

**UNIVERSIDADE DE MINAS GERAIS**  
**Escola De Engenharia**  
**Programa De Pós-Graduação Em Engenharia De Estruturas**

Jordana Angélica De Faria

**DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO MONOTÔNICO E RESPOSTA  
CÍCLICA DO PAINEL CONSTITUÍDO POR PLACAS OSB E RETICULADO DE  
AÇO DO SISTEMA *LIGHT STEEL FRAMING***

Belo Horizonte

2024

Jordana Angélica De Faria

**DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO MONOTÔNICO E RESPOSTA  
CÍCLICA DO PAINEL CONSTITUÍDO POR PLACAS OSB E RETICULADO DE  
AÇO DO SISTEMA *LIGHT STEEL FRAMING***

Dissertação em versão final 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”.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Barreto Caldas

Belo Horizonte

2024

F224d

Faria, Jordana Angélica de.

Determinação do comportamento monotônico e resposta cíclica do painel constituído por placas OSB reticulado de aço do sistema *Light Steel Framing* [recurso eletrônico] / Jordana Angélica De Faria. - 2024.  
1 recurso online (111 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Francisco Carlos Rodrigues.

Coorientador: Rodrigo Barreto Caldas.

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

Apêndices: f. 86-111.

Bibliografia: f. 84-85.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Aço - Trabalhos a frio - Teses.  
3. Cisalhamento - Teses. 4. Estudos experimentais - Teses. 5. Chapas de aço - Teses. I. Rodrigues, Francisco Carlos. II. Caldas, Rodrigo Barreto.  
III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.  
IV. Título.

CDU: 624(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS



### **ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS Nº: 404 DA ALUNA JORDANA ANGÉLICA DE FARIA**

Às **08:30** horas do dia **02** do mês de **fevereiro** de **2024**, reuniu-se, em ambiente virtual, a Comissão Examinadora, a saber, indicada pelo Colegiado do Programa em **13 de setembro de 2023**, para julgar a defesa da Dissertação de Mestrado intitulada "**Determinação do Comportamento Monotônico e Resposta Cíclica do Painel Constituído por Placas OSB e Reticulado de Aço do Sistema Light Steel Framing**", cuja aprovação é um dos requisitos para a obtenção do Grau de MESTRE EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS na área de ESTRUTURAS.

Por motivos de saúde o orientador do trabalho, **Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues**, não participou da sessão de defesa.

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

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

**APROVADA Prof. Dr. Armando Cesar Campos Lavall - DEES -**

**UFMG: APROVADA**

**Prof. Dr. Eduardo de Miranda Batista - COPPE - UFRJ: APROVADA**

Pelas indicações acima, à candidata foi considerada APROVADA, conforme pareceres em anexo.

O resultado final foi comunicado publicamente à candidata pelo Presidente da Comissão.

Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

Belo Horizonte, 02 de fevereiro de 2024.

Observações:

1. A aprovação da candidata na defesa da Dissertação de Mestrado não significa que a mesma tenha cumprido todos os requisitos necessários para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Estruturas;
2. Este documento não terá validade sem a assinatura do Coordenador do Programa de Pós Graduação.



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Barreto Caldas, Professor do Magistério Superior**, em 02/02/2024, às 11:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo de Miranda Batista, Usuário Externo**, em 02/02/2024, às 11:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Armando Cesar Campos Lavall, Professor do Magistério Superior**, em 02/02/2024, às 11:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leandro Lopes da Silva, Coordenador(a)**, em 30/08/2024, às 11:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **2804131** e o código CRC **2DABB387**.

*“Originalidade é a volta à origem, de modo que original é aquele que, com novos meios, volta à simplicidade das primeiras soluções...”*

*(GAUDÍ, 1852-1926)*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Euler e Sinara pelo apoio, às minhas irmãs Débora e Paloma pela torcida, ao meu noivo Pedro pelo incentivo e ao meu primo dr. Thiago, pelo exemplo de dedicação. Também agradeço à colega Carolina pela jornada compartilhada.

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.

Ao CAPES e à FAPEMIG 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 meus amigos da Pós-Graduação, em especial a Carolina, por toda a ajuda.

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

## RESUMO

O Light Steel Framing (LSF) é um sistema construtivo autoportante que vem ganhando espaço no mercado brasileiro de construção civil, devido ao relativo baixo custo de produção, simplicidade de fabricação, rapidez de execução e racionalização da construção. A racionalização construtiva obtida por esta forma de construção mostra que o sistema pode solucionar a crescente demanda por moradias no Brasil devido ao seu potencial de utilização em larga escala e, com isso, vir a ser inserido no âmbito das tecnológicas sociais. O sistema é constituído por reticulados de perfis galvanizados formados a frio e o fechamento da estrutura de aço geralmente é efetuado com OSB (Oriented Strand Boards) ou placa cimentícia. Este tipo de painel também pode contribuir para a resistência da parede ao cisalhamento devido à resistência mecânica dos materiais constituintes, incluindo as placas de revestimento. Desta forma, a presente pesquisa envolve um trabalho experimental para investigar o desempenho estrutural de alguns painéis com função de paredes de cisalhamento (*shear wall*). Para tanto, será verificada a contribuição das placas OSB no aumento da rigidez no plano dessas paredes, com o objetivo de estabilizar a estrutura quanto às forças laterais e, se possível, reduzir o consumo de aço utilizado no sistema LSF. As análises experimentais foram realizadas através de quatro ensaios utilizando painéis em escala real, sendo três ensaios com placas de OSB e um ensaio com contraventamento apenas com treliças na vertical constituídas de perfis de encaixes estampados, submetidos a carregamento vertical uniforme, a carregamento lateral monotônico e também a carregamento lateral cíclico. Modos de falha, forças de cisalhamento e rigidez do painel foram observados.

Palavras-chave: perfil de aço formado a frio; parede de cisalhamento; Oriented Strand Board; análise experimental; *shear wall*.

## ABSTRACT

Light Steel Framing (LSF) is a self-supporting construction system that has been gaining space in the Brazilian civil construction market, due to its relatively low production cost, manufacturing simplicity, speed of execution and construction rationalization. The constructive rationalization achieved by this type of construction shows that the system can solve the increasing demand for habitations in Brazil due to its potential for large-scale use and, therefore, be inserted into the scope of social technologies. The system consists of cold-formed galvanized profiles and the wall sheathing of the steel structure is usually carried out with OSB (Oriented Strand Boards) or cement board. This type of panel can also contribute to the wall's shear strength (*shear wall*) due to the mechanical strength of the constituent materials. Thus, the present research involves experimental investigation to investigate the structural performance of some panels with shear wall function. In order to do so, the contribution of OSB plates will be verified in the increase of rigidity in the plane of these walls, with the objective of stabilizing the structure in terms of lateral forces and, if possible, reducing the consumption of steel used in the LSF system. The experimental analyzes were carried out through four assays using full-scale panels, what it means, three assays with OSB plates and one assay with bracing only with two vertical trusses consisting of stamped fitting profiles, subjected to uniform vertical loading, monotonic lateral loading and also cyclic side loading. Failure modes, shear forces and panel stiffness were observed.

Keywords: cold-formed steel; shear wall; Oriented Strand Board; experimental method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Componentes de um painel estrutural com abertura (adaptado de Santiago et al., 2012).....	19
Figura 1.2 Componentes de um painel de entrepiso (adaptado de Santiago et al., 2012).....	20
Figura 1.3 Alguns tipos de seções transversais. (Rodrigues, 2006).....	21
Figura 1.4 Estrutura metálica em perfil de aço galvanizado de residência de dois andares construída no sistema Light Steel Framing. (Light Steel Frame, 2017).....	21
Figura 1.5 Desenho esquemático de uma residência em Light Steel Framing (Santiago, 2012) .....	22
Figura 1.6 Estrutura de piso em Light Steel Framing (Santiago et al, 2012) .....	22
Figura 1.7 Caibros e vigas alinhados com montantes de painel estrutural (Santiago et al, 2012) .....	23
Figura 1.8 Desenho de painel de parede em Light Steel Framing – Unidade: milímetros (Autoria propria, 2020).....	24
Figura 2.1 Diferentes sistemas de contraventamento dos painéis LSF. (BALDASSINO, et al., 2014).....	28
Figura 2.2 Configuração do teste. (BALDASSINO, et al., 2014).....	28
Figura 2.3 Falhas típicas de conexão. (BALDASSINO, et al., 2014).....	30
Figura 2.4 Padrões de fissuras das placas. (BALDASSINO, et al., 2014).....	30
Figura 2.5 Resultados dos testes das paredes G8 (ensaios monotônicos e cíclicos). Fonte: BALDASSINO, et al., 2014 .....	31
Figura 2.6 Desenho do modelo ensaiado. (LIN et al., 2014).....	31
Figura 2.7 Configuração do ensaio (LIN et al., 2014).....	32
Figura 2.8 a) Gráfico de Força versus Deslocamento para carregamentos monotônicos. b) Envelope dos resultados de carga versus deslocamentos para ensaios cíclicos. Fonte: LIN et. al, 2014.....	33
Figura 2.9 Fratura do revestimento na ligação com a guia inferior (LIN et al., 2014).....	33
Figura 2.10 (a) configuração do ensaio e posicionamento de sensores (b) parede de cisalhamento com localização dos transdutores (números de 1 a 6). (LIU et. al 2014).....	34
Figura 2.11. Fotografias das configurações do espécime testado: (a) Teste 4, 1,22 metros de largura, revestido de placa OSB, com fita de aço horizontal e sem Perfil Ue superior; (b) Teste 16, 2,44 metros de largura, revestido de placa de gesso com	

viga C superior; (c) Teste 11c, 2,44 metros de largura, revestido de placa OSB, com fita de aço horizontal e viga C superior; (d) Teste 14, 2,44 metros de largura, revestido de placa OSB, com fita de aço horizontal e sem viga C superior . (LIU, 2014).....	34
Figura 2.12. Configuração do ensaio. (NIARI et. al, 2015) .....	36
Figura 2.13. Carregamento cíclico aplicado nos ensaios (NIARI et. al, 2015).....	37
Figura 2.14. Resposta de deslocamento lateral versus carga lateral dos painéis de parede de cisalhamento. (NIARI et. al, 2015).....	37
Figura 2.15. Comparação dos resultados. (A) Resultados de força versus deslocamento. (B) Curva envelope de força versus deslocamento (NIARI et. al, 2015) .....	38
Figura 2.16 Identificação dos componentes dos painéis de ensaio. a) Painel sem placa OSB; b) Painel com vedação por placas OSB. (Adaptado de HENRIQUES, 2017) .....	39
Figura 2.17 Layout experimental dos painéis LSF sujeitos a carregamento lateral. Fonte: HENRIQUES et al., 2017 .....	39
Figura 2.18 Modelos ensaiados de paineis LSF (HENRIQUES, 2017).....	40
Figura 2.19 Resultados de força versus deformação dos testes experimentais em painéis de estrutura de aço leve sujeito a carregamento lateral. (HENRIQUES, 2017).....	41
Figura 2.20 Configuração de teste. ( MARZALEH et. al, 2018) .....	42
Figura 2.21 Configuração do teste . (WU et. al, 2018).....	44
Figura 2.22. Posicionamento dos transdutores. (WU et. al, 2018).....	45
Figura 2.23 Modo de falha por cisalhamento das conexões por parafuso (modelos sem preenchimento de gesso). (a) inclinação dos parafusos (b) ruptura por cisalhamento dos parafusos (c) falha das conexões parafusadas. (WU et. al, 2018).....	45
Figura 2.24 Ruptura dos revestimentos (modelos preenchidos) (a) fratura local (b) deslizamentos (WU et. al, 2018) .....	46
Figura 2.25 Fotos de três modelos ensaiados. (Datchoua, 2018) .....	47
Figura 2.26 Modelos prontos para ensaio push-test. (REZENDE, 2019) .....	48
Figura 2.27. Configuração do ensaio. (WANG et. al, 2019).....	49
Figura 2.28. Vista geral da montagem do experimento (WANG et. al, 2019).....	49
Figura 2.29 Desenho esquemático da configuração de teste (LOPES et al, 2023) .....	51
Figura 2.30 Imagens de falhas comuns após ensaio. (a) flambagem local e escoamento da guia inferior; (b) rompimento da placa OSB; (c) ruptura por cisalhamento e arrancamento dos parafusos; (d) ruptura da placa de gesso. (LOPES et al., 2023)	52

Figura 2.31 Detalhes. (a) parede de LSF convencional; (b) perfis de LSF; (c) hold-down; (d) parede de LSF híbrida; (e) coluna de apoio lateral das paredes híbridas. (AKTEPE et al., 2023) .....	54
Figura 2.32 Vistas esquemáticas da configuração do teste. (AKTEPE et al., 2023).....	55
Figura 2.33 Posicionamento dos transdutores. (AKTEPE et al., 2023) .....	55
Figura 2.34 Posicionamento dos 4 transdutores de deslocamento no painel (ASTM 564-06)	58
Figura 2.35 Gráfico EEEP.(ASTM E2126, 2019).....	59
Figura 2.36 Cronograma de deslocamento cíclico conforme o método B (ASTM E2126-19). .....	61
Figura 2.37 Gráfico EEEP. (AISI S213) .....	61
Figura 2.38 Definição de $P_y$ (a) Gráfico de força versus deslocamento do protocolo de carregamento monotônico (b) curva envelope do protocolo de carregamento cíclico. (ECCS, 1986).....	62
Figura 3.1 Perspectiva 3D de ensaio de painéis de cisalhamento (DE FARIA, 2023) .....	63
Figura 3.2 Esquema de ensaio de painéis contraventados com placas OSB. (DE FARIA, 2023) .....	64
Figura 3.3. a) Detalhe de fixação do Hold-down b) Perspectiva da lateral do ensaio. (DE FARIA, 2023).....	64
Figura 3.4 Detalhamento do hold-down. (DE FARIA, 2023).....	65
Figura 3.5 Detalhe das fixações superiores do ensaio em perspectiva 3D (DE FARIA, 2023)	65
Figura 3.6 Perspectiva 3D indicando a posição dos transdutores de deslocamento para o ensaio de carregamento lateral. (DE FARIA, 2023) .....	67
Figura 3.7 Fotos dos transdutores posicionados para realização dos ensaios. (1) DTs 1, 4 e 5; (2) DT Diagonal; (3) DT2; (4): DT3. (DE FARIA, 2023) .....	68
Figura 3.8 Modelo em light steel frame com treliças verticais. (DE FARIA, 2023) .....	69
Figura 3.9 Reticulado de aço do modelo para receber as placas OSB (DE FARIA, 2023) .....	69
Figura 3.10 Placas OSB parafusadas ao engradamento do painel de LSF do modelo. (DE FARIA, 2023).....	70
Figura 3.11 Modelo M1M a) montagem antes do ensaio b), c) e d) montagem após ensaio. (DE FARIA, 2023) .....	71
Figura 3.12 Gráfico de sincronização entre Tempo versus Deslocamento medidos pelo DT3 e Tempo versus Força medidos pelo atuador no ensaio M1M. (DE FARIA, 2023).	72
Figura 3.13 Modelo M4M: a) montagem antes experimento b) montagem após experimento. (DE FARIA, 2023) .....	72

Figura 3.14 Gráfico Força versus Deslocamento do Atuador e transdutor DT3 medidos durante os ensaios M1M e M2M. (DE FARIA, 2023).....	73
Figura 3.15 Gráfico de sincronização entre Tempo versus Deslocamento medidos pelo DT3 e Tempo versus Força medidos pelo atuador hidráulico no ensaio do modelo M2C. (DE FARIA, 2023) .....	74
Figura 3.16 Modelo M2C: a) montagem antes do ensaio; b) modelo após ensaio, no momento da falha da placa OSB e do montante oposto ao da aplicação da força lateral; c) modelo após ensaio mostrando o painel flambado lateralmente, incluindo os três montantes mais próximos da aplicação da força lateral. (DE FARIA, 2023) .....	75
Figura 3.17 Ensaio do modelo M3C: a) montagem antes do ensaio; b) modelo após ensaio, no momento da falha da placa OSB e do primeiro montante do lado da aplicação da carga lateral; c) modelo após ensaio mostrando a placa OSB mais próxima da aplicação da força lateral flambada lateralmente. (DE FARIA, 2023) .....	76
Figura 3.18 Gráfico de Força versus Deslocamento e Curva Envelope do Atuador versus DT Diagonal medidos nos ensaios dos modelos M2C e M3C. (DE FARIA, 2023) ....	77
Figura 3.19 Gráfico EEEP do modelo M1M. (DE FARIA, 2023).....	77
Figura 3.20 Gráfico EEEP do modelo M4M. (DE FARIA, 2023).....	78
Figura 3.21 Gráfico EEEP do modelo M2C. (DE FARIA, 2023).....	78
Figura 3.22 Gráfico EEEP do Modelo M3C. (DE FARIA, 2023) .....	79
Figura 4.1 Gráfico de Força versus Deslocamento e Curva Envelope da Força Horizontal versus e DT Diagonal medidos nos ensaios dos modelos M1M, M2C, M3C e M4C. (DE FARIA, 2023).....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 Dimensões nominais usuais dos perfis de aço para o LSF (ABNT NBR 15253, 2014).....	20
Tabela 2.1 Resultados medidos nos ensaios realizados. (Adaptado de Baldassino et al., 2014) .....	29
Tabela 2.2 Resultados da rigidez dos ensaios de acordo com padrão ECCS e AISI. (Adaptado de LIN, 2014) .....	32
Tabela 2.3 Resumo dos resultados dos ensaios (adaptado de LIU, 2014).....	35
Tabela 2.4. Detalhes das paredes em LSF revestidas com aço. (adaptado de NIARI et. al, 2015).....	36
Tabela 2.5 Programa experimental em painéis de LSF sujeitos a carregamento lateral. (Adaptado de HENRIQUES et. al, 2017).....	38
Tabela 2.6 Resumo dos resultados dos ensaios experimentais em painéis de estrutura leve de aço sujeitos a carregamento lateral (Adapato de HENRIQUES, 2017). .....	40
Tabela 2.7 Resultados dos ensaios (MARZALEH et al., 2018).....	42
Tabela 2.8 Descrição dos modelos ensaiados e resultados obtidos (WU et. al, 2018).....	43
Tabela 2.9 Descrição dos modelos ensaiados (WANG et. al, 2019).....	49
Tabela 2.10 Informações dos modelos ensaiados (LOPES et al., 2023).....	50
Tabela 2.11 Resultados experimentais obtidos com os testes de paredes constituídas de painéis LSF (LOPES et al., 2023).....	52
Tabela 2.12 Resultados obtidos através dos ensaios experimentais. (AKTEPE et al., 2023) ..	53
Tabela 2.13 Amplitudes dos ciclos conforme o Método B. (ASTM E2126-19).....	60
Tabela 3.1 Posicionamento dos DTs – (DE FARIA, 2023) .....	66
Tabela 3.2 Especificação dos ensaios de carregamento lateral cíclico e monotônico (DE FARIA, 2023).....	68
Tabela 3.3 Resultado de força máxima e rigidez dos ensaios monotônicos (DE FARIA, 2023) .....	73
Tabela 3.4 Resultados de carga máxma e rigidez dos modelos sob carregamentos cíclicos. (DE FARIA, 2023) .....	76
Tabela 4.1 Resultados de cargas, rigidez, carga elástica e força de escoamento dos ensaios de carregamentos monotônico e cíclico de acordo com a ASTM E2126. (DE FARIA, 2023).....	80

## LISTA DE SÍMBOLOS

$G$	Rigidez de cisalhamento interno
$K$	Taxa de deformação das fibras da madeira
$K_0$	Rigidez inicial
$K_e$	Rigidez elástica da ligação
$kN$	KiloNewton
$P_{m\acute{a}x}$	Carga máxima
$P_e$	equivale a 0,4 da carga máxima atingida
$P_u$	equivale a 0,8 de $P_{m\acute{a}x}$
$P_y$	Força inicial de escoamento
$U_e$	U enrijecido
$\mu$	Ductilidade
$V$	Velocidade de carregamento dos corpos de prova à flexão
$\Delta$	Varição de deslocamento
$\Delta_{int}$	Varição de deslocamento interno
$\Delta_e$	Deslocamento lateral correspondente a $P_e$
$\Delta_y$	Deslocamento lateral correspondente a $P_y$
$\Delta_{max}$	Deslocamento lateral correspondente a $P_{m\acute{a}x}$
$\Delta_u$	Deslocamento lateral correspondente a $P_u$

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior
DEES	Departamento de Engenharia de Estruturas
DT	Transdutor de Deslocamento
ECCS	<i>European Convention for Constructional Steelwork</i>
EEEP	<i>Equivalent energy elastic-plastic model</i>
EN	<i>European Committee Standardization – European Standard</i>
LAEES	Laboratório de Análise Experimental de Estruturas
LSF	<i>Light Steel Framing</i>
NBR	Norma Brasileira
PROPEEs	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
ZAR	Aço de Alta Resistência Mecânica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1	<i>Considerações Iniciais</i> .....	18
1.2	<i>Características Gerais do Sistema</i> .....	18
1.2.1	Painel de Cisalhamento .....	24
1.3	<i>Objetivos</i> .....	25
1.4	<i>Justificativa</i> .....	25
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO</b> .....	<b>27</b>
2.1	<i>Ensaios</i> .....	27
2.1.1	Pesquisa realizada por Baldassino <i>et al.</i> (2014) .....	27
2.1.2	Pesquisa realizada por Lin <i>et al.</i> (2014) .....	31
2.1.3	Pesquisa realizada por Liu <i>et al.</i> (2014) .....	33
2.1.4	Pesquisa realizada por Niari <i>et al.</i> (2015).....	36
2.1.5	Pesquisa realizada por Henriques <i>et al.</i> (2017) .....	38
2.1.6	Pesquisa realizada por Marzaleh <i>et al.</i> (2018).....	41
2.1.7	Pesquisa realizada por Wu <i>et al.</i> (2018) .....	43
2.1.8	Pesquisa realizada por Datchoua (2018) .....	46
2.1.9	Pesquisa realizada por Rezende (2019).....	47
2.1.10	Pesquisa realizada por Wang <i>et al.</i> (2019) .....	48
2.1.11	Pesquisa realizada por Lopes <i>et al.</i> (2023) .....	50
2.1.12	Pesquisa realizada por Aktepe <i>et al.</i> (2023) .....	53
2.2	<i>Normas</i> .....	56
2.2.1	ASTM E564-5286 .....	57
2.2.1.1	Procedimento de teste.....	57
2.2.1.2	Cálculo .....	59
2.2.2	ASTM E2126-29944 .....	59
2.2.3	AISI S213-07/S1-09 2012 .....	61
2.2.4	ECCS 1986 .....	62
<b>3</b>	<b>ENSAIOS EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>63</b>
3.1	<i>Configuração de montagem</i> .....	63
3.1.1	Detalhes dos dispositivos e fixações utilizados na configuração de teste .....	64
3.1.2	Instrumentação.....	66

3.1.3	Modelos ensaiados com a configuração de teste .....	68
3.2	<i>Ensaio de carregamento lateral monotônico</i> .....	70
3.3	<i>Ensaio de carregamento lateral cíclico</i> .....	73
3.3.1	Definições de EEEP – Equivalent energy elatic-plastic model.....	77
<b>4</b>	<b>DISCUSSÕES</b> .....	<b>80</b>
4.1	<i>Em relação a montagem</i> .....	81
4.2	<i>Em relação ao tipo de ensaio</i> .....	81
4.3	<i>Em relação aos resultados obtidos</i> .....	81
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>83</b>
	<b>Referências</b> .....	<b>84</b>
	<b>Apêndice A – Gráficos dos ensaios monotônicos</b> .....	<b>86</b>
	<b>Apêndice B – Gráficos dos ensaios cíclicos</b> .....	<b>99</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

A Primeira Revolução Industrial, começada na Inglaterra no século XVIII, foi um marco importante para o crescimento econômico, pela industrialização e mecanização das fábricas, permitindo avanços tecnológicos e utilização de materiais, antes inexplorados, como o aço. Em 1850, temos um dos primeiros edifícios construídos em ferro e aço, o Palácio de Cristal, em Londres, e a Torre Eiffel, em Paris de 1889. Com a disponibilidade de materiais como vidro e aço, as construções deixaram de se moldar pelos limites impostos pelos antigos materiais, como a pedra e a madeira. Nos Estados Unidos, o aço foi inaugurado em 1869, na Ponte do Brooklyn, Nova Iorque e o primeiro edifício em estrutura metálica, foi o “*Home Insurance Company*”, em Chicago de 1885 (CONSUL STEEL, 2002).

Apesar de alguns países latino-americanos serem um dos maiores produtores mundiais de aço, o emprego do material como estrutura de edificações, é bastante reduzido em comparação ao seu potencial. Ainda falta acesso à informação e preparo de profissionais qualificados para mão de obra (SANTIAGO et al., 2012).

Para reduzir o uso de insumos e operações nos canteiros de obra, é necessário a utilização de novos sistemas construtivos, e um dos fatores que podem contribuir para facilitar a implementação destas novas tecnologias, é apresentar o impacto nos custos de uma construção.

## 1.2 Características Gerais do Sistema

Entre as soluções construtivas em estrutura metálica, o sistema Light Steel Frame (LSF) é uma construção a seco, que utiliza perfis leves de aço galvanizado formados a frio e tem sido considerado leve e econômico no mercado da construção civil. 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 verticais conduzem as forças verticais e horizontais para a fundação do edifício.

Além dos subsistemas estruturais, também fazem parte do LSF, os subsistemas de isolamento, placas de fechamentos interno e externo (com função apenas de vedação ou como componentes estruturais das paredes de cisalhamento), telhado e instalações elétricas e

hidráulicas, entre outros. O emprego do LSF é vantajoso, pois reduz o tempo de execução e o desperdício; tem maior resistência à corrosão; durabilidade; custo reduzido; é 100% reciclável e incombustível (RODRIGUES et al., 2016).

Para garantir que o sistema resista também aos esforços horizontais, é necessário que haja um contraventamento na parede estrutural (shear wall), que pode ser feito com fitas de aço galvanizado, ou com treliça na vertical constituída de perfis de encaixes estampados bem como com placas de revestimento. A presente dissertação contempla a análise dos resultados de ensaios monotônicos e dos ensaios cíclicos realizados em três painéis constituídos por placas OSB (oriented strand board) e o reticulado de aço do sistema Light Steel Framing e em um painel constituído apenas pelo reticulado de aço e contraventado em cada uma de suas extremidades por treliça na vertical formada por perfis de encaixes estampados.

Os perfis são obtidos a partir de bobinas de aço Zincado de Alta Resistência (ZAR), com revestimento metálico igual a 150 g/m<sup>2</sup> (alumínio-zinco) e 275 g/m<sup>2</sup> (zinco) e, tem resistência ao escoamento de no mínimo 230 Mpa. A capacidade autoportante do sistema é devido a forma alinhada no qual se encontram os perfis, dando origem ao termo “in line framing”.

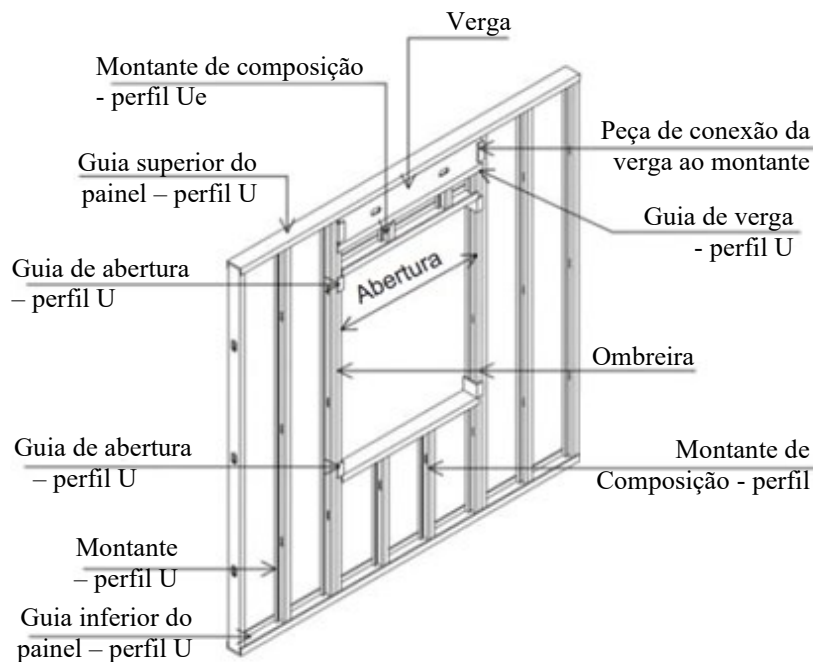


Figura 1.1 Componentes de um painel estrutural com abertura (adaptado de Santiago et al., 2012).

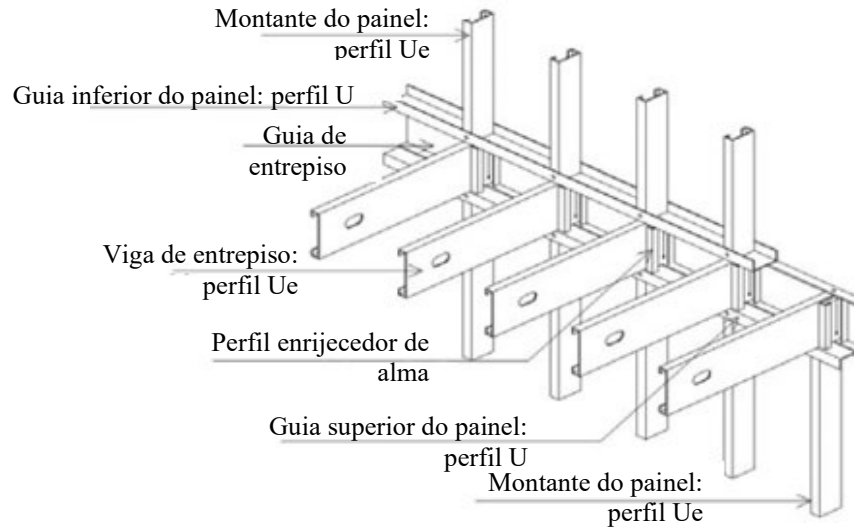


Figura 1.2 Componentes de um painel de entrepiso (adaptado de Santiago et al., 2012).

Tabela 1.1 Dimensões nominais usuais dos perfis de aço para o LSF (ABNT NBR 15253, 2014)

Denominação	Tipo	Largura da alma “bw” (mm)	Largura da mesa “bf” (mm)	Largura do enrijecedor de borda “D” (mm)
Ue 90	Montante	90	40	12
Ue 140	Montante	140	40	12
Ue 200	Montante	200	40	12
U 90	Guia	92	38	-
U 140	Guia	142	38	-
U 200	Guia	202	38	-

Os perfis mais comercializados no Brasil são os de 90, 140 e 200 mm 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. Além dessas, as seções do tipo cartola, usados em ripas de telhados, e a cantoneira, utilizada para fazer conexões, também podem ser utilizadas. Os montantes e as vigas, são responsáveis pela transmissão de esforços, enquanto as guias, geralmente não transferem e nem absorvem esforços. Ver elementos do sistema na Figura 1.1 e Figura 1.2 e os perfis na Figura 1.3 e na Tabela 1.1.

A ABNT NBR 15253 (2014) trata exclusivamente de perfis com revestimento metálico, onde são estabelecidas espessuras nominais (soma da espessura da chapa e da espessura do revestimento dos dois lados): mínima de 0,80 mm e máxima de 3,00 mm. A resistência ao escoamento mínima especificada é de 230 MPa. Além disso, é admitida a execução de aberturas sem reforços nos perfis, desde que o eixo de furação esteja no eixo longitudinal central da alma do perfil e a geometria dos furos esteja de acordo com o desenho especificado na norma. Ainda de acordo com a norma, a distância entre furos sucessivos é maior ou igual a 600 mm, e deve estar, no mínimo, a 300 mm da extremidade do perfil. A Figura 1.3, exibe alguns tipos de seções transversais.

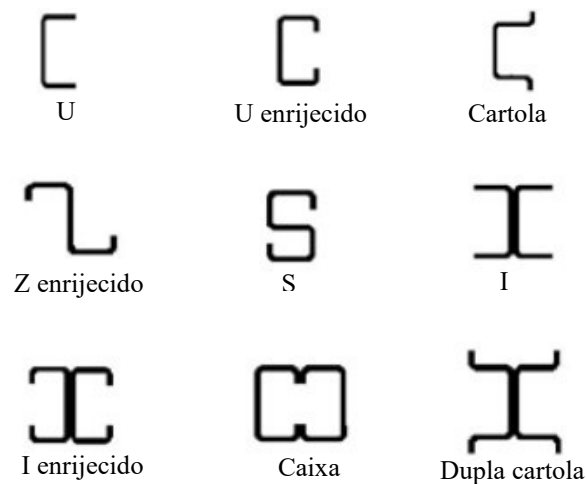


Figura 1.3 Alguns tipos de seções transversais. (Rodrigues, 2006).

Vale ressaltar que, para o cálculo estrutural de uma edificação em LSF, o ideal é considerar o maior número de elementos estruturais para suportar as cargas de tal forma que cada um seja responsável por resistir a uma pequena parcela da força total aplicada. Dessa maneira, se utilizará de perfis e painéis mais leves (RODRIGUES E CALDAS, 2016).



Figura 1.4 Estrutura metálica em perfil de aço galvanizado de residência de dois andares construída no sistema Light Steel Framing. (Light Steel Frame, 2017)

O sistema LSF possui grande flexibilidade e versatilidade no projeto arquitetônico, podendo ser utilizado para construção de residências unifamiliares, edifícios residenciais e comerciais até sete pavimentos, hotéis, hospitais, clínicas, estabelecimentos de ensino e até unidades modulares. A Figura 1.4 trata-se de um exemplo de utilização do sistema LSF.

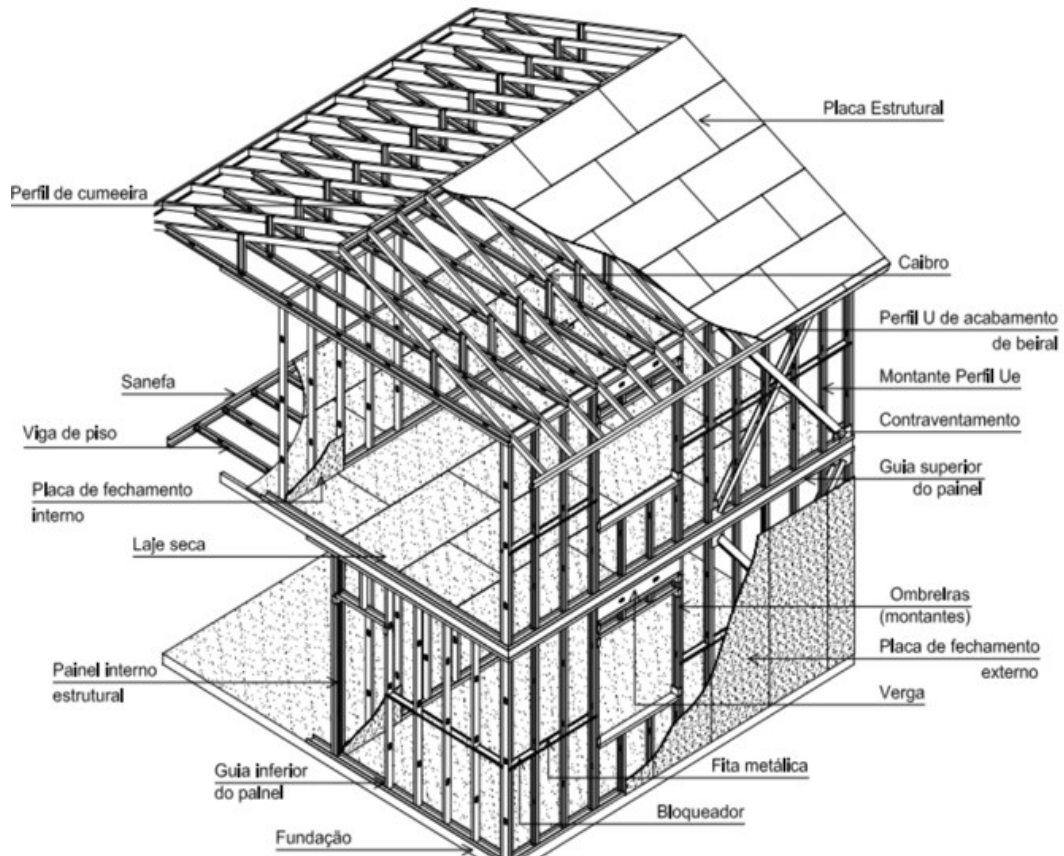


Figura 1.5 Desenho esquemático de uma residência em Light Steel Framing (Santiago, 2012)

As vigas de piso estão apoiadas nos montantes, de forma alinhada, para garantir que a estrutura atenda aos esforços solicitantes, além de que precisam ser resistentes 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, é necessário sanefa ou guia de encabeçamento, enrijecedor de alma, vigas caixa de borda. Quanto aos tipos de lajes sobre telha metálica, existem duas, a laje do tipo úmida e 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 1.5.

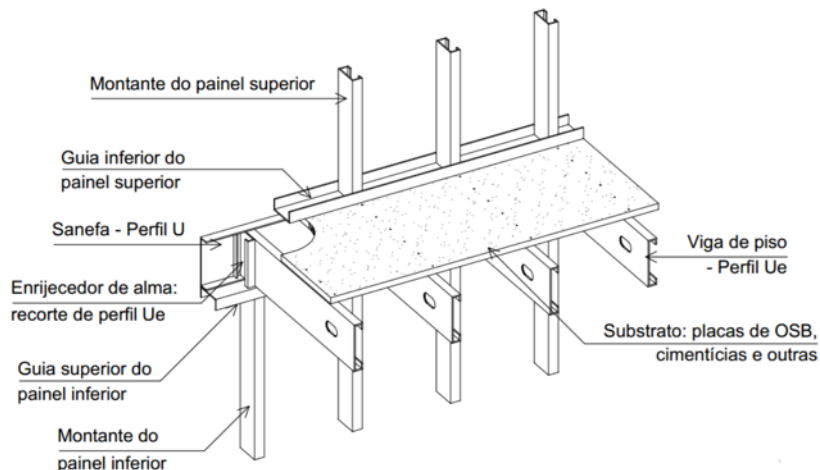


Figura 1.6 Estrutura de piso em Light Steel Framing (Santiago et al, 2012)

A cobertura, evidenciada na Figura 1.7 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 a alma dos perfis do telhado esteja alinhada a alma dos perfis dos painéis estruturais das paredes.

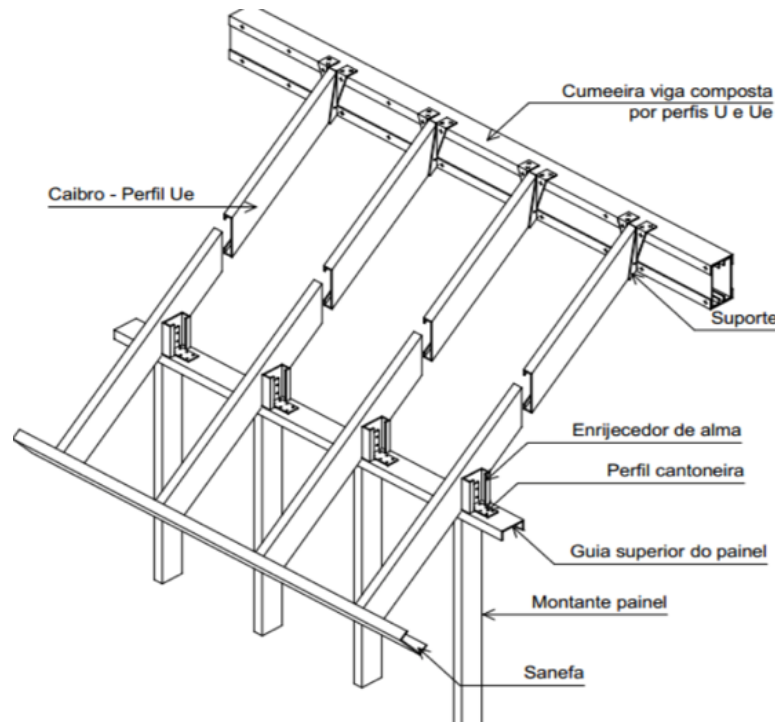


Figura 1.7 Caibros e vigas alinhados com montantes de painel estrutural (Santiago et al, 2012)

Para que o sistema LSF funcione de maneira correta, é necessário que os conectores sejam utilizados de maneira correta 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 o de ancoragem “hold-down” e 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 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. Os furos são pré-determinados no projeto conforme a NBR 15253 (ABNT, 2014).

### 1.2.1 PAINEL DE CISALHAMENTO

Os painéis de paredes estruturais são compostos por placas de revestimento, geralmente de OSB e, de reticulados de aço constituídos por montantes, separados entre si por 400 ou 600 mm, conforme a Figura 1.8. Os painéis distribuem as forças da estrutura, transmitindo-as ao solo e podem ser revestidos por diversos materiais, tanto na parte externa quanto na parte interna.

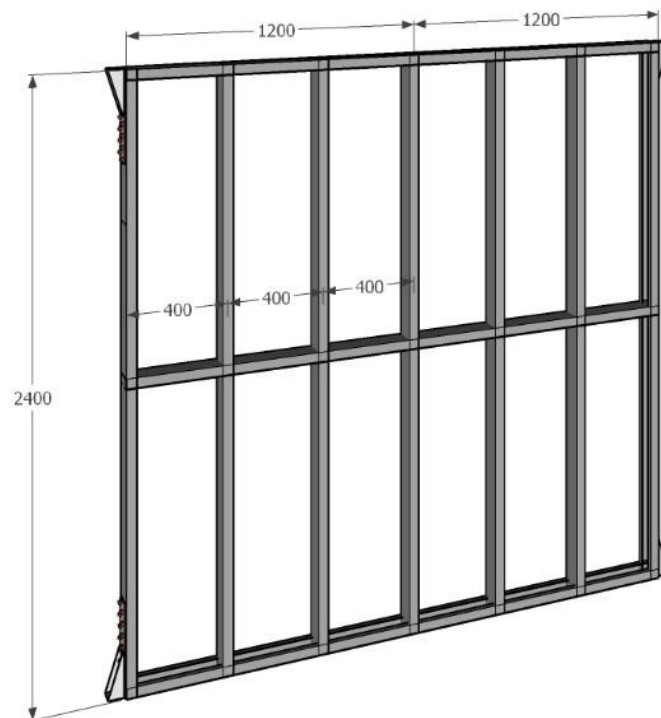


Figura 1.8 Desenho de painel de parede em Light Steel Framing – Unidade: milímetros (Autoria própria, 2020)

O sistema de fechamento dos painéis estruturais é feito com vedações 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 Santiago et al. (2012). As placas são fabricadas de acordo com as dimensões estabelecidas no projeto de arquitetura para atender ao pé direito estabelecido e o painel composto por elas deve considerar esta modulação, conforme visto na Figura 1.8.

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 interior do reticulado de aço do sistema LSF, que segue o princípio massa-mola-massa, no qual se insere um material absorvente entre os painéis estruturais, como a lã de vidro.

### 1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é avaliar, experimentalmente, a contribuição das placas OSB na rigidez dos painéis de cisalhamento em Light Steel Framing quando solicitadas à força horizontal. Dessa forma, este estudo irá contribuir com pesquisas futuras relacionadas ao contraventamento dos painéis do sistema LSF feito por placas OSB e o reticulado metálico, afim de também reduzir o consumo de aço no sistema.

Além do objetivo geral, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- a) realizar uma revisão bibliográfica para averiguar quais ensaios já foram realizados e os resultados de cada um para comparação posterior;
- b) determinar e comparar, por meio de ensaios monotônicos e cíclicos, o comportamento em painéis de light steel framing vedados com placas OSB e painéis de light steel framing estabilizados apenas com treliças verticais em suas extremidades.

### 1.4 Justificativa

Como já foi citado, o uso do sistema LSF traz inúmeras vantagens e vem crescendo cada vez mais no Brasil. É de extrema importância maximizar as vantagens estruturais deste sistema normatizando o uso das placas de vedação também como contribuintes para resistência e rigidez quando as paredes são submetidas a carregamento lateral. Conhecer tais propriedades das placas em trabalho conjunto com o restante do painel é fundamental para reduzir a quantidade de aço do sistema, pois as placas poderiam também substituir o uso de treliças e fitas de aço galvanizados, as quais são mais onerosas, gerando economia.

Além do mais, este estudo traz conhecimento tecnológico e científico sobre o uso do sistema LSF e aproveitamento total dos materiais utilizados. De posse dos resultados dos ensaios monotônicos e cíclicos, em termos de força e deslocamento, será possível definir os parâmetros necessários para determinar o comportamento quanto à rigidez lateral do painel de

cisalhamento em estudo. Espera-se que os resultados obtidos nesta pesquisa contribuam e sirvam de base para a elaboração ou revisão de normas brasileiras para especificação e determinação dos parâmetros de ensaio dos painéis de cisalhamento tendo placas OSB como componentes de contraventamento.

Com isto, este trabalho atende aos objetivos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas (PROPEEs/UFMG), além de complementar pesquisas já iniciadas pelos professores Francisco Carlos Rodrigues e Rodrigo Barreto Caldas relacionadas ao sistema construtivo LSF.

## 2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Esta pesquisa foi baseada em ensaios similares realizados e em normas técnicas, os quais serão apresentados nos subtópicos a seguir.

### 2.1 Ensaios

#### 2.1.1 Pesquisa realizada por Baldassino *et al.* (2014)

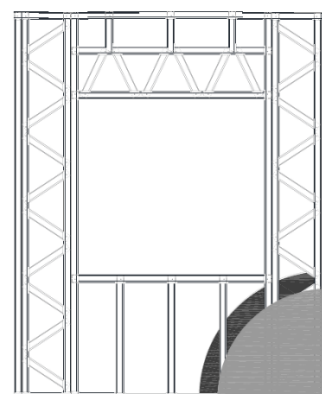
Baldassino *et al.* (2014) realizaram oito ensaios de carregamento monotônico e cíclico em painéis de paredes de LSF revestidas com placas de diferentes materiais:

- A - placa de cimento;
- B - papelão que combina fibras de celulose;
- E - placa de cimento reforçada com fibra;
- F - placa de cimento com fibra de madeira;
- G - placa de cimento reforçada com malha de fibra de vidro;
- H - placa de fibra de gesso.

Com o objetivo de gerar um modelo numérico para capturar flambagem elástica local das vigas e rigidez das conexões, foram feitos testes experimentais em paredes sujeitas a cargas verticais combinadas e deslocamentos laterais no plano do modelo, bem como testes nas conexões de revestimento e de aço com revestimento. A Figura 2.1 exibe os quatro tipos de configuração dos modelos que receberam as placas como revestimento.



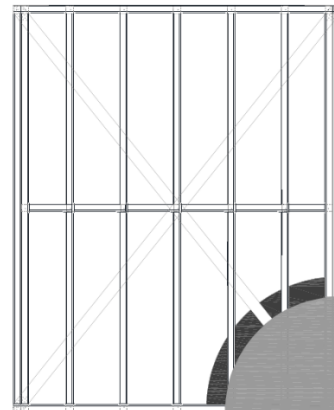
a) G5 – Painel LSF com treliças verticais laterais



b) G7 – Painel LSF com treliças verticais laterais e janela central com treliça superior



c) G8 – Painel LSF sem acréscimos de contraventamento



d) G9 Painel LSF com fita de aço “X”

Figura 2.1 Diferentes sistemas de contraventamento dos painéis LSF. (BALDASSINO, et al., 2014)

Para o teste, foi construída uma configuração especialmente para as paredes de LSF, utilizado para aplicar uma carga vertical constante de 16,96kN/m ao longo do comprimento do painel, bem como um deslocamento lateral no plano do topo da parede, conforme Figura 2.2



a) vista lateral



b) vista frontal

Figura 2.2 Configuração do teste. (BALDASSINO, et al., 2014)

Os testes das paredes foram realizados em 8 tipos de painéis de parede (com dimensões de 2.400m x 3.018 mm) com perfis verticais espaçados de 400 mm entre si, conectados por rebites de 4,8 mm de diâmetro. As variações das paredes eram: apenas estrutura de aço, estrutura de aço contraventada com fitas de aço em X, estrutura de aço contraventada com treliças verticais e estrutura de aço com treliças verticais e janela central sob treliça horizontal. A segunda variação foi o tipo de revestimento usado: cinco tipos diferentes de placa cimentícia e uma placa de gesso.

Para os ensaios experimentais, Baldassino et al. (2014) projetaram uma configuração com aplicação de força de gravidade constante de 16,96 kN/m ao longo do comprimento da parede e um atuador hidráulico para aplicar o deslocamento lateral no topo e no plano da parede.

Para o carregamento monotônico foi utilizada uma taxa de velocidade mínima de 0,5 mm/min e taxa de velocidade máxima 16 mm/min. Já para o ensaio cíclico, a taxa de velocidade mínima foi 0,6 mm/min e a taxa de velocidade máxima foi de 14,7 mm/min, conforme o procedimento de teste da ECCS (1986) para elementos estruturais de aço sob carregamentos cíclicos.

Os resultados em termos de rigidez secante (até 0,4 da carga máxima), carregamento lateral última ( $P_U$ ) e rotação na carga final, bem como a rotação de 0,8 da carga final 0,8 (pós-pico) são fornecidos na Tabela 2.1

Para o cálculo da rigidez ( $G$ ), diferente de Henriques et al. (2017), a ser apresentado posteriormente, o autor utilizou o valor de 40% da carga máxima em acordo com a ASTM D1037-06 (2006).

Tabela 2.1 Resultados medidos nos ensaios realizados. (Adaptado de Baldassino et al., 2014)

Modelo	Carga Lateral Máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ ) (kN)	Rotação na Carga Máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ ) (mrad)	Rotação a 0,8 da Carga Máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ ) (mrad)	Rigidez ( $G$ )(kN/m)
G5 100 400 BB-1	64.20	9,7	18,2	6760
G5 100 400 BB-2	62.72	10,3	-	5639
G7 100 400 AB-1	40.40	19,8	32,2	2864
G8 100 400 EF-1	70.04	17,3	-	6044
G8 100 400 EF-2	66.80	10,8	-	5463
G8 100 400 BB-1	66.48	11,2	19,3	6170
G9 100 400 GH-1	76.92	13,3	-	5320
G9 100 400 GH-2	70.76	18,0	-	3824

\*As letras A, B, E, F, G e H se referem a qual tipo de placa foi usada em cada um dos dois lados do modelo.

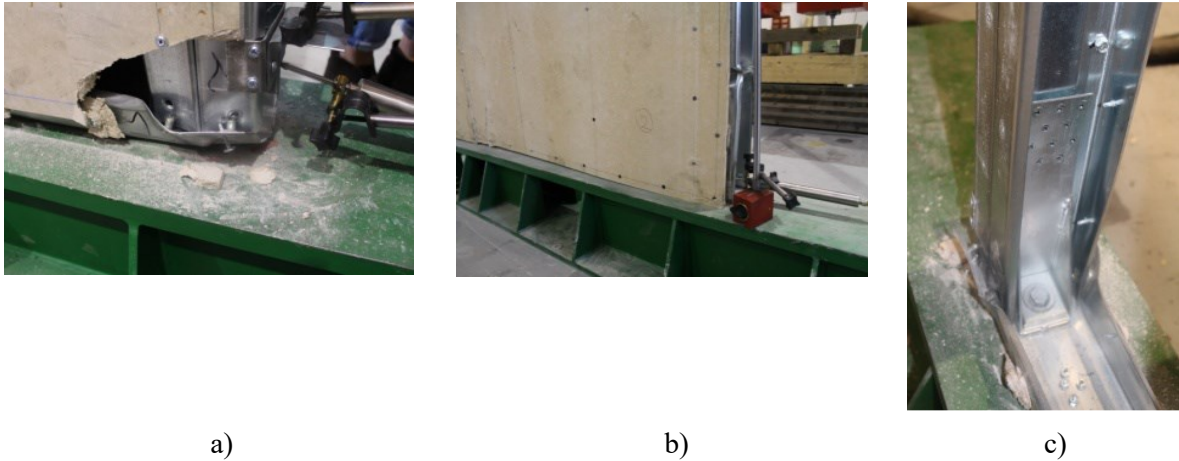
\*Os números 5, 7, 8 e 9 identificam qual o sistema de contraventamento do painel LSF, sendo: treliças verticais laterais, treliças verticais laterais e janela central com treliça superior, sem acréscimos de contraventamento, e com fita de aço "X", respectivamente.

\*O número 1 e 2 indicado no final do nome do modelo se refere ao protocolo de carregamento utilizado: monotônico e cíclico, respectivamente.

Baldassino et al. (2014) verificaram que o tipo de sistema de contraventamento de aço não influenciou de forma substancial na rigidez e na capacidade máxima de carga dos modelos, as quais foram principalmente atribuídas ao tipo de revestimento por placas. Também foi observado que os modelos sem placa de revestimento obtiveram uma perda prematura de carga, associada com a falha na ligação do hold-down ao painel. Em relação aos modelos com abertura de janela, notou-se uma significativa redução da rigidez e capacidade de cisalhamento, embora foi observado o aumento de deslocamento no colapso.

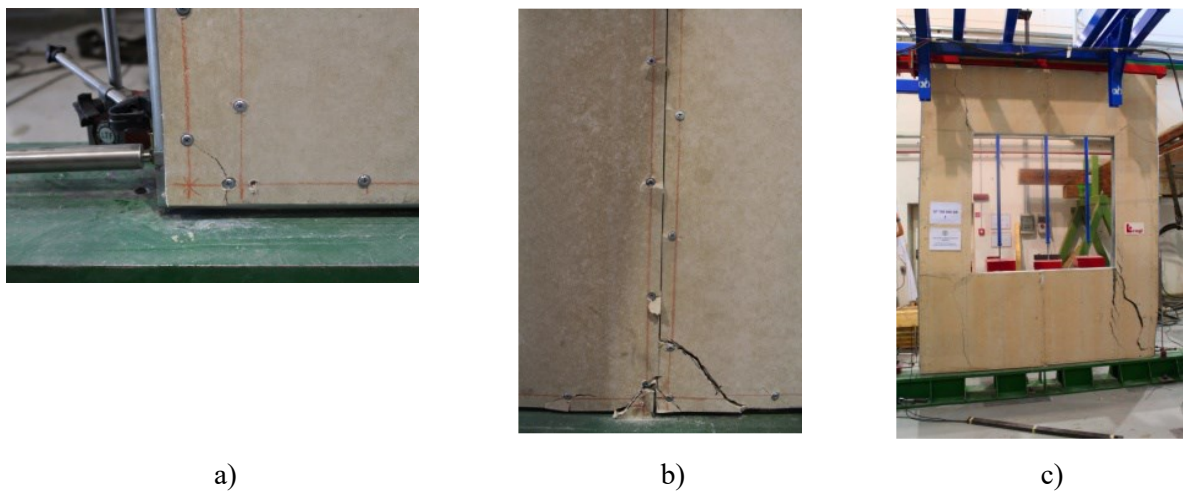
Baldassino et al. (2014) também concluíram que a falha dos espécimes foi causada principalmente pela degradação da resistência das conexões dos parafusos de revestimento

fixado nos montantes (Figura 2.3), dos rebites que conectam os membros da estrutura de aço, dos parafusos entre os montantes e hold-downs e, finalmente, dos chumbadores de ancoragem. Deformações localizadas nos montantes e padrões de fissuras das placas de revestimento (Figura 2.4) também foram observados. Os testes nas paredes descritos nesta seção ilustram claramente o papel principal desempenhado tanto pelas placas de revestimento quanto pelas conexões do revestimento à estrutura na resposta geral das paredes.



a) b) c)

Figura 2.3 Falhas típicas de conexão. (BALDASSINO, et al., 2014)



a) b) c)

Figura 2.4 Padrões de fissuras das placas. (BALDASSINO, et al., 2014)

“Respostas muito semelhantes também foram observadas nos testes cíclicos e monotônicos, se o mesmo tipo de parede de cisalhamento for considerado”, afirmam Baldassino et al. (2014). Foram percebidos os mesmos modos de falha e curvas semelhantes. A Figura 2.5 compara as curvas carga-deslocamento lateral para o teste monotônico (linha tracejada) e o teste cíclico reverso (linha contínua)

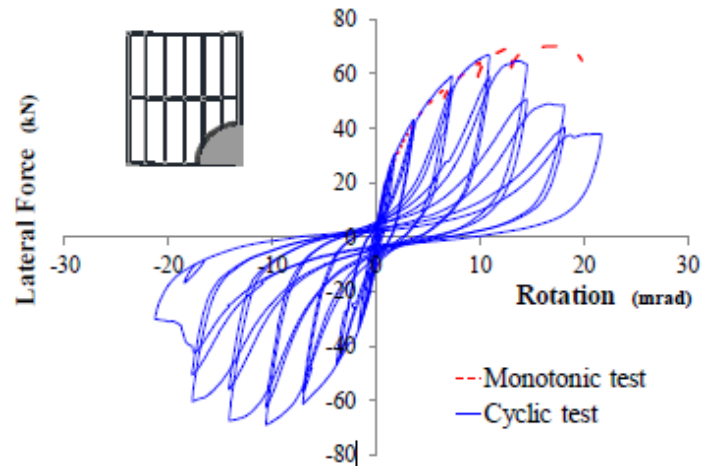


Figura 2.5 Resultados dos testes das paredes G8 (ensaios monotônicos e cíclicos). Fonte: BALDASSINO, et al., 2014

### 2.1.2 Pesquisa realizada por Lin et al. (2014)

Lin et. al (2014) realizaram testes de carregamento cíclicos e monotônicos em paredes de LSF revestidas com placas de silicato de cálcio.

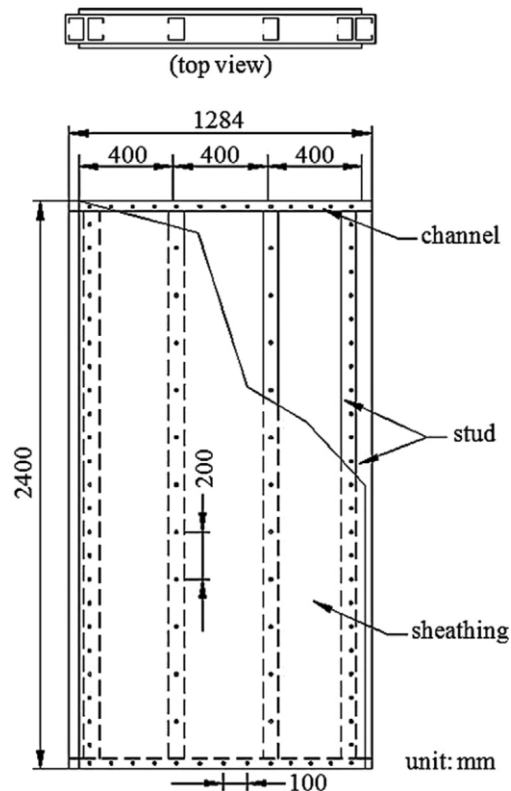


Figura 2.6 Desenho do modelo ensaiado. (LIN et al., 2014)

Os espécimes de teste foram colocados verticalmente na plataforma de ensaio (Figura 2.7) para conduzir o comportamento estrutural dos painéis de parede. O atuador com capacidade de 500 kN foi usado para aplicar o cisalhamento monotônico e a força cíclica em todos os espécimes. Um total de nove espécimes (ver Figura 2.6) foi testado nesse estudo para investigar

o comportamento estrutural dos painéis de parede LSF com revestimento. Três modelos foram testados sob carga de cisalhamento monotônico (Figura 2.8 (a)) e seis foram testados sob força horizontal cíclica, (b) nos quais foi variada a espessura da placa (9 e 12mm) e se os painéis eram revestidos apenas de um lado ou nos dois lados.

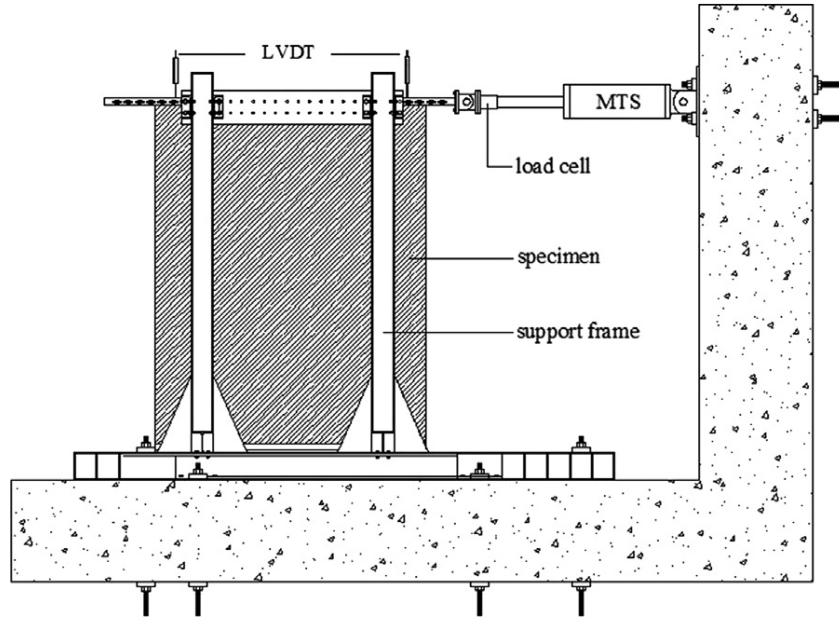


Figura 2.7 Configuração do ensaio (LIN et al., 2014)

Tabela 2.2 Resultados da rigidez dos ensaios de acordo com padrão ECCS e AISI. (Adaptado de LIN, 2014)

Modelo	Descrição	Rigidez de acordo com ECCS (kN/mm)	Rigidez de acordo com AISI (kN/mm)
FM-C09-HO-1	Monotônico - Painel com revestimento de 9mm em um lado	0,51	0,95
FC-C09-HO-1	Cíclico - Painel com revestimento de 9 mm em um lado	0,33	0,61
FC-C09-HO-2	Cíclico - Painel com revestimento de 9 mm em um lado	0,37	0,68
FM-C12-HO-1	Monotônico - Painel com revestimento de 12 mm em um lado	0,53	0,99
FC-C12-HO-1	Cíclico - Painel com revestimento de 12 mm em um lado	0,42	0,78
FC-C12-HO-2	Cíclico - Painel com revestimento de 12 mm em um lado	0,41	0,77
FM-C09-HT-1	Monotônico - Painel com revestimento de 9mm em dois lados	0,66	1,24
FC-C09-HT-1	Cíclico - Painel com revestimento de 9 mm em dois lados	0,43	0,81
FC-C09-HT-2	Cíclico - Painel com revestimento de 9 mm em dois lados	0,46	0,87

\*As siglas FM e FC se referem ao tipo de carregamento: monotônico e cíclico, respectivamente.

\*Os números 09 e 12 se referem a espessura das placas de silicato de cálcio, sendo 9 mm e 12 mm, respectivamente.

\*As siglas HO e HT se referem a painel revestido com placa em apenas um dos lados ou dos dois lados, respectivamente.

Fica claro, na Tabela 2.2, a relevância do revestimento como fator estrutural, pois, a carga máxima para painéis com dois lados de revestimento de 9 mm de espessura é cerca de 40,7% maior do que as das amostras com um lado de 9 mm do revestimento quando submetidas

a cargas cíclicas, de acordo com a Figura 2.8. Os padrões de cálculo ECCS e AISI serão apresentados na seção 2.2.

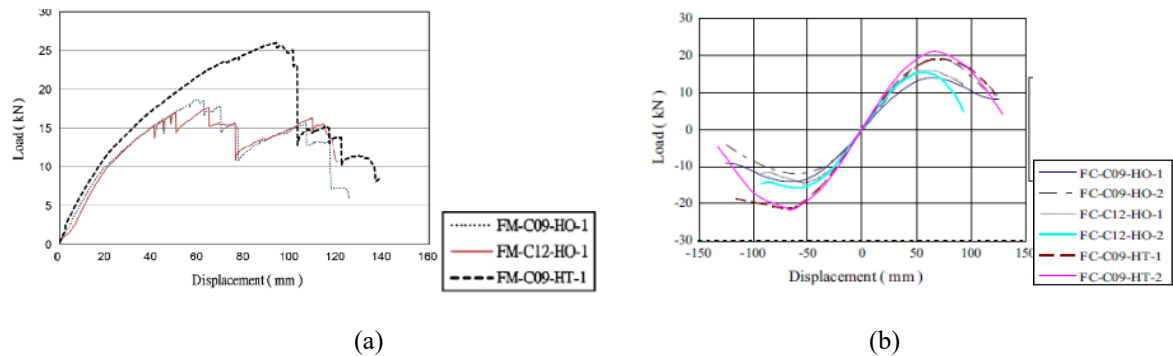


Figura 2.8 a) Gráfico de Força versus Deslocamento para carregamentos monotônicos. b) Envelope dos resultados de carga versus deslocamentos para ensaios cíclicos. Fonte: LIN et. al, 2014



Figura 2.9 Fratura do revestimento na ligação com a guia inferior (LIN et al., 2014)

Os autores observaram que a falha dos painéis de parede ocorreu principalmente na guia inferior da estrutura de aço devido à grande deformação, conforme mostra a Figura 2.9. A falha de rasgamento da guia inferior foi observada apenas nos painéis sob forças cíclicas.

Também foi notado que as forças máximas obtidas de painéis sob carga monotônica (média de 20,78 kN) foram maiores do que as dos testes sob cargas cíclicas (média de 16,85kN).

### 2.1.3 Pesquisa realizada por Liu et al. (2014)

Em Liu et. Al (2014), foram feitos ensaios experimentais para analisar os impactos de detalhes práticos de construção na performance cíclica de painéis de paredes de cisalhamento em LSF revestidas externamente com placas OSB. As variáveis consideradas neste estudo foram o tipo de revestimento interno (OSB, gesso ou nenhum), a localização dos parafusos, o

posicionamento de fita de aço fixada horizontalmente, a presença de fita de aço fixada vertical e a presença de viga metálica perfil “Ue” na borda superior horizontal do painel.

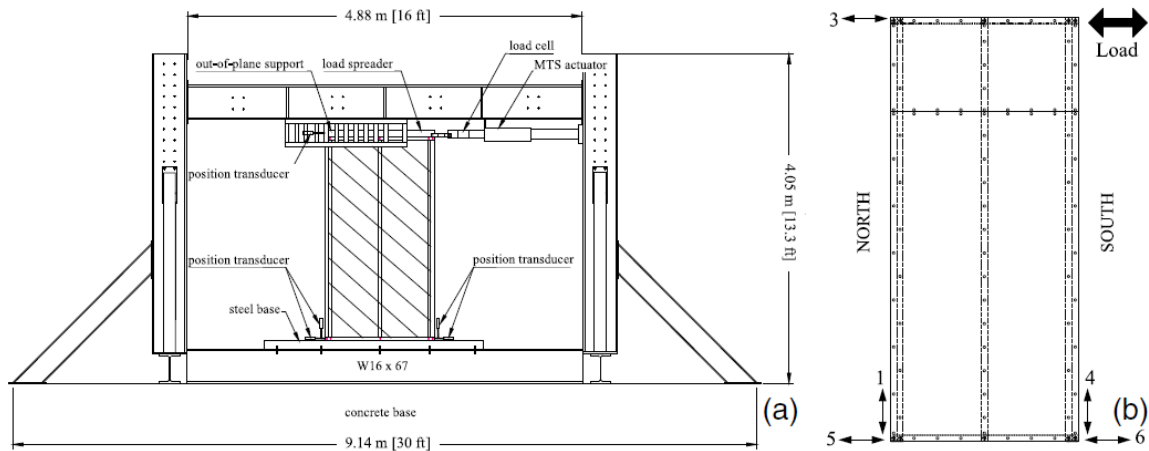


Figura 2.10 (a) configuração do ensaio e posicionamento de sensores (b) parede de cisalhamento com localização dos transdutores (números de 1 a 6). (LIU et. al 2014)

Conforme Figura 2.10 (a), os sensores foram aplicados na parte superior e inferior da parede (b) para monitorar os deslocamentos laterais e os deslocamentos verticais. As paredes foram produzidas nas medidas de 1,22m x 2,74m ou de 2,44m x 2,74

Foram realizados ensaios cíclicos e monotônicos sob controle de deslocamento. O ensaio monotônico foi feito seguindo o protocolo ASTM E564-06 que requer uma pré carga de aproximadamente 10% da carga máxima estimada a ser aplicada e mantida por 5 min para acomodar as conexões. Esse procedimento é feito seguindo a sequência de 1/3 e 2/3 da carga máxima até ela ser atingida.

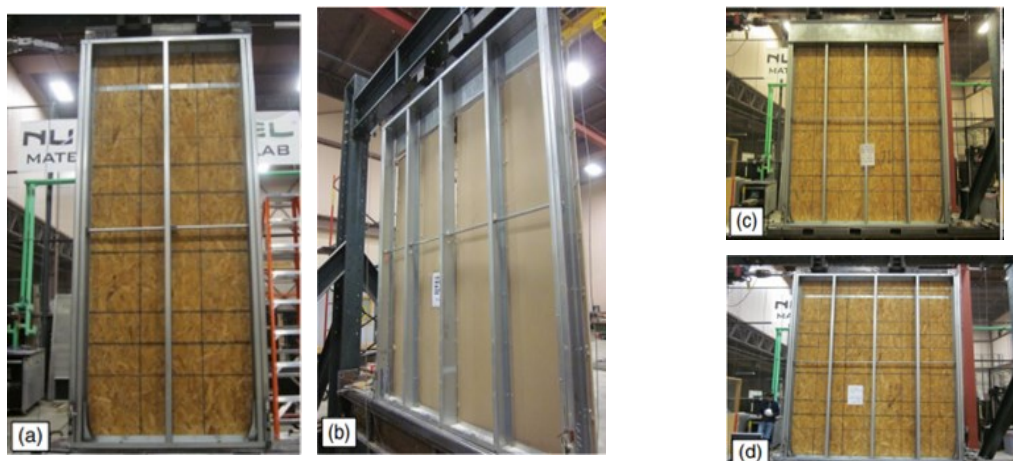


Figura 2.11. Fotografias das configurações do espécime testado: (a) Teste 4, 1,22 metros de largura, revestido de placa OSB, com fita de aço horizontal e sem Perfil Ue superior; (b) Teste 16, 2,44 metros de largura, revestido de placa de gesso com viga C superior; (c) Teste 11c, 2,44 metros de largura, revestido de placa OSB, com fita de aço horizontal e viga C superior; (d) Teste 14, 2,44 metros de largura, revestido de placa OSB, com fita de aço horizontal e sem viga C superior . (LIU, 2014)

Para o ensaio cíclico, foi aplicado o protocolo CUREE (que não abordaremos nesta pesquisa por não se tratar do protocolo utilizado no experimento e não ter sido visto em outras pesquisas

aqui apresentadas) juntamente à ASTM E2126. Desta forma, uma força cíclica constante de 0,2 Hz foi escolhida para o teste, assim como um deslocamento de referência baseado no ensaio monotônico. A Figura 2.11 apresenta a fotografia de alguns dos modelos ensaiados.

Tabela 2.3 Resumo dos resultados dos ensaios (adaptado de LIU, 2014)

Ensaio	Dimensões (m)	Presença de Perfil Ue superior	Fita de aço horizontal <sup>a</sup> (m)	Fita de aço vertical <sup>b</sup> (m)	Carga máxima (kN/m)		Média carga máxima (kN/m) Pave
					P+	P-	
1c	1.22 x 2.74	Sim	2,44	-	17.9	-	17.9
2	1.22 x 2.74	Sim	2,44	-	16.9	15.2	16.1
3*	1.22 x 2.74	Sim	2,44	-	18.4	14.0	16.2
4	1.22 x 2.74	Não	2,44	-	15.3	14.0	14.7
5	1.22 x 2.74	Sim	2,13	-	14.9	13.9	14.4
6	1.22 x 2.74	Não	2,13	-	18.0	12.1	15.0
7	1.22 x 2.74	Não	2,44	0,31	12.8	13.4	13.1
8	1.22 x 2.74	Não	2,44	0,61	15.1	13.5	14.3
9	1.22 x 2.74	Não	2,44	0,61	13.4	13.0	13.2
10	1.22 x 2.74	Não	1,37	0,61	13.9	13.9	13.9
11c	2.44 x 2.74	Sim	2,44	-	15.9	-	15.9
12	2.44 x 2.74	Sim	2,44	-	18.3	15.4	16.9
13*	2.44 x 2.74	Sim	2,44	-	19.4	16.6	18.0
14	2.44 x 2.74	Não	2,44	-	15.4	14.4	14.9
15 <sup>c</sup>	2.44 x 2.74	Não	2,44	-	12.9	12.2	12.6
16**	2.44 x 2.74	Sim	2,44	-	3.78	2.95	3.37

\* Placas com dois revestimentos: OSB de um lado e gesso do outro.

\*\* Placa com apenas um revestimento, sendo ele de gesso.

—<sup>a</sup> Distância da fita de aço até a base do painel

—<sup>b</sup> Distância da fita de aço até a lateral do painel

—<sup>c</sup> Os painéis possuem parafusos com diâmetro de 1,37mm, exceto pelo modelo do ensaio 15, que possui diâmetro de 0,84mm.

O desempenho geral das paredes de cisalhamento testadas está resumida na Tabela 2.3. As paredes de cisalhamento mais estreitas têm um pouco mais de absorção de energia (por comprimento da parede). Também foi verificado que no modelo revestido apenas com gesso (ensaio 16), a dissipação de energia é limitada.

Os autores concluíram que todas as paredes testadas tiveram força que excedeu as capacidades nominais da especificação fornecida (AISI-S213-07), no entanto, os detalhes de construção impactaram o comportamento das paredes de cisalhamento. Os resultados indicaram que a presença do perfil Ue de aço no alinhamento superior do painel aumentou a força máxima da parede de cisalhamento (aproximadamente 10%), mas diminuiu um pouco a dissipação de energia. A presença da placa de gesso combinada à placa OSB fez com que aumentasse a rigidez inicial e, modestamente, a força máxima. O diâmetro dos parafusos também influencia na resistência ao cisalhamento, na ductilidade e na rigidez, podendo ser observado nos testes 14 e 15, que possuem as mesmas características, exceto que o painel 15 possui parafusos de 0,84 mm, o que reduz 16% a sua resistência em relação aos painéis com parafusos de 1,37mm. No geral, a presença das fitas de aço não produzem uma resposta significativa na rigidez inicial e resistência máxima. Também notou-se que a presença das fitas de aço horizontais é mais benéfica quando alinhadas a altura do perfil Ue superior, criando uma melhor condição de

resistência. fixadas no interior das paredes de cisalhamento diminui a força máxima e aumenta a flexibilidade dessas paredes (pois permitem a transferência de força de cisalhamento), particularmente no caso dos painéis com fitas verticais.

#### 2.1.4 Pesquisa realizada por Niari et al. (2015)

Em Niari et. al (2015), foi feito um estudo, através de ensaios experimentais em escala real, sobre o comportamento sísmico nas paredes constituídas em LSF revestidas de aço.

Baseado na norma ASTM 0370 "Métodos e definições de teste padrão para testes mecânicos de produtos de aço", a Figura 2.12 mostra a configuração dos testes. A Tabela 2.4 exhibe as variações das paredes ensaiadas.

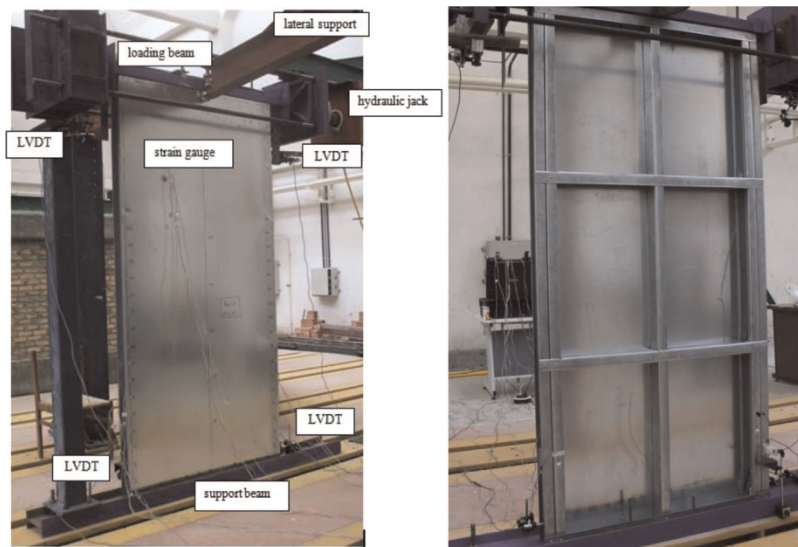


Figura 2.12. Configuração do ensaio. (NIARI et. al, 2015)

Tabela 2.4. Detalhes das paredes em LSF revestidas com aço. (adaptado de NIARI et. al, 2015)

Modelo	Largura da parede (mm)	Altura da parede (mm)	Espessura do revestimento (mm)	Espessura dos perfis LSF	Espaçamento dos parafusos (mm)	Revestimento dupla face
1. St1.2-sh1	1250	2500	1	1.2	100/300	Não
2. St1.2-sh1.5	1250	2500	1.5	1.2	100/300	Não
3. St1.2-sh1	1250	2500	1	1.2	100/300	Sim

Foram utilizados 5 transdutores (LVDT) para medir os deslocamentos. Os autores também utilizaram extensômetros para obter a força axial e os ensaios foram conduzidos pelo controle de deslocamento, durante carregamentos cíclicos (seguindo o protocolo da ATC-24). Para aplicação da força horizontal, foi utilizado um atuador de 100 toneladas. Com o deslocamento como entrada, a carga foi medida simultaneamente através das células de carga. Os modelos foram ensaiados por meio de carregamento cíclico (conforme a Figura 2.13), através de compressão direta das paredes.

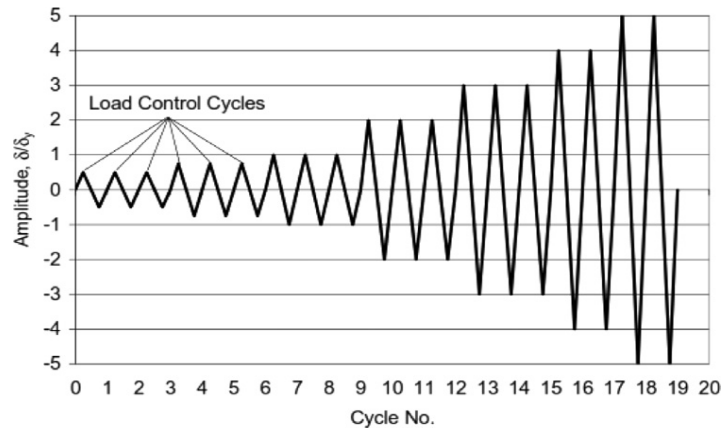


Figura 2.13. Carregamento cíclico aplicado nos ensaios (NIARI et. al, 2015)

Em Niari et. al (2015), notou-se que todas as paredes de cisalhamento exibiram flambagem elástica por cisalhamento dos painéis de revestimento em níveis de carga baixos. Conforme o deslocamento lateral aumentou, um campo de tração em cada painel foi desenvolvido. Observou-se que a resistência final ao cisalhamento das paredes está diretamente relacionada ao rompimento das ligações do revestimento ao reticulado metálico.

Os resultados de deslocamento de carga para cada corpo de prova individual, bem como as curvas envelopes de deslocamento versus carga dos modelos sob carregamento lateral cíclico podem ser vistos na Figura 2.14.

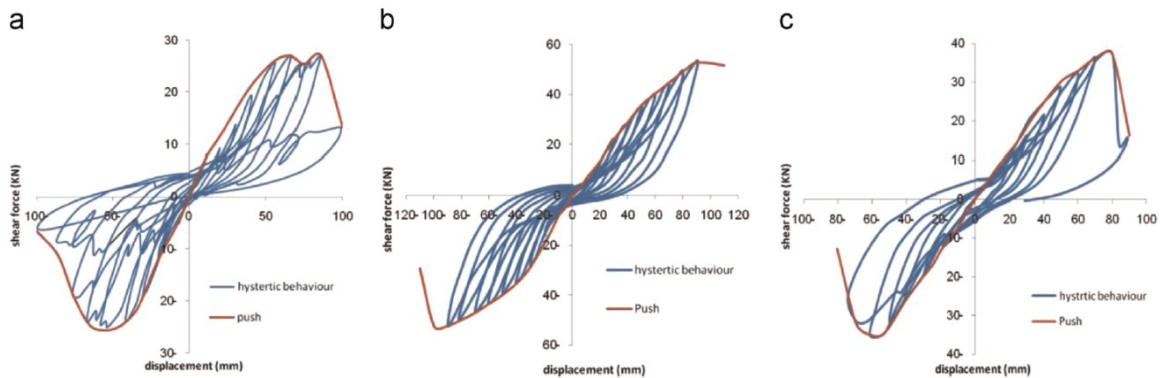


Figura 2.14. Resposta de deslocamento lateral versus carga lateral dos painéis de parede de cisalhamento. (NIARI et. al, 2015)

Observa-se nos gráficos da Figura 2.14 que a carga final média e o deslocamento máximo para o modelo 1 são iguais a 26,3 kN e 61,5 mm. Já para o modelo 2 é igual a 37,5 kN e 74,5 mm, respectivamente. Já para o modelo 3, a carga final média são iguais a 53,6 kN. Percebe-se que a carga final para o modelo com revestimento de aço de 1 mm nos dois lados é cerca de 100% maior do que o modelo com revestimento de 1 mm em um lado quando sujeito a cargas cíclicas. Como resultado, as capacidades de carga para o modelo 3 são maiores do que com fixação de revestimento de revestimento de aço de um lado. A comparação das curvas envelopes dos modelos são fornecidas na Figura 2.15.

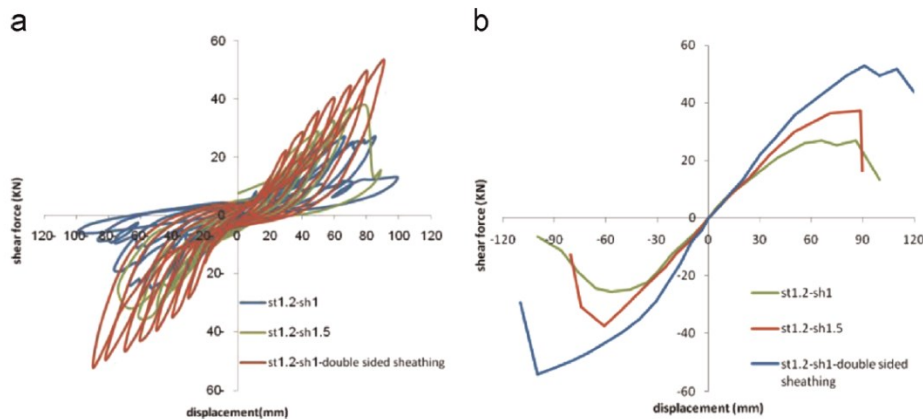


Figura 2.15. Comparação dos resultados. (A) Resultados de força versus deslocamento. (B) Curva envelope de força versus deslocamento (NIARI et. al, 2015)

Como mostrado nessa figura, com o aumento da espessura do revestimento, a rigidez e a resistência ao cisalhamento da parede de cisalhamento aumentaram. A resistência ao cisalhamento das amostras st1.2-sh1 e st1.2-sh1.5 é de 26,3 kN e 37,5 kN, respectivamente. Portanto, o aumento na espessura do revestimento do segundo modelo fez com que a resistência ao cisalhamento aumentasse em cerca de 42%.

Após os ensaios experimentais, os autores prosseguiram para a modelagem de elementos finitos, os quais não abordaremos por priorizar apenas as similaridades com o assunto tratado neste trabalho.

2.1.5 Pesquisa realizada por Henriques *et al.* (2017)

Henriques et al. (2017) ensaiaram painéis de LSF revestidos com placas OSB e painéis não revestidos, todos fabricados em escala 1:1 para obter o comportamento estrutural quando submetidos a carregamento lateral, sendo que três séries de dois testes cada uma foram consideradas. A Tabela 2.5 resume o programa experimental e a Figura 2.16 exhibe os componentes dos modelos ensaiados.

Tabela 2.5 Programa experimental em painéis de LSF sujeitos a carregamento lateral. (Adaptado de HENRIQUES et. al, 2017)

MODELO	TIPO	VARIÁVEL
1	Estrutura de aço	Sem placas OSB
2		
3	Estrutura de aço revestida com placas OSB	Placas OSB parafusadas com espaçamento de 300 mm
4		
5	Estrutura de aço revestida com placas OSB	Placas OSB parafusadas com espaçamento de 150 mm
6		

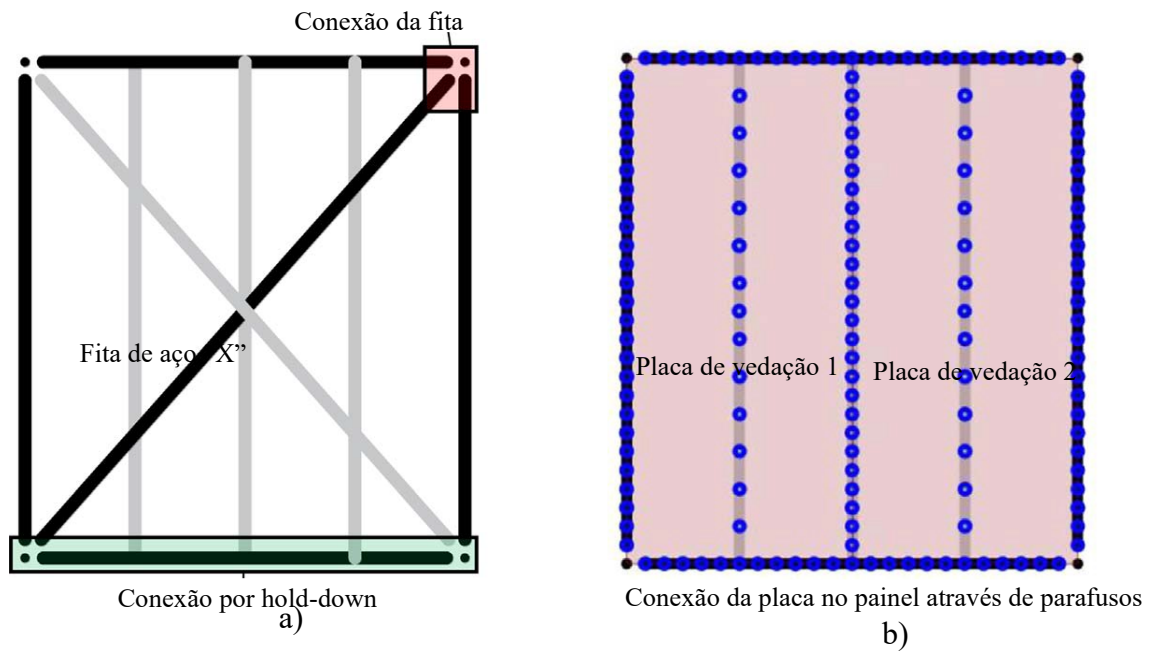


Figura 2.16 Identificação dos componentes dos painéis de ensaio. a) Painel sem placa OSB; b) Painel com vedação por placas OSB. (Adaptado de HENRIQUES, 2017)

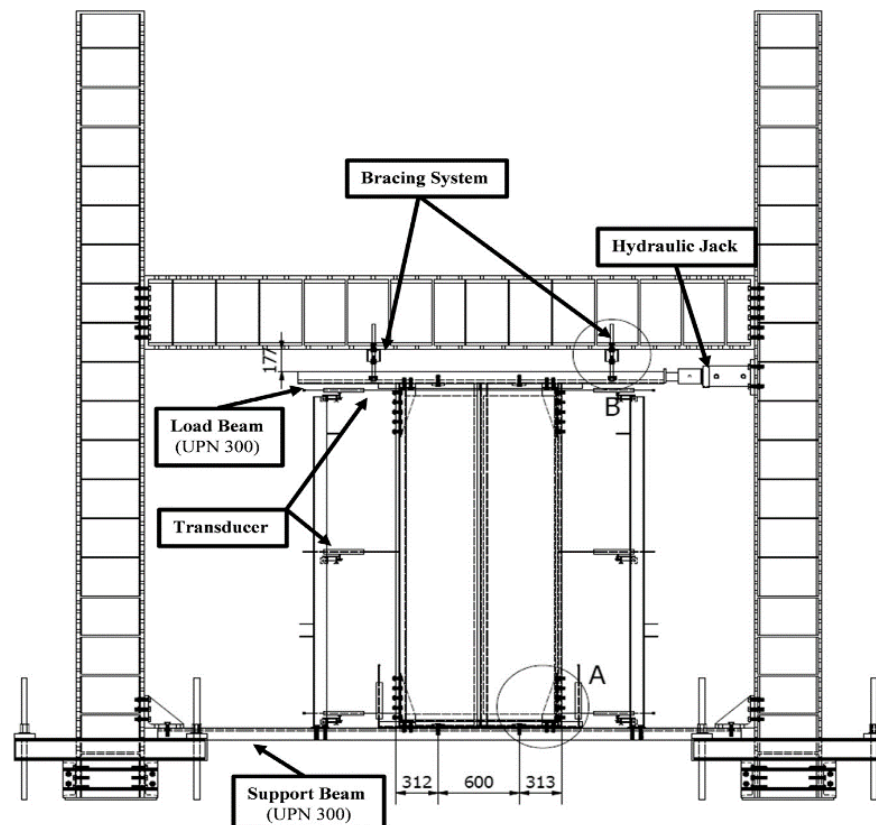


Figura 2.17 Layout experimental dos painéis LSF sujeitos a carregamento lateral. Fonte: HENRIQUES et al., 2017

O ensaio consistiu em um carregamento lateral monotônico aplicado na parte superior do painel. Os detalhes do layout de teste são fornecidos na Figura 2.17. Os modelos foram fixados em uma viga de suporte na parte inferior e na viga de carga na parte superior por meio

de dois suportes e duas placas de fixação com parafusos M20 (hold-downs), os quais foram responsáveis por resistir aos efeitos de levantamento e cisalhamento introduzidos nos painéis durante os testes de carga. Para medir a deformação do painel foram utilizados vários transdutores de deslocamento linear (DT). Para evitar deslocamentos para fora do plano do painel, a viga de carga foi apoiada por rolamentos superiores em ambos os lados do painel, conforme indicado na Figura 2.17.

Para medir a deformação do painel foram utilizados quatro transdutores de deslocamento, de acordo com a norma ASTM E564 (suas especificações serão abordadas na próxima seção)



a) Painel de aço puro



b) Painel reforçado com placa OSB

Figura 2.18 Modelos ensaiados de painéis LSF (HENRIQUES, 2017)

Os ensaios deste estudo, conforme mostrados na Figura 2.18, foram conduzidos até a falha do modelo, sendo que, no painel apenas com estrutura de aço, a falha ocorreu no montante vertical, o qual não foi especificado, por instabilidade local do perfil. Já nos painéis revestidos com placas OSB, a falha foi observada na conexão da placa OSB e o perfil.

Os resultados dos testes em termos de carregamento máximo e rigidez ao cisalhamento interno (G) estão resumidos na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 Resumo dos resultados dos ensaios experimentais em painéis de estrutura leve de aço sujeitos a carregamento lateral (Adapato de HENRIQUES, 2017).

Modelo	Carga máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ ) (kN)	Média da Carga máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ ) (kN)	Rigidez (G) (N/mm)	Média da Rigidez (G) (N/mm)
1	3,91	3,99	79,00	90,68
2	4,06		102,35	
3	17,47	17,47	965,10	960,45
4	17,46		55,10	
5	24,40	25,85	904,00	900,50
6	27,30		897,00	

Vale ressaltar que também foi desenvolvido, em seguida, um modelo de elementos finitos calibrado com base nos resultados experimentais, sendo que os resultados numéricos obtidos não serão analisados neste trabalho. No estudo, Henriques et al. (2017) concluíram que fica evidente o efeito benéfico da placa OSB e se observa que a deformabilidade dos painéis, especialmente dos painéis com estrutura LSF sem revestimento, depende da conexão do parafuso entre os perfis. Já nos painéis revestidos com placas OSB, as conexões entre a placa e os perfis de aço foram limitantes para a resistência lateral do painel (com o aumento do número de parafusos, a resistência também aumentou).

Conforme a Figura 2.19, as curvas Força x Deslocamento de cada ensaio evidenciam as diferenças entre os corpos de prova. Os testes 1 e 2, possuem comportamento flexível com baixa capacidade de carga e alta capacidade de deformação. Os demais ensaios (revestidos com placas OSB), exibiram maior rigidez e capacidade de carga.

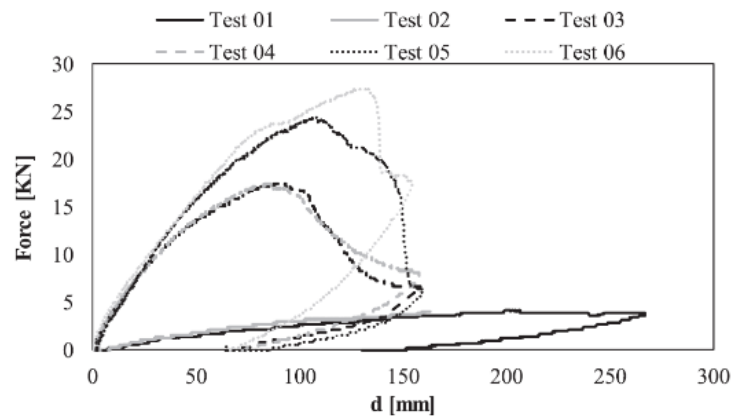


Figura 2.19 Resultados de força versus deformação dos testes experimentais em painéis de estrutura de aço leve sujeito a carregamento lateral. (HENRIQUES, 2017)

É interessante destacar que os autores valorizam a placa OSB como contribuinte para o contraventamento lateral, sendo uma solução possível para a estabilidade lateral das estruturas em LSF.

#### 2.1.6 Pesquisa realizada por Marzaleh *et al.* (2018)

Em Marzaleh et al. (2018), diferentemente dos trabalhos anteriores, o estudo não abrangeu as estruturas em LSF, mas foram estudadas as paredes de cisalhamento de madeira com moldura leve e placas de OSB submetidas a carga vertical, momento fletor e carga lateral monotônica. Os modelos de parede eram compostos de moldura GL24h de madeira laminada colada (GLT) e revestimento de OSB (de 15 mm de espessura) em ambos os lados da parede.

Três testes de parede em escala 1:1 também foram conduzidos para investigar o comportamento monotônico no plano dos painéis quando submetidos a um momento fletor e carga vertical de ação simultânea.

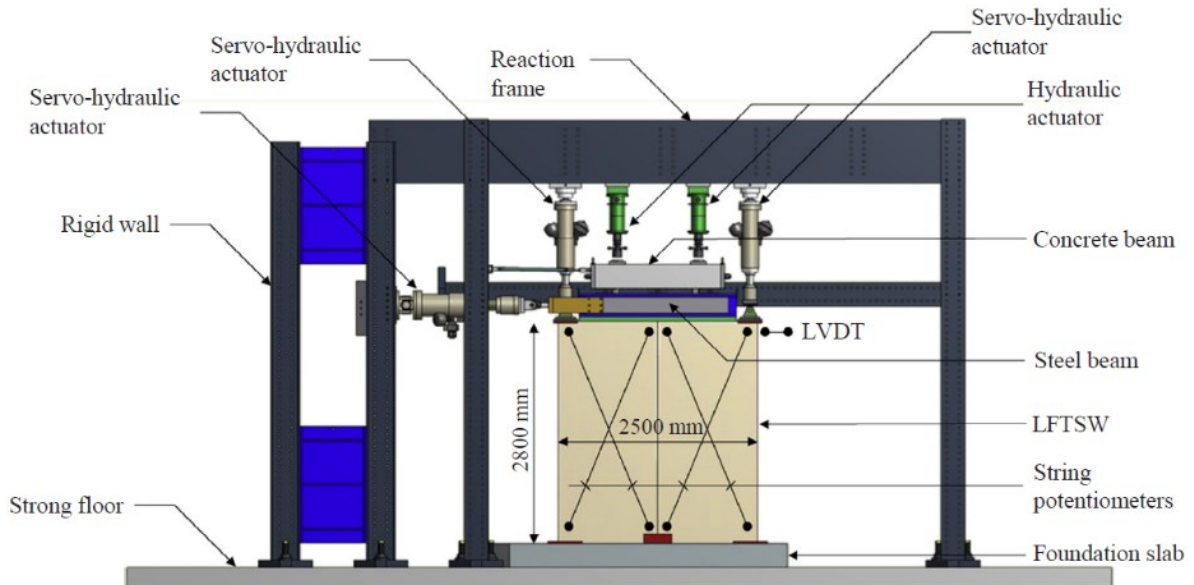


Figura 2.20 Configuração de teste. ( MARZALEH et. al, 2018)

A Figura 2.20 exhibe os componentes de configuração do teste. Para aplicação das cargas verticais constantes, foram utilizados dois cilindros hidráulicos e dois atuadores servo-hidráulicos instalados verticalmente ao quadro de reação. Um atuador servo-hidráulico foi conectado horizontalmente no plano da parede rígida (na lateral esquerda) para fornecer a força lateral  $P$  aplicada ao painel ensaiado transferida através de uma placa de aço parafusada no topo do painel.

Ainda na Figura 2.20, pode-se observar que o painel foi ancorado diretamente na fundação de concreto construída no piso. Em cima do painel, foi colocada uma viga de aço para representar a laje de um piso em um edifício real. Sobre a viga foi colocada uma viga de concreto para transferência da carga vertical do atuador sem restringir o movimento horizontal da parede durante o ensaio.

Tabela 2.7 Resultados dos ensaios (MARZALEH et al., 2018)

Modelo*	Resistência ao cisalhamento ( $P_{max}$ ) (kN)	Deslocamento Final ( $D_u$ ) (mm)	Rigidez 0-1.25mm (kN/mm)	Rigidez 0-5mm (kN/mm)
LV-WOB	151,9	81,6	8,9	7,7
HV-WOB	121,1	99,0	6,7	6,9
LV-WB	143,6	78,1	11,6	8,1

\*A rotulagem dos espécimes foi baseado no nível de carga vertical (L: baixo e H: alto) e se foi aplicado momento fletor (WB) ou não (WOB).

Os principais resultados dos testes estão resumidos na Tabela 2.7 em termos de resistência máxima ao cisalhamento, deslocamento final e rigidez ao cisalhamento. Uma vez que o comportamento dos painéis é não linear desde o início do carregamento lateral, a rigidez ao cisalhamento foi avaliada em diferentes níveis de deslocamento, nomeadamente no estado limite de utilização (5 mm) e 25% dele. O deslocamento final é considerado de forma semelhante em todos os métodos sendo igual ao deslocamento correspondente a uma degradação de 20% da resistência ao cisalhamento.

Os autores concluíram que para uma verdadeira análise da rigidez, na qual eles fazem em diferentes níveis de deslocamento, é necessário estimar corretamente a rigidez das conexões, bem como utilizar o método adequado ao tipo de painel para estimar a rigidez ao cisalhamento dos painéis de madeira leve revestidos de OSB. O modelo numérico calibrado permite uma melhor estimativa desses dados. No caso de aplicação das equações analíticas atuais, os detalhes de construção e as condições de contorno devem seguir certas diretrizes para que a validade e adequação das equações sejam endossadas.

### 2.1.7 Pesquisa realizada por Wu et al. (2018)

Seguindo os padrões de pesquisa apresentados, os autores desta pesquisa testaram paredes de LSF revestidas com placas de gesso e, também, preenchidas com gesso (feito com densidade mais leve, adequada à estrutura leve de LSF) para entender qual a melhoria da rigidez lateral e força de cisalhamento, quando utilizado este tipo de revestimento.

Tabela 2.8 Descrição dos modelos ensaiados e resultados obtidos (WU et. al, 2018)

Modelo	Tipo de revestimento (um lado/do outro lado)	Espaçamento dos perfis (mm)	Tipo de preenchimento	Ductilidade $\mu$ (ECCS)	Carga máxima (kN/m)
HS-140-1	WGB/WGB	600	Sem preenchimento	6,08	9,84
HS-140-2	WGB/WGB	600	A	7,47	16,9
HS-140-3a	WGB/WGB	600	B	6,87	22,8
HS-140-3b	WGB/WGB	400	B	7,58	19,97
HS-140-3c	WGB/OSB	600	B	8,02	25,58
HS-140-4	WGB/WGB	600	C	6,45	24,97

\*WGB: 12mm de espessura, material: waterproof gypsum board

\*OSB: 9 mm de espessura, material: oriented strand board

\*As letras a, b e c se referem ao tipo de gesso utilizado, os quais variaram nas proporções de mistura de grânulos de poliestireno e bolhas de ar, sendo: a - FGD gypsum 390 (7,54kg/m<sup>3</sup> de grânulos de poliestireno e 3,753kg/m<sup>3</sup> de bolhas de ar); b - FGD gypsum 497 (9,52kg/m<sup>3</sup> de grânulos de poliestireno e sem presença de bolhas de ar); c - FGD gypsum 572 (5,85kg/m<sup>3</sup> de grânulos de poliestireno e sem presença de bolhas de ar)

A Tabela 2.8 descreve os modelos ensaiados. Para isso, 6 espécies (2,4m de largura por 3 m de altura) foram testadas sob carregamentos horizontais cíclicos. A densidade e a força de compressão do gesso foram variadas para investigar seus impactos na força lateral e na força

de cisalhamento das paredes. Além do revestimento de gesso, também foram ensaiados painéis revestidos com OSB, a fim de comparação. O modo de falha, a resposta de deslocamento de carga, a deformação e a capacidade de absorção de energia das espécies também foram investigadas.

A configuração do ensaio pode ser vista na Figura 2.21. As cargas laterais foram aplicadas à viga de reação do topo por um atuador montado na parede de reação. Antes de aplicar as cargas laterais, uma carga axial constante durante os ensaios foi aplicada por um atuador hidráulico sob a viga distributiva e depois transferida ao topo das espécies por dois rolamentos. A fim de medir os deslocamentos laterais devido a deformação por cisalhamento das espécies, 8 transdutores foram colocados de acordo com o guia de ensaio do Chinese Standard, conforme Figura 2.22.

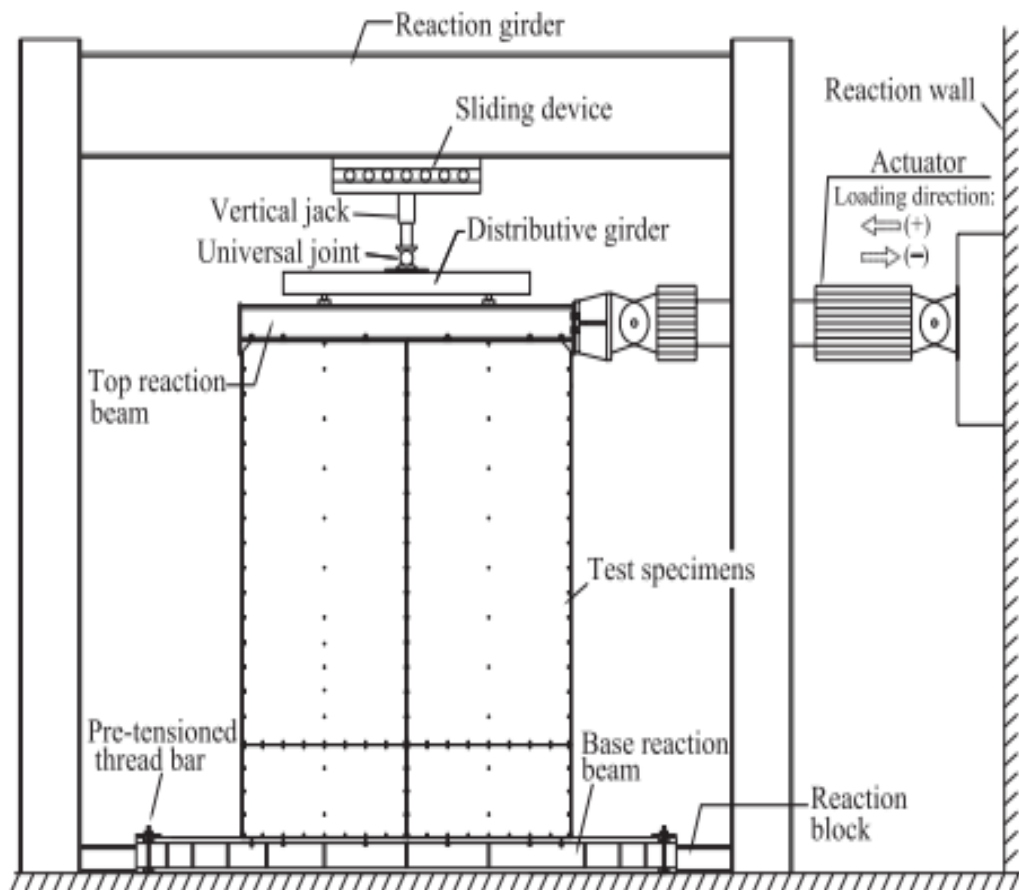


Figura 2.21 Configuração do teste . (WU et. al, 2018)

Assim como em Lin et. Al (2014), para avaliar a rigidez inicial, carga de escoamento ( $P_y$ ), pico de carga (carga máxima) e os deslocamentos laterais, foram utilizados dois métodos: Recomendação ECCS e EEEP (*Equivalent energy elastic-plastic model*) em conformidade com o AISI standard, a serem revistas na seção 2.2.

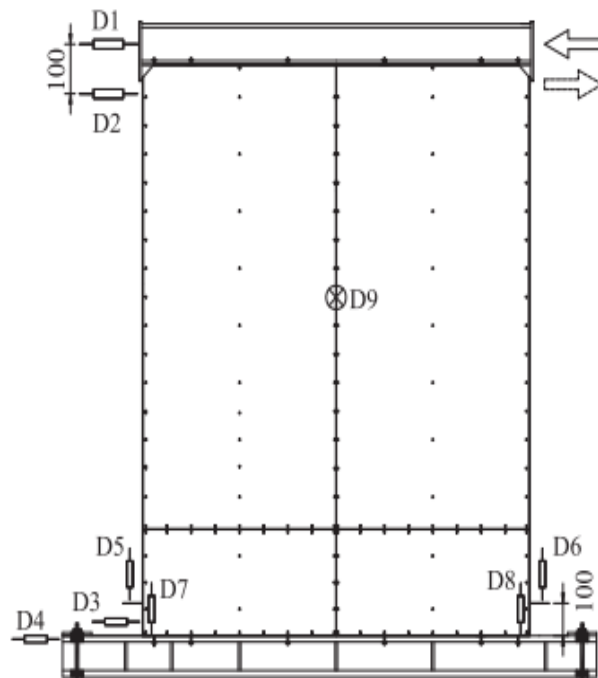


Figura 2.22. Posicionamento dos transdutores. (WU et. al, 2018)

Para os ensaios cíclicos, três ciclos reversos, que em cada um ocorreu o aumento gradual do nível de desvio relativo ao deslocamento horizontal (0,25%, 0,5%, 0,75%, 1,0%, 1,5%, 2,0%, 2,5%, 3,0%) foram utilizados nos ensaios. O último nível de desvio (3,5%) foi aplicado por apenas um ciclo. O atuador aplicou cada alvo de deslocamento de maneira quase estática. Os alvos de deslocamentos predeterminados no carregamento final foram computados multiplicando a razão do desvio do alvo e a altura da parede.

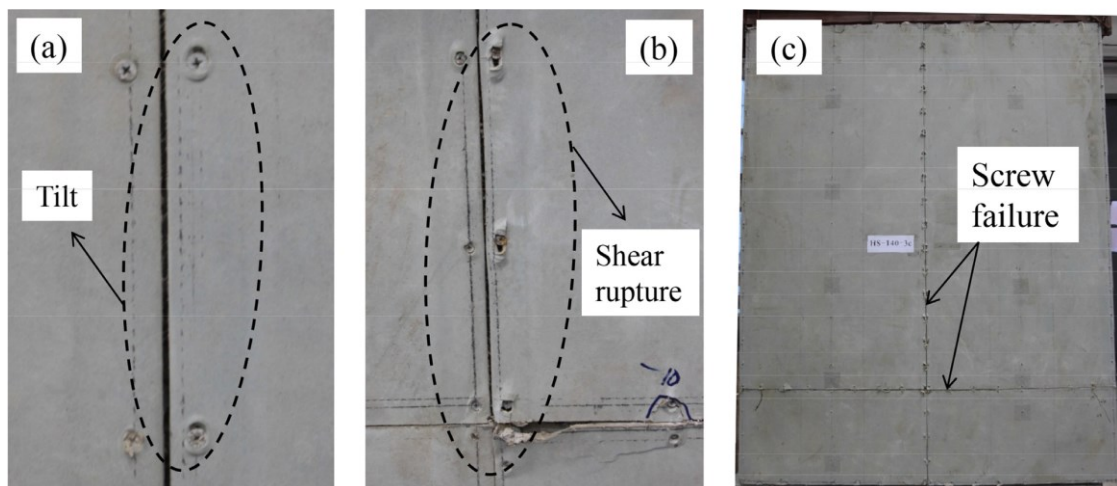


Figura 2.23 Modo de falha por cisalhamento das conexões por parafuso (modelos sem preenchimento de gesso). (a) inclinação dos parafusos (b) ruptura por cisalhamento dos parafusos (c) falha das conexões parafusadas. (WU et. al, 2018)

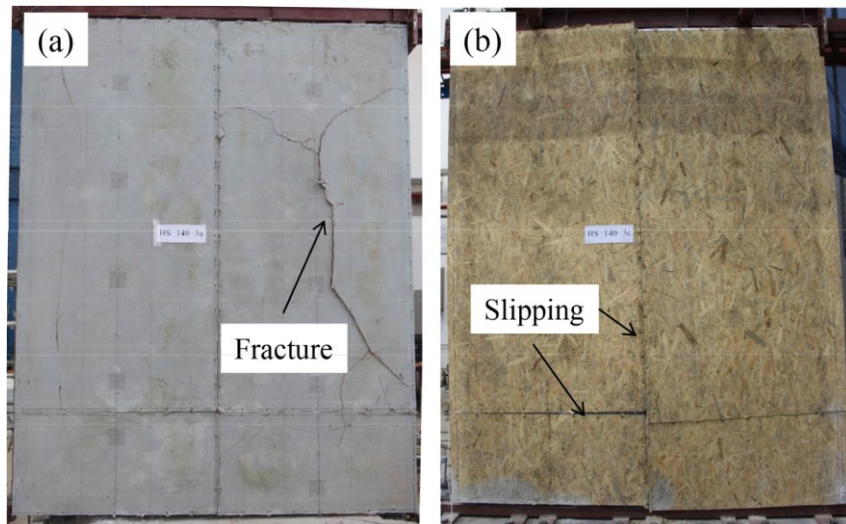


Figura 2.24 Ruptura dos revestimentos (modelos preenchidos) (a) fratura local (b) deslizamentos (WU et. al, 2018)

Foi observado que os modelos que possuíam revestimento (Figura 2.23), obtiveram a primeira falha na conexão painel-revestimento, especialmente nos quatro cantos. Foi observado que os revestimentos de gesso foram fraturados visivelmente, o que, de fato, não ocorreu no revestimento de OSB. (WU et. Al, 2018)

Após realização do ensaio, foram retiradas as placas de revestimento para observar qual foi o comportamento do gesso de preenchimento, o qual foi dividido em vários pedaços pelas vigas das paredes. Notou-se que nenhuma falha óbvia ocorreu nas estruturas das paredes, mostrando que elas são fortes o suficiente para fornecer a contenção dos pedaços de gesso. Ver Figura 2.24.

Com esta pesquisa, e de acordo com a Tabela 2.8, pode-se observar que o aumento da força e da rigidez das paredes preenchidas foi óbvia dada a participação do gesso (como preenchimento) na resistência lateral. Quando o material da placa de revestimento foi mudado de gesso para OSB em um dos lados da parede, a capacidade de carregamento aumentou de 22,80 para 25,58 kN/m. Logo, o efeito de reforço do OSB é mais forte do que o WGB.

### 2.1.8 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 foram levados em consideração a espessura do aço e da placa de OSB e o espaçamento axial 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 axial entre os parafusos, variando entre 150 mm e 300 mm. Na Figura 2.25 estão representados os três tipos de modelos ensaiados pelo autor.



Figura 2.25 Fotos de três modelos ensaiados. (Datchoua, 2018)

Foi observado pelo autor que a espessura das placas de OSB, o espaçamento axial 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 ( $\mu$ ) dos corpos de prova, constituídos por parafusos, placa OSB e perfis do sistema LSF. Ou seja, quanto maior o número de montantes e distância axial dos parafusos, maior os valores de  $P_{m\acute{a}x}$ , de  $k_e$ , de  $A$  e de  $\mu$ . Além disso, quanto maior a espessura da placa de OSB, maior o valor de  $A$ .

#### 2.1.9 Pesquisa realizada por Rezende (2019)

Na pesquisa realizada por Rezende (2019), foi realizado um estudo experimental da ligação de placas de compensado estrutural com perfis do sistema construtivo Light Steel Framing. Para avaliar o comportamento dos parafusos autobroncantes e auto-atarraxantes de fixação na interface entre o perfil metálico e as placas de compensado estrutural, foram feitos ensaios do tipo Standard Push-test.

Em Rezende (2019) foram fabricados 144 espécimes, totalizando 3 modelos diferentes representando variadas posições do montante e dos parafusos. Além disso, para as mesmas variações foram produzidos 3 espécimes idênticos. A Figura 2.26 mostra os três modelos, sendo: M1 – com montantes na extremidade e placas de compensado estrutural de 720mm de comprimento e 400 mm de largura, com parafusos na borda da placa; M2 – com montantes intermediários e placas de 720mm de comprimento e 150mm de largura, com parafusos no meio

da placa; M3 – com montante na base e placas de compensado estrutural de 620mm de comprimento e 400mm de largura, com parafusos na borda inferior.

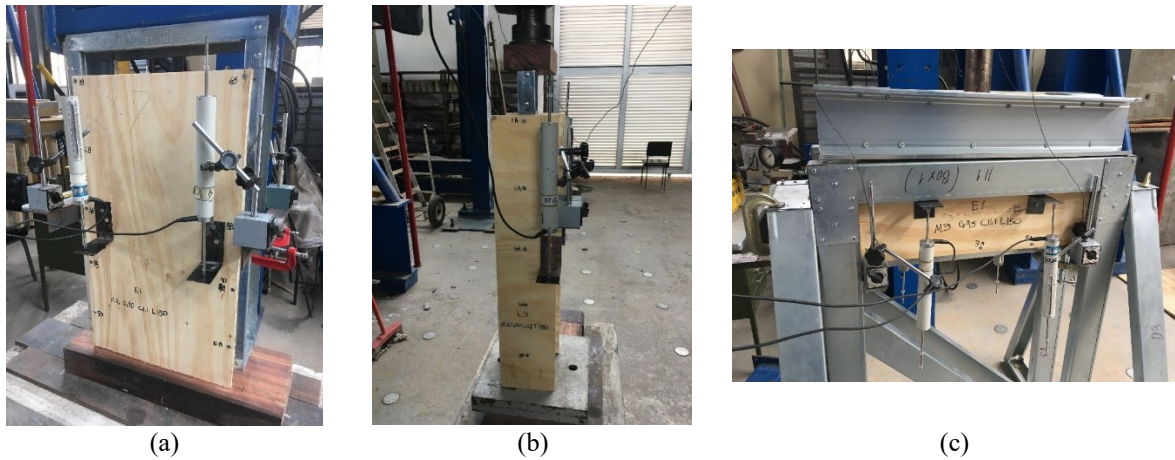


Figura 2.26 Modelos prontos para ensaio push-test. (REZENDE, 2019)

Com os ensaios e resultados obtidos, foi possível observar as influências de cada variação dos espécimes:

- A direção do corte da placa: as placas de compensado estrutural com corte na direção longitudinal são mais fortes que as de corte transversal.
- Espessura das placas: as séries com placas de 11,1mm de espessura possuem mais força por parafuso em relação as placas de 18,3mm, exceto pelo modelo M3 que apresentou mais força na placa de 18,3mm. Quanto à rigidez por ligação das placas, as placas mais espessas tem maior valor.
- Espaçamento entre os parafusos: as séries com espaçamento axial de 150mm são significativamente mais rígidas que as espaçadas em 300mm no modelo M1 e M3. Já no modelo M2, aconteceu o contrário.
- Posição dos parafusos: o modelo M2, os quais possuem parafusos no meio da placa, foi o que mais se sobressaiu em valor máximo de força (3193,42N) e também de rigidez por ligação.

#### 2.1.10 Pesquisa realizada por Wang et al. (2019)

Na pesquisa de Wang et al. (2019), foram realizados ensaios cíclicos e análises numéricas para investigar a performance estrutural de paredes de cisalhamento estruturadas de aço formado a frio e que utilizam treliças tubulares revestidas por placas OSB.

Para isso, foram realizados ensaios em cinco modelos de paredes de 4,2m de largura por 3,24 m de altura contendo ou não o revestimento OSB para análise do comportamento. Outra

variante abordada é a localização de portas e janelas (ou não) em cada modelo. Alguns modelos também continham fita de aço em X. A Tabela 2.9 mostra a descrição dos modelos ensaiados.

Tabela 2.9 Descrição dos modelos ensaiados (WANG et. al, 2019)

Modelo	Tamanho da abertura (mm)		Ductilidade $\mu$		Rigidez elástica (N/mm)		Carga máxima (kN)	
	Porta	Janela	+	-			+	-
CFSTT0*	-	-	3,39	5,75	10,65	7,35	24,56	18,74
CFSTT1	-	-	4,28	4,88	5,97	5,62	74,22	74,10
CFSTT2	900 x 2100	-	5,50	6,64	0,95	1,06	54,8	50,56
CFSTT3	-	1200 x 1560	6,11	9,03	5,05	3,93	53,21	37,76
CFSTT4	900 x 2100	1200 x 1560	6,78	8,15	4,94	4,10	54,12	38,15
CFSTT5	3000 x 2420	-	5,81	8,71	1,67	1,32	23,9	18,07

\*Todos os painéis são revestidos por placas OSB dos dois lados, exceto o modelo CFSTT0, que não possui revestimento em nenhum dos lados.

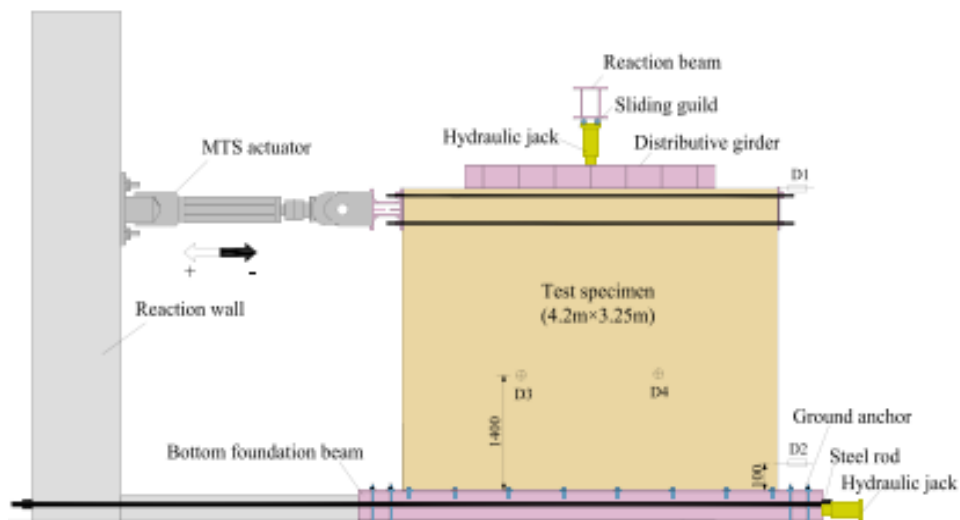


Figura 2.27. Configuração do ensaio. (WANG et. al, 2019)

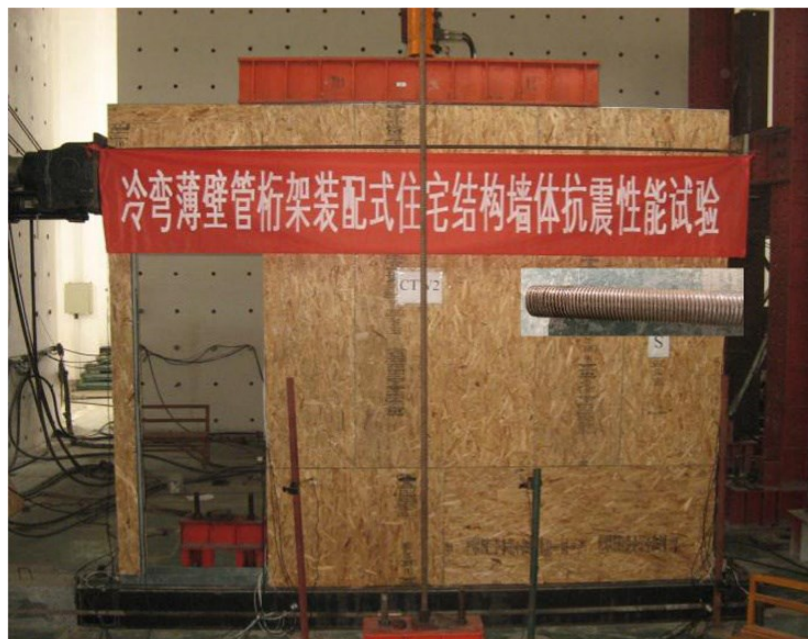


Figura 2.28. Vista geral da montagem do experimento (WANG et. al, 2019)

Conforme mostra a montagem do ensaio na Figura 2.27 e Figura 2.28, um atuador de hidráulico com faixa de deslocamento de +/- 250 mm foi utilizado para exercer a carga lateral

cíclica da parede. Quatro barras de aço de 32 mm de diâmetro foram usadas para transferir a carga entre a atuador e o modelo. Um macaco hidráulico foi utilizado para conter o deslocamento da parte inferior da parede, na viga de fundação inferior e um macaco hidráulico no topo da parede cisalhamento de 170 kN foi utilizado para aplicação da força vertical. A força axial de 170 kN (exceto para o peso da viga distributiva) foi aplicada gradualmente ao topo da parede de cisalhamento. Quatro DTs foram usados para medir os deslocamentos das espécies durante o ensaio.

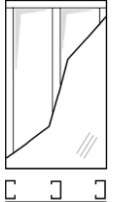
Como este estudo apresentou análise numérica, além dos ensaios experimentais, abordaremos as conclusões finais observadas pelos autores. Pode ser observado que a degradação da força pode ser atribuída às rachaduras do OSB, aos parafusos arrancados, separação entre painel e estrutura, fratura das fitas de aço e deformações das guias superiores e inferiores. Outro fator analisado foi que ocorreu perda de resistência quando haviam grandes aberturas nos painéis. Por outro lado, quando a área de abertura é pequena, a performance sísmica pode ser aumentada significativamente pela configuração de vigas treliçadas de quatro membros em ambos os lados ao invés de vigas treliçadas de dois membros. A comparação entre os ensaios mostra que os painéis OSB possuem contribuição significativa na rigidez da parede.

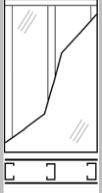
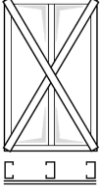
No geral, as paredes de cisalhamento ensaiadas exibiram uma boa deformabilidade e pode satisfazer os requerimentos de design sísmico das estruturas.

#### 2.1.11 Pesquisa realizada por Lopes et al. (2023)

Lopes *et al.* (2023) realizaram o estudo do comportamento mecânico de paredes constituídas de painéis LSF revestidos de placa OSB, placa de gesso ou chapa de aço através de ensaios experimentais utilizando carregamento lateral para ensaios monotônicos e cíclicos, em escala 1:1.

Tabela 2.10 Informações dos modelos ensaiados (LOPES et al., 2023)

Modelo	Descrição	Desenho esquemático
O12_150_M O12_150_C	Placa OSB com espessura de 12mm	
O_12_75_M O_12_75_C	Placa OSB com espessura de 12mm	
O_22_150_M O_22_150_C	Placa OSB com espessura de 22mm	
SS1.5_150_M SS1.5_150_C	Chapa de aço de 2050x1200x1.5mm	

O12_P13_150_M O12_P13_150_C	Placa OSB com espessura de 12mm + placa de gesso com espessura de 13mm	
XB1.5_150_M XB1.5_150_C	Contraventamento em fita (X) de aço de 2200x100x1.5mm	

\*A rotulagem dos espécimes foi baseada no tipo de vedação do painel, sendo “O” para OSB, “SS” para chapa de aço e “XB” para fita (X) de aço; na espessura da vedação; na distância dos parafusos (150 ou 75mm); e no protocolo utilizado no ensaio, sendo “M” para monotônico e “C” para cíclico.

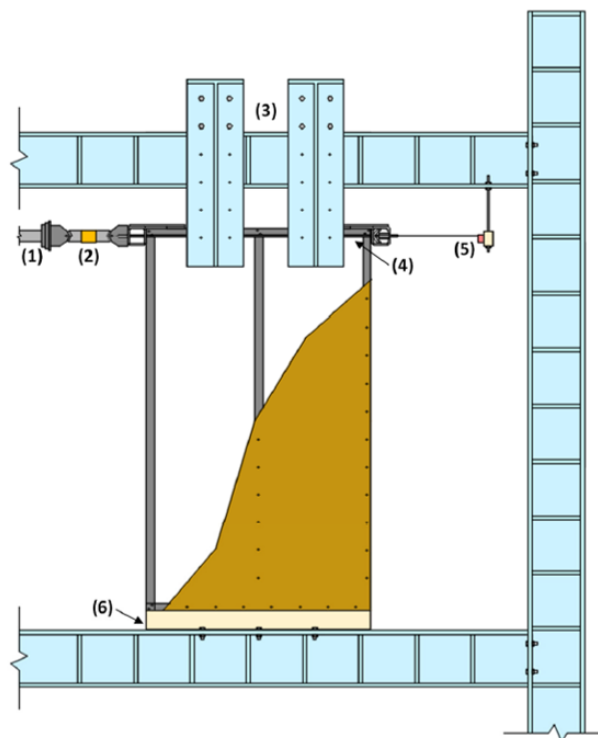


Figura 2.29 Desenho esquemático da configuração de teste (LOPES et al, 2023)

Na Figura 2.29 Figura 3.1 tem-se: 1 – atuador hidráulico; 2 – célula de força; 3 – sistema de contenção lateral; 4 – subestruturas de aço fixadas na guia superior; 5 – transdutor; 6 – perfil laminado do tipo “W” para fixação do painel na viga inferior do quadro.

A Tabela 2.10 exibe as informações dos modelos que foram ensaiados e a Figura 2.29 mostra os detalhes da configuração dos testes, os quais foram realizados através de fixação do painel em viga de aço inferior e instalado um transdutor no eixo horizontal no sentido oposto à força do atuador. Para não permitir que o modelo saísse perpendicularmente do plano vertical, foram utilizadas subestruturas de aço para contenção lateral na viga superior.

Lopes et al. (2023) realizaram os testes monotônicos sob controle de deslocamento horizontal do atuador, a uma taxa de 0,2mm/s, até que alcançasse um valor aproximado de 50%

da carga máxima da parede testada. Para o carregamento lateral cíclico, utilizou-se o protocolo recomendado pela ECCS, no qual a amplitude crescente de deslocamento horizontal cíclico depende dos dados coletados previamente nos ensaios monotônicos.

Tabela 2.11 Resultados experimentais obtidos com os testes de paredes constituídas de painéis LSF (LOPES et al., 2023)

Modelo	Rigidez inicial $K_0$ (kN/mm)	Deslocamento horizontal (mm)	Carga máxima (kN)	Ductilidade $\mu$ (-)
O12_150_M	0,66	9,0	9,6	5,8
O_12_75_M	0,72	15,0	12,5	2,9
O_22_150_M	0,92	10,0	9,2	4,8
O12_P13_150_M	0,65	16,0	10,8	3,4
XB1.5_150_M	0,39	16,0	8,9	2,8
SS1.5_150_M	0,74	13,0	10,0	1,4
O12_150_C	0,66 <sup>a</sup>	9,0 <sup>a</sup>	9,3	-
O_12_75_C	0,72 <sup>a</sup>	15,0 <sup>a</sup>	12,7	-
O12_P13_150_C	0,92 <sup>a</sup>	10,0 <sup>a</sup>	10,0	-
O_22_150_C	0,65 <sup>a</sup>	16,0 <sup>a</sup>	10,5	-
XB1.5_150_C	0,39 <sup>a</sup>	16,0 <sup>a</sup>	10,9	-
SS1.5_150_C	0,74 <sup>a</sup>	13,0 <sup>a</sup>	9,9	-

—<sup>a</sup> : Assume-se que o valor para os modelos dos ensaios cíclico seriam os mesmos que dos ensaios monotônicos. Para os ensaios cíclicos, não foram apresentados resultados quanto a ductilidade.

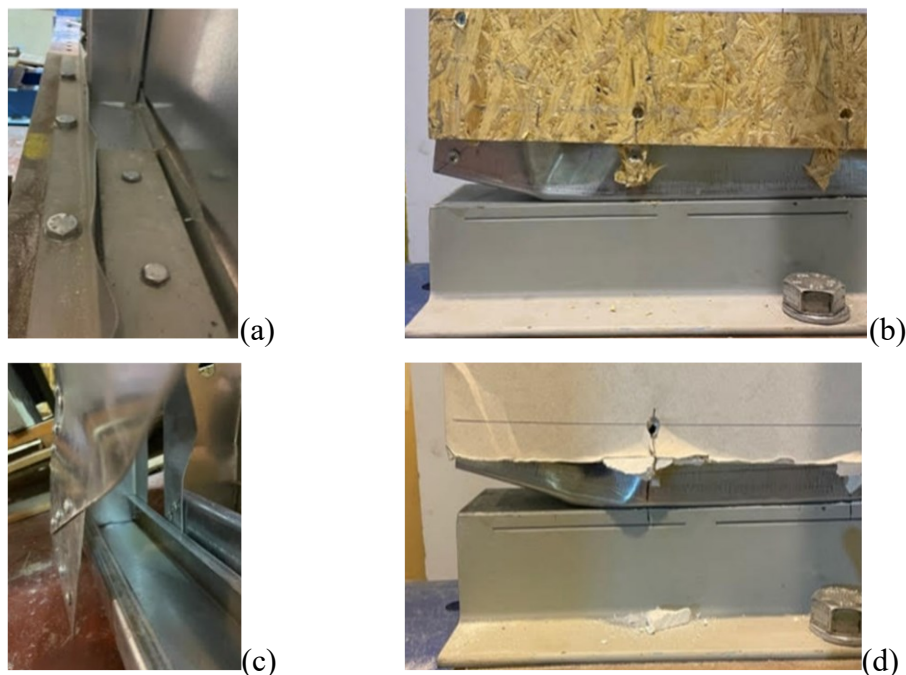


Figura 2.30 Imagens de falhas comuns após ensaio. (a) flambagem local e escoamento da guia inferior; (b) rompimento da placa OSB; (c) ruptura por cisalhamento e arrancamento dos parafusos; (d) ruptura da placa de gesso. (LOPES et al., 2023)

A Figura 2.30 exibe as imagens das falhas mais comuns encontradas após ensaio, sendo elas: a flambagem local e escoamento da guia inferior; o rompimento da placa OSB; ruptura por cisalhamento e arrancamento dos parafusos; ruptura da placa de gesso. De acordo com os resultados, apresentados na Tabela 2.11, os painéis que possuíam como contraventamento, as placas OSB (modelos O12\_150 monotônico e cíclico, O12\_75 monotônico e cíclico,

O12\_P13\_150 monotônico e cíclico e O22\_150 monotônico e cíclico) apresentaram um comportamento menos frágil do que os demais (em relação a ductilidade). A tabela indica que a rigidez (dos painéis com placas OSB descritos acima) aumenta em cerca de 10% quando a distância dos fixadores de 75mm e aumenta em 40% quando se tem a combinação da placa OSB com a placa de gesso. Já em relação a espessura da placa OSB, não há interferência na rigidez.

Em relação a carga máxima alcançada por cada modelo ensaiado, notou-se uma melhoria de 33% quando a distância entre os fixadores é menor e a espessura do OSB é menor. Ademais, as placas de gesso falharam antes das placas OSB, as quais são três vezes mais resistentes que as primeiras. No grupo de paredes sem placa OSB, a falha é governada pelo corte e cisalhamento e arrancamento dos parafusos.

#### 2.1.12 Pesquisa realizada por Aktepe et al. (2023)

Tabela 2.12 Resultados obtidos através dos ensaios experimentais. (AKTEPE et al., 2023)

	Modelos	Carga máxima (N)	Deslocamento horizontal (mm)	Rigidez $K_0$ (N/mm)
Painéis LSF híbridos	CBR-C-S1-Push	11.509,94	20,93	1355,10
	CBR-C-S1-Pull	-7.673,29	-5,79	2152,88
	CBR-C-S2-Push	12.078,33	16,94	1503,89
	CBR-C-S2-Pull	-6.110,21	-17,88	1750,33
	CBL-M-S1	7.531,19	7,14	1705,03
	CBL-M-S2	8.241,68	8,65	1604,63
	CBR-M-S1	10.799,45	22,59	1641,63
	CBR-M-S2	10.657,35	27,08	1369,09
	CDR-C-S1-Push	26.856,52	24,26	3122,17
	CDR-C-S1-Pull	-23.161,97	-13,73	4076,75
	CDR-C-S2-Push	26.856,52	25,00	2655,92
	CDR-C-S2-Pull	-23.304,07	-14,28	3856,49
	CDR-M-S1	26.998,62	24,34	2543,14
	CDR-M-S2	27.282,82	22,77	2461,23
Painéis LSF convencionais	HBR-C-S1-Push	9.700,57	69,53	773,59
	HBR-C-S1-Pull	-5.683,92	-18,88	1107,67
	HBR-C-S2-Push	9.520,57	43,77	937,89
	HBR-C-S2-Pull	-5.968,12	-7,78	1080,53
	HUR-C-S1-Push	15.204,49	22,71	1311,83
	HUR-C-S1-Pull	-12.362,53	-23,81	1482,93
	HUR-C-S2-Push	14.636,09	21,12	1224,22
	HUR-C-S2-Pull	-13.783,51	-21,92	1124,86
	HDR-C-S1-Push	18.188,54	33,87	1248,71
	HDR-C-S1-Pull	-18.188,54	-38,31	967,29
	HDR-C-S2-Push	18.899,03	34,79	1436,58
	HDR-C-S2-Pull	-18.046,45	-32,23	1368,95

\*C- painéis LSF híbridos com coluna de apoio lateral ou H- painéis LSF fixados através de hold-down (convencionais)

\*B- sem revestimento ou U- com um lado revestido ou D- com os dois lados revestidos

\*R- diagonal inclinada para a direita ou L- diagonal inclinada para a esquerda

\*M- carregamento monotônico ou C- carregamento cíclico

\*Numero do teste: 1 ou 2

Aktepe et al. (2023) realizaram uma investigação experimental a respeito do comportamento lateral de painéis formados a frio (LSF) em um sistema híbrido que compreende uma estrutura de painel em LSF adicionada de colunas em LSF mais expressas do que os perfis do painel. Foram realizados ensaios que abrangeram painéis em LSF convencionais para comparação com os painéis híbridos. Além disso, alguns painéis receberam revestimento de placa de fibra de madeira e cimento. A rotulagem destas amostras e diferenças descritas, podem ser observadas na Tabela 2.12.

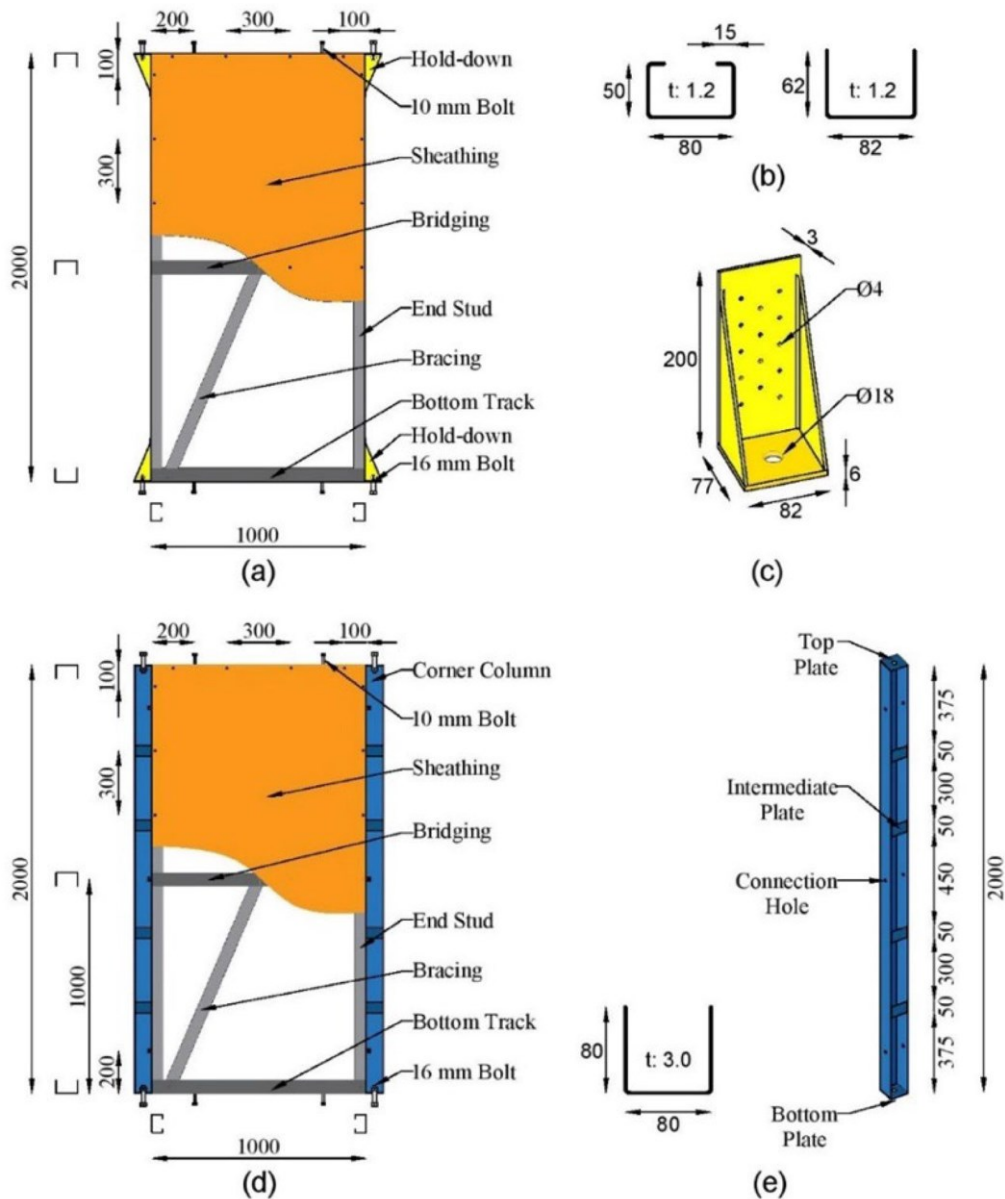


Figura 2.31 Detalhes. (a) parede de LSF convencional; (b) perfis de LSF; (c) hold-down; (d) parede de LSF híbrida; (e) coluna de apoio lateral das paredes híbridas. (AKTEPE et al., 2023)

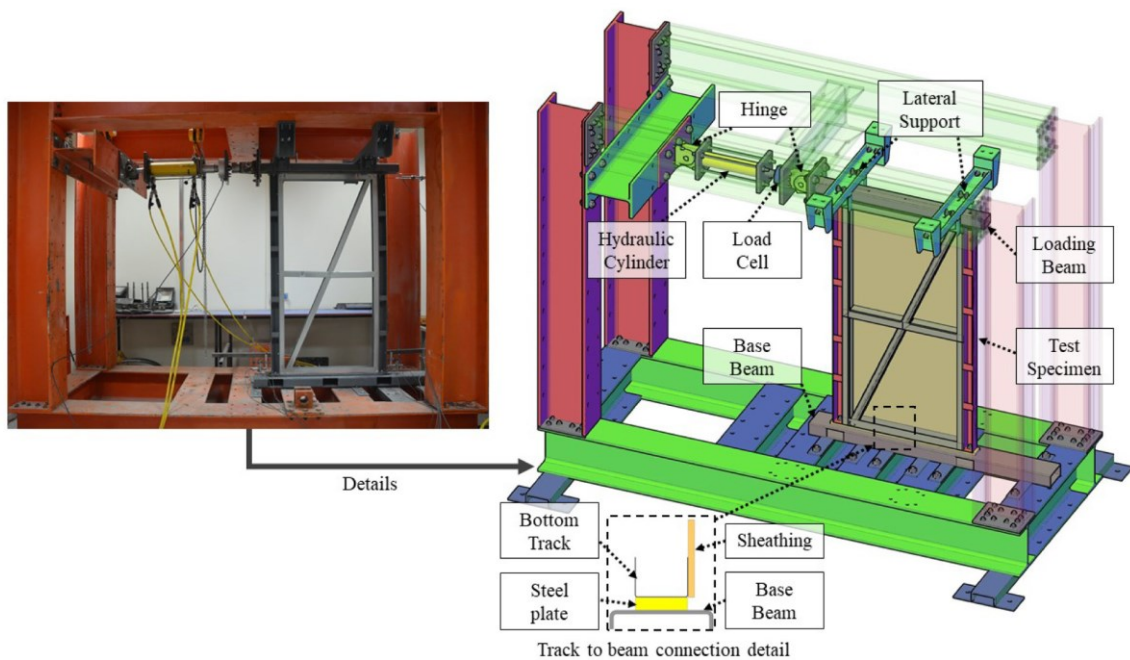


Figura 2.32 Vistas esquemáticas da configuração do teste. (AKTEPE et al., 2023)

A Figura 2.32 exibe a configuração do ensaio. O atuador hidráulico está fixado na lateral horizontal superior alinhado à viga horizontal superior ao painel a ser ensaiado. O painel é fixado a uma viga metálica presa à base. Foram utilizados 8 transdutores para medir os deslocamentos locais do painel, conforme mostrado na Figura 2.33.

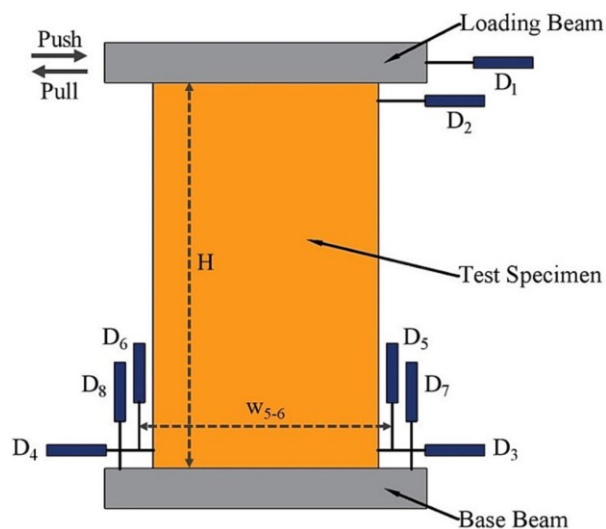


Figura 2.33 Posicionamento dos transdutores. (AKTEPE et al., 2023)

Neste estudo, observou-se que a capacidade máxima de cisalhamento é alcançada devido a deformações locais e levantamento da guia de apoio inferior – devido à força de tração que atua sobre o suporte fixado ao perfil inferior. A flambagem também ocorre na parte inferior na extremidade esquerda (na lateral que atua o atuador)

Os resultados constantes na Tabela 2.12 exibem que as paredes sem revestimentos (tanto híbridas quanto convencionais) mostraram falhas semelhantes, apresentando redução significativa na resistência. Em relação ao comportamento sísmico, notou-se que as paredes convencionais, tiveram suas falhas com o esmagamento devido à flambagem nas extremidades do painel. Já as paredes híbridas atingiram a sua capacidade máxima à medida que ocorreram falhas na conexão do perfil lateral do painel com as colunas de apoio lateral, pois, as forças geradas no painel LDF são transmitidas a estas colunas através das conexões, evitando a falha por carga axial. Isso demonstra harmonia entre os painéis LSF e as colunas de apoio lateral. Além disso, a inclusão de placas de revestimento, neste caso, placa de cimento de fibra de madeira, mostrou melhoria na capacidade de cisalhamento e aumento da rigidez, apesar de reduzir a ductilidade do sistema.

## 2.2 Normas

Serão abordadas as normas que tratam dos assuntos referentes ao trabalho, sendo elas:

- A norma que trata da prática padrão para teste de carga estática para a resistência ao cisalhamento em paredes moldadas para edifícios. A ASTM E564 – 06 (revisada em 2018) fornece uma determinação da rigidez e resistência de qualquer parede de estrutura leve.
- A norma que prevê métodos de ensaio padrão para ensaios de carregamento cíclicos para identificar a resistência ao cisalhamento dos elementos verticais dos sistemas de forças laterais das construções (paredes de cisalhamento), chamada ASTM E2126.29944.
- A norma norte americana para estruturas de aço formadas a frio, AISI S213-07/S1-09, que aborda o projeto de sistemas de resistência à força lateral para resistir às forças do vento e sísmicas em uma ampla gama de edifícios construídos com estrutura de aço formada a frio.
- A norma europeia que trata de estruturas metálicas na construção, ECCS 1986, a fim de comparar com os métodos anteriores os procedimentos indicados para ensaios monotônicos e cíclicos.

### 2.2.1 ASTM E564-5286

A ASTM E564-06 (revisada em 2018), *Standard Practice for Static Load Test for Shear Resistance of Framed Walls for Buildings* (Prática Padrão para Teste de Carga Estática para Resistência ao Cisalhamento de Paredes Apoiadas para Edifícios), tem como objetivo descrever os métodos para avaliar a capacidade de cisalhamento de paredes apoiadas em fundação rígida (simulando aquelas que serão utilizadas em serviço) e com força aplicada na parte superior do plano vertical da parede a fim de fornecer a rigidez ao cisalhamento e resistência de qualquer parede formada por estrutura leve.

A parede a ser utilizada no ensaio é constituída por elementos de estrutura incluindo quaisquer elementos de reforço diagonal ou outros reforços, assim como elementos de revestimentos e conexões. O desempenho desta parede é influenciado diretamente pelo tipo e espaçamento das conexões (parafusos) internas da estrutura, das conexões entre revestimento e estrutura e das conexões entre o painel e a sua ancoragem à plataforma de teste, ou piso, ou fundação. Todas as conexões utilizadas devem representar as conexões que são, normalmente, utilizadas nas construções de edifícios atuais.

Para a montagem do teste, é importante lembrar que devem ser previstas soluções para evitar a rotação no plano da parede e minimizar a torção, a partir da aplicação de força vertical, - a qual simulará o piso ou elementos da cobertura usados na construção real do edifício – e também de outros elementos de fixação.

#### 2.2.1.1 Procedimento de teste

A presente dissertação aplicou o procedimento de teste detalhado na norma ASTM E564-06 (revisada em 2018), o qual será abordado resumidamente nesta seção.

A norma exige o mínimo de dois espécimes de painel de parede para determinar a capacidade de cisalhamento e as forças verticais devem ser aplicadas paralelamente e no topo de parede, usando um atuador ou dispositivo de carga semelhante capaz de manter uma taxa de deslocamento constante.

Para o teste monotônico, a norma indica que aplique a pré-carga de 10% da máxima prevista e mantenha por 5 min para acomodar as conexões. Para que os objetivos do teste sejam alcançados, a aquisição de dados irá quantificar a resistência ao cisalhamento e a rigidez da parede. Sendo a resistência ao cisalhamento denotada como a carga máxima por comprimento

unitário da parede e a rigidez ao cisalhamento, a medição de carga de acordo com o deslocamento de cisalhamento correspondente.

A norma corrente apresenta dois meios de calcular a rigidez ao cisalhamento do ensaio: medição estimada medindo o alongamento diagonal do painel e medição direta. Sendo a primeira através do cálculo com base no alongamento diagonal, o qual simplifica o teste, eliminando a necessidade de medir a rotação do corpo rígido e translação horizontal da parede, requerindo apenas uma medida no ensaio (a medida diagonal).

Como nos ensaios apresentados neste trabalho, utilizamos a segunda abordagem de medição, aprofundaremos nos detalhes desta medição. A medição direta considera quatro deslocamentos para avaliar a deformação por cisalhamento. Esta maneira pode ser considerada mais complicada porque o conjunto do painel tende a girar e transladar à medida que a estrutura é deformada, o que deve ser evitado. As medições dos DTs (transdutores) estão apresentadas na Figura 2.34.

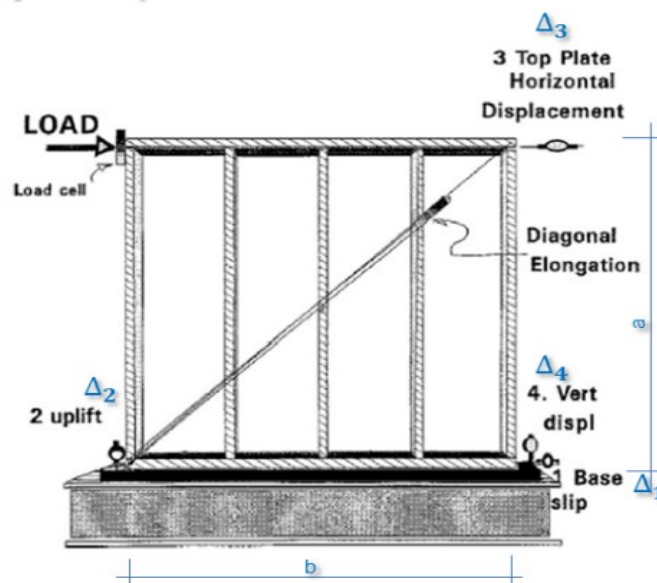


Figura 2.34 Posicionamento dos 4 transdutores de deslocamento no painel (ASTM 564-06)

- O transdutor 1 mede o deslocamento horizontal na direção do eixo inferior do painel no lado oposto do carregamento lateral.
- O transdutor 2 registra o deslocamento vertical da viga inferior (quando a parede é levantada da base rígida) do mesmo lado do carregamento lateral, indicando a rotação do corpo rígido.
- O transdutor 3 mede o deslocamento horizontal da placa no direção do eixo superior do painel, posicionado no lado oposto do carregamento lateral.
- O transdutor 4 registra o deslocamento vertical da guia inferior do painel, tal como o transdutor 2, porém no lado oposto ao carregamento lateral.

### 2.2.1.2 Cálculo

Com base nas medições de deslocamentos horizontal e vertical desses quatro transdutores e seguindo a ASTM E564, o deslocamento de cisalhamento interno ( $\Delta_{int}$ ) é determinado pela equação (1):

$$\Delta_{int} = \Delta_3 - \Delta_1 - (\Delta_2 - \Delta_4) \cdot \frac{a}{b}$$

Equação 1

Assim, a rigidez de cisalhamento interno (G) do painel é dada pela equação (2):

$$G = \frac{P}{\Delta_{int}} \cdot \frac{a}{b}$$

Equação 2

Como o comportamento do painel de parede é não linear, para o cálculo da rigidez ao cisalhamento interno é considerada uma carga de referência de 33% da carga máxima ( $P_{máx.}$ ).

### 2.2.2 ASTM E2126-29944

De acordo com a ASTM E2116-19, *Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings* (Métodos de Teste Padrão para Teste de Carga Cíclica (reversível) para Resistência ao Cisalhamento de Elementos de Sistemas Verticais Resistentes a Forças Laterais de Edifícios) o teste monotônico destina-se a fornecer dados de um deslocamento contínuo em uma amostra com condições de contorno idêntica às amostras que serão testadas ciclicamente. Deve ser realizado pelo menos um ensaio monotônico antes.

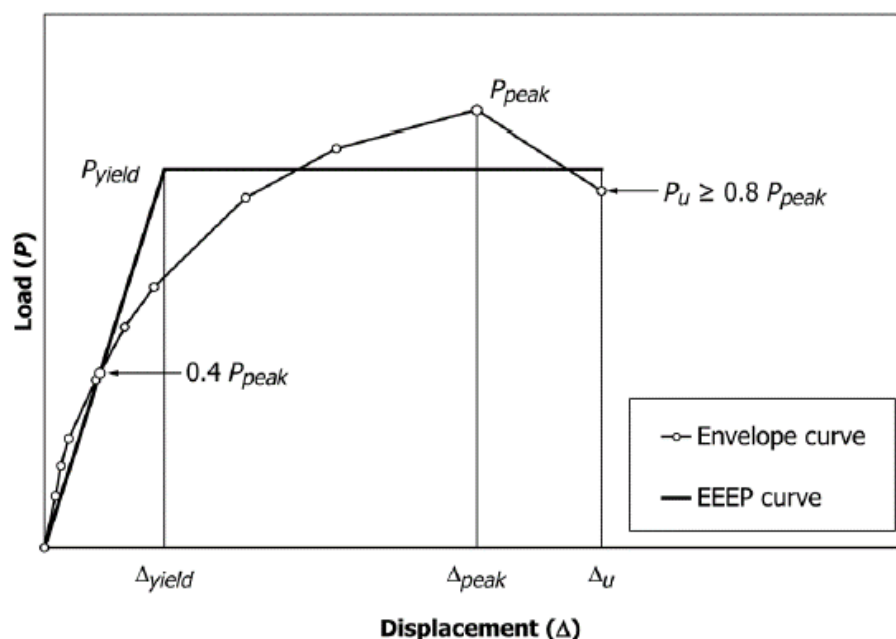


Figura 2.35 Gráfico EEEP.(ASTM E2126, 2019)

A Figura 2.35 exibe o Gráfico EEEP, que significa Equivalent energy elastic-plastic model (modelo elástico-plástico de energia equivalente) e representa, a partir dos ensaios experimentais de carregamento lateral, como encontrar, além da rigidez e pico de força aplicada (carga máxima ou  $P_{peak}$  conforme o gráfico), a força elástica ( $P_e$ ), a força de escoamento ( $P_y$ ) e seus deslocamentos laterais líquidos correspondentes:  $\Delta e$ ,  $\Delta y$ , respectivamente.

Para os testes cíclicos, a norma determina que o ensaio envolva ciclos de deslocamento agrupados em etapas de incrementos aumentando os níveis de deslocamento.

Nesta dissertação será abordado o Método B, que está em conformidade com o Protocolo ISO 16670. O programa de carga ISO consiste em dois deslocamentos padrões, sendo o primeiro deslocamento em cinco ciclos iguais totalmente convertidos em deslocamentos de 1,25%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10% do valor de deslocamento final ( $\Delta_m$ ) obtido em ensaio monotônico realizado anteriormente. O segundo padrão de deslocamento consiste em fases, cada uma contendo três ciclos totalmente convertidos de igual amplitude, em deslocamentos de 20%, 40%, 60%, 80%, 100 %, e 120 % do deslocamento final  $\Delta_m$ .

Tabela 2.13 Amplitudes dos ciclos conforme o Método B. (ASTM E2126-19).

Pattern	Step	Minimum Number of Cycles	Amplitude, % $\Delta_m$
1	1	1	1.25
	2	1	2.5
	3	1	5
	4	1	7.5
	5	1	10
2	6	3	20
	7	3	40
	8	3	60
	9	3	80
	10	3	100
	11	3	Additional increments of 20 (until specimen failure)

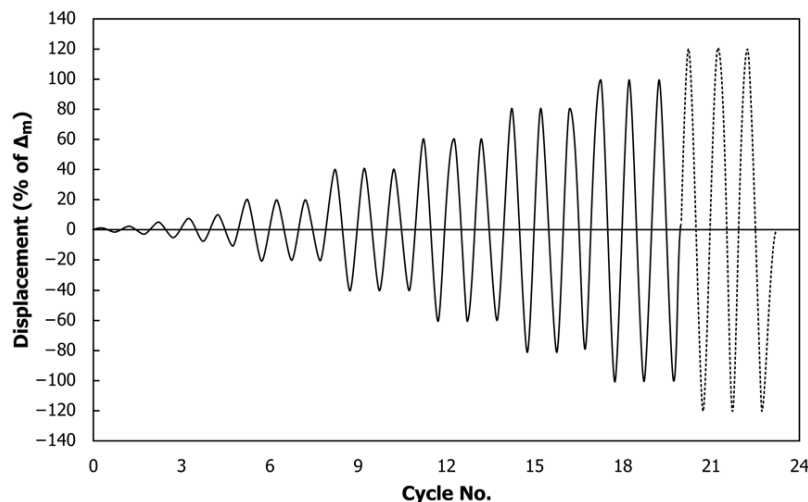


Figura 2.36 Cronograma de deslocamento cíclico conforme o método B (ASTM E2126-19).

Conforme Tabela 2.13 e a Figura 2.36, no ensaio de carregamento cíclico, são adotados 3 ciclos completos cada um de 1 mm positivo e negativo, depois 3 ciclos completos cada um de  $\pm 2$  mm, e sucessivamente de  $\pm 4$ mm,  $\pm 6$ mm,  $\pm 8$ mm,  $\pm 16$ mm, depois 9 ciclos de  $\pm 32$ mm e assim por diante, até que ocorra a falha do modelo.

### 2.2.3 AISI S213-07/S1-09 2012

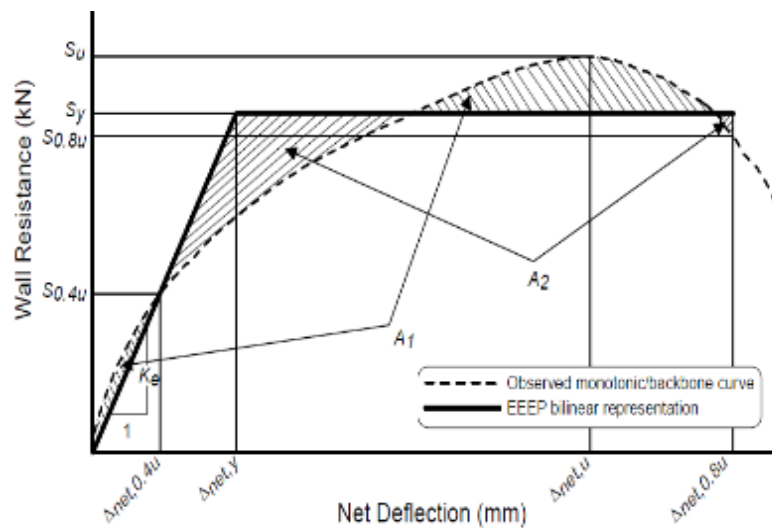


Figura 2.37 Gráfico EEEP. (AISI S213)

Assim como a ASTM E2116 (2019), a AISI S213, além da rigidez e pico de força aplicada (carga máxima ou  $S_u$  conforme o gráfico), também determina a força elástica ( $P_e$ ) (que não abordamos nesta dissertação) e a força de escoamento ( $P_y$ ) e seus deslocamentos laterais líquidos correspondentes:  $\Delta_e$ ,  $\Delta_y$ , (conforme Figura 2.37). A rigidez inicial pode ser determinada com a rigidez secante à carga  $P_e$ . O ponto elástico ( $\Delta_e$ ,  $P_e$ ) é localizado em  $0,4P_{max}$ . O ponto de pico ( $\Delta_{max}$ ,  $P_{max}$  – ou  $S_u$  conforme o gráfico) é determinado como a carga máxima e o deslocamento correspondente nas curvas envelope.

No entanto, os métodos geram diferentes pontos de escoamento (“ $\Delta_y$ ,  $P_y$  – ou  $S_y$  conforme o gráfico). Para o Método da ASTM E2116 (2019), o ponto de escoamento pode ser obtido como o ponto de cruzamento da linha elástica  $K_0$  com a linha de  $0,1K_0$ , que é a tangente das curvas envelope. Já para Método da AISI S213 (2012) o ponto é determinado utilizando o modelo EEEP que é capaz de dissipar uma quantidade de energia equivalente ( $\text{Área } A_1 = A_2$  na Figura 2.37).

O método ASTM utiliza a inclinação definida entre a origem e o ponto em  $0,4P_{max}$  obtido a partir dos resultados dos testes. O método AISI é semelhante ao primeiro, exceto

quanto ao detalhe em que a relação de aspecto do reticulado da parede é considerado para o cálculo de rigidez. Assim, a rigidez calculada pelo método AISI é 1,87 vezes superior à determinada segundo as recomendações da ASTM.

Neste trabalho, foi escolhido utilizar o método ASTM para o cálculo do ponto elástico.

#### 2.2.4 ECCS 1986

A ECCS 1986 - Recommended Testing Procedure for Assessing the Behavior of Structural Steel Elements Under Cyclic Loads (Procedimento de Teste Recomendado para Avaliar o Comportamento de Elementos Estruturais de Aço sob Cargas Cíclicas), também aborda o comportamento de estruturas de aço sob carregamentos cíclicos e assim como a ASTM E2126, a ECCS determina que seja realizado pelo menos um ensaio monotônico antes dos ensaios cíclicos, para determinar a sequência de amplitudes em função do valor médio (quando aplicável) do deslocamento final ( $\Delta m$ ) obtido a partir dos testes monotônicos.

Esta convenção também exhibe os gráficos de força versus deslocamento dos ensaios monotônicos e de curva envelope dos ensaios cíclicos (Figura 2.38) e explica como encontrar e a força de escoamento ( $P_y$ ). A interseção das tangentes determina a força de escoamento em ambos os gráficos.

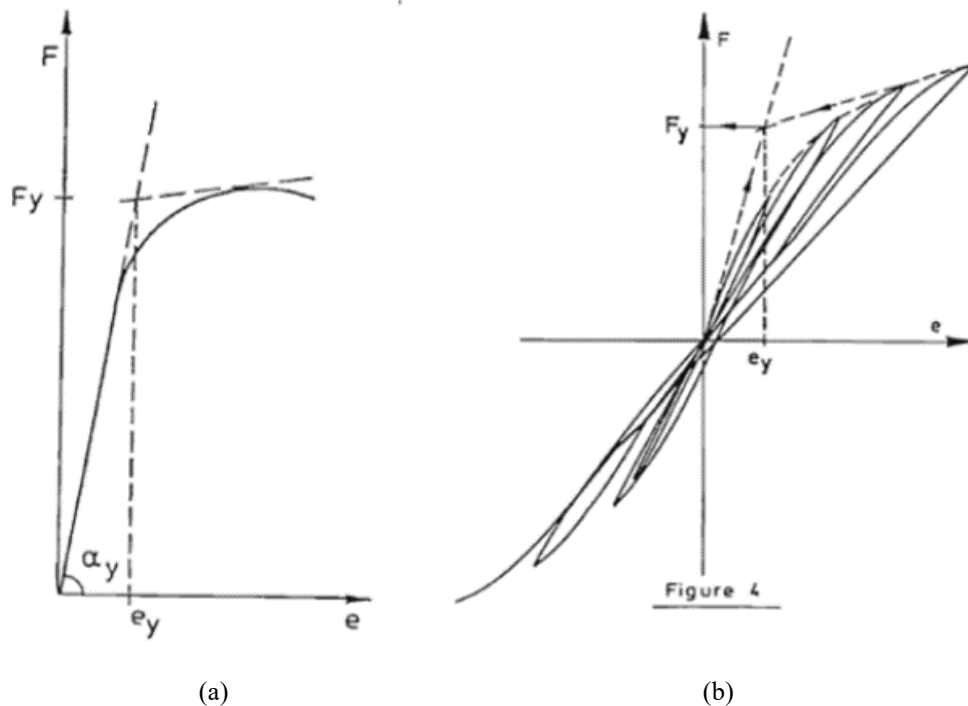


Figura 2.38 Definição de  $P_y$  (a) Gráfico de força versus deslocamento do protocolo de carregamento monotônico (b) curva envelope do protocolo de carregamento cíclico. (ECCS, 1986)

### 3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 Configuração de montagem

Para a realização dos ensaios relativos à presente pesquisa, a configuração de teste foi baseada na norma ASTM 564-06 (2012), onde todos os requisitos pontuados foram atendidos, conforme será exibido em seguida.

Nos ensaios (Figura 3.1 e Figura 3.2), a força lateral é aplicada por meio de um atuador hidráulico posicionado na viga de aplicação da força que está fixada na guia superior do modelo e um transdutor de deslocamento é posicionado na outra extremidade dessa guia superior para o registro dos respectivos deslocamentos horizontais. Todos os componentes da configuração de ensaio estão representados na Figura 3.1

Cada um dos modelos ensaiados foi também submetido a duas forças concentradas de gravidade (blocos de concreto), cada uma delas com valor constante de 18 kN. A aplicação dessas forças teve com objetivo simular a força de gravidade distribuída de 15kN/m ao longo do comprimento do painel, correspondente à carga transferida do painel do segundo pavimento para o painel do primeiro pavimento da edificação residencial tomada como referência no presente estudo.

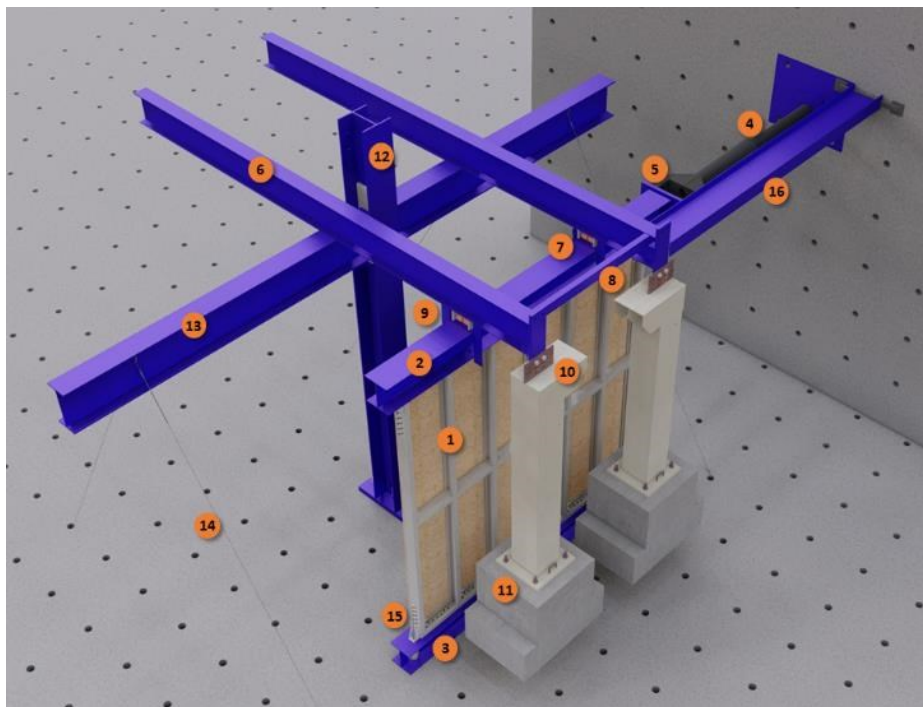


Figura 3.1 Perspectiva 3D de ensaio de painéis de cisalhamento (DE FARIA, 2023)

Na Figura 3.1 tem-se:

1 – painel a ser ensaiado; 2 – viga de apoio superior; 3 – viga de apoio inferior; 4 – atuador hidráulico para aplicação da força horizontal; 5 – ligação do atuador com o painel; 6 – vigas de sustentação das forças verticais (com valor fixo); 7 – rolamentos de apoio; 8 – barra de separação das vigas de sustentação; 9 – cantoneiras de contenção lateral do painel; 10 – placa de ligação das forças verticais à viga de sustentação; 11 – forças verticais (blocos de concreto); 12 – pilar da montagem; 13 – viga de apoio das vigas de sustentação das forças verticais; 14 – cabos de aço para contenção lateral do sistema de aplicação das forças verticais; 15 – hold down de ligação do painel com as vigas de apoios superiores e inferiores; 16 – viga fixa na parede lateral de reação para imobilização do sistema vertical de aplicação de carga.

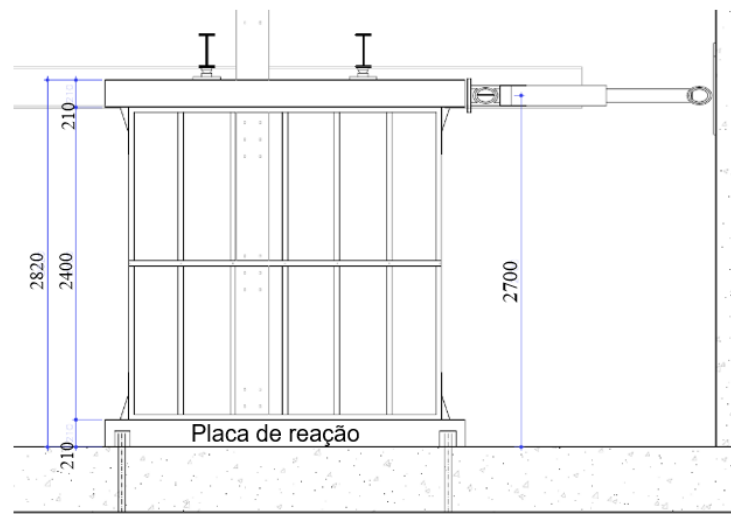


Figura 3.2 Esquema de ensaio de painéis contraventados com placas OSB. (DE FARIA, 2023)

### 3.1.1 Detalhes dos dispositivos e fixações utilizados na configuração de teste

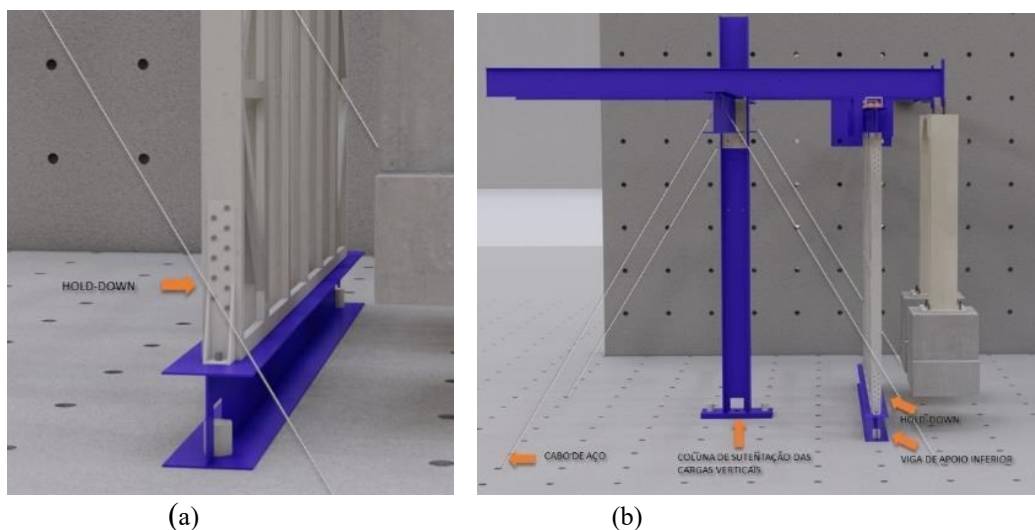


Figura 3.3. a) Detalhe de fixação do Hold-down b) Perspectiva da lateral do ensaio. (DE FARIA, 2023)



força, para contenção horizontal do ensaio na direção do atuador. Além disso, também para evitar o deslocamento do modelo para fora do seu plano, cantoneiras foram soldadas nas vigas de sustentação das forças verticais. A Figura 3.5 exhibe os dispositivos e as fixações da configuração descrita acima.

Cada um dos modelos ensaiados foi submetido a duas forças concentradas de gravidade (blocos de concreto), cada uma delas com valor constante de 18 kN. A aplicação dessas forças teve como objetivo simular a força de gravidade distribuída de 15 kN/m correspondente à carga transferida do painel do segundo pavimento para o painel do primeiro pavimento da edificação residencial tomada como referência no presente estudo.

Além das forças de gravidade, os modelos também foram submetidos a carregamento lateral monotônico ou carregamento lateral cíclico, conforme o modelo, todos aplicados na horizontal em um dos vértices superiores e segundo o plano do modelo.

A força lateral horizontal foi aplicada por meio de um atuador hidráulico MTS com capacidade de força máxima de  $\pm 250$  kN e com deslocamento de cilindro de  $\pm 250$  mm.







O controle do atuador hidráulico MTS e a aquisição dos dados referentes à força lateral aplicada e o correspondente deslocamento do cilindro hidráulico foram efetuados com o Sistema FlexTest GT Controller da MTS.

### 3.1.2 Instrumentação

Foram utilizados transdutores posicionados de acordo com a indicação da ASTM 564-06 (2012), mas, para corrigir a variação do DT1 (que mede o deslocamento horizontal inferior do painel), foram consideradas as medições do DT5 (transdutor acrescentado para medir o deslocamento horizontal da viga horizontal inferior). Ver Figura 3.7.

De acordo com a Tabela 3.1 e Figura 3.8, observa-se que o DT3 está diretamente relacionado ao carregamento horizontal que ocorre no lado esquerda da viga superior.

Tabela 3.1 Posicionamento dos DTs – (DE FARIA, 2023)

					
DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	DTD

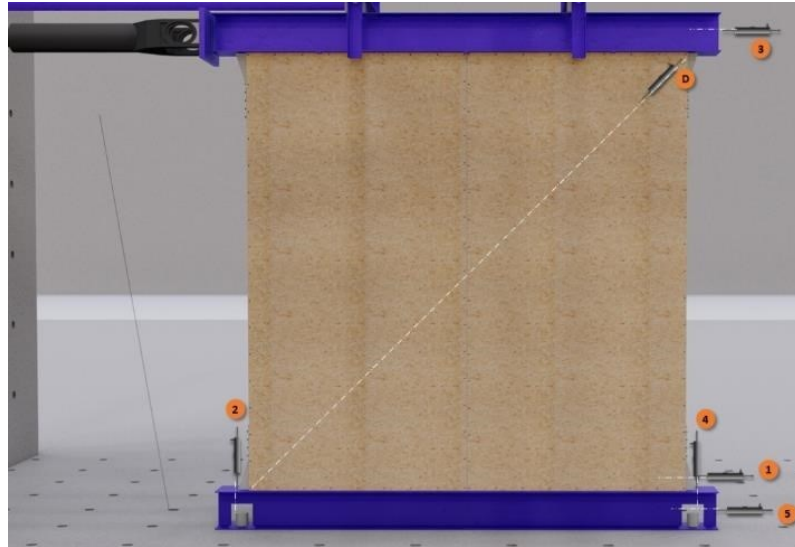


Figura 3.6 Perspectiva 3D indicando a posição dos transdutores de deslocamento para o ensaio de carregamento lateral. (DE FARIA, 2023)

Os transdutores de deslocamento (DT) utilizados e mostrados na Figura 3.7 foram todos da marca Kyowa, com capacidade máxima de medição de 100 mm.

A aquisição das leituras referentes aos deslocamentos lineares medidos com os DTs nos modelos foi efetuada via sistema eletrônico, de maneira automatizada, através da digitalização de sinais analógicos utilizando um microcomputador equipado com uma placa CAD10-26 e o software correspondente AqDados 4.0, ambos da Lynx Eletrônica, que permitiu a aquisição dos sinais e o tratamento dos mesmos durante o ensaio e logo após seu término. O sistema de aquisição de dados é preparado para a leitura dos sinais analógicos de até 32 sensores.



(1)



(2)



Figura 3.7 Fotos dos transdutores posicionados para realização dos ensaios. (1) DTs 1, 4 e 5; (2) DT Diagonal; (3) DT2; (4): DT3. (DE FARIA, 2023)

Foi utilizado o método de medições direto abortado pela ASTM E564-06 (revisada em 2018), apresentado na seção 2.2.1. Acrescentando a correção adicional, com a medição do DT5, a equação utilizada, é a seguinte:

$$\Delta_{int} = \Delta_3 - (\Delta_1 - \Delta_5) - (\Delta_2 - \Delta_4) \cdot \frac{a}{b} \quad \text{Equação 3}$$

Para o calculo de rigidez ao cisalhamento interno (G) do painel, foi utilizada a equação 2, apresentada na seção 2.2,1.

### 3.1.3 Modelos ensaiados com a configuração de teste

Neste estudo, a autora realizou 4 ensaios – cada um deles submetido às mesmas forças de gravidade, sendo que 2 modelos foram submetidos a carregamento lateral monotônico e 2 foram submetidos a carregamento lateral cíclico, todos aplicados na guia superior e segundo o plano do modelo, de acordo com a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Especificação dos ensaios de carregamento lateral cíclico e monotônico (DE FARIA, 2023)

DATA	ENSAIO	MODELO	
08/11/2019	Ensaio 1	M1M	Ensaio do monotônico em modelo light steel frame com placa OSB com espessura e=9,5mm

25/11/2019	Ensaio 2	M2C	Ensaio cíclico em modelo light steel frame com placa OSB com espessura $e = 11\text{mm}$
03/12/2019	Ensaio 3	M3C	Segundo ensaio cíclico em modelo light steel frame com placa OSB com espessura $e = 11\text{mm}$
20/12/2019	Ensaio 4	M4M	Ensaio monotônico em modelo light steel frame com treliça de contraventamento, sem revestimento com placa OSB

\* Todos os reticulados de aço dos modelos tinham a distância entre montantes igual a 400 mm.

O aço utilizado para a fabricação dos perfis foi produzido pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) e era do tipo ZAR 280 Z 275, com revestimento de zinco de 275 g de Zn/m<sup>2</sup>.

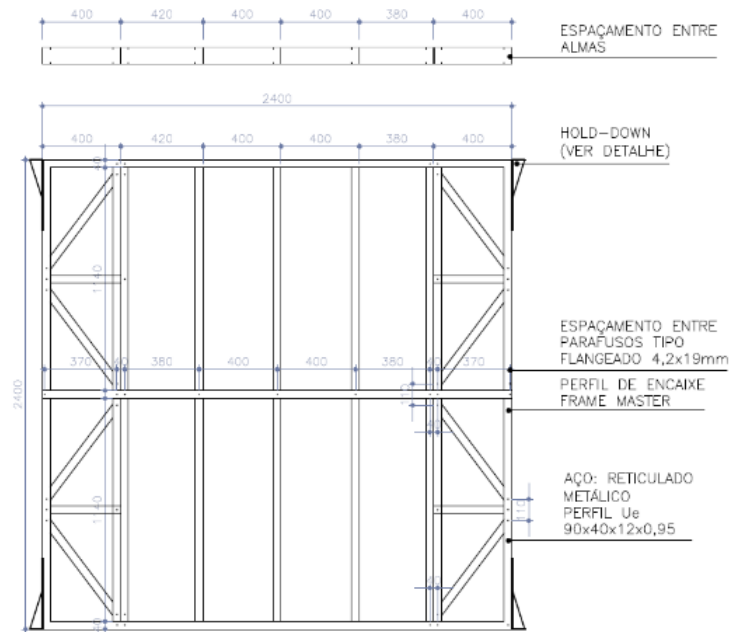


Figura 3.8 Modelo em light steel frame com treliças verticais. (DE FARIA, 2023)

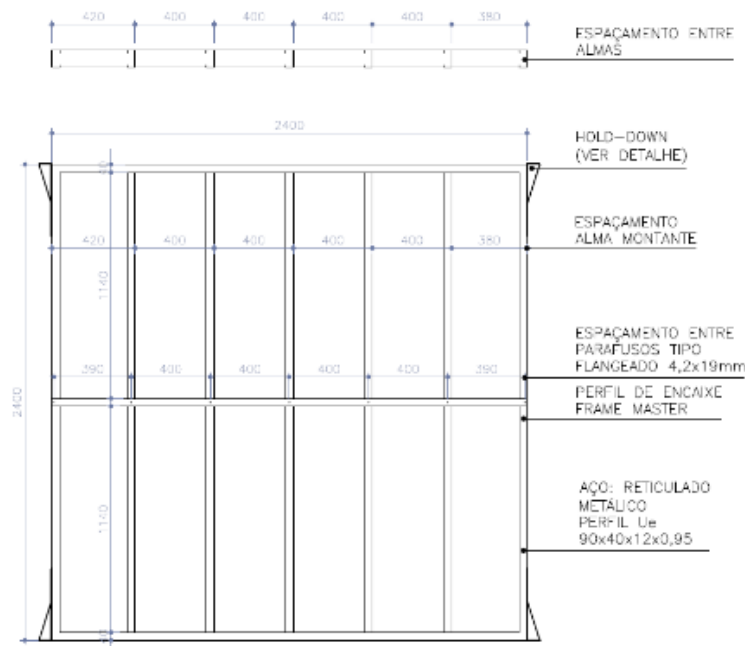


Figura 3.9 Reticulado de aço do modelo para receber as placas OSB (DE FARIA, 2023)

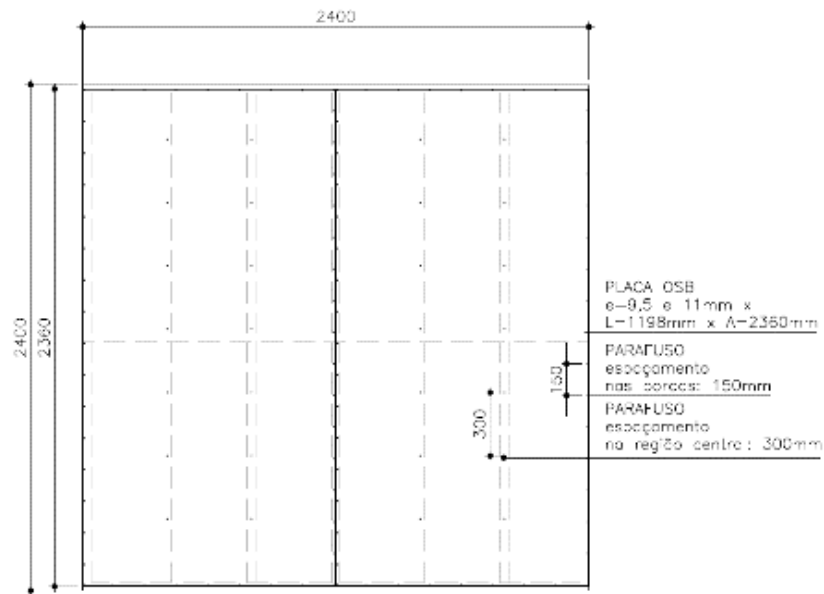


Figura 3.10 Placas OSB parafusadas ao engradamento do painel de LSF do modelo. (DE FARIA, 2023)

As figuras Figura 3.8, Figura 3.9 e Figura 3.10 exibem as duas variações dos modelos ensaiados, sendo o modelo com treliça utilizado como comparação de rigidez ao cisalhamento com a dos modelos com placa OSB.

### 3.2 Ensaio de carregamento lateral monotônico

Nesta pesquisa, o método para ensaios monotônicos utilizado, foi o sugerido pela norma .ASTM E2126 (2019), apresentado na seção 2.2.2. Neste estudo, seguindo os parâmetros indicados, a velocidade do deslocamento foi controlada em 0,01mm/s, com leitura de 2 hertz e  $\Delta$  (deslocamento) de 1,5mm com 3 ciclos para sincronização.

A Figura 3.11 a) exhibe a montagem antes do início do ensaio. A Figura 3.11 b), c) e d) apresenta o modelo após o ensaio, em que ocorreu flambagem local no montante oposto ao atuador (b), a torção do painel (c) e giro e afundamento dos parafusos 47 e 48 da placa B (parte central superior) devidos aos carregamentos impostos.

As primeiras falhas foram observadas nas ligações entre revestimento e o engradamento metálico, quando os parafusos começaram a girar e penetrar nas placas OSB – caracterizando o modo de falha pull-over, e em seguida alguns dos parafusos do hold-down inferior do lado de aplicação da força lateral se desprenderam do dispositivo de fixação da ancoragem. A força máxima aplicada foi de 30,3 kN



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.11 Modelo M1M a) montagem antes do ensaio b), c) e d) montagem após ensaio. (DE FARIA, 2023)

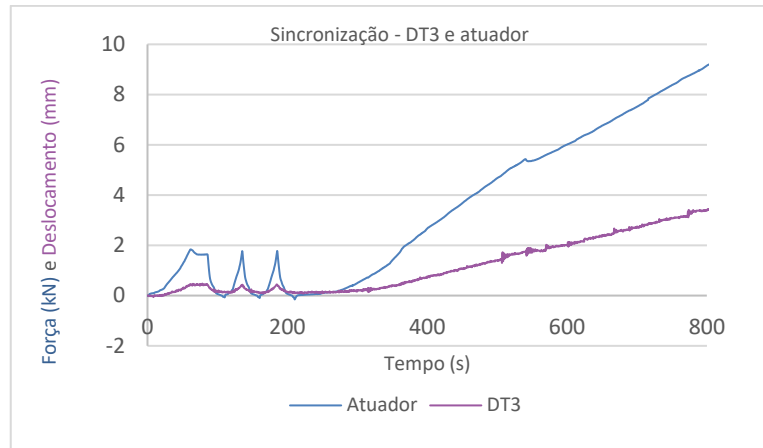


Figura 3.12 Gráfico de sincronização entre Tempo versus Deslocamento medidos pelo DT3 e Tempo versus Força medidos pelo atuador no ensaio M1M. (DE FARIA, 2023)

O gráfico de Força e Deslocamento versus Tempo do Atuador e DT3, exibido na Figura 3.12 representa a sincronização entre os deslocamentos e força aplicada em função do tempo.



Figura 3.13 Modelo M4M: a) montagem antes experimento b) montagem após experimento. (DE FARIA, 2023)

A Figura 3.13 exibe o modelo M4M (ligth steel frame com travamento lateral com treliças) antes e após realização do ensaio, respectivamente.

Observa-se na base do montante da Figura 3.13 (b) o mecanismo de colapso após a ocorrência de flambagem local nesse montante da extremidade oposta à do carregamento horizontal. Deve-se ainda considerar que o início do escoamento se deu com a força horizontal de 5,95kN quando houve falha do hold-down inferior do lado da aplicação da força horizontal

e a força máxima horizontal aplicada no momento da falha foi de 6,34kN. Os resultados são apresentados na Tabela 3.3.

Ao comparar os resultados dos dois ensaios monotônicos, nos gráficos da Figura 3.14, os quais seguiram o mesmo protocolo (modelos M1M e M4M), observa-se que o modelo usando placas OSB se sobressaiu em termos de carga máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ ) 30,3 kN, e Rigidez (G) de 174 kN/mm, sendo a força máxima aplicada no modelo com treliça foi de 6,34kN e a Rigidez (G) de 128 kN/mm, (Tabela 8)

Tabela 3.3 Resultado de força máxima e rigidez dos ensaios monotônicos (DE FARIA, 2023)

MODELO	Força Máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ ) (kN)	Rigidez (G) (kN/mm)
M1M	30,3	174
M4M	6,34	42,82

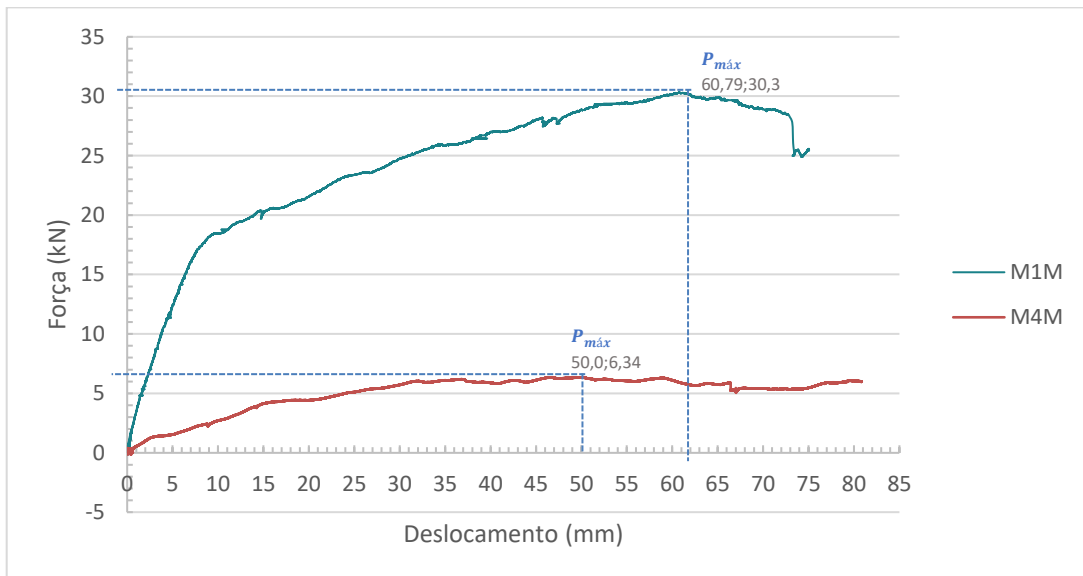


Figura 3.14 Gráfico Força versus Deslocamento do Atuador e transdutor DT3 medidos durante os ensaios M1M e M2M. (DE FARIA, 2023)

### 3.3 Ensaio de carregamento lateral cíclico

Para os testes cíclicos, esta pesquisa abordou o Método B da ASTM E2126 (2019), apresentado na seção 2.2.3.

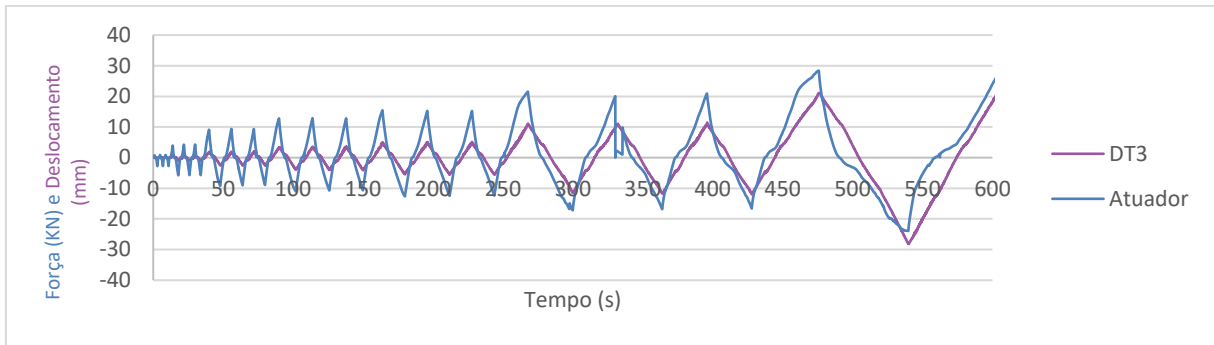


Figura 3.15 Gráfico de sincronização entre Tempo versus Deslocamento medidos pelo DT3 e Tempo versus Força medidos pelo atuador hidráulico no ensaio do modelo M2C. (DE FARIA, 2023)

Conforme Figura 3.15, no ensaio de carregamento cíclico, adotou-se 3 ciclos completos cada um de 1 mm positivo e negativo, depois 3 ciclos completos cada um de  $\pm 2$  mm, e sucessivamente de  $\pm 4$ mm,  $\pm 6$ mm,  $\pm 8$ mm,  $\pm 16$ mm, depois 9 ciclos de  $\pm 32$ mm, e 2 ciclos de  $\pm 48$ mm, quando o ensaio do modelo M2C foi encerrado devido a falha do painel ocorrer antes do previsto e pela priorização da preservação da montagem. Mantiveram-se as cargas verticais (blocos de concreto) no total de 36 kN, como no ensaio monotônico, e as leituras nas aquisições de dados foram efetuadas com uma frequência de 2 hertz.



(a)



(b) (c)  
 Figura 3.16 Modelo M2C: a) montagem antes do ensaio; b) modelo após ensaio, no momento da falha da placa OSB e do montante oposto ao da aplicação da força lateral; c) modelo após ensaio mostrando o painel flambado lateralmente, incluindo os três montantes mais próximos da aplicação da força lateral. (DE FARIA, 2023)

A Figura 3.16 exibe as fotos do modelo M2C antes e após o ensaio. A falha ocorreu com o colapso do montante oposto à aplicação da força lateral (imagem (b)) quando o deslocamento do atuador estava no primeiro ciclo de 32mm e a força lateral no valor de 28,6 kN. Após o colapso, no primeiro ciclo de 48mm, ocorreu flambagem lateral do painel como um todo e colapso dos três montantes nas proximidades da força lateral aplicada, conforme a imagem (c).



(a)



(b)

(c)

Figura 3.17 Ensaio do modelo M3C: a) montagem antes do ensaio; b) modelo após ensaio, no momento da falha da placa OSB e do primeiro montante do lado da aplicação da carga lateral; c) modelo após ensaio mostrando a placa OSB mais próxima da aplicação da força lateral flambada lateralmente. (DE FARIA, 2023)

Ressalta-se que o modelo M3C tem a mesma configuração de montagem que a do modelo M2C. A Figura 3.17 exibe a montagem antes do ensaio (imagem (a)) e após o ensaio (imagens (b) e (c)) nas quais é possível notar o colapso do montante próximo ao atuador hidráulico horizontal, momento em que ocorreu a falha estrutural com força lateral de 20,8 kN durante o terceiro ciclo de 16mm. Durante o processo de falha, os parafusos inferiores de ligação placa OSB e reticulado metálico do LSF entraram na placa. A Tabela 3.4 exibe os resultados encontrados nos dois ensaios cíclicos.

Tabela 3.4 Resultados de carga máxima e rigidez dos modelos sob carregamentos cíclicos. (DE FARIA, 2023)

MODELO	Força Máxima ( $P_{máx}$ ) kN	Rigidez (G) (kN/mm)
M2C	28,60	641
M3C	20,80	696

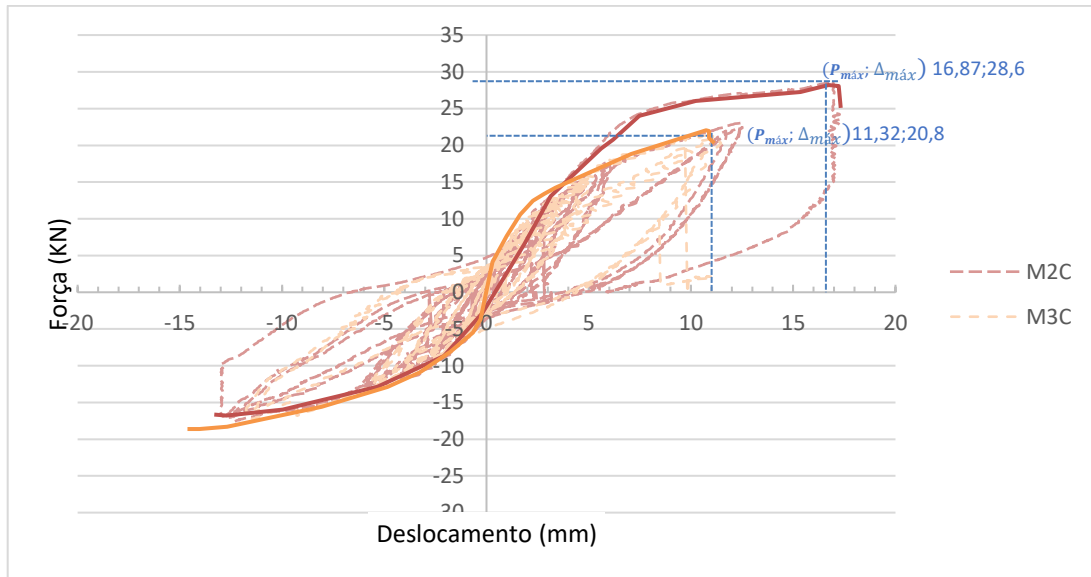


Figura 3.18 Gráfico de Força versus Deslocamento e Curva Envelope do Atuador versus DT Diagonal medidos nos ensaios dos modelos M2C e M3C. (DE FARIA, 2023)

Ao comparar os ensaios de carregamento cíclicos, nos gráficos da Figura 3.18, os quais seguiram o mesmo protocolo durante os ensaios dos modelos M2C e M3C, observa-se que os resultados dos modelos ensaiados diferiram muito pouco entre si, uma vez que a Rigidez ( $G$ ) encontrada foi de  $641\text{kN/mm}$  para o modelo M2C e de  $696\text{kN/mm}$  para o modelo M3C.

Em termos de força máxima horizontal, os gráficos apresentam semelhança e proporcionalidade, apesar do modelo M3C ter apresentado falha em um ciclo anterior ao do modelo M2C, um no terceiro ciclo de  $16\text{mm}$  e outro no primeiro ciclo de  $32\text{mm}$ , respectivamente. Para fins de análise laboratoriais, os ensaios foram finalizados logo que apresentaram as falhas conclusivas, para que os modelos pudessem ser preservados.

### 3.3.1 Definições de EEEP – Equivalent energy elatic-plastic model

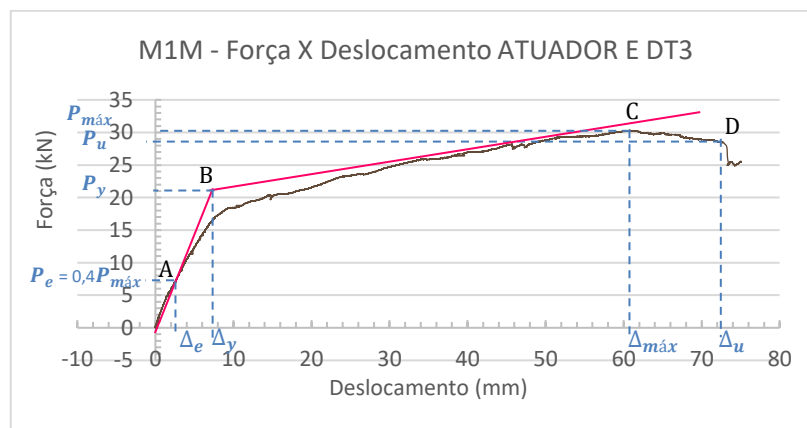


Figura 3.19 Gráfico EEEP do modelo M1M. (DE FARIA, 2023)

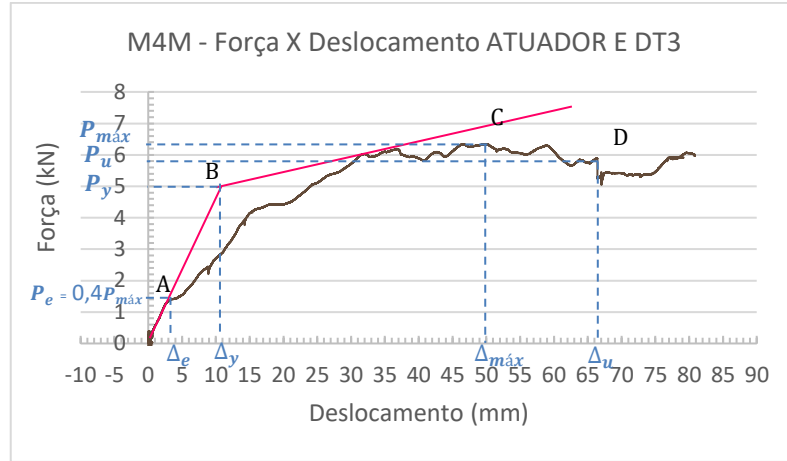


Figura 3.20 Gráfico EEEP do modelo M4M. (DE FARIA, 2023)

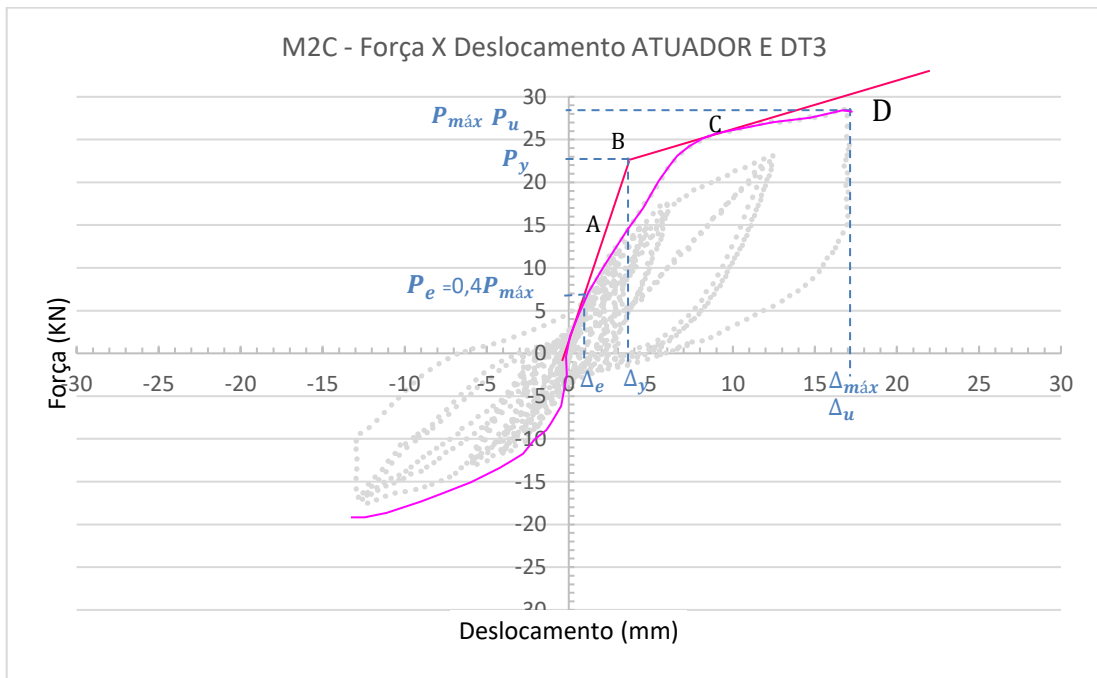


Figura 3.21 Gráfico EEEP do modelo M2C. (DE FARIA, 2023)

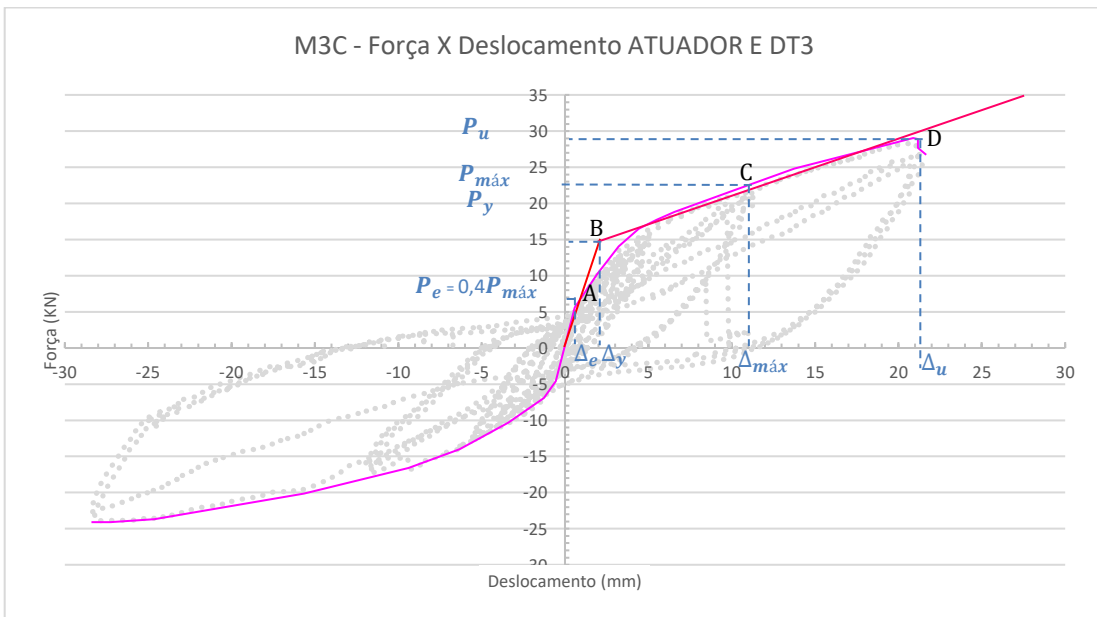


Figura 3.22 Gráfico EEEP do Modelo M3C. (DE FARIA, 2023)

As Figuras Figura 3.19 Figura 3.20 Figura 3.21 Figura 3.22 apresentam os gráficos EEEP dos quatro modelos ensaiados. Os gráficos estão de acordo com a norma ASTM E2126, e exibem os pontos de força elástica em “A” ( $P_e$ ), as quais equivalem a 0,4 da carga máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ ) em “C” e carga de escoamento em “B” ( $P_y$ ).

É importante salientar que, neste caso específico dos gráficos EEEP do método (b), o que denomina-se de carga última em “D” ( $P_u$ ) é a última carga alcançada pelo modelo. No caso do ensaio M3C, a carga no momento de falha é menor do que a carga última, pois a força horizontal imposta continuou crescendo após a caracterização do modo de falha.

## 4 DISCUSSÕES

A Tabela 4.1 exibe os valores dos resultados dos 4 modelos ensaiados, em termos de Carga Máxima, Rigidez, Carga Elástica e Carga de Escoamento, sendo estes dois últimos, calculados através do método da ASTM E2126 (2019). Os resultados encontrados representam o que era esperado em relação às características de cada modelo ensaiado.

Tabela 4.1 Resultados de cargas, rigidez, carga elástica e força de escoamento dos ensaios de carregamentos monotônico e cíclico de acordo com a ASTM E2126. (DE FARIA, 2023)

MODELO	Força Máxima ( $P_{máxima}$ ) (kN)	Rigidez ( $G$ ) (kN/mm)	Carga elástica ( $P_e$ ) (kN)	Força de Escoamento ( $P_y$ ) (kN)
M1M	30,3	174	7,57	21
M2C	28,60	641	7,15	23
M3C	20,8	696	5,20	15
M4M	6,34	42,82	1,58	5

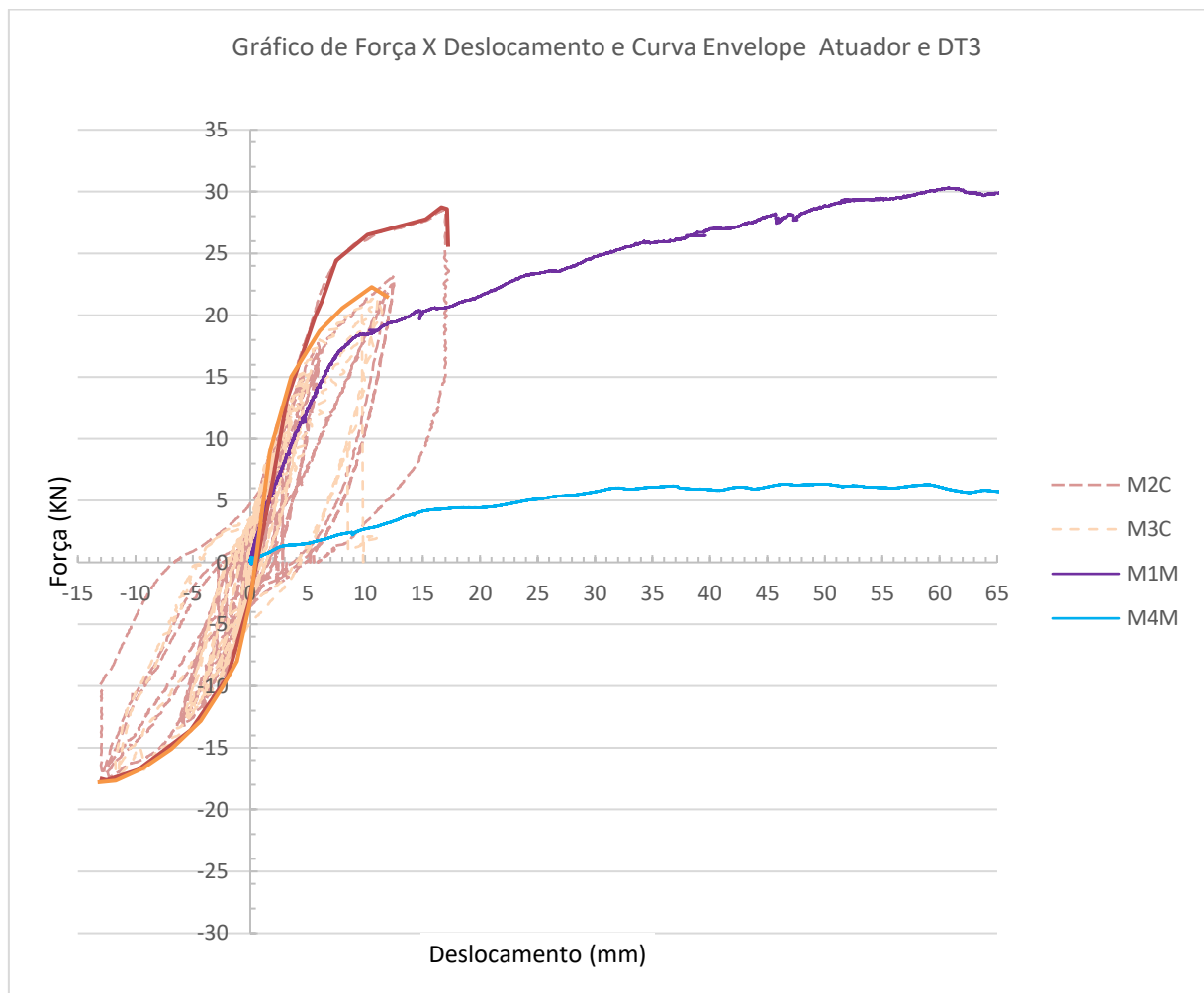


Figura 4.1 Gráfico de Força versus Deslocamento e Curva Envelope da Força Horizontal versus e DT Diagonal medidos nos ensaios dos modelos M1M, M2C, M3C e M4C. (DE FARIA, 2023)

A Figura 4.1 exibe o resultado dos 4 ensaios em relação à Força versus Deslocamento e a curva envelope dos dois ensaios cíclicos (M2C e M3C).

#### *4.1 Em relação a montagem*

Durante o processo de construção da configuração do teste em escala real 1:1, percebeu-se a necessidade de incluir diferentes tipos de artifícios para evitar o deslocamento lateral do topo do painel para fora do seu plano do ensaio.

Para que o sistema de simulação da força de gravidade (blocos de concreto) correspondente à carga transferida do painel do segundo pavimento não interferisse na movimentação natural do painel, foram utilizados: rolamentos e cantoneiras soldadas nas vigas de sustentação de aplicação de carga fixada no topo do painel; uma barra de separação entre as vigas de sustentação das forças verticais; um perfil I fixado na parede de reação lateral; cabos de aço para contenção das vigas de apoio das vigas de sustentação.

Dessa forma, foi possível alcançar o objetivo de manter os blocos de concreto suspensos e imóveis e sem interferência durante a realização dos ensaios.

Outro ponto de destaque foi o posicionamento e medição precisa dos transdutores de deslocamento e a inclusão do DT5 para desconto de qualquer possível deslocamento da viga inferior (que simula a laje inferior de uma edificação de dois andares) em relação ao piso do laboratório.

#### *4.2 Em relação ao tipo de ensaio*

Os ensaios monotônicos, evidentemente, apresentaram maiores deslocamentos, em relação aos cíclicos. Nota-se que as falhas ocorridas foram sempre nos montantes opostos ao lado de aplicação da força horizontal, devido ao movimento em direção única do atuador.

Já em relação aos ensaios cíclicos, além da falha com o colapso do montante oposto à aplicação da força lateral, também houve o colapso dos montantes nas proximidades da força lateral aplicada.

#### *4.3 Em relação aos resultados obtidos*

Dos três modelos ensaiados que possuíam placa OSB em sua constituição, M1M, M2C e M3C, o modelo M1M possuía placa com espessura inferior à dos demais modelos (9,5mm e 11mm, respectivamente), por questões de disponibilidade de material quando da sua fabricação, e, possivelmente, este foi um dos parâmetros para seu resultado de Rigidez inferior, mas ainda

assim, superior à do modelo sem placa OSB, que foi contraventado com treliças metálicas (M4M).

É importante salientar, que, no ensaio do modelo M3C, ocorreu um escape do DT3 (o qual representa o principal medidor de deslocamento dos ensaios por se tratar de aferir o deslocamento horizontal oposto à força horizontal do atuador, no eixo superior). Logo em seguida ao escape, houve a ruptura de alguns parafusos da conexão placa OSB e painel LSF.

Fica evidente o menor desempenho do modelo M4M. Em comparação aos modelos que apresentaram placa OSB como revestimento, percebe-se que o modelo M4M teve seu desempenho prejudicado pela falta deste revestimento. Além disso, a presença da treliça metálica como contraventamento não produziu resposta suficiente para equipara-se ao contraventamento dos painéis de vedação.

Enquanto o início da falha dos modelos que possuíam placa OSB se deu através da conexão painel e placa pelos parafusos (por giro e afundamento dos mesmos), a falha no painel com treliça inicia-se diretamente nos montantes da estrutura LSF pelas flambagens locais dos montantes e depois pela deformação total do painel. Dessa forma, a estrutura metálica se torna muito mais exposta aos fenômenos de flambagem e deformação causados pelas forças horizontais.

## 5 CONCLUSÃO

Para que fosse possível avaliar o comportamento estrutural dos painéis de parede em LSF revestidos com placas OSB, foi necessário projetar, fabricar e construir no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEEs) do Departamento de Engenharia de Estruturas (DEEs) da Escola de Engenharia da UFMG (EE.UFMG) a configuração de teste descrita no item 3.1. Durante e após os ensaios verificou-se que a configuração de testes apresentou o comportamento esperado, superando as expectativas quanto à aplicação das forças impostas e quanto à aquisição de dados relativos às forças impostas e deslocamentos medidos conforme a norma, atendendo ao que está prescrito na norma ASTM 564-06 (2012).

As forças laterais horizontais de carregamento monotônico e cíclico foram impostas conforme o previsto no programa de ensaio, sem que ocorresse qualquer deslocamento fora do plano do painel (do tipo flambagem lateral, por exemplo).

Com a configuração de testes foi possível determinar a rigidez ao cisalhamento interno (G) do painel, além da Força Máxima, a Força Elástica e a Força de Escoamento através dos estudos de carregamento lateral, conforme apresentados e discutidos na publicação “Determinação da rigidez de painéis de parede do sistema Light Steel Framing” desses mesmos autores.

A partir dos ensaios com carregamentos monotônicos e carregamentos cíclicos, fica evidente o ganho do desempenho estrutural positivo da placa OSB utilizada no painel e, com isso, pode-se concluir que os painéis revestidos com placas OSB obtiveram, aproximadamente, 400% de carga máxima e 135% de rigidez em relação ao painel contraventado com treliças verticais, que por sua vez, apresentou comportamento flexível alta capacidade de deformação.

Percebe-se que a presença dos fechamentos em placa OSB é decisiva no cálculo estrutural como um todo. A conexão (através dos parafusos) entre placa OSB e perfis de aço foi um fator limitante para a resistência horizontal do painel, principalmente nas conexões de borda das placas.

Faz-se necessário mais estudos baseados em metodologias similares para averiguação e criação de parâmetros consistentes para valorizar o uso de placas OSB com função, além de revestimento, também estrutural.

## Referências

- 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. 24 p.
- AISI S213-07, **North American Standard for Cold-Formed Steel Framing-Lateral Design**, 2007 Edition.
- ASTM A370, A370-06, **Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products**, American Society for Testing and Materials, 2006.
- ASTM E2126, **Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings**, 2019.
- AKTEPE, Rafet; AKDUMAN, Şaban; ERKAL , Burcu Güldür. **Experimental investigation on lateral behavior of novel hybrid cold-formed steel walls with composite sheathing**. Journal of Constructional Steel Research , vol.202, 2023
- BALDASSINO, N; ACCORTI, M; SCAVAZZA, F; ROGERS, C.A. **Lateral loading response of CFS framed shear wall with cement board panels**. 2014.
- CONSULSTEEL. **Manual de Procedimiento: Construcción con Steel Framing**. Buenos Aires: ConsulSteel, 303p, 2002.
- 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. Escola de Engenharia UFMG. 2018.
- ECCS, **Recommended Testing Procedure for Assessing the Behaviour of Structural Steel Elements under Cyclic Loads**. 1986, n 45, First Edition.
- ESTRUTURA STEEL FRAME – TIPOS E DIFERENÇAS. **Light Steel Frame**. Disponível em: <http://lightsteelframe.eng.br/estrutura-steel-frame-tipos-e-diferencas/>. Acesso em: 10 de outubro de 2018.
- HENRIQUES, J; ROSA, N; GERVASIO, H; SANTOS, P; SILVA, L.S. **Structural performance of light steel framing panels using screw connections subjected to lateral loading**, Thin-Walled Structures, 121, 67–88, 2017.
- LIN, Shin-Hua; PAN, Chi-Ling; HSU, Wei-Ting. **Monotonic and cyclic loading tests for cold-formed steel wall frames sheathed with calcium silicate board**. Thin-Walled Structures, v. 74, p. 49-58, 2014.

LIU, Bin; HAO, Ji-Ping; ZHONG, Wei-Hui; WANG, Hao. **Performance of cold-formed-steel-framed shear walls sprayed with lightweight mortar under reversed cyclic loading**. *Thin-Walled Structures*, v. 98, p. 312-331, 2016.

LOPES, Dalila M; DUARTE, António P. C.; SILVESTRE, Nuno. **Experimental Investigation of Light Steel Framing Walls under Horizontal Loading**. *Buildings*. 13. 193. 10.3390/buildings13010193, 2023.

MARZALEH, Abdollah Sadeghi; NERBANO, Stella; GROCE, Andrea Sebastiani; STEIGER, René. **OSB sheathed light-frame timber shear walls with strong anchorage subjected to vertical load, bending moment, and monotonic lateral load**. *Engineering Structures*, v. 173, p. 787-799, 2018.

NIARI, S. E.; RAFEZY, B.; ABEDI, K. B. Rafezy, K. Abedi. **Seismic behavior of steel-sheathed cold-formed steel shear wall: Experimental investigation and numerical modeling**. *Thin Wall Struct.* 96 337–347, 2015

REZENDE, Janaína. **Estudo Experimental da Ligação de Placas de Compensado Estrutural com Perfis do Sistema Construtivo Light Steel Framing**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia UFMG. 2019.

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, 224p. 2016.

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

WANG, Jingfeng; WANG, Wanqian; XIAO, Yaming; YU, Bo. **Cyclic test and numerical analytical assessment of cold-formed thin-walled steel shear walls using tube truss**. *Thin-Walled Structures*. 134. 442-459. 10.1016/j.tws.2018.09.038., 2019

WU, Hanheng; CHAO, Sisi; ZHOU, Tianhua; LIU, Ziangbin. **Cold-formed steel framing walls with infilled lightweight FGD gypsum Part I: Cyclic loading tests**. *Thin-Walled Structures*. 132. 10.1016/j.tws.2018.04.003, 2018

## Apêndice A – Gráficos dos ensaios monotônicos

Os gráficos de sincronização entre atuador e transdutores versus tempo e os gráficos de força do atuador versus deslocamento dos transdutores de todos os modelos ensaiados nos ensaios de carregamento monotônico estão contidos neste apêndice. Tais gráficos foram utilizados para os cálculos dos parâmetros discutidos neste trabalho.

### 1 Gráficos do ensaio MIM

O ensaio monotônico em modelo light steel frame com placa osb  $e=9,5\text{mm}$ , distância entre montantes de 400 mm foi realizado dia 8 de novembro de 2019.



Figura 1 Posicionamento do transdutor 1 em relação ao painel de ensaio.



Figura 2 Posicionamento do transdutor 2 em relação ao painel de ensaio.



Figura 3 Posicionamento do transdutor 3 em relação ao painel de ensaio.



Figura 4 Posicionamento do transdutor 4 em relação ao painel de ensaio.



Figura 5 Posicionamento do transdutor 5 em relação ao painel de ensaio.



Figura 6 Posicionamento do transdutor diagonal em relação ao painel de ensaio.

### 1.1 Transdutor 1

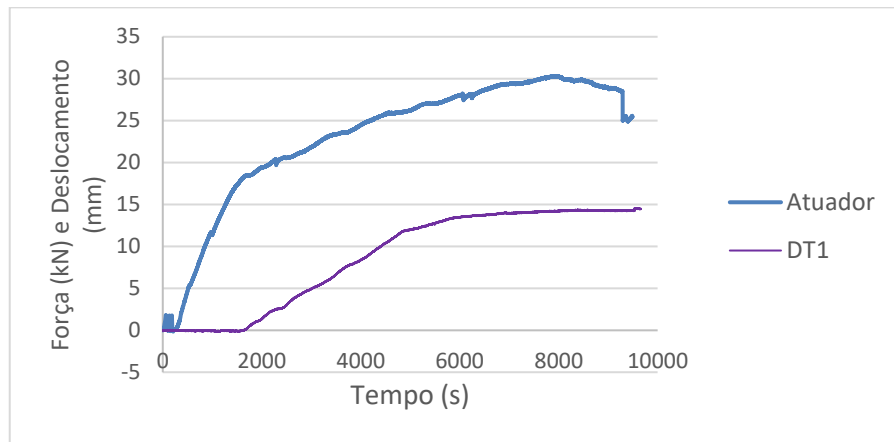


Figura 7 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 1 do modelo M1M

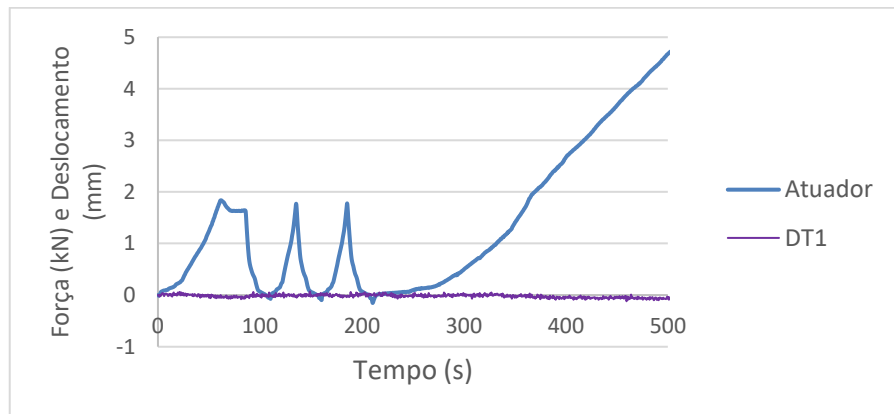


Figura 8 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 1 do modelo M1M

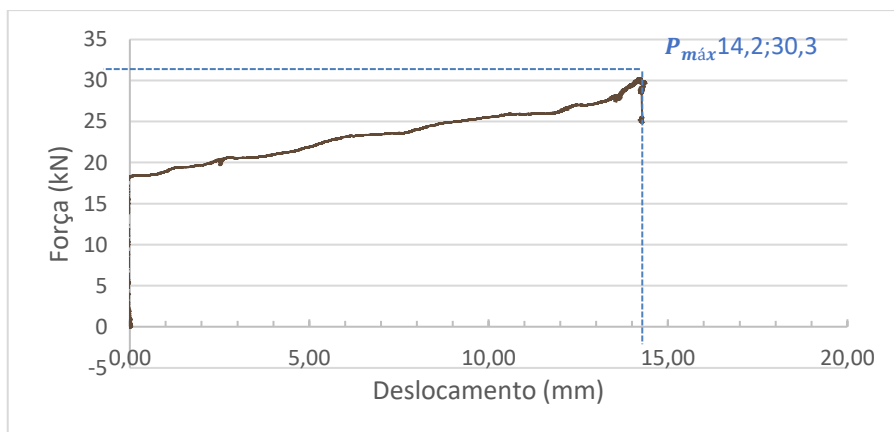


Figura 9 Gráfico de Força (kN) versus Deslocamento (mm) e indicação do ponto de carga máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor 1 do modelo M1M

## 1.2 Transdutor 2

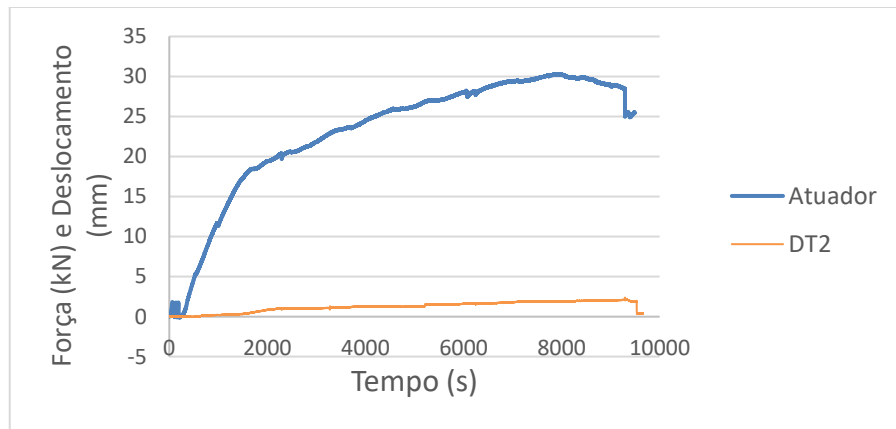


Figura 10 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 2 do modelo M1M

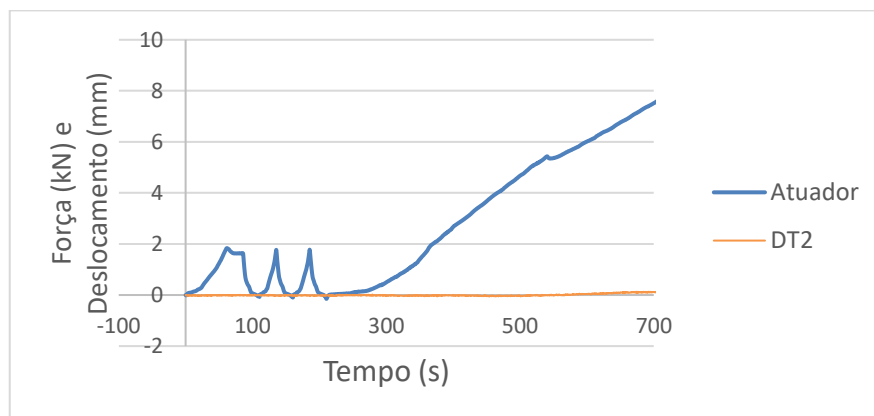


Figura 11 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 2 do modelo M1M

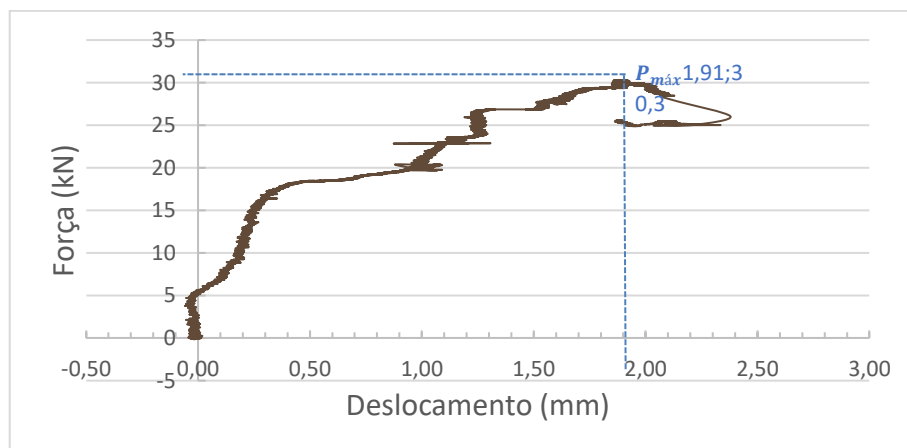


Figura 12 Gráfico de Força (kN) versus Deslocamento (mm) e indicação do ponto de carga máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor 2 do modelo M1M

## 1.3 Transdutor 3

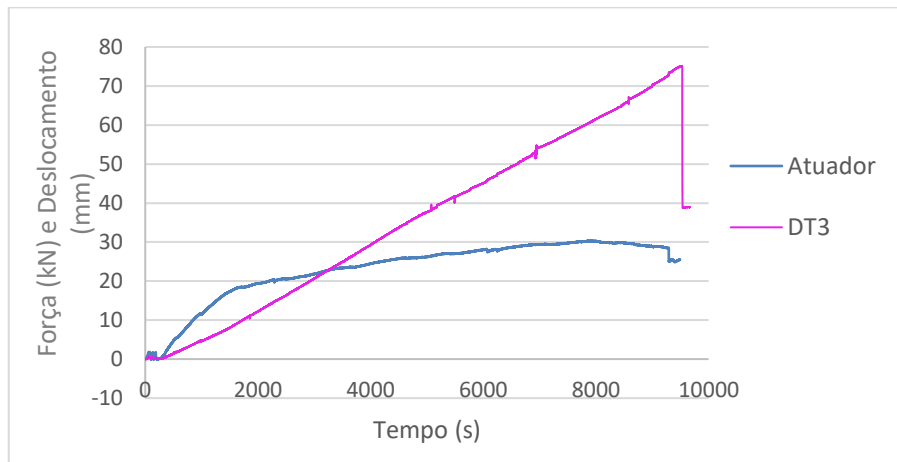


Figura 13 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 3 do modelo M1M

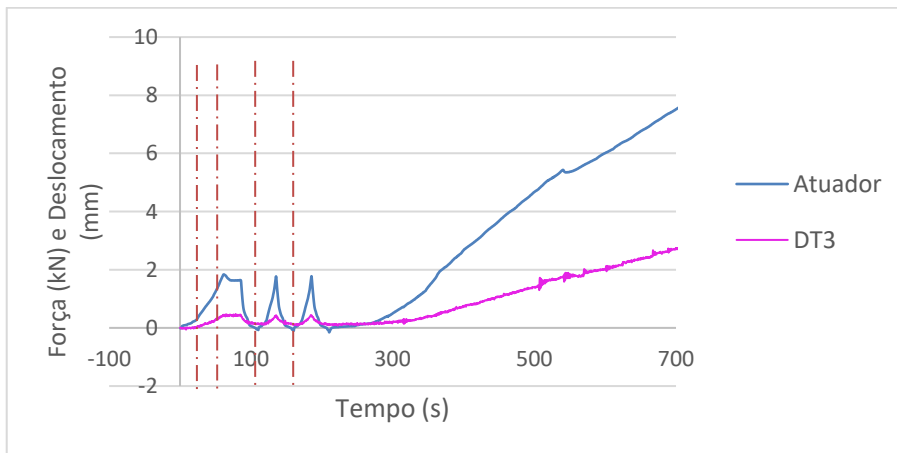


Figura 14 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 3 do modelo M1M

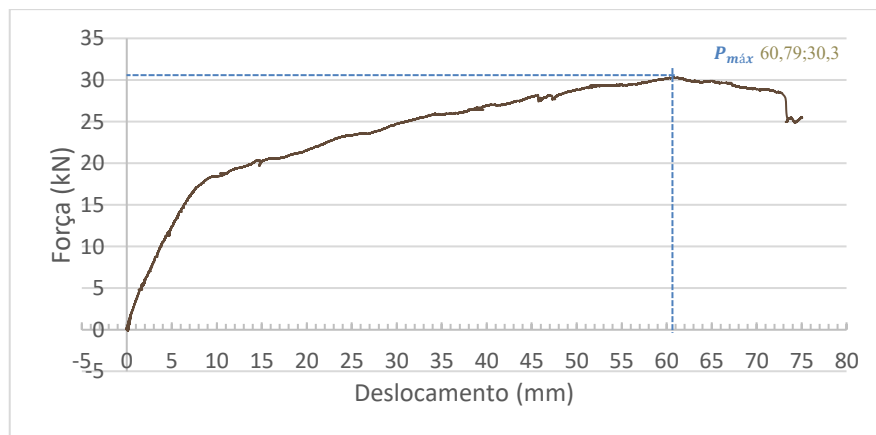


Figura 15 Gráfico de Força (kN) versus Deslocamento (mm) e indicação do ponto de carga máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor 3 do modelo M1M

## 1.4 Transdutor 4

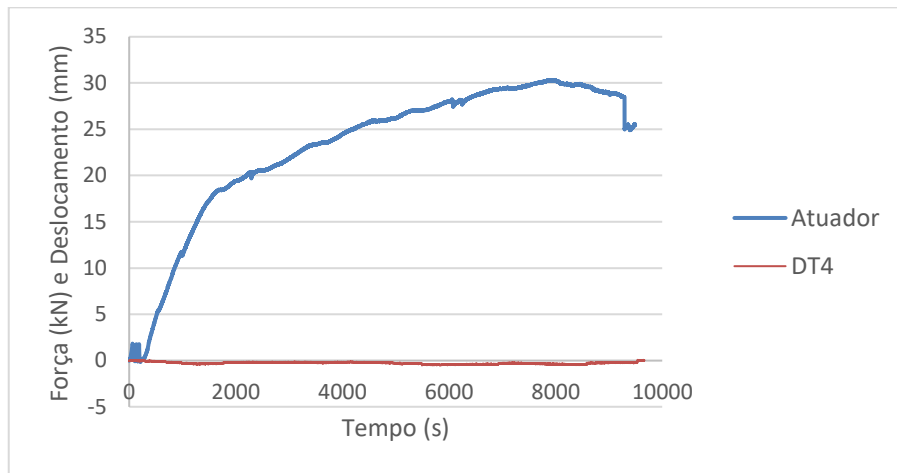


Figura 16 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 4 do modelo M1M

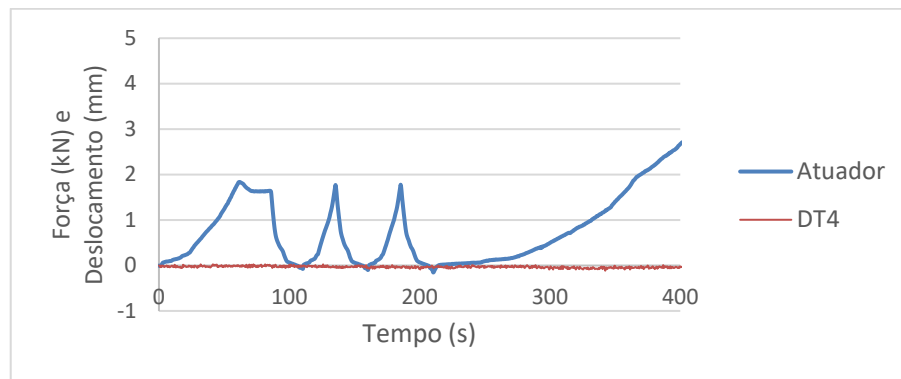


Figura 17 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 4 do modelo M1M

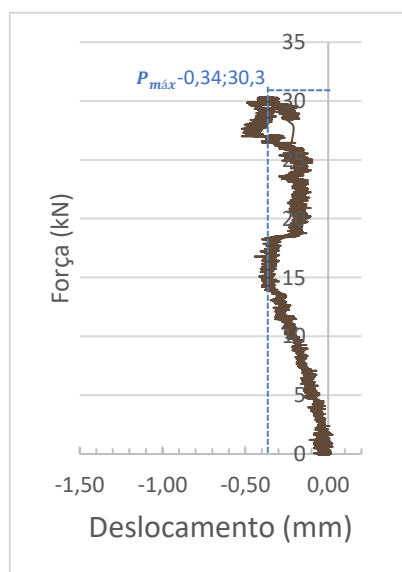


Figura 18 Gráfico de Força (kN) versus Deslocamento (mm) e indicação do ponto de carga máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor 4 do modelo M1M

## 1.5 Transdutor 5

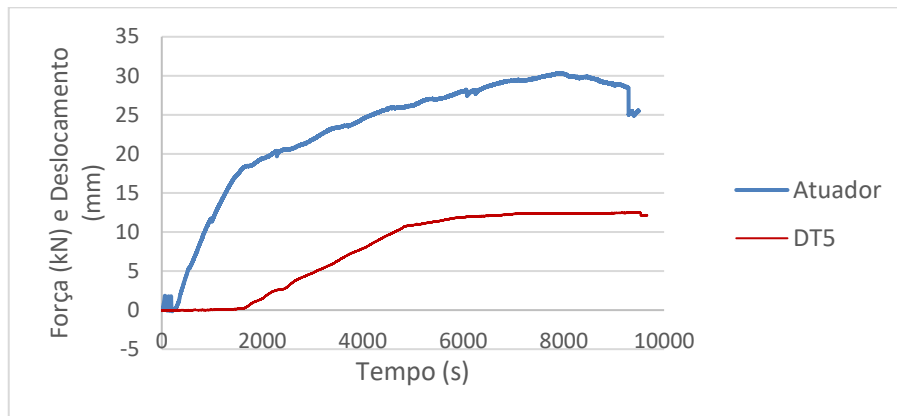


Figura 19 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 5 do modelo M1M

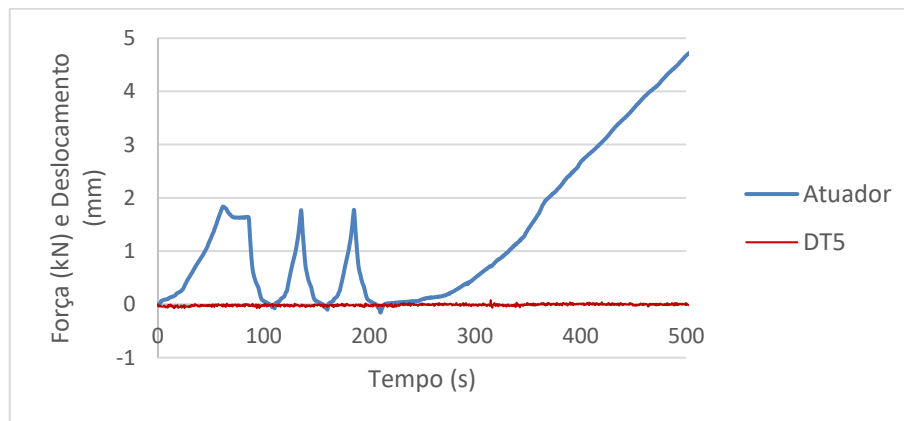


Figura 20 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 5 do modelo M1M

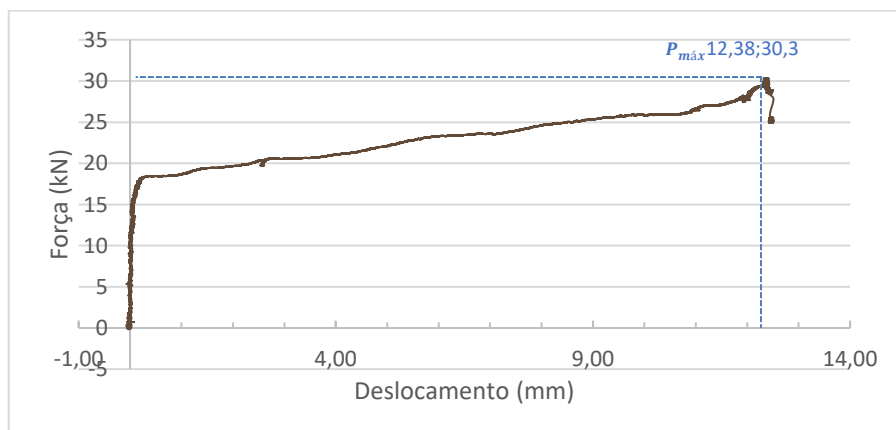


Figura 21 Gráfico de Força (kN) versus Deslocamento (mm) e indicação do ponto de carga máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor 5 do modelo M1M

## 1.6 Transdutor Diagonal

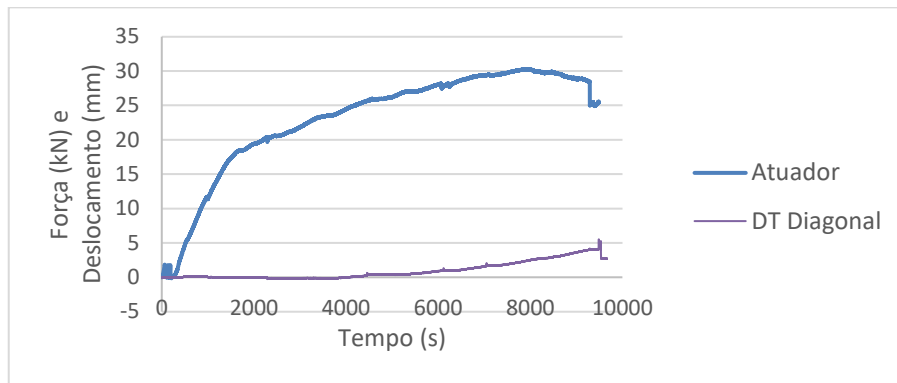


Figura 22 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor diagonal do modelo M1M

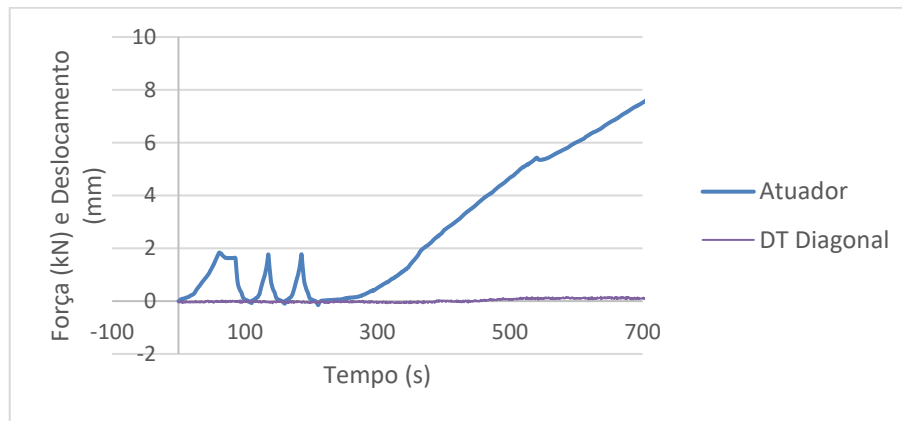


Figura 23 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor diagonal do modelo M1M

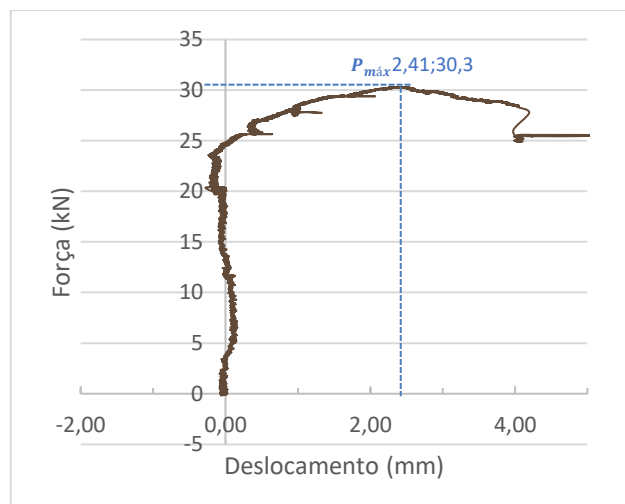


Figura 24 Gráfico de Força (kN) versus Deslocamento (mm) e indicação do ponto de carga máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor diagonal do modelo M1M

## 2 Gráficos do ensaio M4M

O ensaio monotônico em modelo light steel frame com treliça, distância entre montantes de 400 mm foi realizado dia 20 de dezembro de 2019.

### 1.7 Transdutor 1

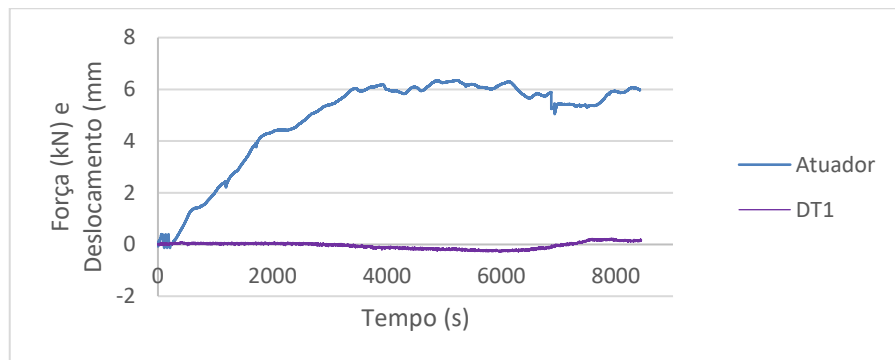


Figura 25 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 1 do modelo M4M

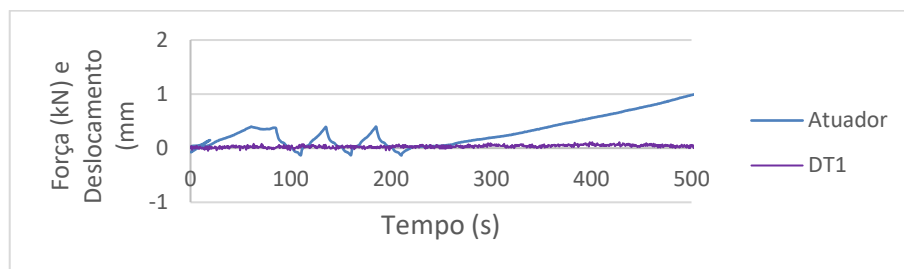


Figura 26 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 1 do modelo M4M

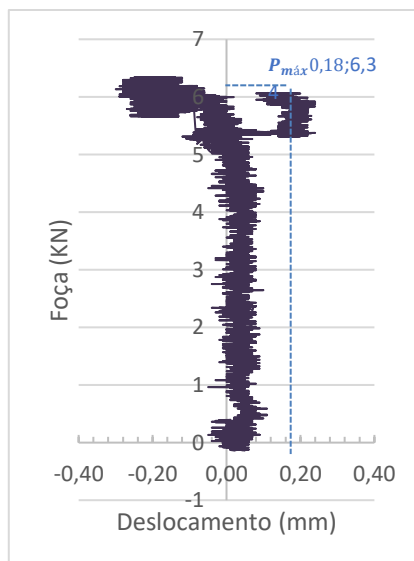


Figura 27 Gráfico de Força (kN) versus Deslocamento (mm) e indicação do ponto de carga máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor 1 do modelo M4M

## 1.8 DT2

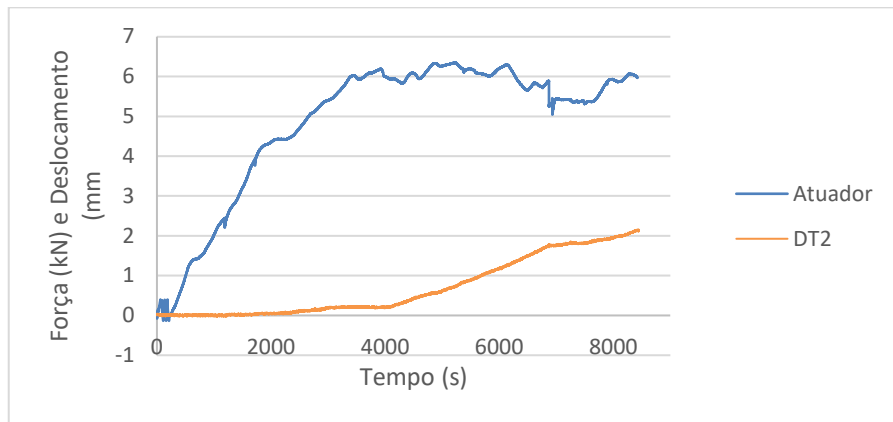


Figura 28 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 2 do modelo M4M

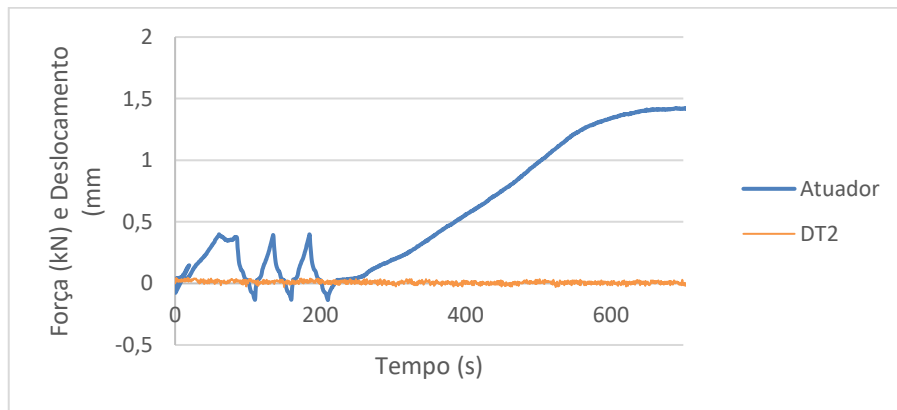


Figura 29 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 2 do modelo M4M

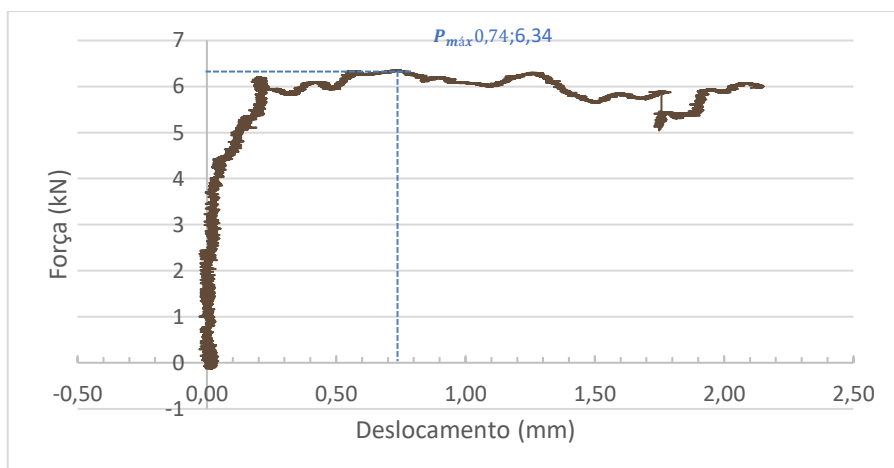


Figura 30 Gráfico de Força (kN) versus Deslocamento (mm) e indicação do ponto de carga máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor 2 do modelo M4M

1.9 DT3

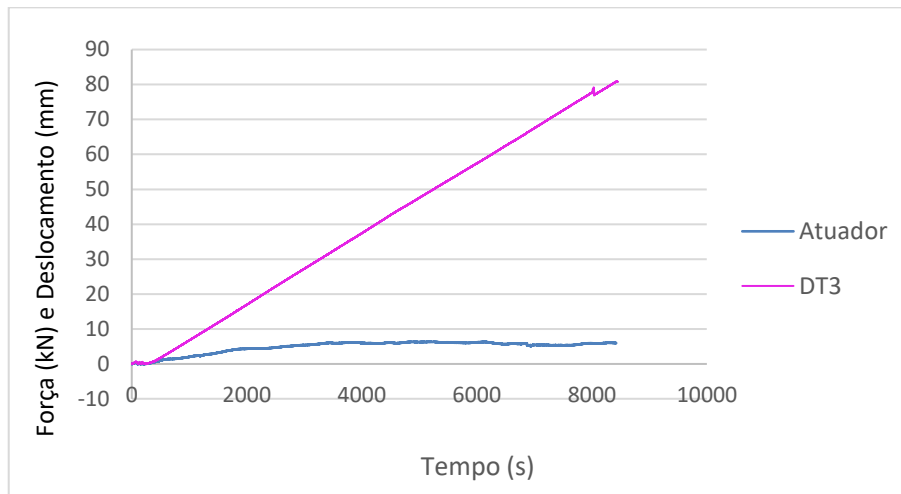


Figura 31 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 3 do modelo M1M

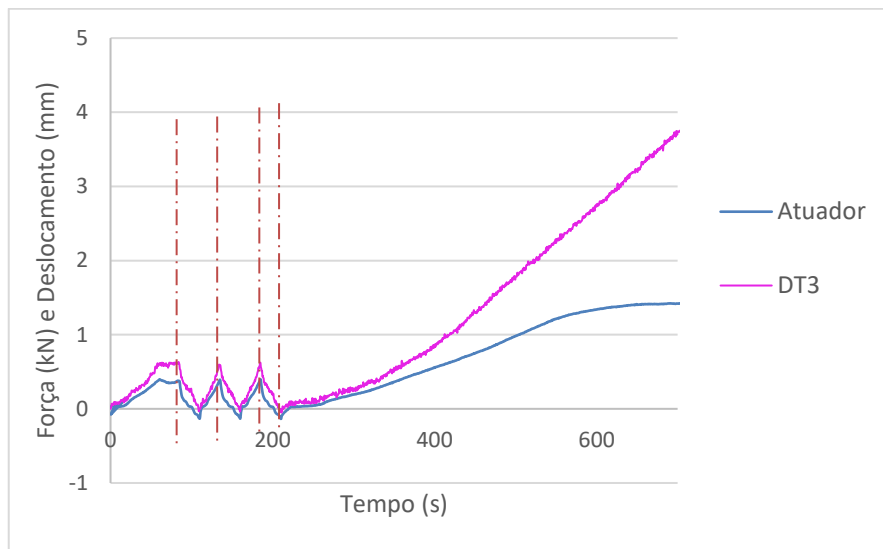


Figura 32 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 3 do modelo M4M

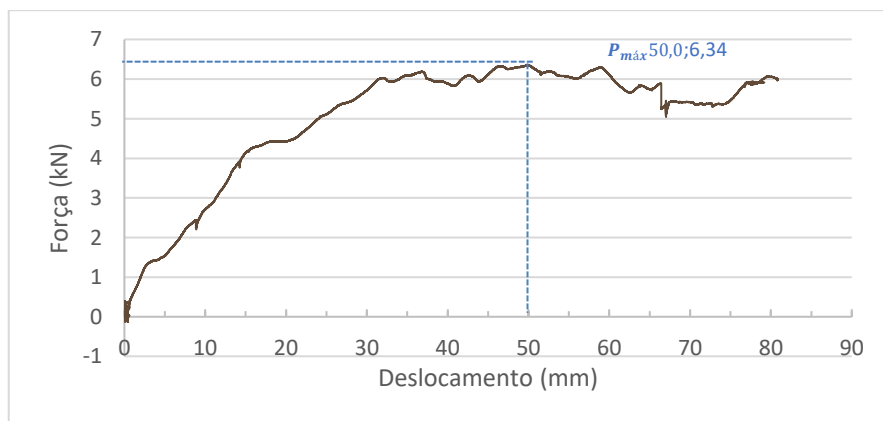


Figura 33 Gráfico de Força (kN) versus Deslocamento (mm) e indicação do ponto de carga máxima (Pmáx) do transdutor 3 do modelo M1M

## 1.10 DT4

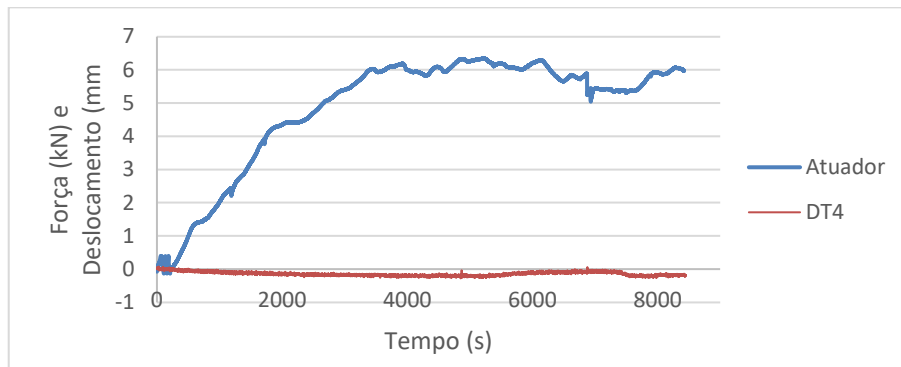


Figura 34 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 4 do modelo M1M

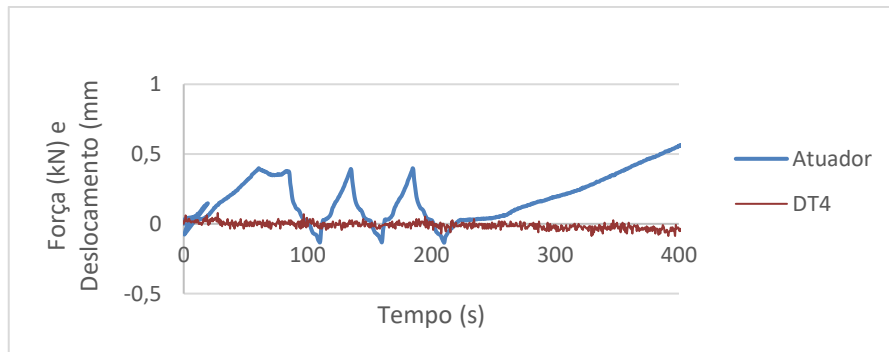


Figura 35 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 4 do modelo M1M

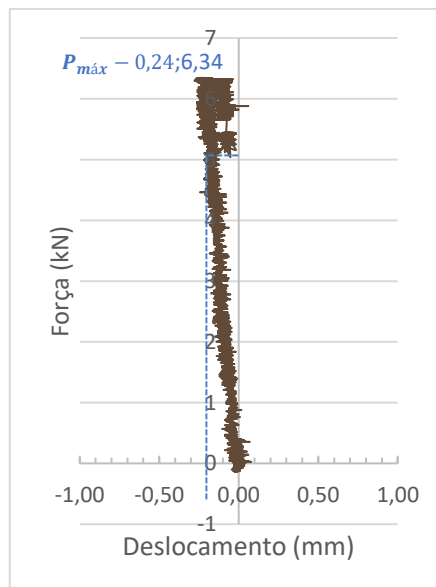


Figura 36 Gráfico de Força (kN) versus Deslocamento (mm) e indicação do ponto de carga máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor 4 do modelo M1M

## 1.11 DT5

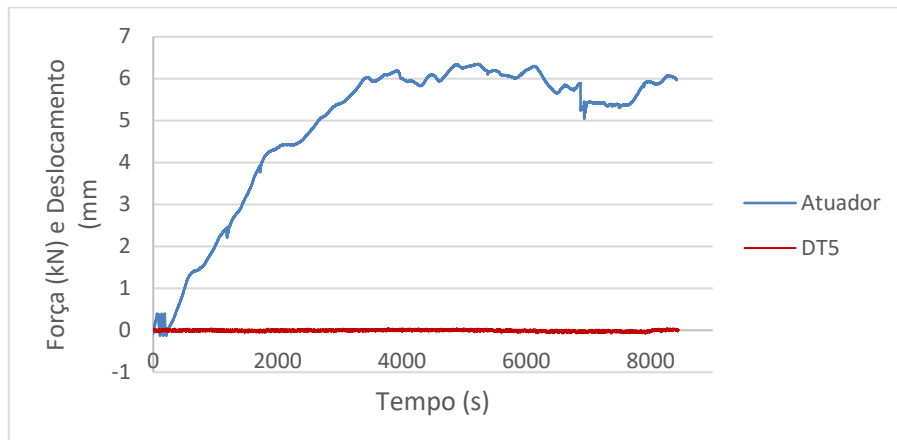


Figura 37 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 5 do modelo M1M

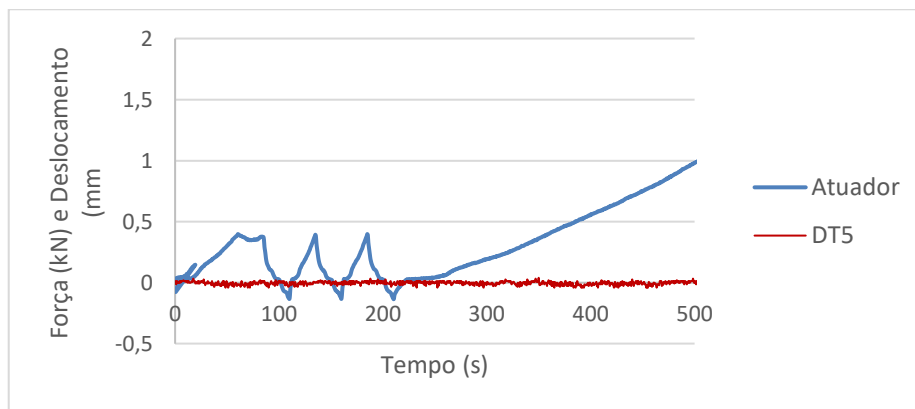


Figura 38 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 5 do modelo M1M

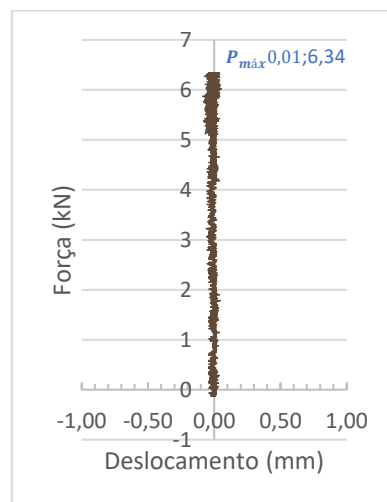


Figura 39 Gráfico de Força (kN) versus Deslocamento (mm) e indicação do ponto de carga máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor 5 do modelo M1M

## 1.12 DT DIAGONAL

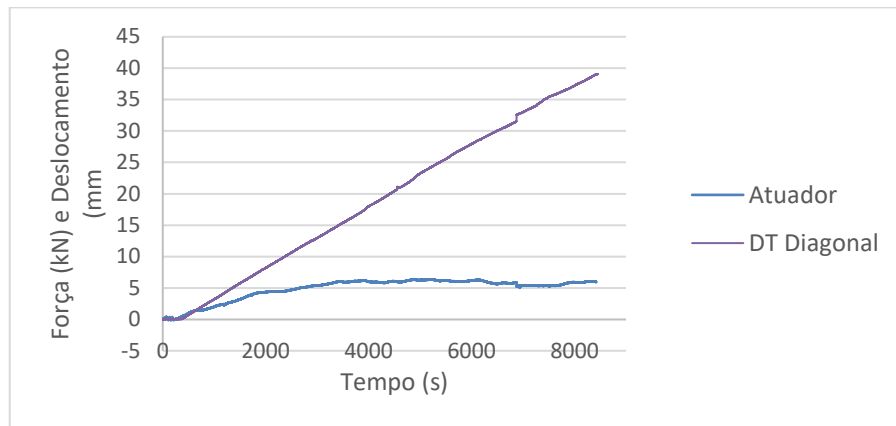


Figura 40 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor diagonal do modelo M1M

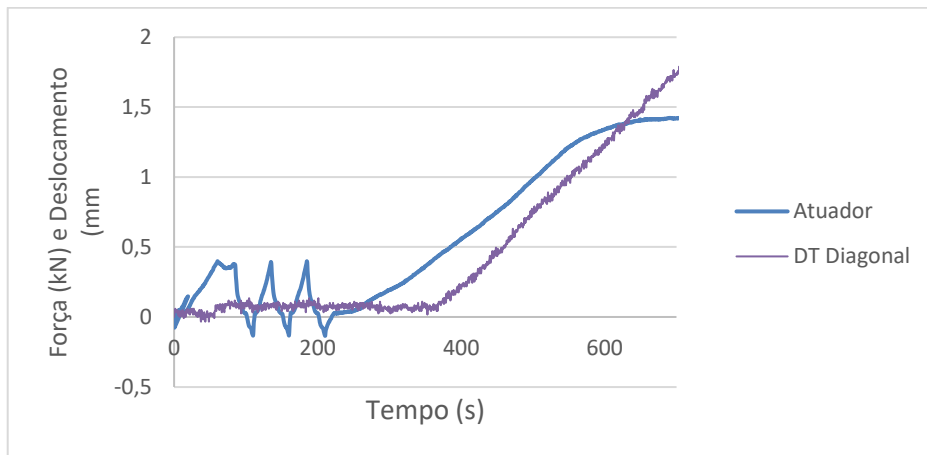


Figura 41 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor diagonal do modelo M1M

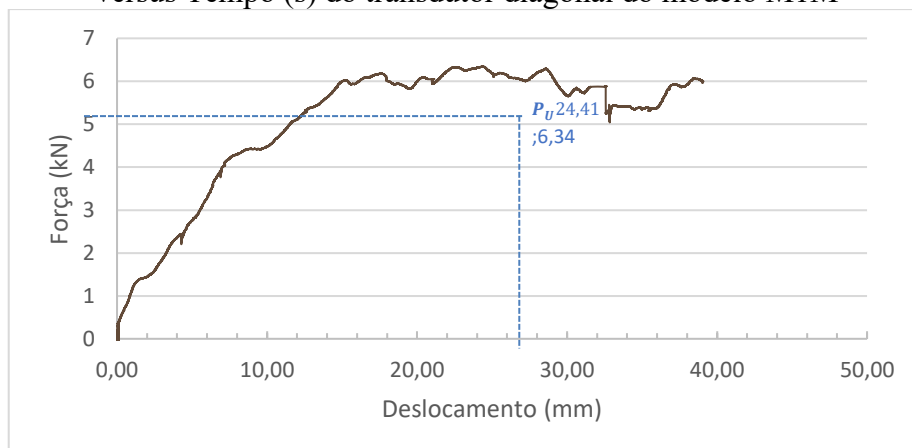


Figura 42 Gráfico de Força (kN) versus Deslocamento (mm) e indicação do ponto de carga máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor diagonal do modelo M1M

## Apêndice B – Gráficos dos ensaios cíclicos

Os gráficos de sincronização entre atuador e transdutores versus tempo e os gráficos de força do atuador versus deslocamento dos transdutores de todos os modelos ensaiados nos ensaios de carregamento cíclico estão contidos neste apêndice. Tais gráficos foram utilizados para os cálculos dos parâmetros discutidos neste trabalho.

### 1 Gráficos do ensaio M2C

O ensaio cíclico em modelo light steel frame com placa osb  $e=9,5\text{mm}$ , distância entre montantes de 400 mm foi realizado dia 25 de novembro de 2019.



Figura 1 Posicionamento do transdutor 1 em relação ao painel de ensaio.



Figura 2 Posicionamento do transdutor 2 em relação ao painel de ensaio.



Figura 3 Posicionamento do transdutor 3 em relação ao painel de ensaio.



Figura 4 Posicionamento do transdutor 4 em relação ao painel de ensaio.



Figura 5 Posicionamento do transdutor 5 em relação ao painel de ensaio.



Figura 6 Posicionamento do transdutor diagonal em relação ao painel de ensaio.

## 1.1 Transdutor 1

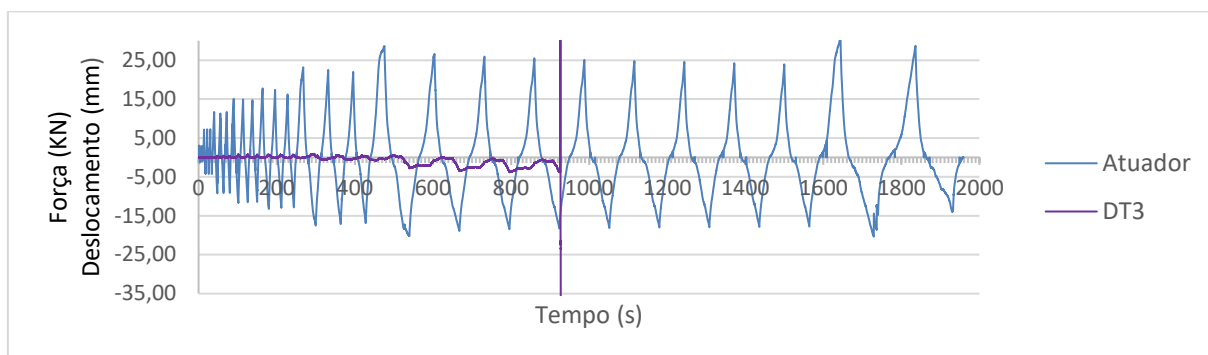


Figura 7 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 1 do modelo M2C

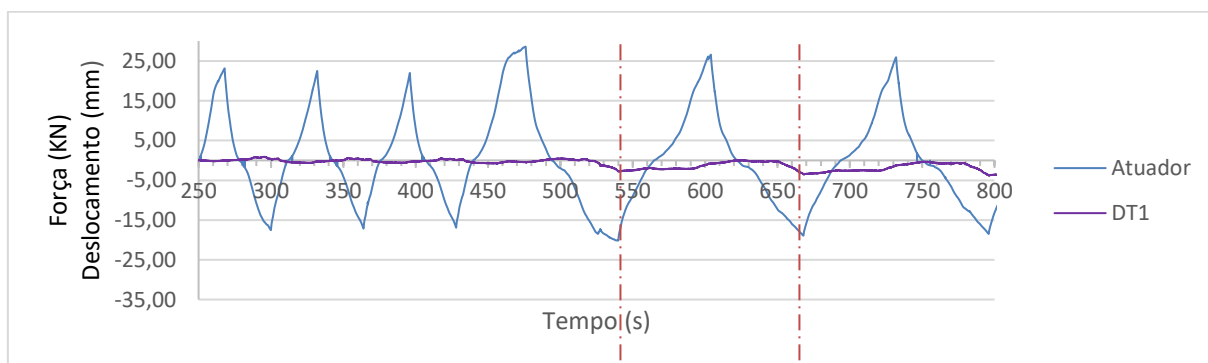


Figura 8 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 1 do modelo M2C

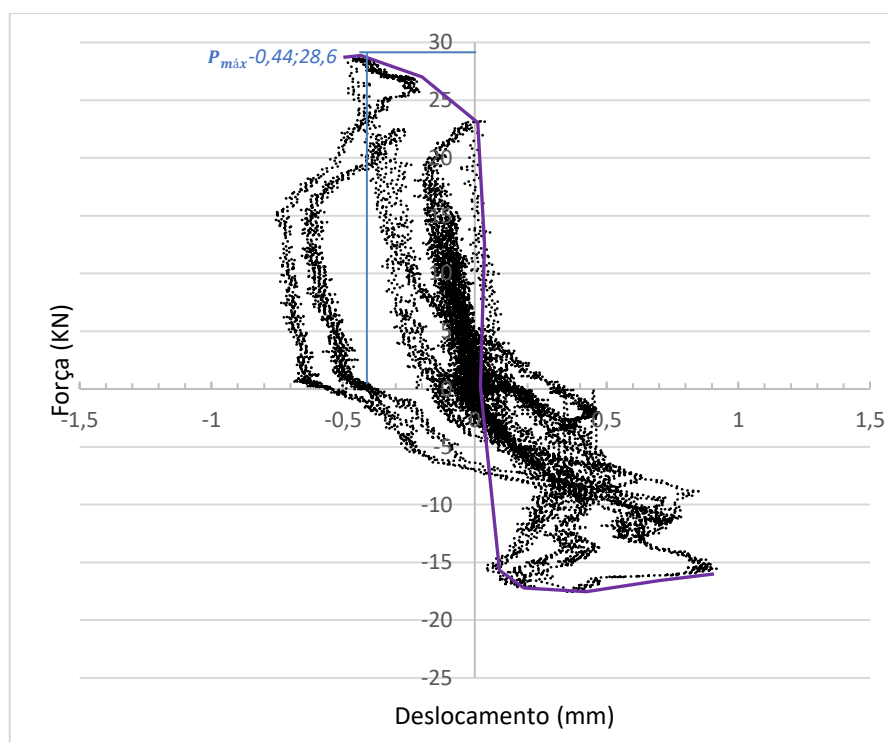


Figura 9 Curva Envelope da Força Horizontal (kN) do atuador versus o deslocamento (mm) e indicação do ponto de força máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor 1 do modelo M2C.

## 1.2 Transdutor 2

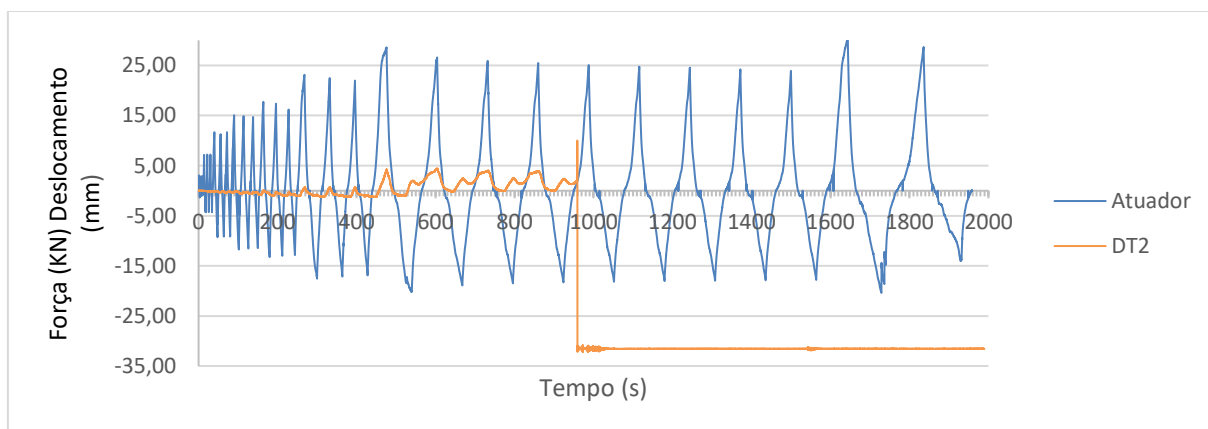


Figura 10 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 2 do modelo M2C

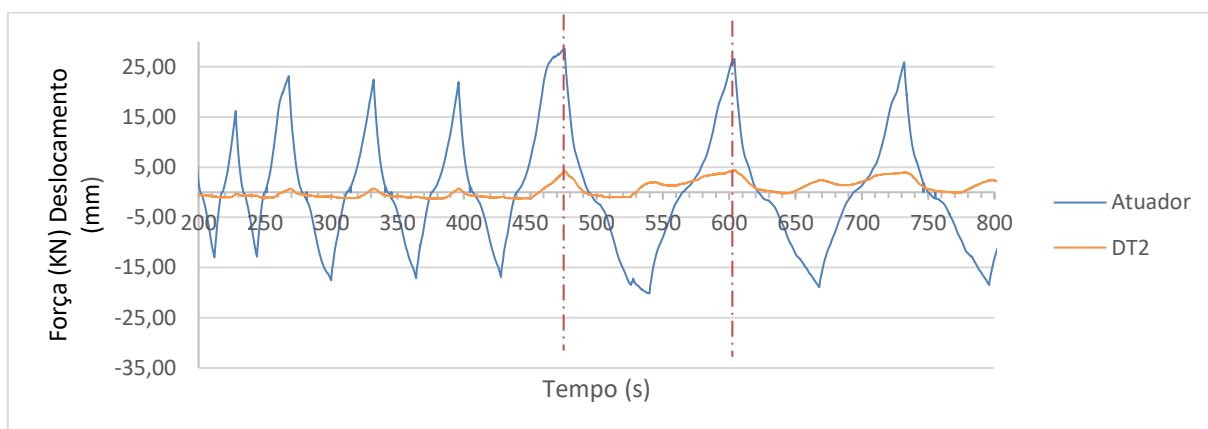


Figura 11 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 2 do modelo M2C

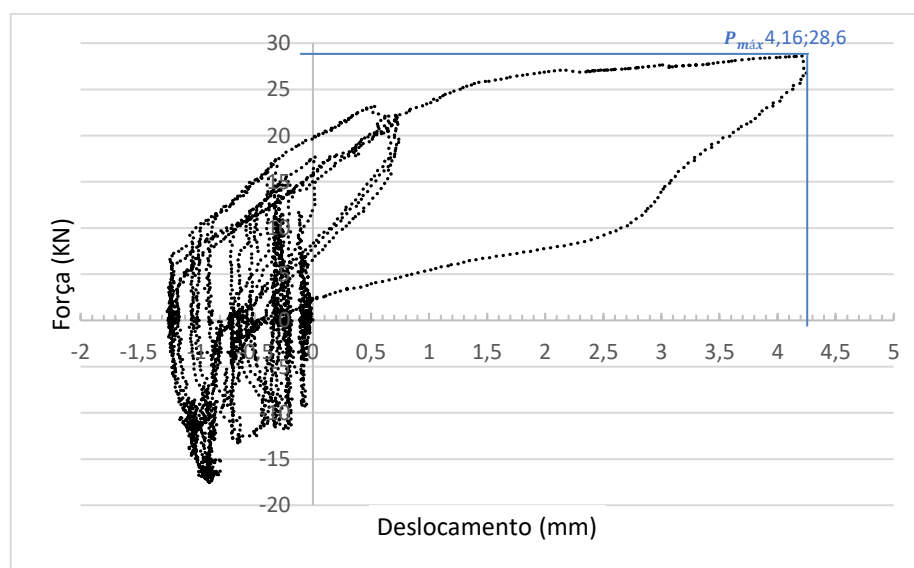


Figura 12 Curva Envelope da Força Horizontal (kN) do atuador versus o deslocamento (mm) e indicação do ponto de força máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor 2 do modelo M2C.

## 1.3 Transdutor 3

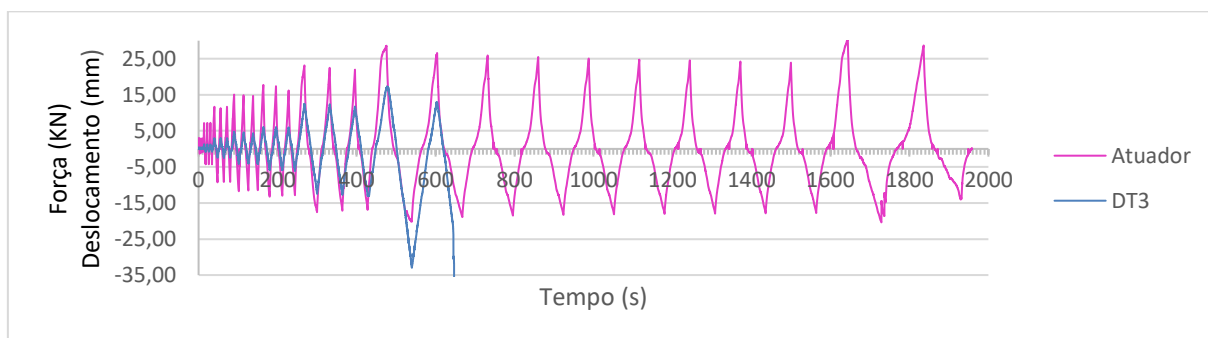


Figura 13 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 3 do modelo M2C

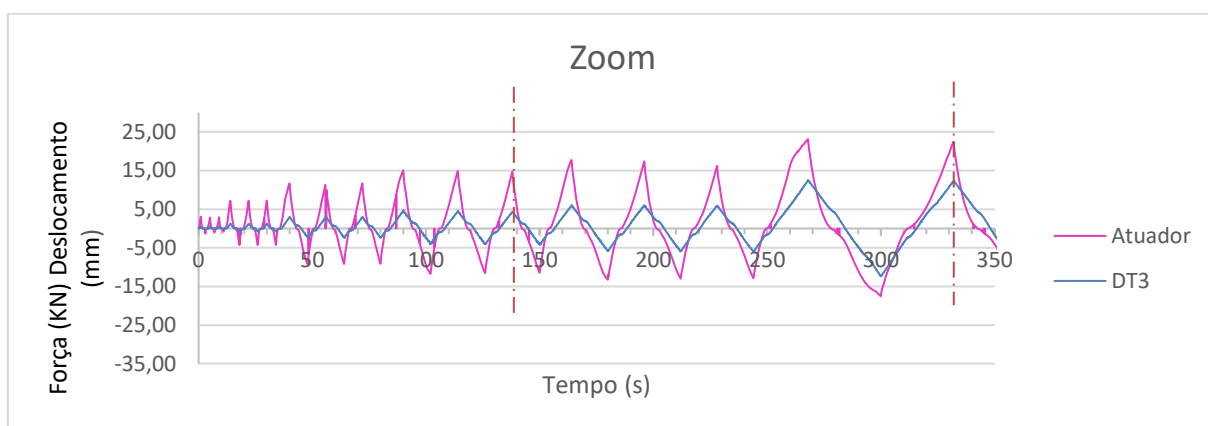


Figura 14 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 3 do modelo M2C

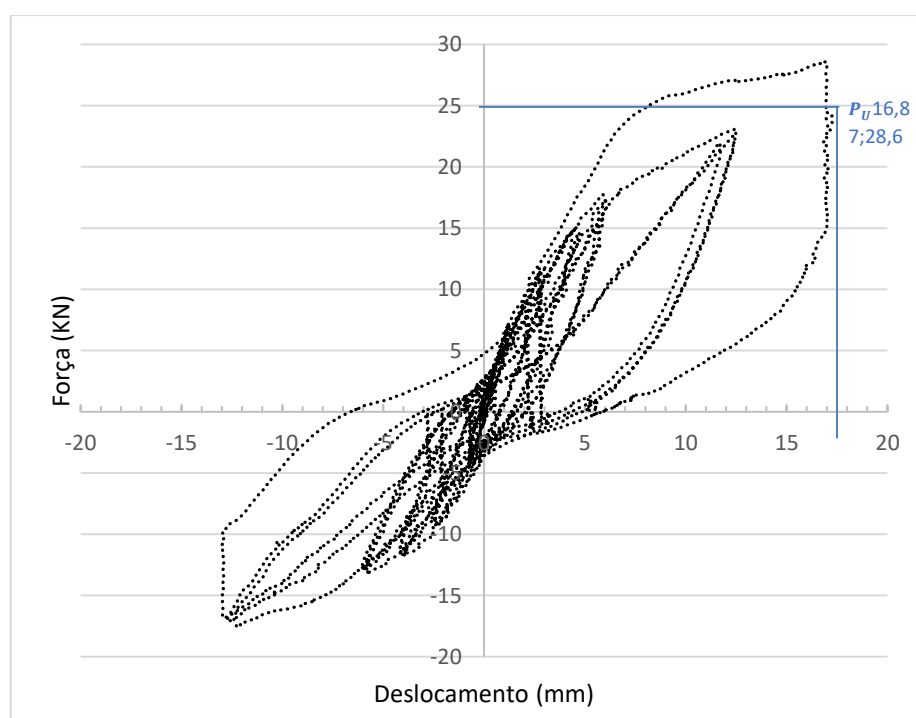


Figura 15 Curva Envelope da Força Horizontal (kN) do atuador versus o deslocamento (mm) e indicação do ponto de força máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor 3 do modelo M2C.

## 1.4 Transdutor 4

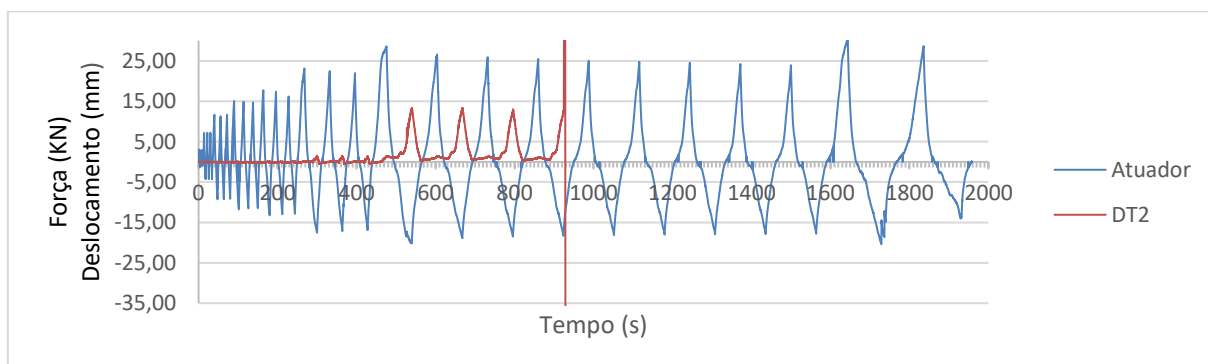


Figura 16 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 4 do modelo M2C

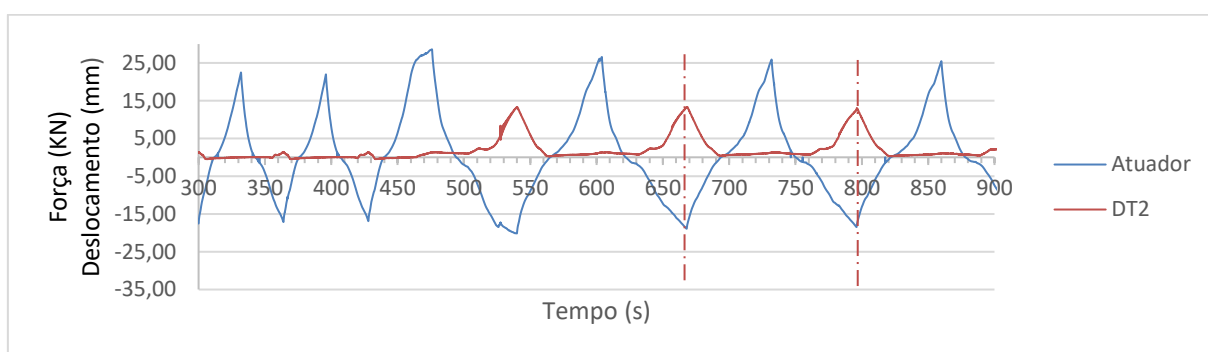


Figura 17 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 4 do modelo M2C

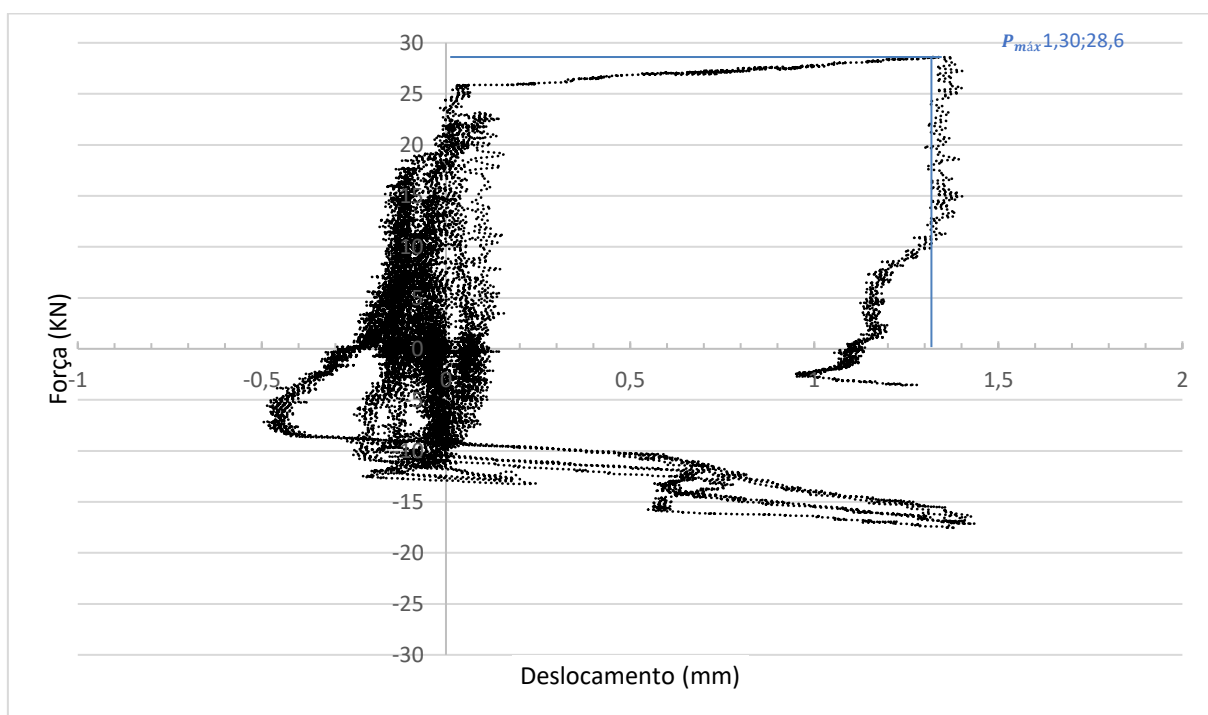


Figura 18 Curva Envelope da Força Horizontal (kN) do atuador versus o deslocamento (mm) e indicação do ponto de força máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor 4 do modelo M2C.

## 1.5 Transdutor 5

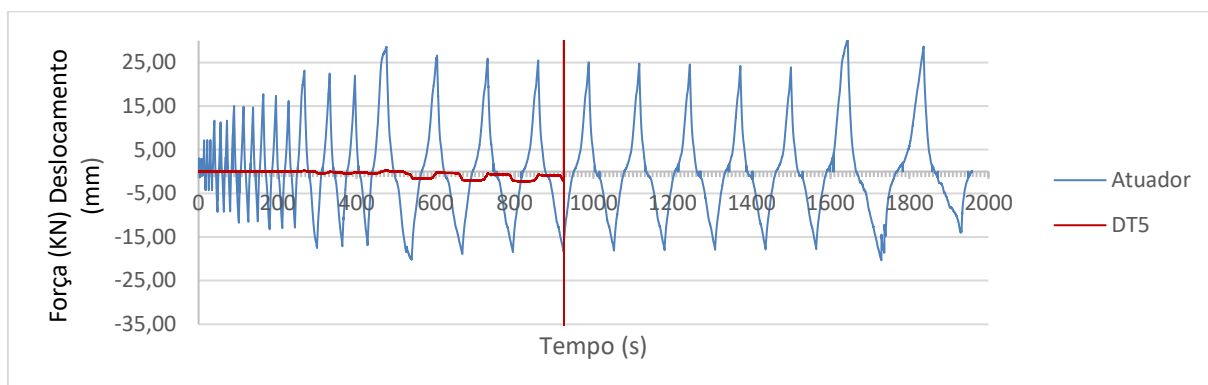


Figura 19 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 5 do modelo M2C

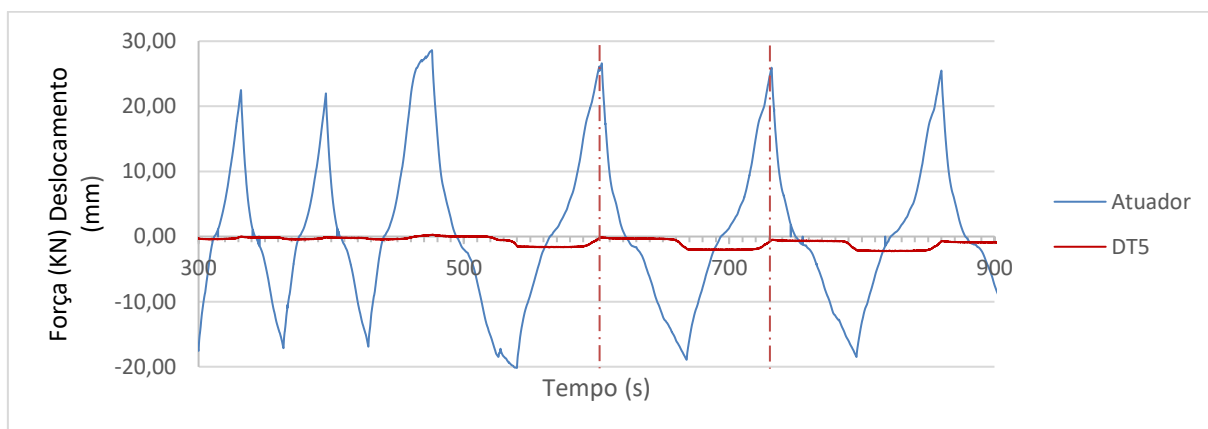


Figura 20 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 5 do modelo M2C

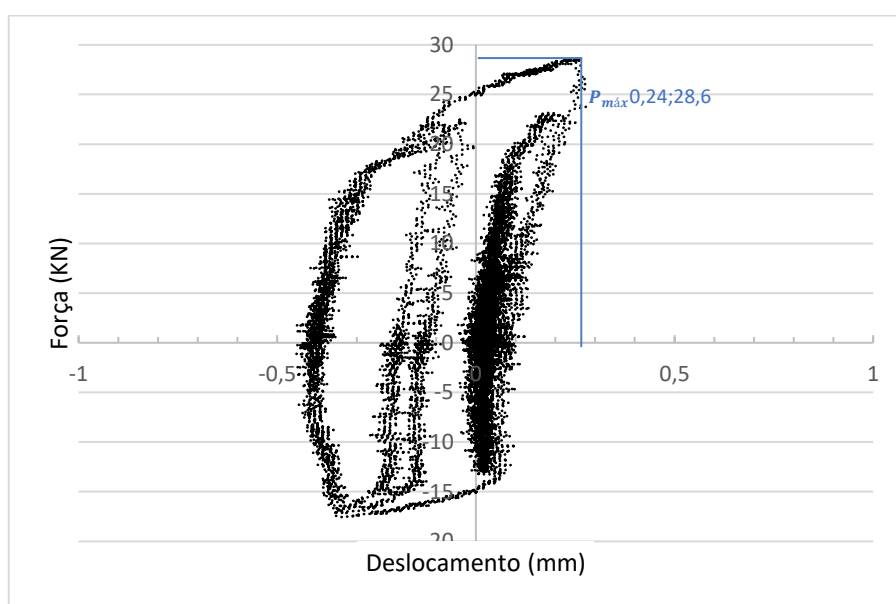


Figura 21 Curva Envelope da Força Horizontal (kN) do atuador versus o deslocamento (mm) e indicação do ponto de força máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor 5 do modelo M2C.

## 1.6 Transdutor Diagonal

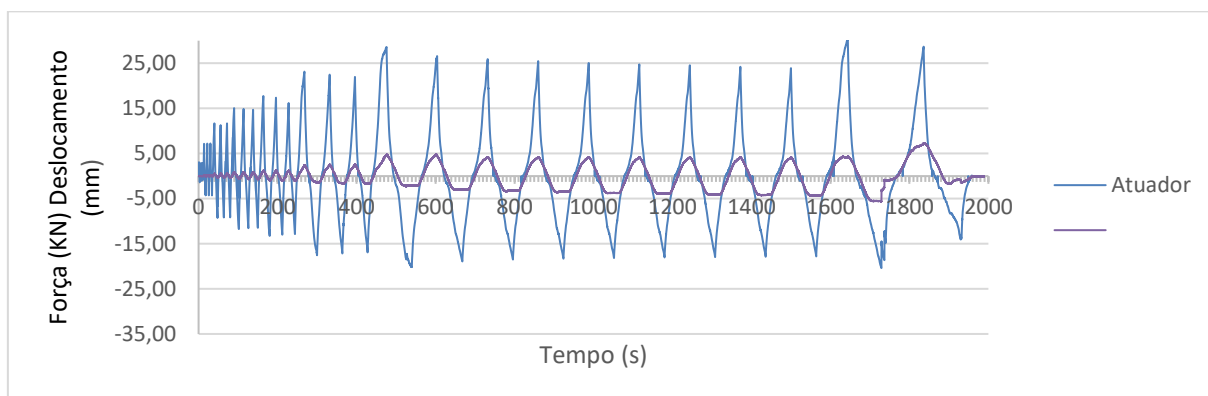


Figura 22 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor diagonal do modelo M2C

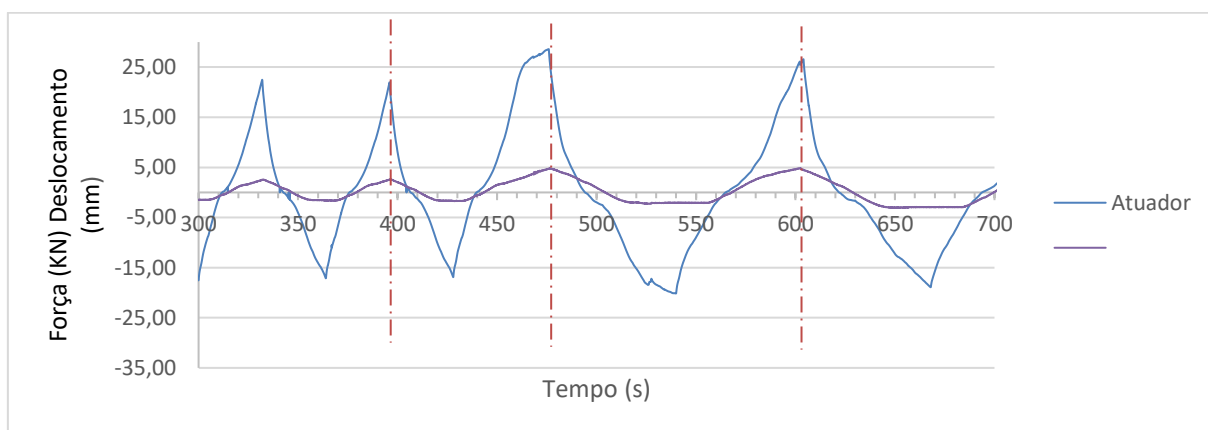


Figura 23 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor diagonal do modelo M2C

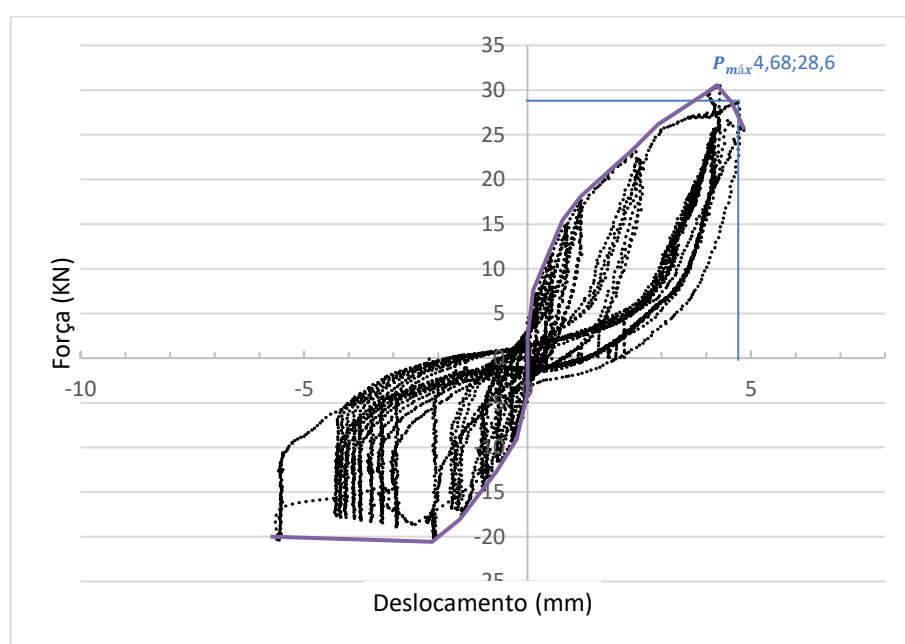


Figura 24 Curva Envelope da Força Horizontal (kN) do atuador versus o deslocamento (mm) e indicação do ponto de força máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor diagonal do modelo M2C.

## 2 Gráficos do ensaio M3C

O ensaio cíclico em modelo light steel frame com treliça, distância entre montantes de 400 mm foi realizado dia 03 de dezembro de 2019.

### 2.1 Transdutor 1

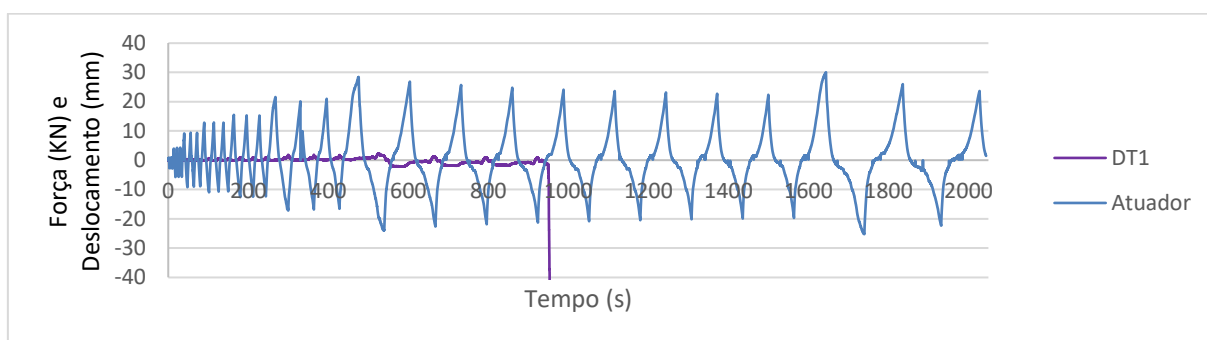


Figura 7 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 1 do modelo M3C

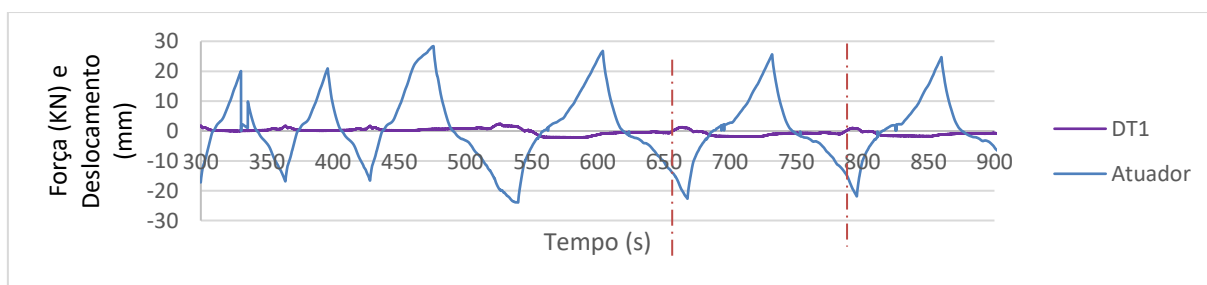


Figura 8 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 1 do modelo M3C

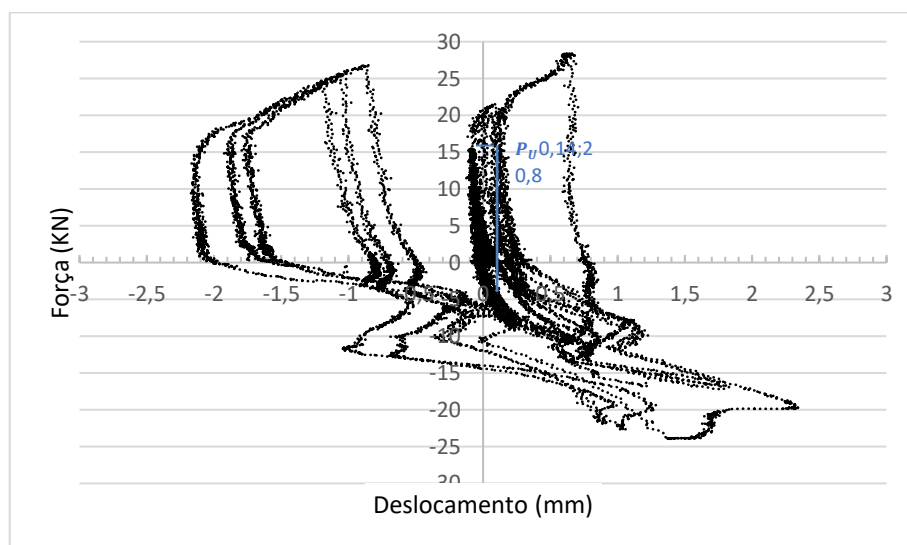


Figura 9 Curva Envelope da Força Horizontal (kN) do atuador versus o deslocamento (mm) e indicação do ponto de força máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor 1 do modelo M3C.

## 2.2 Transdutor 2

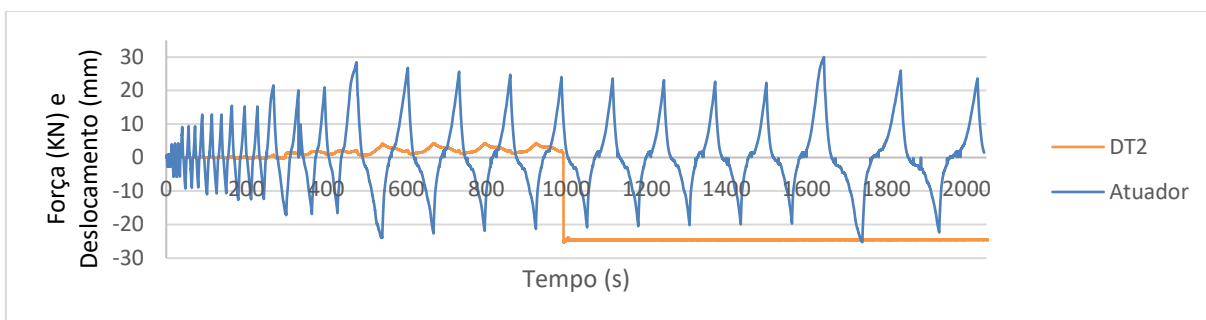


Figura 10 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 2 do modelo M3C

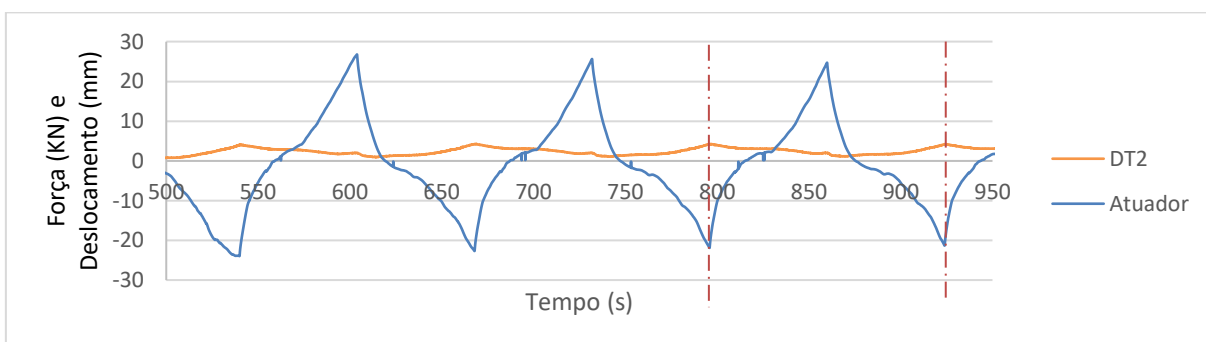


Figura 11 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 2 do modelo M3C

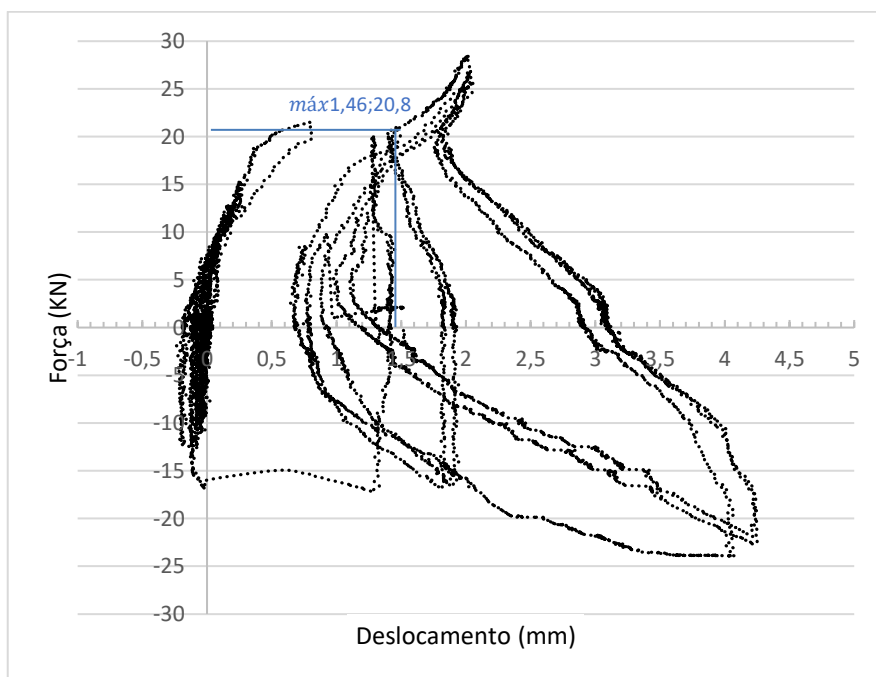


Figura 12 Curva Envelope da Força Horizontal (kN) do atuador versus o deslocamento (mm) e indicação do ponto de força máxima (Pmáx) do transdutor 2 do modelo M3C.

## 2.3 Transdutor 3

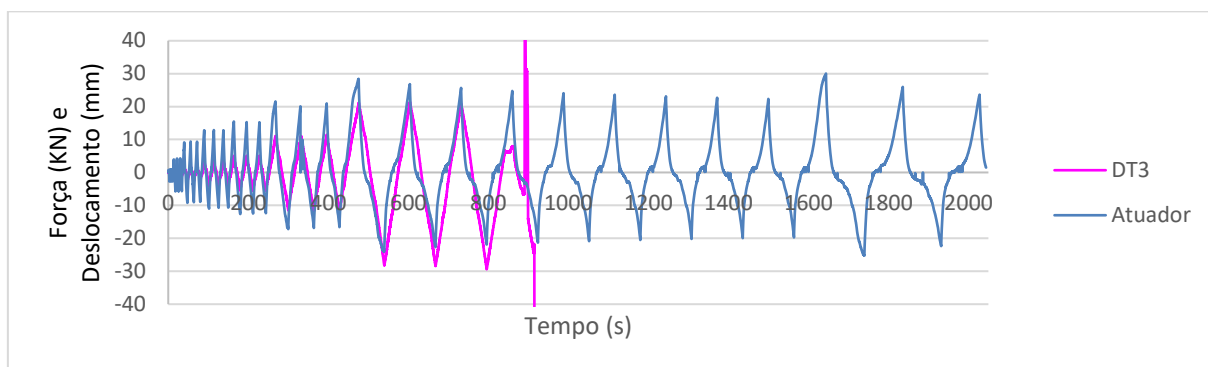


Figura 13 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 3 do modelo M3C

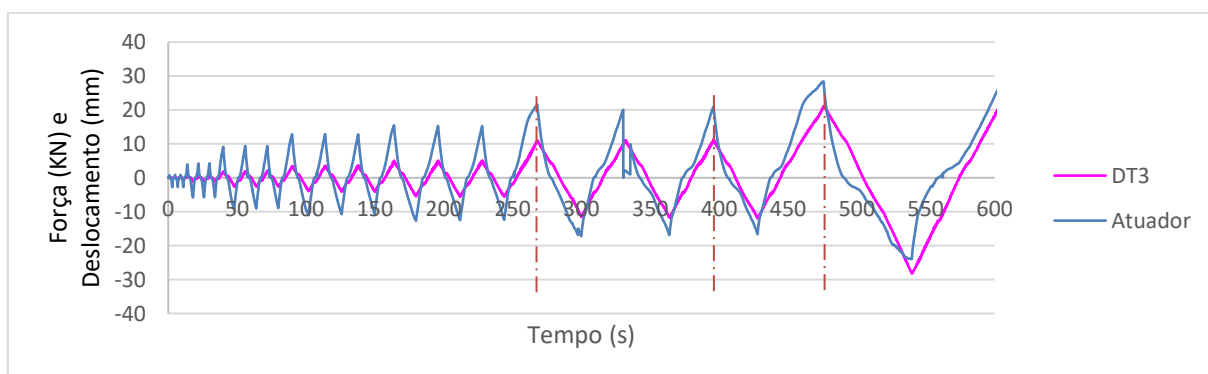


Figura 14 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 3 do modelo M3C

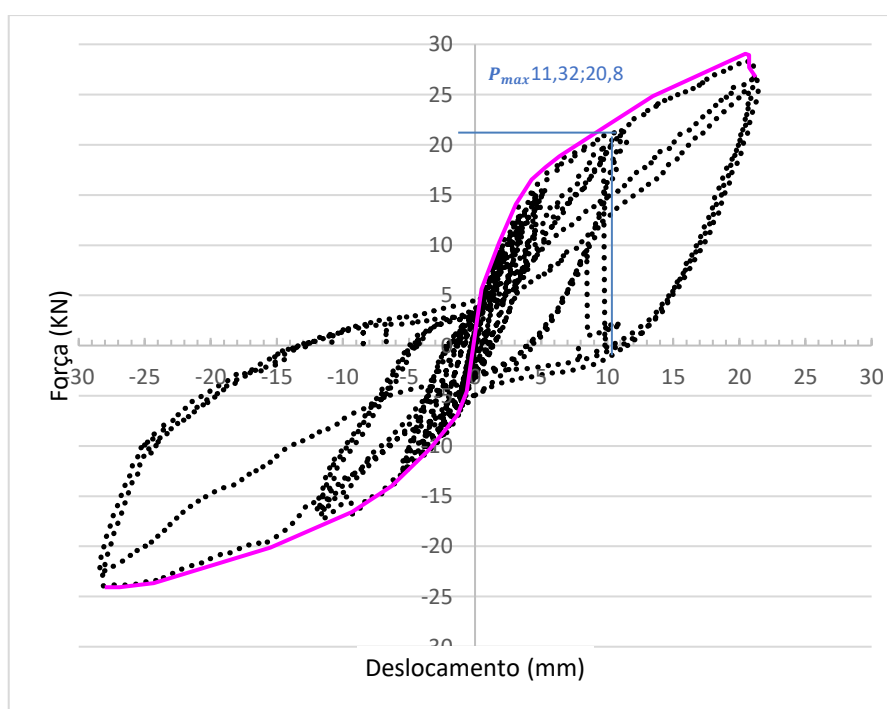


Figura 15 Curva Envelope da Força Horizontal (kN) do atuador versus o deslocamento (mm) e indicação do ponto de força máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor 3 do modelo M3C.

## 2.4 Transdutor 4

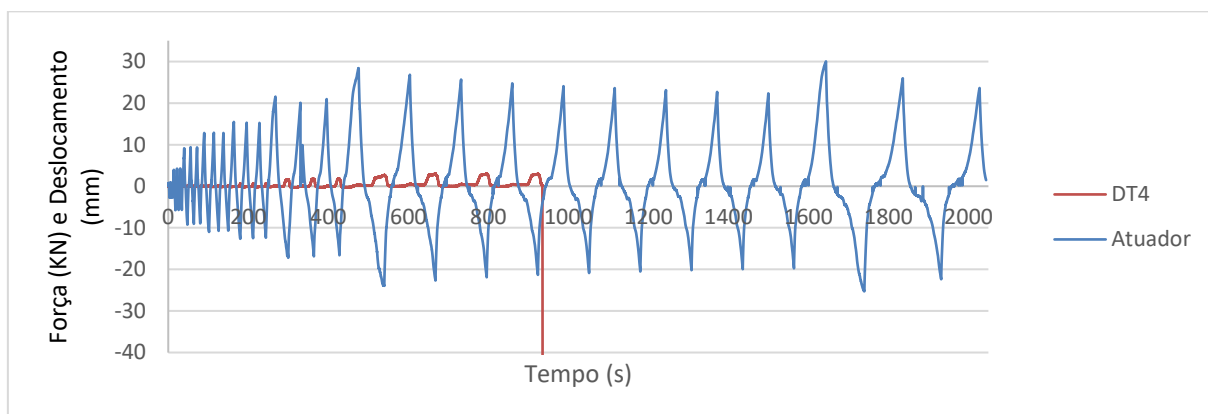


Figura 16 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 4 do modelo M3C

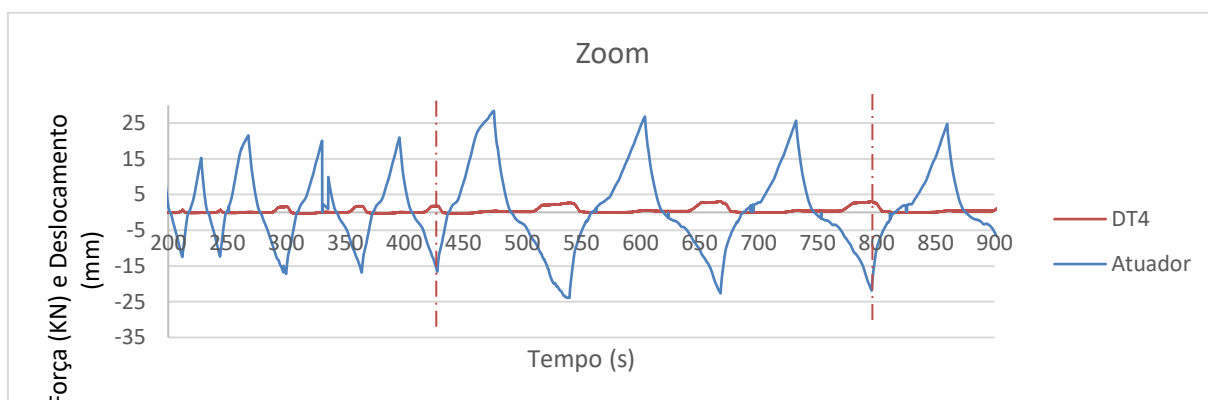


Figura 17 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 4 do modelo M3C

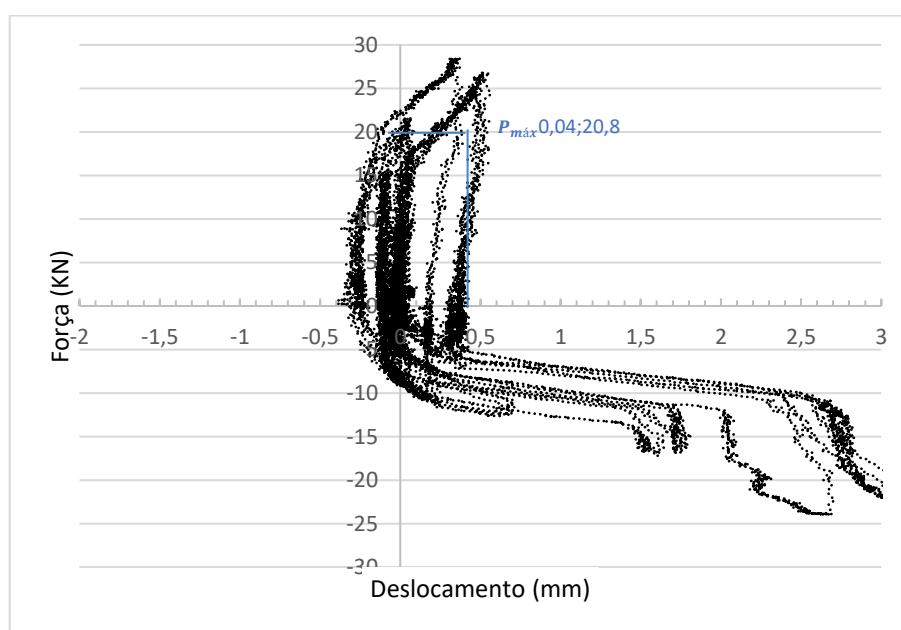


Figura 18 Curva Envelope da Força Horizontal (kN) do atuador versus o deslocamento (mm) e indicação do ponto de força máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor 4 do modelo M3C.

## 2.5 Transdutor 5

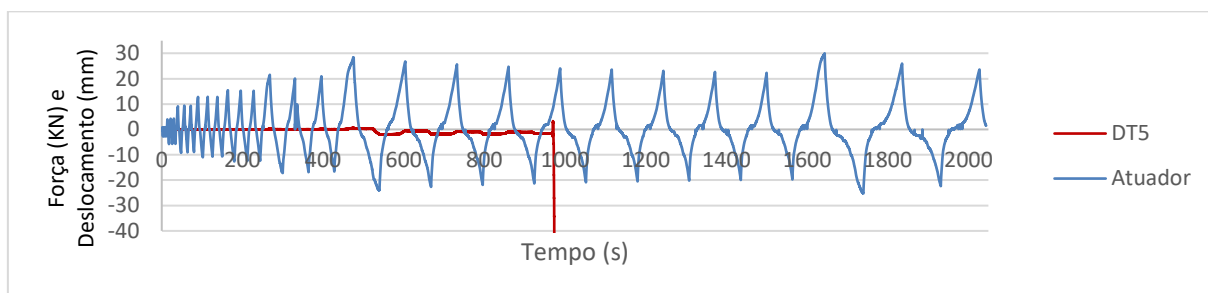


Figura 19 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 5 do modelo M3C

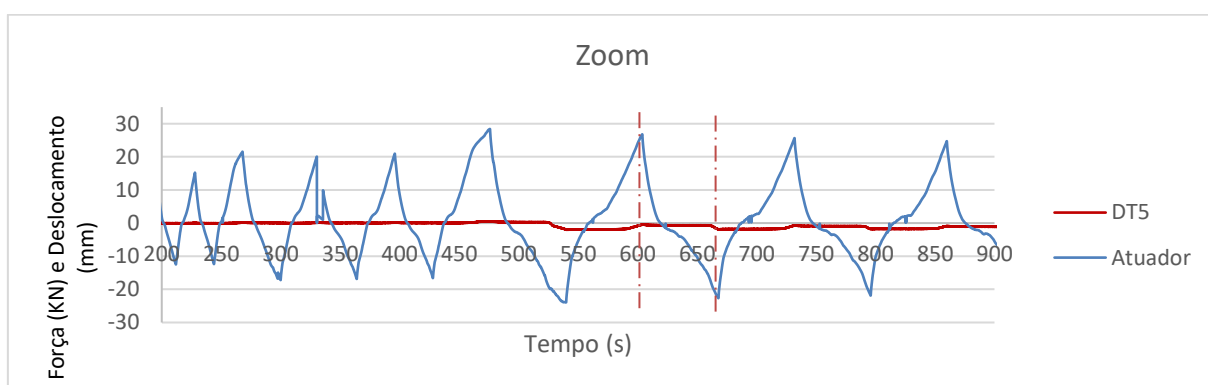


Figura 20 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor 5 do modelo M3C

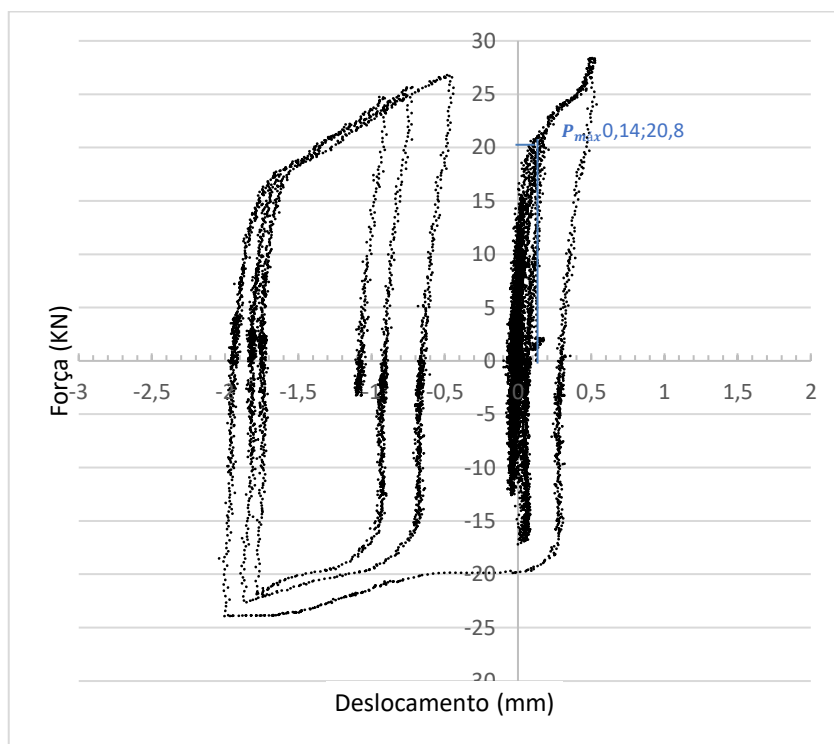


Figura 21 Curva Envelope da Força Horizontal (kN) do atuador versus o deslocamento (mm) e indicação do ponto de força máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor 5 do modelo M3C.

## 2.6 Transdutor Diagonal

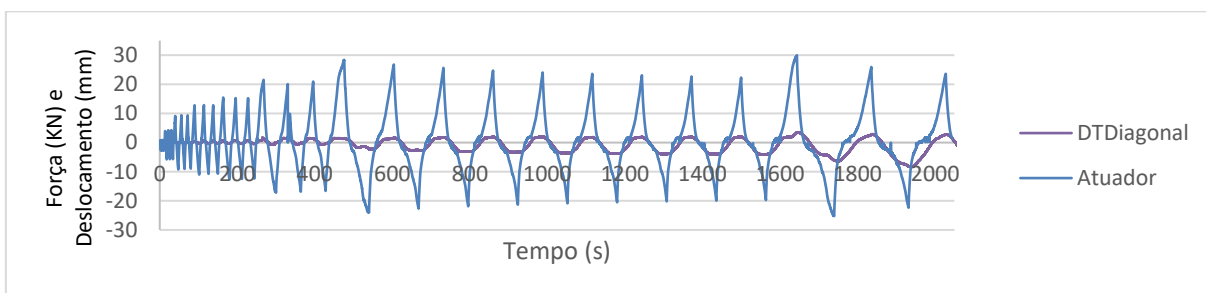


Figura 22 Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor diagonal do modelo M3C

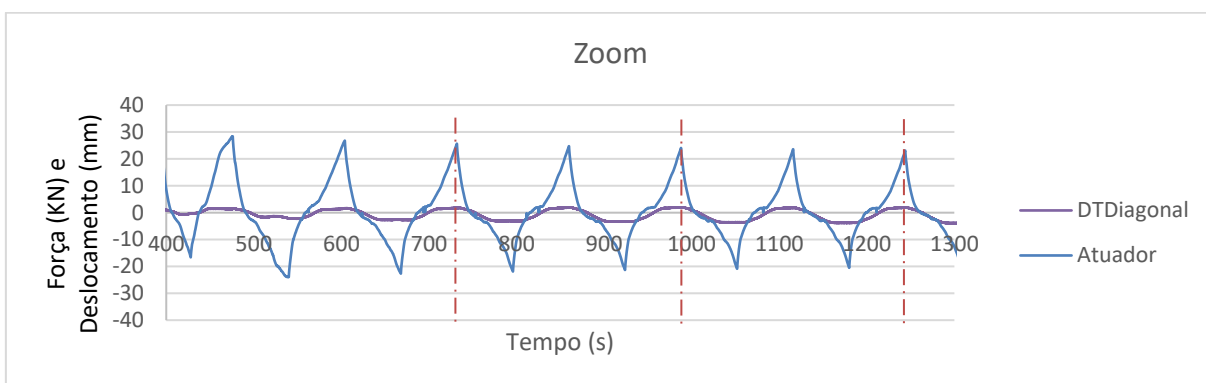


Figura 23 Zoom para conferir sincronização do Gráfico de Força (kN) e Deslocamento (mm) versus Tempo (s) do transdutor diagonal do modelo M3C

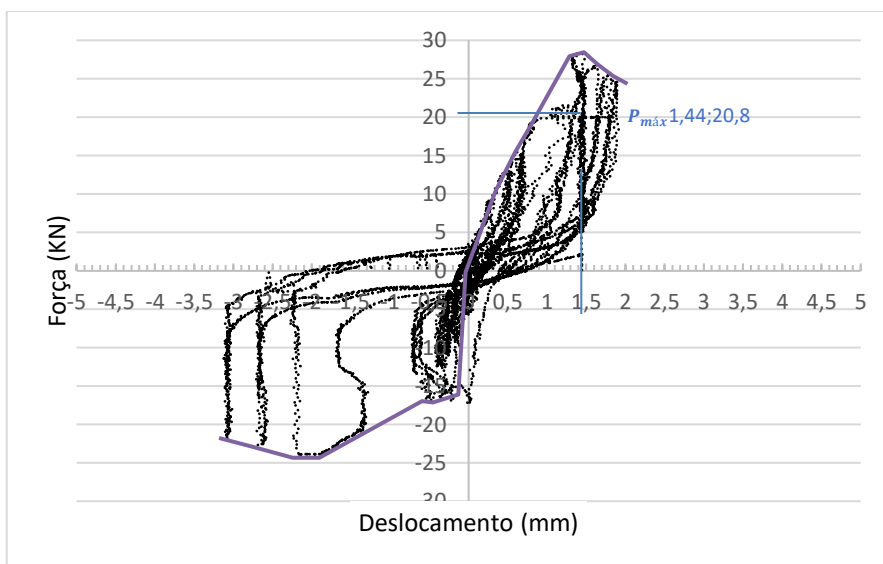


Figura 24 Curva Envelope da Força Horizontal (kN) do atuador versus o deslocamento (mm) e indicação do ponto de força máxima ( $P_{máx}$ ) do transdutor diagonal do modelo M3C.