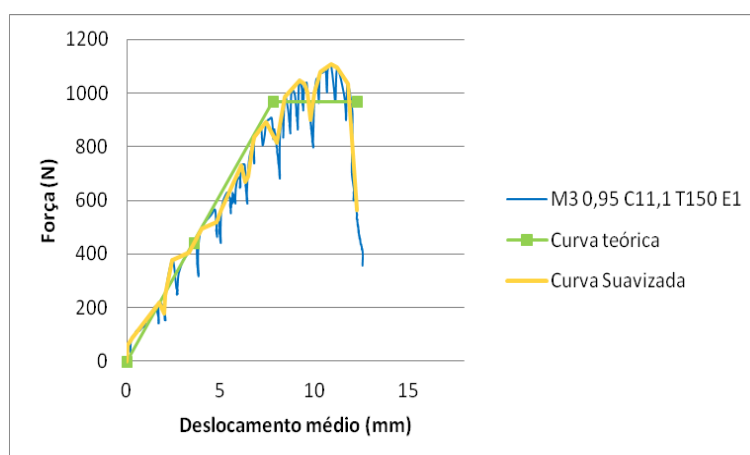


Figura 110 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C11,1 T150 E1” e curva teórica (EEEEP)

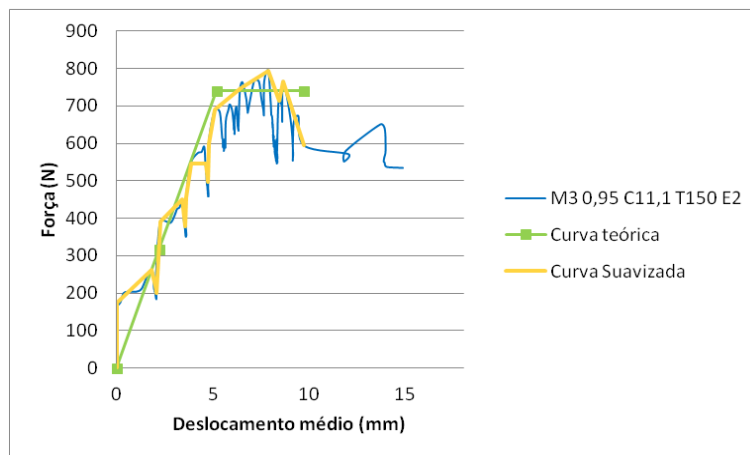


Figura 111 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C11,1 T150 E2” e curva teórica (EEEEP)

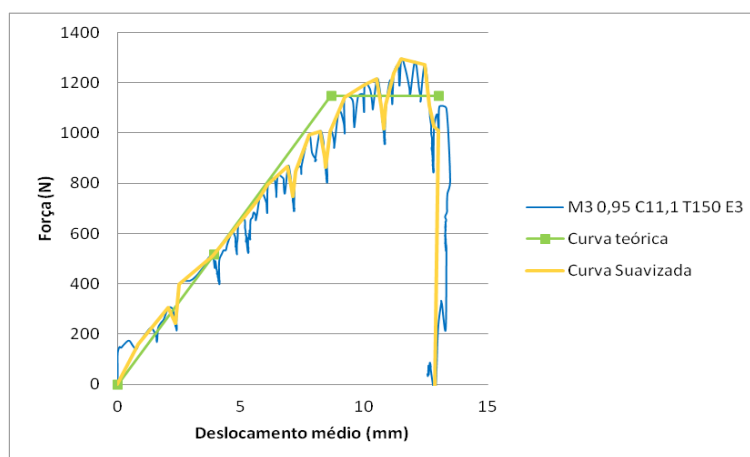


Figura 112 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C11,1 T150 E3” e curva teórica (EEEEP)

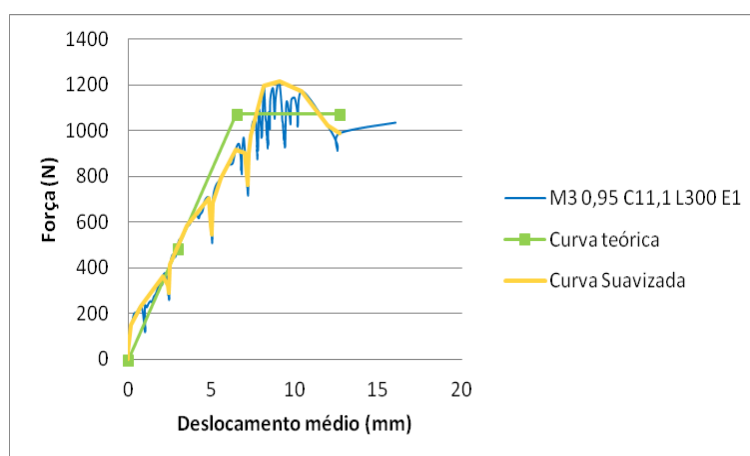


Figura 113 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C11,1 L300 E1” e curva teórica (EEEEP)

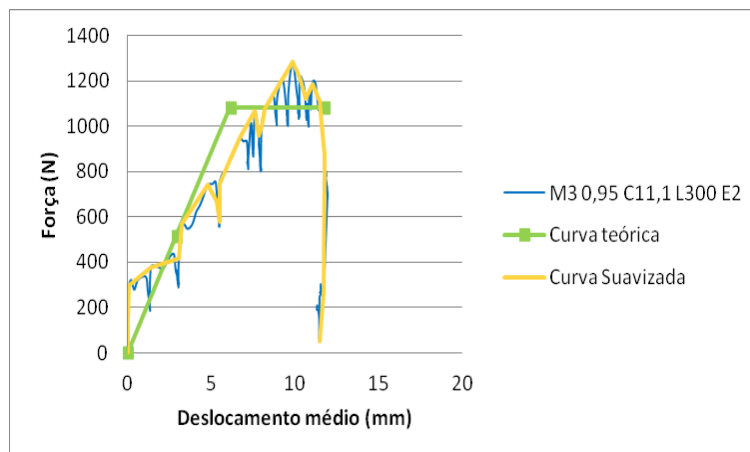


Figura 114 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C11,1 L300 E2” e curva teórica (EEEEP)

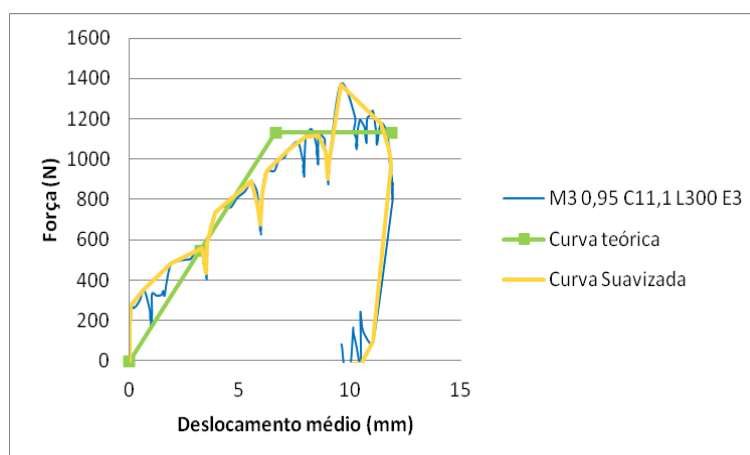


Figura 115 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C11,1 L300 E3” e curva teórica (EEEEP)

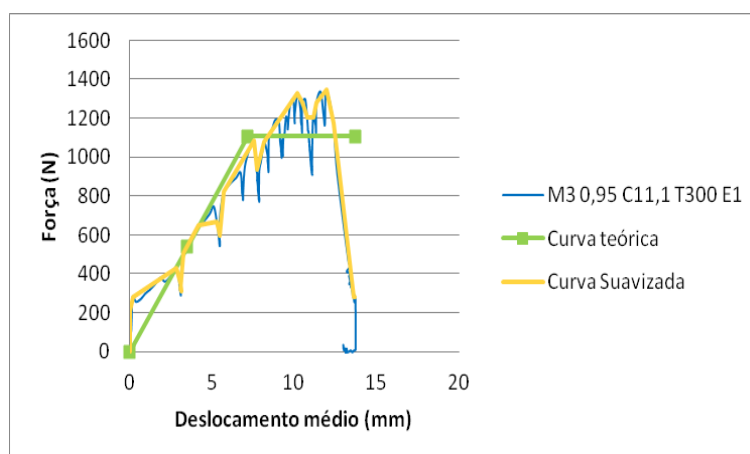


Figura 116 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C11,1 T300 E1” e curva teórica (EEEEP)

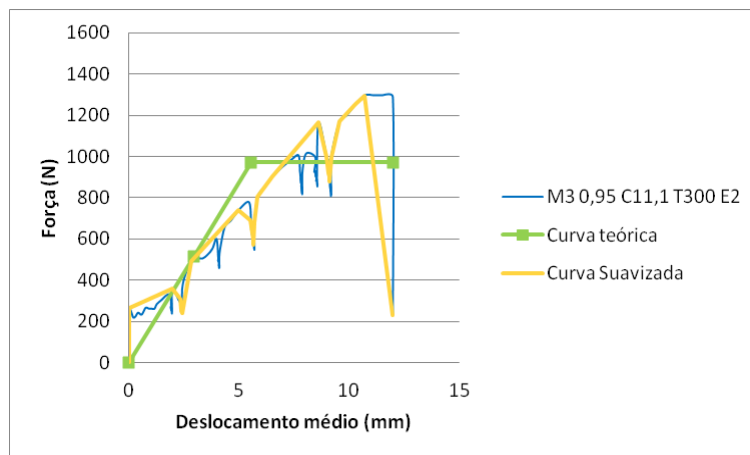


Figura 117 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C11,1 T300 E2” e curva teórica (EEEEP)

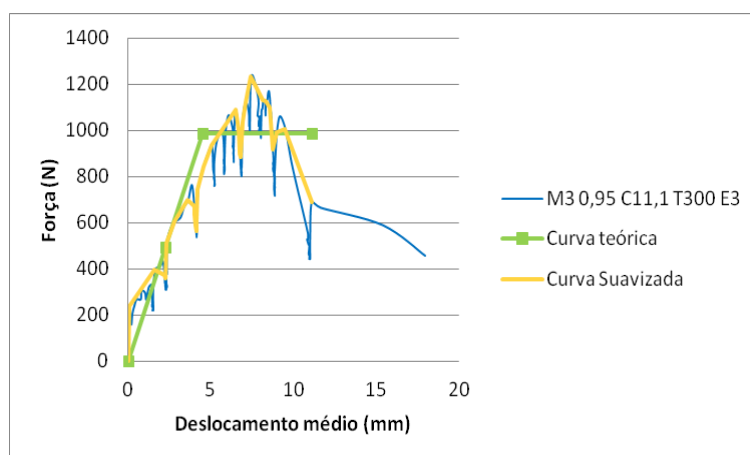


Figura 118 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C11,1 T300 E3” e curva teórica (EEEEP)

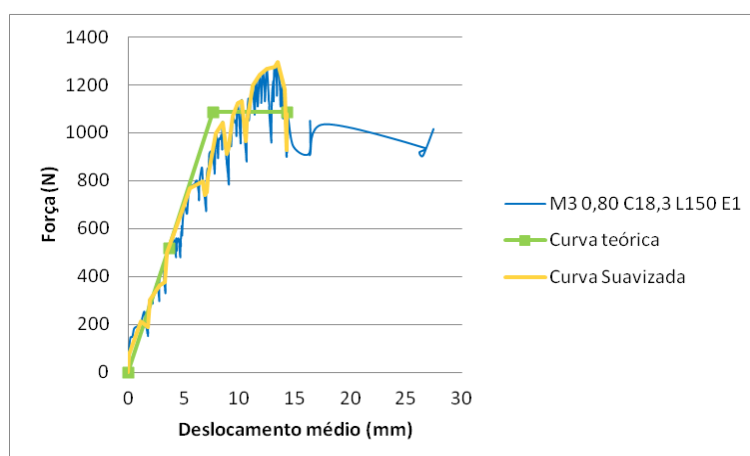


Figura 119 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C18,3 L150 E1” e curva teórica (EEEEP)

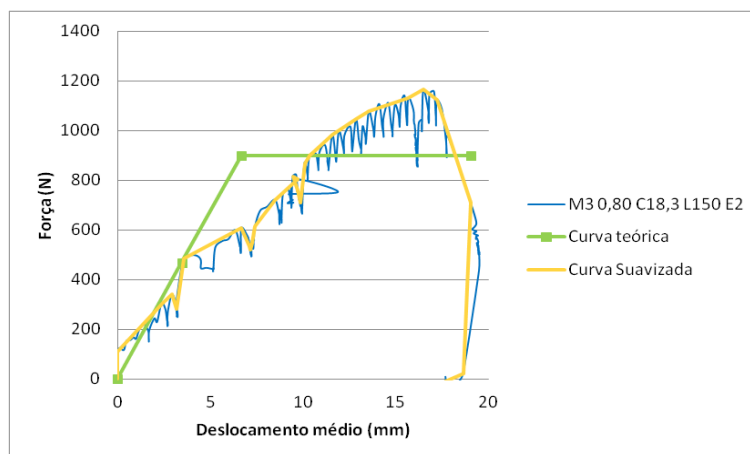


Figura 120 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C18,3 L150 E2” e curva teórica (EEEEP)

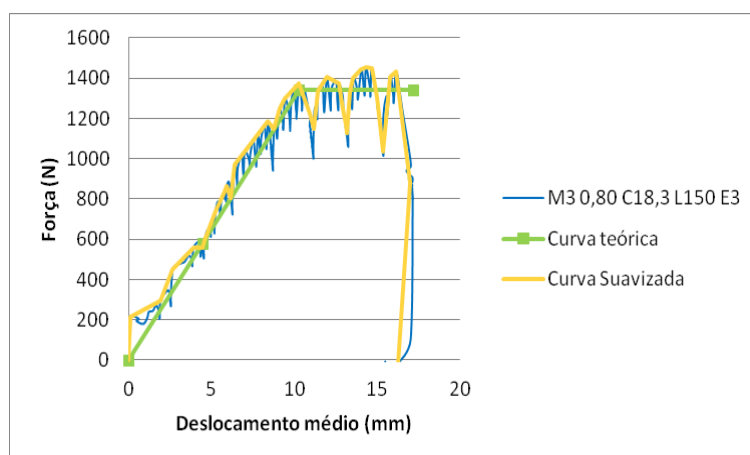


Figura 121 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C18,3 L150 E3” e curva teórica (EEEEP)

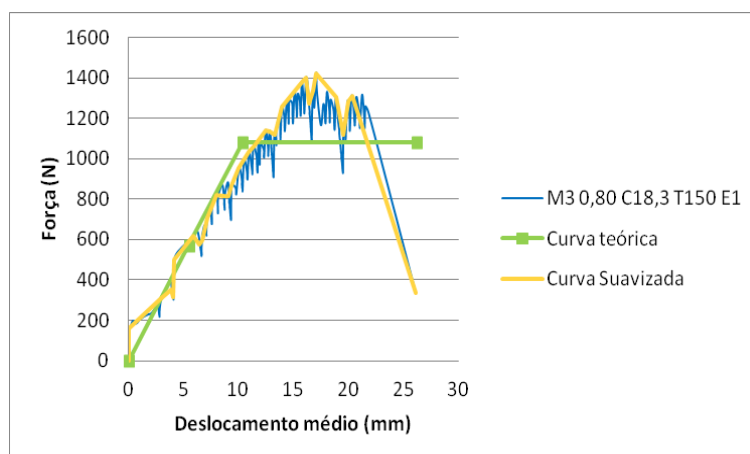


Figura 122 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C18,3 T150 E1” e curva teórica (EEEEP)

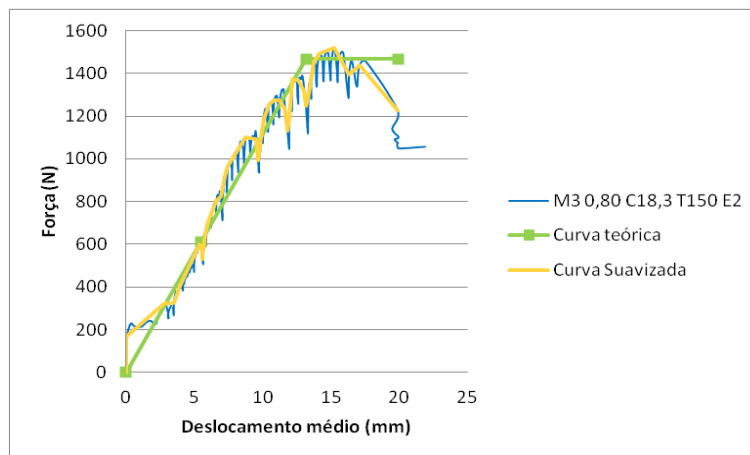


Figura 123 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C18,3 T150 E2” e curva teórica (EEEEP)

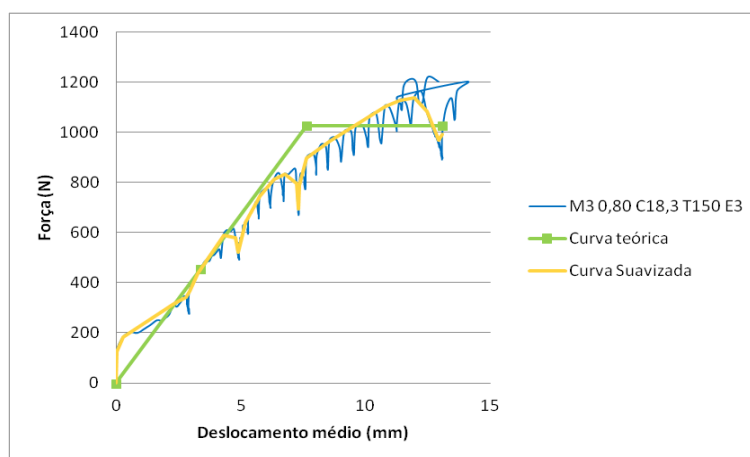


Figura 124 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C18,3 T150 E3” e curva teórica (EEEEP)

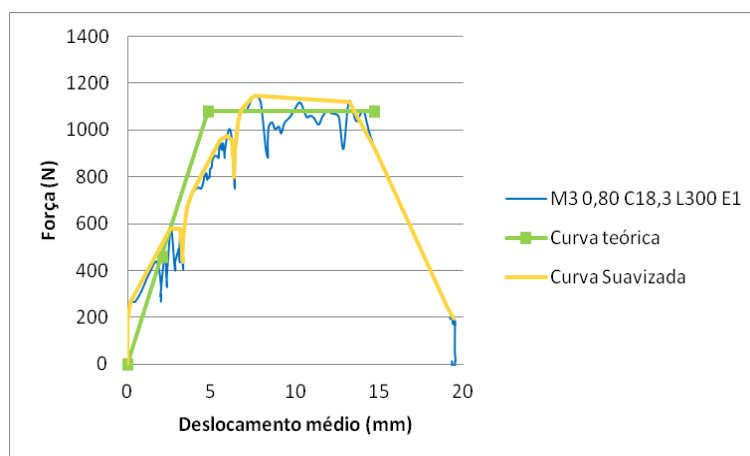


Figura 125 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C18,3 L300 E1” e curva teórica (EEEEP)

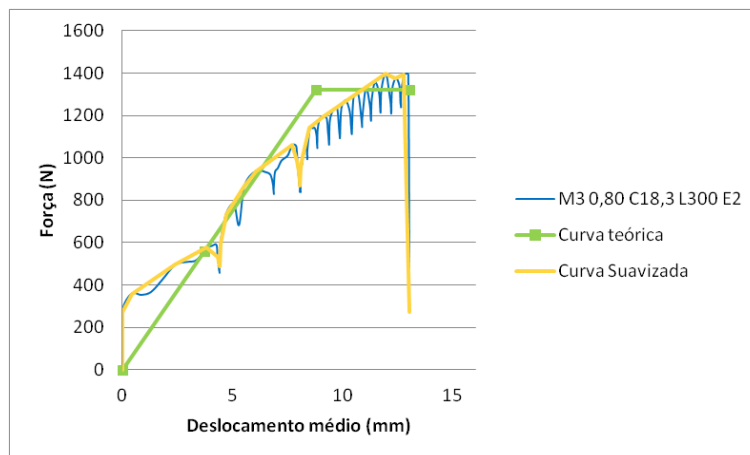


Figura 126 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C18,3 L300 E2” e curva teórica (EEEEP)

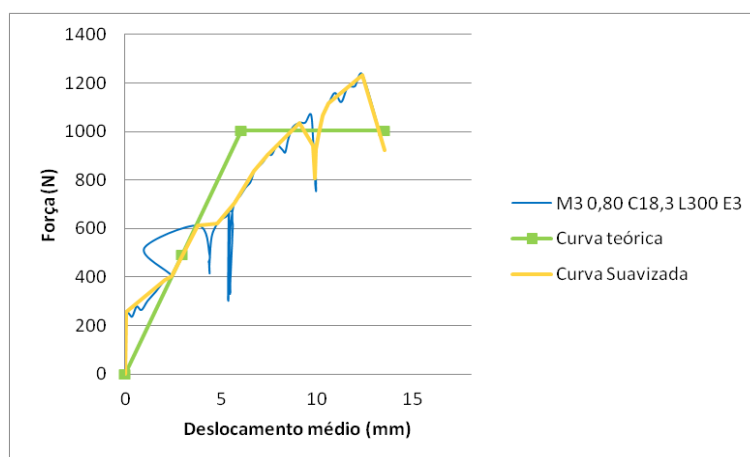


Figura 127 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C18,3 L300 E3” e curva teórica (EEEEP)

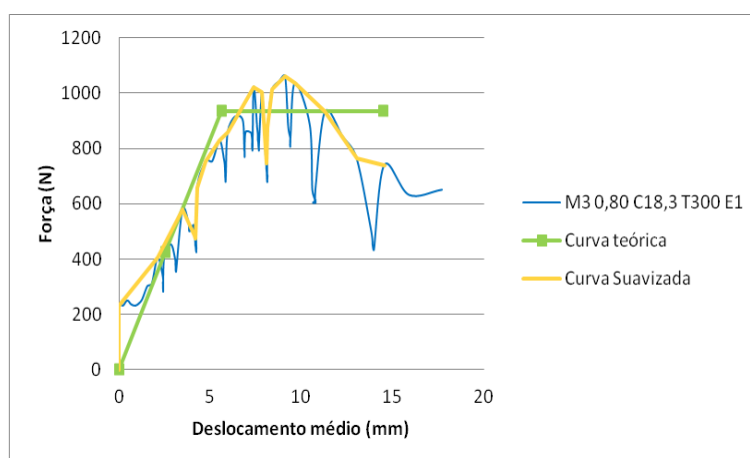


Figura 128 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C18,3 T300 E1” e curva teórica (EEEEP)

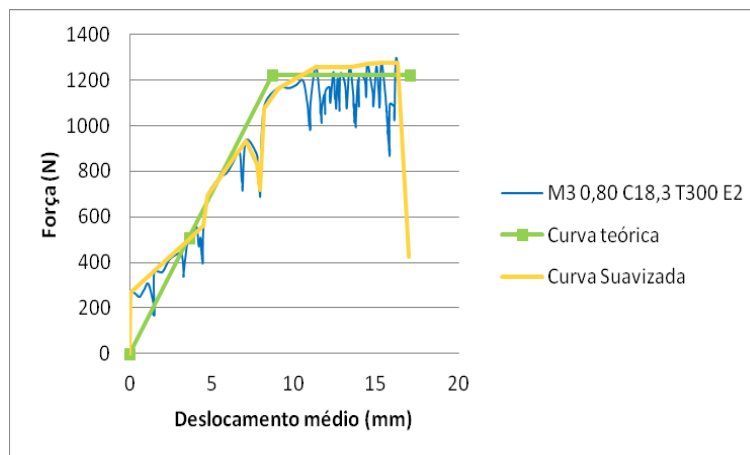


Figura 129 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C18,3 T300 E2” e curva teórica (EEEEP)

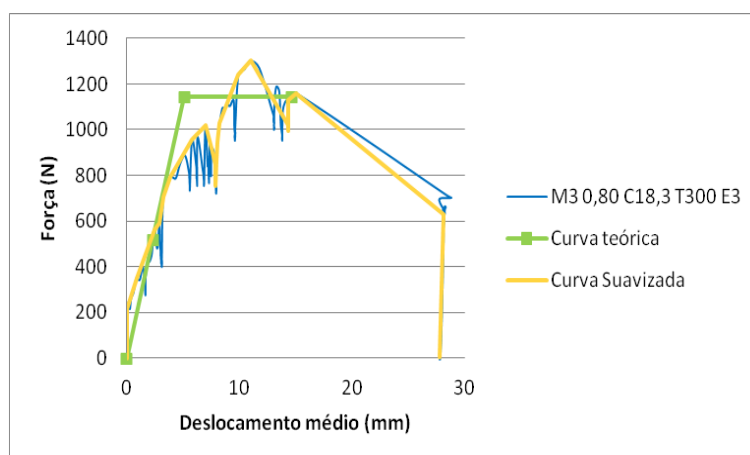


Figura 130 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,80 C18,3 T300 E3” e curva teórica (EEEEP)

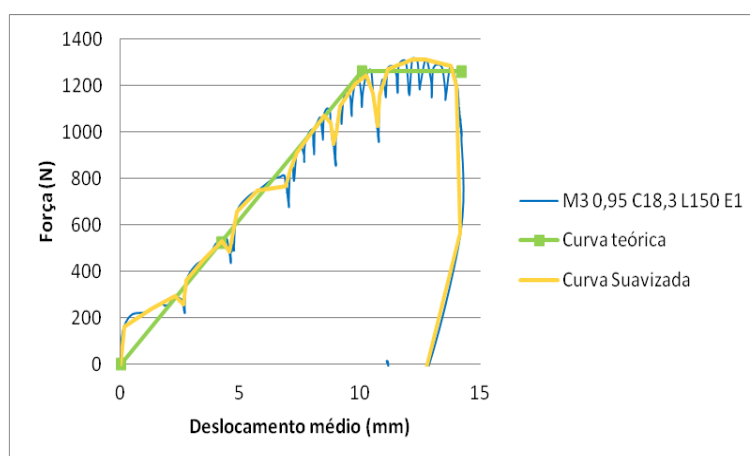


Figura 131 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C18,3 L150 E1” e curva teórica (EEEEP)

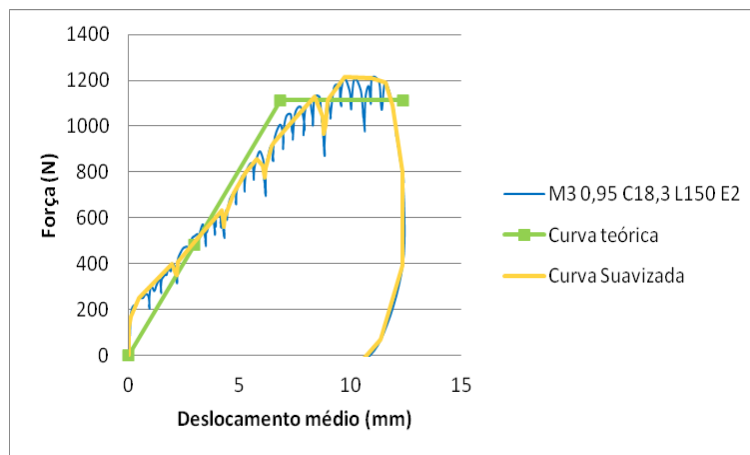


Figura 132 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C18,3 L150 E2” e curva teórica (EEEEP)

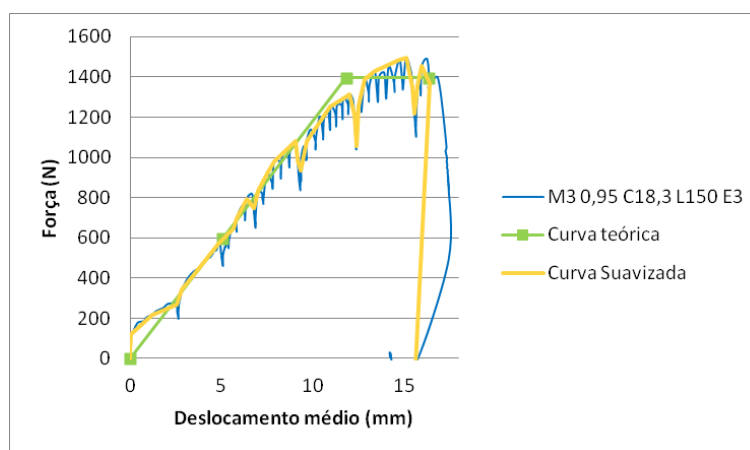


Figura 133 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C18,3 L150 E3” e curva teórica (EEEEP)

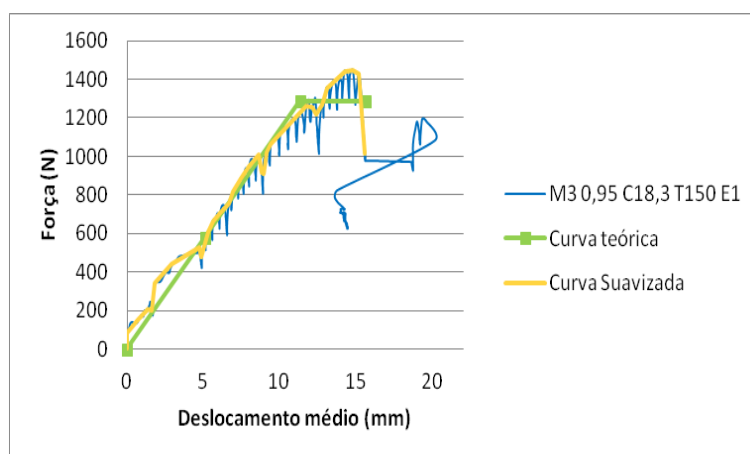


Figura 134 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C18,3 T150 E1” e curva teórica (EEEEP)

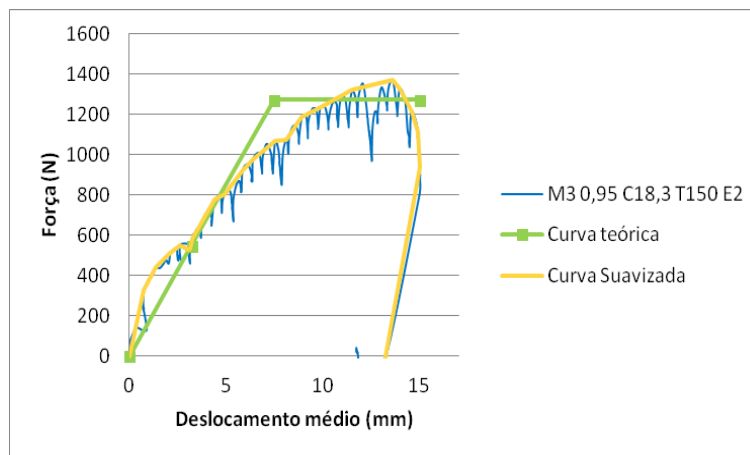


Figura 135 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C18,3 T150 E2” e curva teórica (EEEEP)

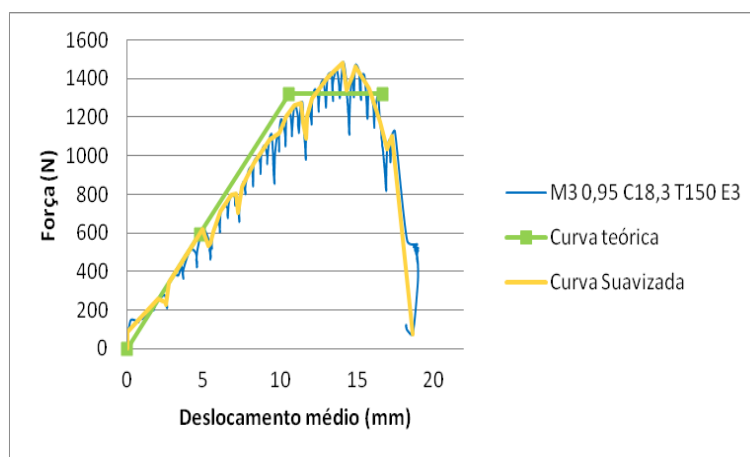


Figura 136 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C18,3 T150 E3” e curva teórica (EEEEP)

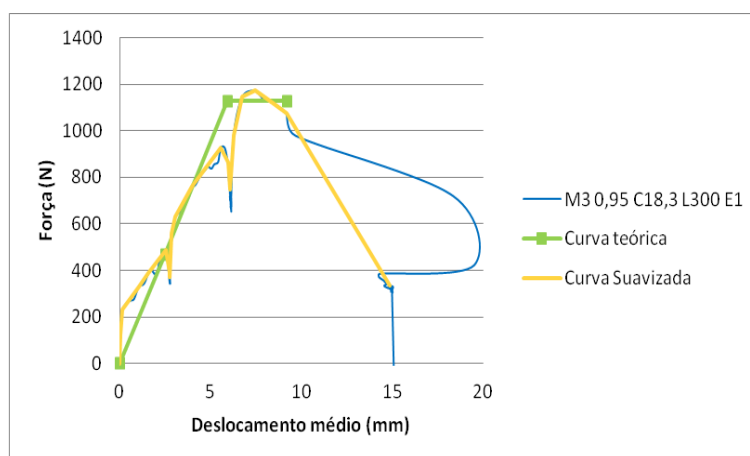


Figura 137 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C18,3 L300 E1” e curva teórica (EEEEP)

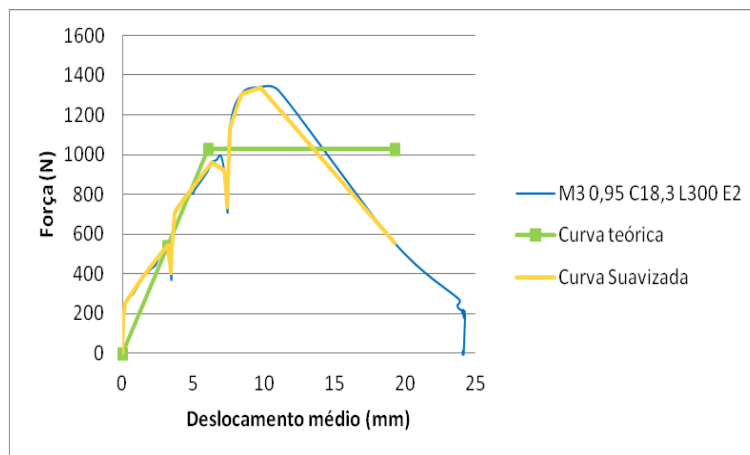


Figura 138 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C18,3 L300 E2” e curva teórica (EEEEP)

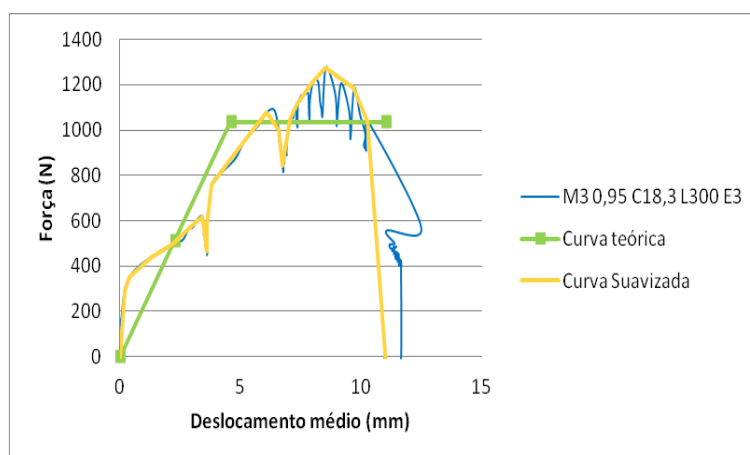


Figura 139 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C18,3 L300 E3” e curva teórica (EEEEP)

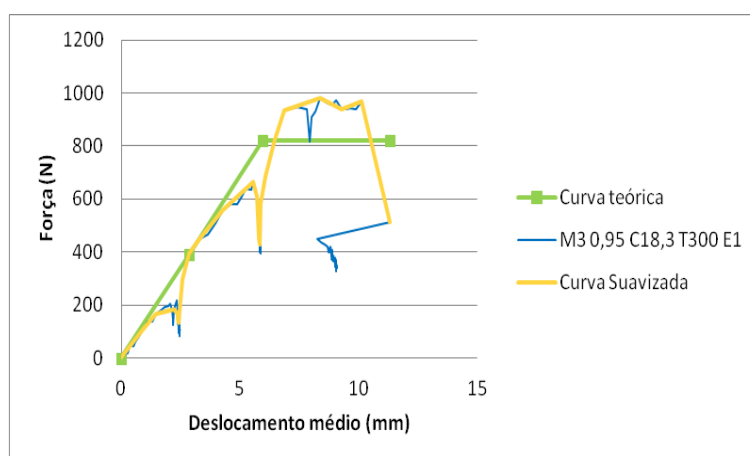


Figura 140 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C18,3 T300 E1” e curva teórica (EEEEP)

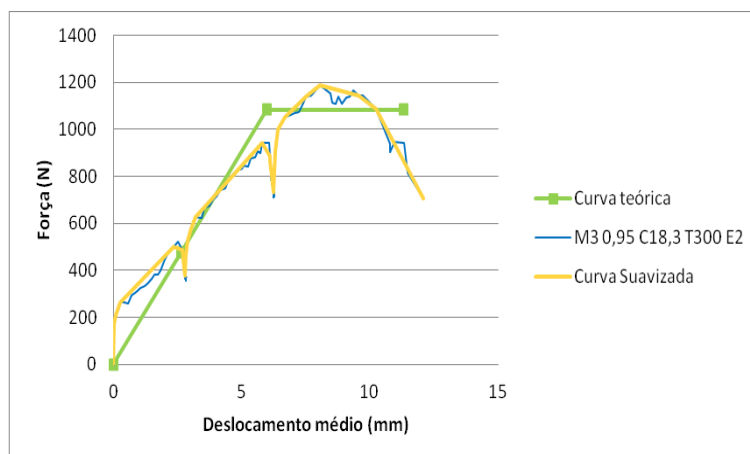


Figura 141 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C18,3 T300 E2” e curva teórica (EEEEP)

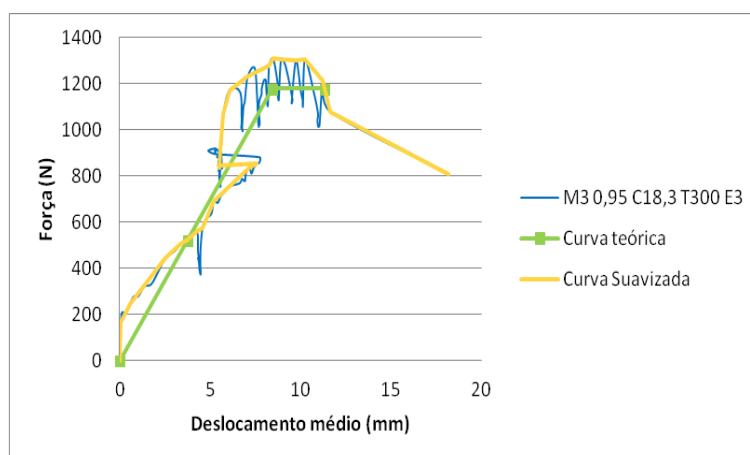


Figura 142 Gráfico força *versus* deslocamento do modelo “M3 0,95 C18,3 T300 E3” e curva teórica (EEEEP)