



Bárbara Sumie Togashi

**Desempenho e Resistência à
Compressão de Cantoneiras
Pultrudadas Curtas de Polímero
Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV)**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil do
Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso

Rio de Janeiro
Março de 2017



Bárbara Sumie Togashi

**Desempenho e Resistência à
Compressão de Cantoneiras
Pultrudadas Curtas de Polímero
Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV)**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Civil do
Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo
assinada.

Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

Prof. Flávio de Andrade Silva

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

Prof. Paulo Batista Gonçalves

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio/DEC

Prof. Janine Domingos Vieira

Universidade Federal Fluminense

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do
Centro Tecnológico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 31 de março de 2017.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, da orientadora e da universidade.

Bárbara Sumie Togashi

Graduou-se em Engenharia Civil pela UFF (Universidade Federal Fluminense) em Niterói, Rio de Janeiro em janeiro de 2011. Ingressou no mestrado na PUC-Rio em agosto de 2014, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa em Estruturas e Materiais.

Ficha Catalográfica

Togashi, Bárbara Sumie

Desempenho e resistência à compressão de cantoneiras pultrudadas curtas de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV) / Bárbara Sumie Togashi; orientador: Daniel Carlos Taissum Cardoso; – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2017.

128 f. il. color; 29,7 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2017.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. PRFV. 3. Cantoneira. 4. Coluna. 5. Resistência. 6. Flambagem por flexo-torção. I Cardoso, Daniel Carlos Taissum. II Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Aos meus pais, Nilza e Seiiti, minha eterna gratidão por todo incentivo e dedicação aos meus estudos e minha educação.

Aos meus irmãos, Cláudia e Rafael, por todo carinho e apoio prestado ao longo dessa caminhada.

Ao meu namorado Paulo, pela paciência e companheirismo durante os anos dedicados ao mestrado.

Ao meu professor orientador Daniel Carlos Taissum Cardoso pela confiança para realização deste trabalho, pela compressão diante as dificuldades encontradas por aluno de período parcial e por ter compartilhado seus conhecimentos e suas experiências profissionais e pessoais.

Às amizades construídas ao longo do mestrado, pela companhia, pelas conversas, conselhos e longas horas de estudos.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas e Materiais (LEM/DEC – PUC-Rio), Euclides, José Nilson e Rogério, pela colaboração na execução dos ensaios.

Ao Instituto Tecnológico da PUC-Rio (ITUC) e à COPPE-UFRJ pela realização de parte dos ensaios de caracterização dos materiais e ao Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente (LGMA/DEC – PUC-Rio) e serviços de confecção dos aparatos de ensaios.

À PUC-Rio pela oportunidade e por todo o suporte acadêmico.

À CAPES pelo suporte financeiro.

À empresa Cogumelo pelo apoio à realização deste trabalho, fornecendo os perfis utilizados neste trabalho.

À empresa CSP Projetos e Consultoria, que através do Engº César Pinto incentivou e disponibilizou tempo para que pudesse cursar o mestrado.

Resumo

Togashi, Bárbara Sumie; Cardoso, Daniel Carlos Taissum (Orientador). **Desempenho e Resistência à Compressão de Cantoneiras Pultrudadas Curtas de Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV)**. Rio de Janeiro, 2017. 128 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho tem como objetivo investigar o desempenho e a resistência de cantoneiras curtas de abas iguais pultrudadas em polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV) submetidas à compressão centrada de curta duração. Os fundamentos teóricos associados ao comportamento de cantoneiras perfeitas e reais são apresentados e os resultados de um programa experimental que envolveu caracterização dos materiais e ensaios à compressão são reportados e discutidos. Ao todo, vinte e uma colunas bi-engastadas com diferentes razões largura/espessura das abas, comprimentos e propriedades mecânicas foram testadas. As forças críticas experimentais para o modo de flambagem à flexo-torção foram determinadas e comparadas com as previsões teóricas, apresentando boa concordância. A resistência à compressão de cada coluna foi obtida experimentalmente, discutindo-se a influência do comportamento pós-flambagem e das imperfeições na capacidade de carga final com relação à esperada para coluna perfeita e, finalmente, uma equação para resistência de coluna é proposta para resolver o problema.

Palavras-chave

PRFV; cantoneira; coluna; resistência; flambagem por flexo-torção.

Abstract

Togashi, Bárbara Sumie; Cardoso, Daniel Carlos Taissum (Advisor). **Performance and Compressive Strength of Pultruded Glass-Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Short Angles**. Rio de Janeiro, 2017. 128 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This paper aims to investigate performance and strength of glass-fiber reinforced polymer (GFRP) pultruded short equal leg angle columns subject to short-term concentric compression. Background theories associated with the behavior of perfect and real angle struts are presented and the results of an experimental program that involved material characterization and compression tests are reported and discussed. In all, twenty-one fixed-ended columns having different leg width-to-thickness ratio and lengths and mechanical properties were tested. Experimental critical loads for flexural-torsional buckling mode were determined and compared with theoretical predictions, showing a good agreement with each other. Compressive strength for each column was obtained, the influence of post-buckling behavior and imperfections in the final load-carrying capacity with respect to that expected for perfect column condition is discussed and, finally, a column strength equation is proposed to address the problem.

Keywords

GFRP; angle; column; strength; flexural-torsional buckling.

Sumário

1	Introdução	17
1.1	Considerações Iniciais.....	17
1.2	Motivação	21
1.3	Objetivos	22
1.4	Organização da Dissertação	23
2	Propriedades dos Pultrudados de Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) – Revisão Bibliográfica.....	24
2.1	Considerações Iniciais.....	24
2.2	Previsão Teórica das Propriedades Elásticas	26
2.3	Determinação Experimental das Propriedades Elásticas	30
2.3.1	Resistência e Módulo de Elasticidade à Tração Longitudinal.....	30
2.3.2	Resistência e Módulo de Elasticidade à Compressão	31
2.3.3	Módulo de Elasticidade à Flexão Longitudinal.....	33
2.3.4	Módulo de Elasticidade à Flexão Transversal	33
2.3.5	Módulo de Cisalhamento	34
3	Comportamento de Colunas de PRFV – Revisão Bibliográfica....	36
3.1	Considerações Iniciais.....	37
3.2	Colunas Perfeitas	40
3.2.1	Esmagamento do Material.....	40
3.2.2	Flambagem por Flexão.....	41
3.2.3	Flambagem por Torção	43
3.2.4	Flambagem por Flexo-torção.....	44
3.2.5	Curva de Assinatura	45
3.2.6	Curva de Resistência e Pós-Flambagem	46
3.3	Colunas Reais	48
3.3.1	Curva de Resistência e a Pós-Flambagem	49
4	Programa Experimental.....	52

4.1	Considerações Iniciais.....	52
4.2	Caracterização dos Materiais	54
4.2.1	Preparação das Amostras	54
4.2.2	Percentual de Fibras	55
4.2.3	Resistência e Módulo de Elasticidade à Tração Longitudinal.....	59
4.2.4	Resistência e Módulo de Elasticidade à Compressão.....	63
4.2.5	Módulo de Elasticidade à Flexão Longitudinal.....	68
4.2.6	Módulo de Elasticidade à Flexão Transversal	71
4.2.7	Módulo de Cisalhamento.....	75
4.2.8	Análise dos Resultados de Caracterização dos Materiais.....	80
4.3	Ensaio de Colunas	81
4.3.1	Preparação das Amostras	81
4.3.2	Procedimento Experimental	85
4.3.3	Resultado dos Ensaios.....	87
5	Conclusões.....	94
5.1	Considerações Finais	94
5.2	Propostas para Trabalhos Futuros	95
6	Referências bibliográficas	96
7	Apêndice A – Relatórios de Ensaios das Colunas.....	107

Lista de figuras

Figura 1.1 - Etapas do processo de pultrusão (SERUTI, 2013).	18
Figura 1.2 - Seções típicas de pultrudados em PRFV (STRONGWELL, 2016).	18
Figura 1.3 - Exemplos de aplicações de pultrudados em PRFV.	20
Figura 2.1 - Camadas que compõem uma seção típica de perfil pultrudado.	25
Figura 2.2 - Simplificações assumidas para determinação das propriedades elásticas (adaptado de JONES, 1999).	28
Figura 2.3 - Modelo do método auto-consistente duplamente embutido.	29
Figura 2.4 - Recomendações da ASTM de amostras para ensaios de tração.	30
Figura 2.5 - Aparatos de ensaios de compressão. (a) ASTM D695. (b) ASTM D3410. (c) ASTM D6641. (CARLSSON <i>et al.</i> , 2014)	32
Figura 2.6 - Métodos para ensaios de cisalhamento. (a) Método de losipescu. (b) Tração a $\pm 45^\circ$. (c) e (d) <i>Two and Three rail shear</i> , respectivamente.	34
Figura 3.1 - Estabilidade do Equilíbrio: (a) equilíbrio estável, (b) equilíbrio instável e (c) equilíbrio neutro ou indiferente.	37
Figura 3.2 - (a) Placa comprimida. (b) Curvas representativas de força P por deslocamento transversal w (adaptado de LEISSA, 1985).	39
Figura 3.3 - Modos de falha por esmagamento do material.	41
Figura 3.4 - Seção típica de uma cantoneira e o modo de flambagem por flexão.	42
Figura 3.5 - Elemento <i>mn</i> da coluna deformada (TIMOSHENKO e GERE, 1961).	43
Figura 3.6 – Modo de flambagem por torção de uma coluna cruciforme.	43
Figura 3.7 - Seção típica de uma cantoneira e o modo de flambagem por flexo-torção.	44

Figura 3.8 - Curvas tensão crítica (F_{cr}) x comprimento (L) para cantoneira L4 (c = engastado e s = apoiado).	46
Figura 3.9 - Curvas de resistência da coluna perfeita.	47
Figura 3.10 - Distribuição aproximada de tensões no modo de falha por flexo-torção.....	48
Figura 3.11 - Resistência normalizada da placa x esbeltez da placa (adaptado de CARDOSO, 2014).	51
Figura 4.1 - (a) Perfis cantoneiras selecionados. (b) Seções transversais.	53
Figura 4.2 - Geometria dos corpos de prova de acordo com o ensaio a ser realizado.....	54
Figura 4.3 - Nomenclatura adotada para identificação dos corpos de prova.	55
Figura 4.4 - Corpos de prova para ensaios de tração e flexão.....	55
Figura 4.5 - Procedimentos iniciais do ensaio de queima: (a) pesagem do cadinho, (b) cadinhos contendo as amostras, (c) dessecador utilizado e (d) cadinhos dispostos no interior da mufla.....	56
Figura 4.6 - Procedimentos após a queima. (a) Separação da manta com auxílio de pinça. (b) Fibras separadas. Acima: fibras contínuas nos cadinhos. Abaixo: mantas num frasco único.	57
Figura 4.7 - Posicionamento do corpo de prova. (a) Extensômetro do tipo <i>clip gage</i> . (b) Utilização de nível a laser.	60
Figura 4.8 - Modos de ruptura: (a) delaminação, (b) ruptura na seção mediana e (c) ruptura próximo às garras de fixação.	61
Figura 4.9 - Gráficos Tensão x Deformação dos ensaios à tração longitudinal. (a) Cantoneira L2. (b) Cantoneira L4.....	62
Figura 4.10 - (a) Corpos de prova para ensaio de compressão. (b) Representação do corpo de prova.	64
Figura 4.11 - (a) Ensaio de compressão – ASTM D6641. (b) Imagem ampliada do ensaio.	65
Figura 4.12 - Ruptura das amostras (a) L2.PO.CO.04 e (b) L4.ES.CO.02.	65
Figura 4.13 - Gráficos Tensão x Deformação dos ensaios à compressão longitudinal. (a) Cantoneira L2. (b) Cantoneira L4.	66

Figura 4.14 - Gráfico Tensão x Deformação do ensaio à compressão longitudinal da amostra L4.ES.CO.05.	67
Figura 4.15 - Ensaio de flexão em três pontos.	69
Figura 4.16 - Gráficos $\Delta P \times 4\delta bt^3/L^3$ dos ensaios à flexão. (a) Cantoneira L2. (b) Cantoneira L4.	70
Figura 4.17 - Ensaio de flexão transversal.	73
Figura 4.18 - Corpo de prova na configuração deformada e croqui do diagrama de momento fletor atuante.	73
Figura 4.19 - Gráficos $M/W \times (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/2$ dos ensaios à flexão transversal. (a) Cantoneira L2. (b) Cantoneira L4.	74
Figura 4.20 - Ensaio de Torção.	77
Figura 4.21 - Amostra deformada em ensaio de torção.	77
Figura 4.22 - Gráficos $T \times 2J\varepsilon_{45}/t$ dos ensaios de torção.	78
Figura 4.23 - Curvas T x Deformações da roseta nas cantoneiras (a) L2 e (b) L4.	80
Figura 4.24 - Colunas do perfil L4 de comprimentos variados.	82
Figura 4.25 - Curvas tensão crítica (F_{cr}) x comprimento (L) para cantoneiras L2 e L4 com extremidades engastadas.	84
Figura 4.26 - Esquema do ensaio de compressão centrada das cantoneiras pultrudadas.	86
Figura 4.27 - Ensaio de compressão - perfil cantoneira L4.	86
Figura 4.28 - Apoio desenvolvido para a condição de engaste das amostras.	86
Figura 4.29 - Posicionamento dos transdutores de deslocamentos na seção transversal mediana da coluna.	87
Figura 4.30 - Índices de esbeltez à flexão e flexo-torção das cantoneiras estudadas no presente trabalho e por Zureick e Steffen (2000).	87
Figura 4.31 - Tensões últimas experimentais normalizadas por esbeltez.	89
Figura 4.32 - Coluna L2.PO.500.1 (a1) durante e (a2) ao fim do ensaio. (b) Posição dos transdutores de desloc. (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_1 \times \delta_1 / \sigma$	90

Figura 4.33 - Gráfico $P \times \delta_{axial}$	91
Figura 4.34 - Curvas $\sigma \times \delta$ de cantoneiras L4 com comprimentos $L =$ 300 mm, 500 mm e 1000 mm.....	91
Figura 4.35 - Curvas de resistências normalizadas por esbeltez.	93
Figura 7.1 - Detalhe genérico do corpo de prova: (a) altura h e (b) seção transversal.	107

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades físicas e mecânicas dos materiais (BANK, 2006).	24
Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas de perfis pultrudados (PRFV).....	26
Tabela 2.3 - Valores de ζ para equação de Halpin-Tsai (CLARKE, 1996).	29
Tabela 3.1 - Coeficiente K_e para flambagem em colunas.....	42
Tabela 3.2 - Classificação de colunas e placas e os modos de falha esperados (adaptada de CARDOSO, 2014).	49
Tabela 4.1 - Resultados do ensaio para determinação do percentual de fibras (V_f).....	58
Tabela 4.2 - Dimensões dos corpos de prova do ensaio de tração longitudinal.	59
Tabela 4.3 - Resistência e módulo de elasticidade à tração longitudinal.	63
Tabela 4.4 - Dimensões dos corpos de prova do ensaio de compressão longitudinal.	64
Tabela 4.5 - Resistência e módulo de elasticidade à compressão longitudinal.	67
Tabela 4.6 - Dimensões dos corpos de prova do ensaio à flexão longitudinal.	68
Tabela 4.7 - Módulo de elasticidade à flexão longitudinal ($E_{L,f}$).	71
Tabela 4.8 - Dimensões dos corpos de prova do ensaio à flexão transversal.....	72
Tabela 4.9 - Módulo de elasticidade à flexão transversal ($E_{T,f}$).	75
Tabela 4.10 - Dimensões dos Corpos de Prova do Ensaio à Torção.....	75
Tabela 4.11 - Módulo de Cisalhamento (G_{LT}).....	79
Tabela 4.12 - Resumo das propriedades, experimentais e teóricas, dos materiais.....	81
Tabela 4.13 - Geometria das colunas L2 e L4 ensaiadas.	83
Tabela 4.14 - Resumo do ensaio de compressão.....	88

Lista de símbolos

Letras romanas minúsculas

b	Largura
b_e	Largura efetiva da aba
d	Distância
m	Massa
n_s	Fator de forma da seção para cisalhamento
r	Raio de giração
r_0	Raio de giração polar
t	Espessura
w	Deflexão para fora do plano
x_0	Distância entre o centro de cisalhamento e o centroide

Letras romanas maiúsculas

A	Área
B_y	Percentual de flexão
E_f	Módulo de elasticidade da fibra
E_L	Módulo de elasticidade longitudinal
$E_{L,c}$	Módulo de elasticidade à compressão longitudinal
$E_{L,f}$	Módulo de elasticidade à flexão longitudinal
$E_{L,t}$	Módulo de elasticidade à tração longitudinal
E_m	Módulo de elasticidade da matriz
E_T	Módulo de elasticidade transversal
E_{Tf}	Módulo de elasticidade à flexão transversal
$F_{cr,F}$	Tensão crítica de flambagem por flexão
$F_{cr,FT}$	Tensão crítica de flambagem por flexo-torção

$F_{cr,T}$	Tensão crítica de flambagem por torção
F_e	Tensão crítica de Euler
$F_{L,c}$	Resistência à compressão longitudinal
$F_{L,t}$	Resistência à tração longitudinal
F_{PP}	Resistência à compressão da placa perfeita
F_u	Tensão última
$F_{u,FT}$	Tensão última relacionada à flexo-torção
G_{LT}	Módulo de cisalhamento no plano
J	Constante de torção
K_e	Coefficiente de flambagem
K_t	Coefficiente de flambagem à torção
L	Comprimento da amostra
M	Momento fletor
P	Força
P_{cr}	Força crítica
Q	Propriedade elástica
T	Momento torsor
V	Fração volumétrica
V_0	Volume inicial
V_f	Percentual de fibras, por volume
V_m	Percentual da matriz, por volume
W	Módulo elástico á flexão

Letras gregas minúsculas

α_{FT}	Fator de imperfeição
β	Coefficiente de torção para barras retangulares
δ	Deflexão
ε	Deformação
θ	Ângulo de rotação
λ	Esbeltez
λ_c	Esbeltez relativa da coluna
λ_p	Esbeltez relativa da placa

λ_{FT}	Esbeltez relacionada à flexo-torção
ν_{LT}	Coeficiente de Poisson maior
ν_{TL}	Coeficiente de Poisson menor
σ	tensão
χ_{FT}	Resistência relativa da placa

Letras gregas maiúsculas

Δ	Amplitude fora do plano; variação
----------	-----------------------------------

Introdução

1.1

Considerações Iniciais

O crescente desenvolvimento de novos materiais para uso na construção civil – dentre os quais se inserem os materiais compósitos – tem possibilitado a execução de estruturas cada vez mais leves, duráveis e resistentes. Segundo CAMPBELL (2003), materiais compósitos podem ser definidos como a combinação de dois ou mais materiais distintos que resultam em melhores propriedades do que as dos componentes individualmente. No caso de dois materiais, os compósitos são constituídos por um reforço (partículas ou fibras) e uma matriz (polímeros, argamassa cimentícias, metálica). Polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV), objeto deste trabalho, trata-se, portanto, de um material compósito resultante da combinação das fibras de vidro em matriz polimérica.

As primeiras utilizações de fibras de vidro embebidas em resinas poliméricas datam da década de 1940, com aplicações militares durante a 2ª Guerra Mundial, seguida da utilização em estruturas *offshore* com o crescimento da indústria petroquímica (BAKIS *et al.*, 2002, SERUTI, 2013). Embora apresentem inúmeras vantagens como alta resistência, baixo peso específico, baixas condutividade elétrica e térmica, elevada resistência à corrosão, dentre outras, o elevado custo para fabricação consistia em um dos maiores obstáculos para utilização de polímeros reforçados com fibra (PRF) na indústria da construção civil.

O desenvolvimento do processo de pultrusão em 1950, nos Estados Unidos, viabilizou consideravelmente a fabricação de perfis com materiais compósitos de seções transversais constantes, através de um processo mecanizado com custos reduzidos, ganhando notoriedade a partir de 1970, tornando esses produtos atrativos à engenharia de estruturas.

A pultrusão consiste num processo de fabricação contínuo e mecanizado de compósitos reforçados com fibras. A Figura 1.1 ilustra esquematicamente as etapas do processo de fabricação de uma peça pultrudada e, na Figura 1.2, algumas seções típicas de pultrudados são apresentadas. Na etapa inicial, os fios e mantas de fibras (e.g. vidro, aramida, carbono, etc.) e o véu de superfície (e.g. poliéster) são puxados através de guias, passando por um tanque de resina onde são impregnados. Na sequência, o conjunto passa por um molde aquecido, onde cura e ganha forma definitiva. Ao fim do processo o perfil, que é continuamente puxado por um rolo puxador, é cortado no comprimento desejado.

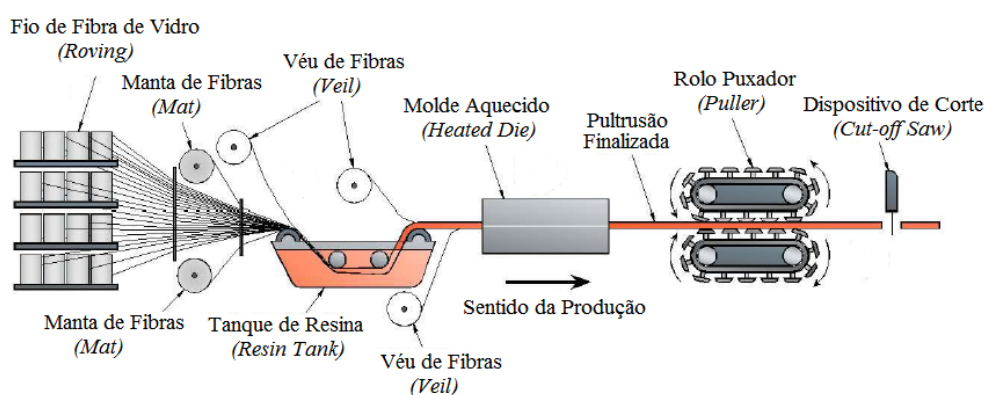


Figura 1.1 - Etapas do processo de pultrusão (SERUTI, 2013).

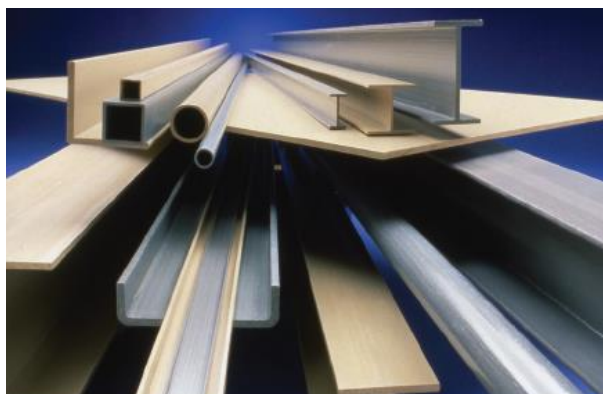


Figura 1.2 - Seções típicas de pultrudados em PRFV (STRONGWELL, 2016).

O primeiro uso estrutural de destaque dos PRFVs aconteceu em 1991, no laboratório de testes de interferência eletromagnética (EMI – *Electromagnetic Interference*) da Apple Computer, cujos componentes estruturais deveriam ser não-metálicos. Embora tenha sido totalmente construído por um processo manual com moldes abertos (*hand lay-up*) em 1985, seus componentes foram sendo

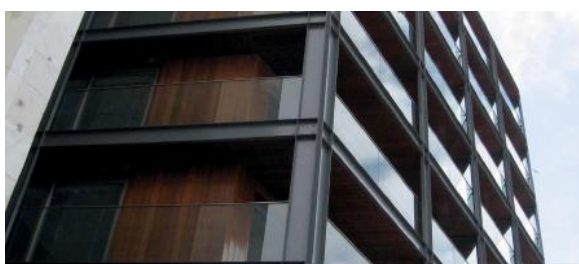
gradualmente substituídos por partes pultrudadas ao longo dos anos. Ainda em 1991, foi construída a passarela de Aberfeldy na Escócia, visando facilitar o acesso dos frequentadores de um clube de golfe aos alvos (buracos) existentes nas terras da margem oposta do rio Tay. A ponte foi construída toda em PRFV (exceto as fundações e as ligações, que utilizaram concreto e aço convencionais) com comprimento de 113 m, vão principal com 63 m, 2,23 m de largura e duas torres, cada uma com 17,5 m de altura, que sustentavam o deck, com seção celular, através de 40 stais (*stay*) feitos com fibra de aramida (*Kevlar*) (BURGOYNE e HEAD, 1993). Quase 20 anos depois, investigações realizadas por STRATFORD (2012) mostraram que, mesmo submetida à condições climáticas extremas, os elementos estruturais principais (deck, torres e cabos) apresentavam bom funcionamento. Neste mesmo período, torres de resfriamento industriais passaram a ser construídas com perfis pultrudados (GREEN *et al.*, 1994).

No Brasil, o uso de perfis pultrudados estruturais tem crescido nos últimos anos, mas ainda destinado principalmente às estruturas secundárias tais como guarda-corpo, escadas de marinho, e eletrocalhas. O interesse é grande, sobretudo, na indústria petroquímica, atraída pela alta resistência a corrosão, durabilidade e baixa condutividade elétrica. Gradualmente, o material vem recebendo a atenção de engenheiros para uso como componentes primários de sistemas estruturais como a utilização como passarelas e estrutura para sustentação de telhados (STRATUS, 2017).

Na Figura 1.3 são apresentados alguns exemplos de aplicação. Dentre eles destacam-se: (a) a ponte de *Aberfeldy*, na Escócia; (b) fachada do Hotel Fasano, no Rio de Janeiro; (c) escadas e guarda-corpo da Torre de observação do Cordova Park, Iowa, EUA e (d₁) a Ponte Fiberline, em Kolding, Dinamarca, com detalhe para o todo da torre (d₂) contraventado com perfis cantoneiras.



(a) Ponte de pedestre Aberfeldy, Escócia. (COMPOSITES UK, 2015)



(b) Fachada do Hotel Fasano, Rio de Janeiro. (COGUMELO, 2016)



(c) Escadas da torre de observação do Cordova Park, Iowa. (STRONGWELL, 2016)



(d₁) Ponte Fiberline em Kolding, Dinamarca. (FIBERLINE, 2017)



(d₂) Ponte Fiberline: detalhe do topo da torre. (FIBERLINE, 2017)

Figura 1.3 - Exemplos de aplicações de pultrudados em PRFV.

Manuais para dimensionamento de estruturas em materiais compósitos têm sido elaborados a fim de assegurar aos projetistas e construtores uma melhor base para projetos com esses materiais, dentre os quais pode-se citar: o *American Society of Civil Engineers - ASCE - Structural Plastic Design Manual* (GRAY, 1984), o *EUROCOMP Design Code and Handbook* (CLARKE, 1996) e o *Italian Guide for the Design and Construction of Structures Made of FRP Pultruded*

Elements (CNR, 2008), além das normas, ainda em desenvolvimento: *ASCE Pre-Standard for Load and Resistance Factor Design (LRFD) of Pultruded Fiber Reinforced Polymer (FRP) Structures (Final)* (ASCE, 2010) e *Prospect for new guidance in the design of FRP: Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes* (ASCIONE *et al.*, 2016). No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), no que se refere aos perfis pultrudados, apenas recomenda ensaios experimentais para verificação destes quanto ao atendimento aos requisitos da NBR 15708:2011.

1.2

Motivação

Os perfis pultrudados em PRFV têm mostrado bastante eficiência em diversas aplicações dada sua elevada resistência. Entretanto, a combinação de seu baixo módulo de elasticidade longitudinal com módulos de elasticidade transversal e de cisalhamento ainda mais baixos em elementos com paredes finas conduz a um importante estado-limite último de instabilidade (flambagem), acarretando em redução da capacidade de carregamento quando submetidos à compressão ou flexão (CARDOSO, 2014).

Nos últimos anos, diversas pesquisas têm sido conduzidas acerca de colunas pultrudadas de seções duplamente simétricas submetidas à compressão centrada, sendo abordados os modos de flambagem global, local e a interação de ambos, buscando métodos para previsão teórica da resistência à compressão (ZUREICK e SCOTT, 1997, BARBERO e DEVIVO, 1999, PUENTE *et al.*, 2006, CARDOSO *et al.*, 2014b). Perfis pultrudados monossimétricos, como no caso das cantoneiras, perfis U e T, apresentam poucas fontes de estudos embora suas aplicações sejam tão amplas quanto às demais. (HEWSON, 1978, ZUREICK AND STEFFEN, 2000, SILVESTRE e CAMOTIM, 2003, LEE *et al.*, 2005). Sua utilização como elementos principais em sistemas estruturais pode produzir esforços combinados de flexão e compressão e, assim, o comportamento diante os estados limites de instabilidade e de resistência é de fundamental importância no dimensionamento.

Segundo BAKIS *et al.* (2002), análises de compósitos reforçados com fibra, em geral, baseiam-se em premissas utilizadas para dimensionamento de estruturas

em aço, embora existam diferenças significativas intrínsecas aos materiais. Assim, o dimensionamento de perfis cantoneiras, em geral, requer atenção especial uma vez que, dada a baixa rigidez torsional, as colunas formadas por este tipo de perfil, ficam suscetíveis aos fenômenos de instabilidade por torção (DINIS e CAMOTIM, 2015). RASMUSSEN (2006) e MESACASA (2012) ressaltam ainda que, a equivalência entre o modo de flambagem local com o modo torsional, leva a resultados excessivamente conservadores, principalmente quando avaliadas cantoneiras curtas engastadas.

Em cantoneiras comprimidas, três modos de falha distintos – ou uma combinação deles – podem ocorrer: flambagem por flexo-torção, flambagem por flexão na menor inércia e falha por ruptura do material. ZUREICK e STEFFEN (2000) propõem expressões, para cantoneiras pultrudadas que apresentam esses modos; entretanto, as lacunas que intermediam o comportamento entre as colunas perfeitas e as reais necessitam ser preenchidas racionalmente de forma a levar em conta o comportamento pós-flambagem, condições de contorno e imperfeições, além de abranger seções com diferentes razões largura/espessura e propriedades mecânicas.

1.3

Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é investigar o desempenho e a resistência de cantoneiras curtas de abas iguais pultrudadas em PRFV submetidas à compressão centrada. Para isso, é realizada uma investigação acerca da teoria que aborda os modos de flambagem em cantoneiras perfeitas, bem como o comportamento de cantoneiras reais, considerando as imperfeições geométricas e inerentes ao material. Uma proposta de expressão para resistência à compressão desses elementos é apresentada e validada por resultados experimentais.

Para obtenção dos dados experimentais, foi realizado programa para dois tipos colunas com seções transversais distintas, uma com matriz composta por resina poliéster isoftálica e outra com matriz de resina éster-vinílica, de comprimentos variados. Compreende escopo do programa a caracterização dos materiais, medições da geometria das amostras e das imperfeições, determinação

experimental da carga crítica, da resistência à compressão, do modo de falha e análise do comportamento pós-flambagem.

Como objetivo secundário, foram investigados métodos para a determinação experimental das propriedades do material pultrudado reforçado com fibra de vidro, com foco nos padrões utilizados pela norma americana ASTM (*American Society for Testing and Materials*). Entretanto, frente às limitações geométricas, ensaios não padronizados também são propostos.

1.4

Organização da Dissertação

A seguinte organização é adotada nesta dissertação:

- No Capítulo 2, são apresentadas as características e propriedades típicas de perfis pultrudados em PRFV e as equações para previsões teóricas para determinação das propriedades elásticas, bem como as revisões bibliográficas dos ensaios de caracterização dos materiais em estudo.
- No Capítulo 3, o comportamento de colunas perfeitas e os modos de flambagem por flexão, torção e flexo-torção para materiais ortotrópicos são retratados e equações para determinar tensões críticas de flambagem para as cantoneiras ortotrópicas de paredes finas submetidas a compressão centrada são apresentadas. As cantoneiras reais e os fatores que afetam seu comportamento também são retratadas e por fim, o comportamento pós-flambagem em cantoneiras é investigado.
- No Capítulo 4, o programa experimental de caracterização dos materiais e o ensaio de colunas à compressão centrada são descritos e os resultados reportados.
- No Capítulo 5, as conclusões e propostas para trabalhos futuros são apresentados.
- Como complemento, no Anexo A são apresentados os relatórios dos ensaios das colunas à compressão com representação gráfica dos deslocamentos, dados geométricos, tensões críticas e de rupturas e as observações visuais de cada ensaio.

2

Propriedades dos Pultrudados de Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) – Revisão Bibliográfica

2.1

Considerações Iniciais

Os perfis de polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV) obtidos pelo processo de pultrusão são normalmente produzidos através da impregnação com resina das fibras de vidro na forma de fios longitudinais (*rovings*) e mantas de filamentos contínuos aleatoriamente orientados (*CSM - continuous strand mat*). Visando conferir acabamento e proteção superficial, um véu em fibra de vidro ou poliéster também é comumente adotado (*veil*). Os tipos de resina e fibra de vidro podem ser escolhidos conforme a necessidade de se obter maiores resistência química, mecânica ou de temperatura, porém a seleção de constituintes com características especiais pode conduzir a um maior custo de produção do pultrudado. Dentre os materiais mais utilizados na produção dos perfis estruturais, destacam-se as resinas termofixas de poliéster isoftálica, éster-vinílica e epóxi e as fibras de vidro dos tipos *E-glass* e *S-glass*, onde os prefixos *E* e *S* designam alta resistividade elétrica e alta performance estrutural, respectivamente. A Tabela 2.1 apresenta algumas propriedades físicas e mecânicas desses materiais.

Tabela 2.1 - Propriedades físicas e mecânicas dos materiais (BANK, 2006).

Propriedades Físicas / Mecânicas	Resinas			Fibras de Vidro	
	Poliéster	Éster-vinílica	Epóxi	E-Glass	S-Glass
Densidade (g/cm³)	1,2	1,12	1,2	2,57	2,47
Resistência à Tração (MPa)	65	82	90	3.400	4.600
Mód. Elast. Tração (GPa)	4,0	3,5	3,0	72,5	88
Alongamento Máximo (%)	2,5	6,0	8,0	2,5	3,0
Coefficiente de Poisson*	0,36 ⁽¹⁾	0,30 ⁽²⁾	0,37 ⁽¹⁾	0,225 ⁽²⁾	0,2 ⁽¹⁾

(1) SMITH (1991); (2) TOMBLIN *apud* DAVALOS *et al.* (1996)

O comportamento mecânico dos perfis pultrudados também varia de acordo com o percentual de volume de seus constituintes. Em geral, os perfis pultrudados apresentam fração volumétrica de fibra (percentual de fibras por unidade de volume do compósito), V_f , variando de 35 a 50% (BAKIS *et al.*, 2002), possuindo diferentes números de camadas de filamento contínuo em sua composição e apresentando espessuras e disposições conforme forem as necessidades. A Figura 2.1 mostra as diversas camadas existentes numa seção típica da parede de um perfil pultrudado.

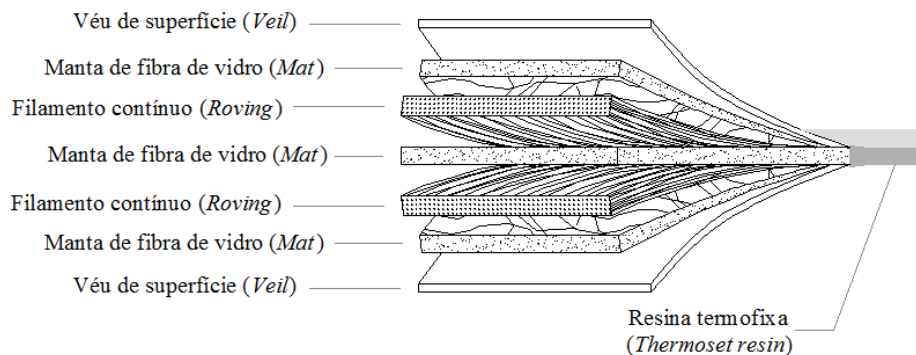


Figura 2.1 - Camadas que compõem uma seção típica de perfil pultrudado.

A ampla variação na quantidade das camadas que constituem os perfis pultrudados (véu de superfície, manta de fibra de vidro, filamento contínuo e resina) pode influenciar nas propriedades mecânicas de um material fornecido por um mesmo fabricante (BINSHAN *et al.*, 1995). Alguns fatores inerentes ao processo de fabricação, como a presença de vazios, o alinhamento das fibras, a introdução de aditivos na matriz polimérica, entre outros, também contribuem para a variabilidade dos resultados (VIEIRA, 2008). A Tabela 2.2 apresenta algumas propriedades mecânicas de perfis pultrudados compostos por resina éster-vinílica fornecidas por diferentes fabricantes. Outros aspectos importantes na mecânica dos perfis pultrudados reforçados com fibras de vidro são seu comportamento ortotrópico e seu diagrama tensão-deformação essencialmente linear elástico na direção longitudinal até atingir a ruptura frágil.

Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas de perfis pultrudados (PRFV).

Propriedades Mecânicas		Cogumelo (1)	Strongwell (2)	Creative (3)
Longitudinal	Resistência à Tração (MPa)	257,4	206,8	245,5
	Mód. de Elast. à Tração (GPa)	20,6	17,9	24,1
	Resistência à Compressão (MPa)	257,4	206,8	306,8
	Mód. de Elast. à Compressão (GPa)	17,3	17,9	20,7
	Mód. de Elast. à Flexão (GPa)	13,7	11,0	13,1
Transversal	Resistência à Tração (MPa)	-	48,3	130,3
	Mód. de Elast. à Tração (GPa)	-	5,5	6,9
	Resistência à Compressão (MPa)	-	110,3	199,9
	Mód. de Elast. à Compressão (GPa)	-	5,5	15,2
	Mód. de Elast. à Flexão (GPa)	-	5,5	11,0
Módulo de Cisalhamento (GPa)		-	2,9	3,4

(1) (*apud* SERUTI, 2013)

(2) (STRONGWELL, 2016)

(3) (CREATIVE, 2015)

2.2

Previsão Teórica das Propriedades Elásticas

O conhecimento das propriedades mecânicas de perfil pultrudados são indispensáveis aos projetos de estruturas. Embora os fabricantes normalmente garantam propriedades mínimas, é de responsabilidade do projetista confirmar as características do material utilizado. Assim, a determinação das propriedades pode ser feita experimentalmente, como será apresentado na seção 4.2, ou através das formulações teóricas, descritas a seguir.

Como já mencionado, as seções pultrudadas são compostas por diversas camadas, cada uma com seus constituintes e propriedades individuais. Assim BANK (2006) caracteriza os materiais compósitos em quatro níveis: (i) nível da fibra, onde a interação dos materiais constituintes é examinado detalhadamente, sendo fibra e matriz considerados homogêneos, linearmente elástico e isotrópicos e as propriedades sendo estabelecidas com relação às frações de massa e volume desses materiais através de modelos micromecânicos; (ii) nível da camada (lâmina), onde a camada unidirecional é considerada como o elemento básico para o cálculo das propriedade multidirecionais do laminado; (iii) nível do laminado, onde se assume o material homogêneo, sem descolamento entre as camadas,

avaliando-se as relações constitutivas através da teoria clássica de laminados, utilizando-se modelos macromecânicos multidirecionais compostos pelo empilhamento de diversas camadas, sugerindo um comportamento ortotrópico ou anisotrópico, conforme for a sequência de empilhamento; (iv) nível da seção, cujos parâmetros podem ser determinados através das análises de tensões, critérios de ruptura da camada ou ruptura última de modelos estruturais.

Três métodos para determinação das propriedades elásticas de camadas (lâminas) unidirecionais são apresentadas no EUROCOMP *Handbook* (CLARKE, 1996):

- a. Regra das misturas: baseado na suposição simplificada da tensão ou deformação. Não são considerados alguns fatores como o formato e espaçamento entre fibras, a geometria, o grau de ligação, dentre outros que podem afetar os módulos de cisalhamento e transversal da lâmina. Entretanto, por ser um método mais conservador, as propriedades reais são, em geral, superiores aos previstos pelas equações (CLARKE, 1996):

$$E_L = V_f E_f + V_m E_m \quad (2.1)$$

$$E_T = \frac{E_f E_m}{E_f (1 - V_f) + E_m V_f} \quad (2.2)$$

$$G_{LT} = \frac{G_f G_m}{G_f (1 - V_f) + G_m V_f} \quad (2.3)$$

$$\nu_{LT} = V_f \nu_f + V_m \nu_m \quad (2.4)$$

onde E_L , E_T , G_{LT} , e ν_{LT} são, respectivamente, os módulos de elasticidade longitudinal e transversal, o módulo de cisalhamento no plano e o coeficiente de Poisson maior do compósito. E , G , ν e V são, respectivamente, o módulo de elasticidade, o módulo de cisalhamento, coeficiente de Poisson e a fração volumétrica dos constituintes, com letras subscritas f e m correspondendo à fibra e à matriz, respectivamente. A Figura 2.2 apresenta as simplificações assumidas em um material reforçado com fibra unidirecional para determinação das propriedades elásticas: (a) E_L : a deformação na fibra é a mesma na matriz sob tensões longitudinais σ_L com as seções permanecendo planas;

(b) E_T : a mesma tensão transversal σ_T é aplicada tanto na matriz quanto na fibra (não há aproximações com relação às deformações); (c) G_{LT} : as tensões de cisalhamento τ são as mesmas na fibra e na matriz (as deformações não são iguais) e (d) ν_{LT} : de forma análoga à primeira, a deformação é considerada a mesma pra ambos materiais (JONES, 1999).

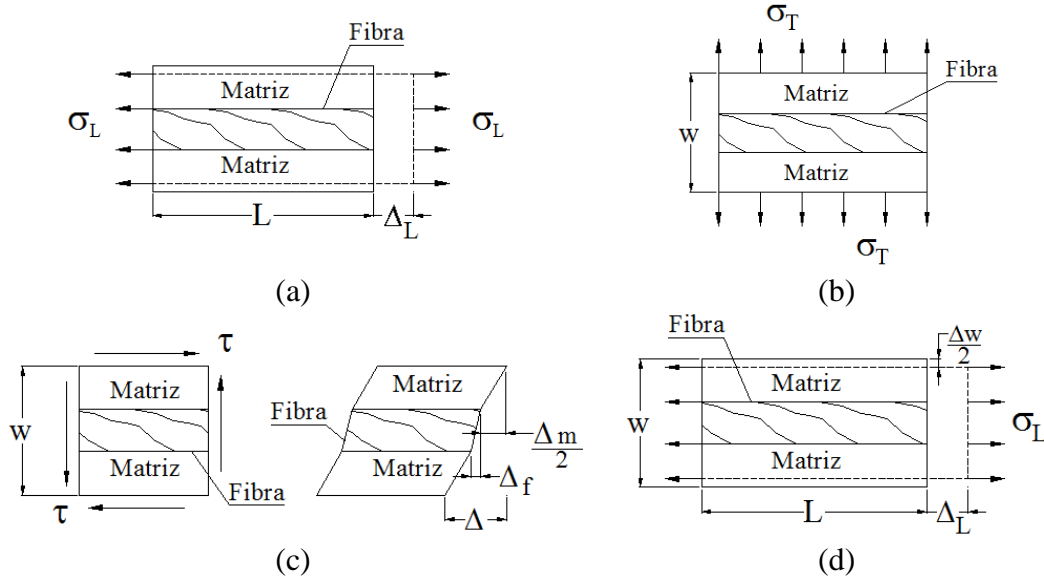


Figura 2.2 - Simplificações assumidas para determinação das propriedades elásticas (adaptado de JONES, 1999).

- b. Método auto-consistente duplamente embutido: o modelo duplamente embutido estudado por WHITNEY (1967) e HERMANS (*apud* CARLSSON *et al.*, 1990), considera a fibra revestida por uma microrregião cilíndrica de matriz que, por sua vez, é incorporada no meio homogêneo isotrópico transversal, conforme ilustrado na Figura 2.3, cujas propriedades são idênticas às propriedades do material compósito. As formulações para determinação das propriedades elásticas são reproduzidas por CLARKE (1996), como a eq. 2.5, para cálculo do módulo de elasticidade longitudinal, que exemplifica a complexidade das formulações.

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f) + \frac{4(v_m - v_f)^2 k_{2f} k_{2m} G_m (1 - V_f) V_f}{(k_{2f} + G_m) k_{2m} + (k_{2f} - k_{2m}) G_m V_f} \quad (2.5)$$

onde G é o módulo de cisalhamento e k_2 é o módulo de compressibilidade do meio homogêneo.

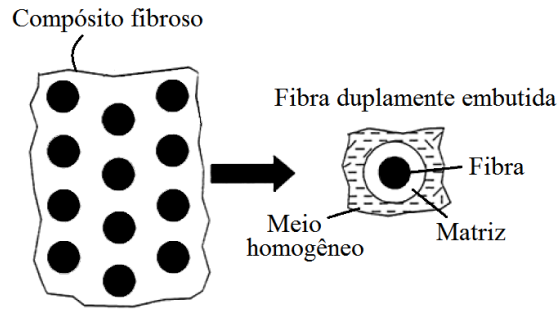


Figura 2.3 - Modelo do método auto-consistente duplamente embutido.

- c. Método de Halpin-Tsai: método semi-empírico, que representa uma solução aproximada dos resultados micromecânicos mais complexos, amplamente utilizado dada a simplicidade das formulações (JONES, 1999). A expressão recomendada pelo EUROCOMP *Design Code* (CLARKE, 1996) para a determinação das propriedades elásticas de compósitos reforçados unidirecional é dada pela equação 2.6:

$$Q = \frac{Q_m [Q_f + \xi Q_m + \xi V_f (Q_f - Q_m)]}{[Q_f + \xi Q_m - V_f (Q_f - Q_m)]} \quad (2.6)$$

onde Q é a propriedade elástica do compósito a ser determinada, Q_m e Q_f são as propriedades correspondentes da matriz e da fibra, respectivamente, e ξ é o parâmetro de eficiência do material compósito e é dado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Valores de ξ para equação de Halpin-Tsai (CLARKE, 1996).

	Propriedade elástica, Q					
	E_L	ν_{LT}	E_T		G_{LT}	
			$V_f < 0.65$	$V_f \geq 0.65$	$V_f < 0.65$	$V_f \geq 0.65$
ξ	∞	∞	2.0	$2.0 + 40V_f^{10}$	1.0	$1.0 + 40V_f^{10}$

Outras aproximações baseadas na teoria da elasticidade podem ser encontradas em JONES (1999) e CARLSSON *et al.* (1990), onde são salientadas as complexidades das formulações, bem como as dificuldades inerentes ao processo de fabricação do material, como o recorrente posicionamento aleatório das fibras, existência de vazios, cura não uniforme, dentre outros fatores que contribuem para que as previsões micromecânicas sejam, em geral, imprecisas.

Os métodos descritos anteriormente não consideram as propriedades das camadas reforçadas com manta de filamentos contínuos aleatoriamente orientados (CSM), as quais contribuem com o aumento das propriedades transversais e de cisalhamento (DAVALOS *et al.*, 1996). Essas camadas são normalmente assumidas como isotrópicas e um método para a determinação das propriedades mecânicas foi proposto por HULL (1981). NAUGHTON *et al.* (1985) investigaram experimentalmente o comportamento da distribuição aleatória de compósitos reforçados com fibras de vidro do tipo *E-glass (chopped strand mat)* em resina poliéster e constataram que as propriedades apresentavam bons resultados quando comparados às previsões teóricas. Entretanto o módulo transversal experimental ficou 18% abaixo do módulo longitudinal, mostrando que o material não é verdadeiramente isotrópico.

2.3

Determinação Experimental das Propriedades Elásticas

2.3.1

Resistência e Módulo de Elasticidade à Tração Longitudinal

Para determinação da resistência e do módulo de elasticidade do material à tração longitudinal (FL_t e EL_t , respectivamente) geralmente são utilizadas as recomendações das ASTM D638 (2010) e ASTM D3039 (2008), cujas amostras distinguem-se geometricamente conforme apresentado na Figura 2.4, sendo respectivamente na forma “*dog-bone*” e retangular.

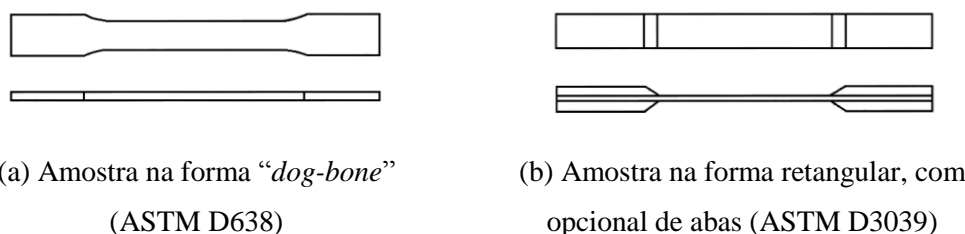


Figura 2.4 - Recomendações da ASTM de amostras para ensaios de tração.

Comumente são encontradas nas bibliografias corpos de prova com geometria retangular conforme ASTM D3039. SONTI e BARBERO (1996), ZUREICK e SCOTT (1997) e CORREIA *et al.* (2011) realizaram ensaios com

amostras retangulares, de diversos perfis compostos por resinas éster-vinílica e poliéster, de dimensões 203 a 457 mm de comprimento, 25,4 e 50,8 mm de largura e 6,4 a 9,8 mm de espessura que conduziram a valores médios para módulo de elasticidade e resistência à tração longitudinal de 17,0 a 32,84 GPa e 177 a 475 MPa, respectivamente.

SERUTI (2013) realizou ensaios com amostras retangulares de um perfil H constituído de resina éster-vinílica seguindo as recomendações da ISO 527-1/4/5. As amostras possuíam dimensões de 9,5 mm de espessura, 25 mm de largura e 250 mm de comprimento e apresentaram resultados médios para módulo de elasticidade e resistência, respectivamente, de 24,4 GPa e 255,9 MPa.

VIEIRA (2008) ensaiou corpos de prova no formato “*dog-bone*” com 203 mm de comprimento, 6,35 mm de espessura e larguras de 12,7 mm na região da garra e 6,35 na região instrumentada para perfis “H” compostos por resinas éster-vinílica e poliéster encontrando para resistência os valores médios de 232 e 253 MPa e para o módulo de elasticidade 22,5 e 20,9 GPa para as respectivas resinas.

2.3.2

Resistência e Módulo de Elasticidade à Compressão

A resistência e o módulo de elasticidade do material à compressão podem ser obtidos através de métodos de ensaio com aplicação da força de compressão diretamente nas extremidades do corpo de prova (ASTM D695, 2010), através de atrito ao longo da interface com cunhas de extremidade (ASTM D3410, 2008) ou por combinação de ambas as formas, i.e., carregamento simultâneo pela extremidade e por atrito (ASTM D6641, 2009). A Figura 2.5 apresenta os aparatos necessários para cada um desses ensaios, sendo o primeiro prescindível para amostras de espessura superior a 3,2 mm. Além disso, cuidados devem ser previamente tomados a fim de evitar desalinhamentos, excentricidades e danos localizados nas regiões de introdução de carga, além de garantir a não ocorrência do fenômeno de flambagem.

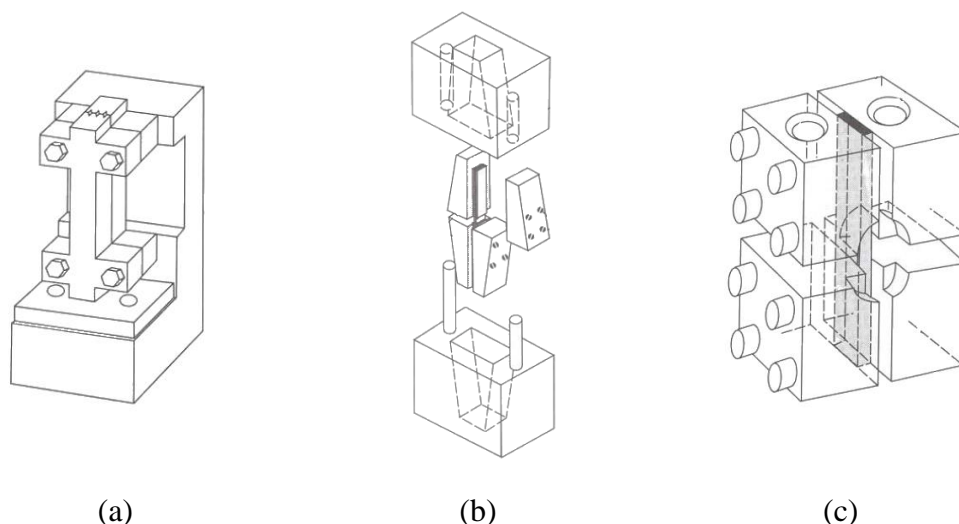


Figura 2.5 - Aparatos de ensaios de compressão. (a) ASTM D695. (b) ASTM D3410. (c) ASTM D6641. (CARLSSON *et al.*, 2014)

Ensaio de compressão em amostras de cantoneiras pultrudadas de resina poliéster e dimensões 6,35x12,7x31,75 mm, realizados por MCCLURE e MOHAMMADI (1995) em acordo com a ASTM D695, produziram resultados para resistência e módulo de elasticidade à compressão de 224 a 333 MPa e 16,3 a 21,8 GPa, respectivamente. ZUREICK e SCOTT (1997) e ZUREICK e STEFFEN (2000) realizaram ensaios conforme a ASTM D3410 com perfis pultrudados de resina poliéster e éster-vinílico de dimensões 6,4 a 12,7 mm de espessura, 25,4 a 38,1 mm de largura e comprimento de 41 a 89 mm. Os valores de resistência e módulo de elasticidade à compressão variaram respectivamente de 210 a 396 MPa e 19,9 a 28,3 GPa.

Como aparatos especiais nem sempre estão disponíveis, ensaios não padronizados podem ser encontrados nas literaturas. CORREIA *et al.* (2011) e CARDOSO (2014) realizaram ensaios simplificados de compressão em amostras de resina poliéster e éster-vinílico de espessuras 9,8 e 6,4 mm, 12,7 mm de largura e comprimento de 39 e 50,8 mm. Os valores de resistência e módulo de elasticidade à compressão apresentados nesses trabalhos variaram de 227 a 429 MPa e 26 a 28 GPa, respectivamente.

2.3.3

Módulo de Elasticidade à Flexão Longitudinal

O módulo de elasticidade à flexão longitudinal pode ser determinado pelo ensaio de flexão em três ou quatro pontos, conforme determinado pelas respectivas normas técnicas ASTM D790 (2010) e ASTM D6272 (2010).

Em geral, ensaios de flexão em três pontos são mais comuns devido à simplicidade na montagem. CORREIA *et al.* (2011) e SERUTI (2013) obtiveram, para amostras de dimensões 9,5-9,8x15x285-300 mm compostas de resina poliéster e éster-vinílica, módulos de elasticidade à flexão longitudinal de 26,9 e 15,8 GPa, respectivamente. Já CARDOSO *et al.* (2014a, b) obtiveram em seus ensaios valores de 11,2 e 21,9 GPa para amostras de dimensões 3,2x40x254 mm e 6,4x44,5x254 mm em respectivas resinas poliéster e éster-vinílica.

2.3.4

Módulo de Elasticidade à Flexão Transversal

Para obtenção do módulo de elasticidade à flexão transversal, as mesmas normas descritas no item 2.3.3 anterior deveriam ser utilizadas, sendo as amostras, nesse caso, extraídas transversalmente ao eixo principal dos perfis. No entanto, nem sempre é possível extrair amostras nos trechos transversais por limitações dimensionais, resultando na necessidade de realizar ensaios não padronizados (CARDOSO *et al.*, 2014c).

Procedimentos não-padronizados foram propostos, por exemplo, por CARDOSO *et al.* (2014b) para determinação do módulo de elasticidade transversal respectivamente de perfis tubulares quadrados compostos por resina poliéster e de perfis-I de resina éster-vinílica, cujos valores variaram de 10,5 a 13,5 GPa.

2.3.5

Módulo de Cisalhamento

A determinação do módulo de cisalhamento no plano pode ser feita através de diversos métodos sendo os mais comuns o método de Iosipescu (*Iosipescu shear test method* - ASTM D5379, 2012), o ensaio de tração em amostras a $\pm 45^\circ$ ($\pm 45^\circ$ Tension shear test - ASTM D3518, 2013) e os ensaios *Two- and three-rail shear* (ASTM D4255, 2007), ilustrados na Figura 2.6.

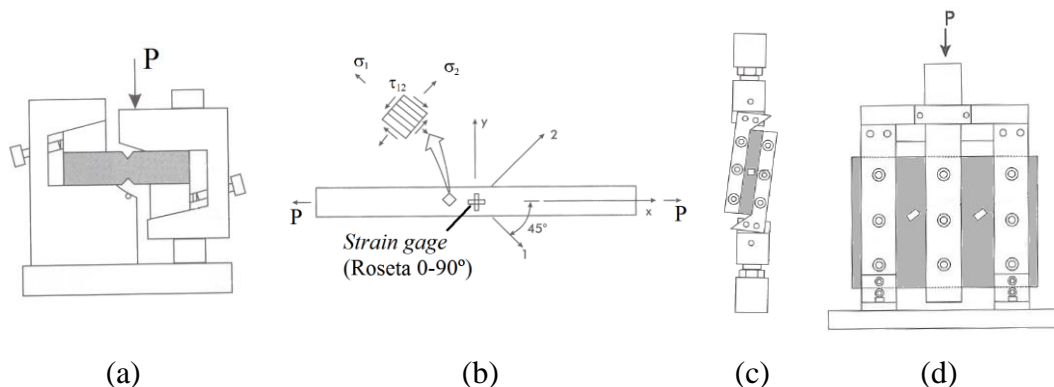


Figura 2.6 - Métodos para ensaios de cisalhamento. (a) Método de Iosipescu. (b) Tração a $\pm 45^\circ$. (c) e (d) *Two and Three rail shear*, respectivamente.

O método de Iosipescu, adotado por BANK (1990), SONTI e BARBERO (1996), ZUREICK e SCOTT (1997) e ZUREICK e STEFFEN (2000), apresentou resultados para módulo de cisalhamento variando de 2,1 a 5,7 GPa para corpos de prova formados por resina poliéster ou éster-vinílica com variadas espessuras variadas. Os dois primeiros autores utilizaram amostras de dimensões padronizadas pela norma, ou seja, 19 mm de largura e 76 mm de comprimento. Os demais utilizaram amostras de dimensões maiores (38 mm de largura e 203 mm de comprimento) visando reduzir a variância associada à distribuição não uniforme das fibras em relação ao tamanho da amostra.

Alguns quesitos como o comportamento não-linear do material em cisalhamento, a dificuldade em se obter o estado de cisalhamento puro e até mesmo a escolha do método para realização do ensaio amplificam a variabilidade e dificuldade na obtenção dos resultados (CHIAO *et al.*, 1977 e CARLSSON *et al.*, 2014).

Portanto, ensaios adaptados, não normalizados, são comumente realizados por diversos autores. CARDOSO *et al.* (2014c) adaptaram o método de ensaio de

tração a $\pm 45^\circ$ para corpos de prova de seções 6,4x12,7x119 mm, formados por resina poliéster ou éster-vinílica, encontrando valores para módulo de cisalhamento variando de 4,1 a 4,7 GPa. YOOSEFINEJAD e HOGG (1996), SONTI e BARBERO (1966) e TURVEY (1998) realizaram ensaios de torção para corpos de prova retangulares de seções, respectivamente, 5x10x250 mm (resina éster-vinílica), 9,5x25,4x178 mm (resinas poliéster ou éster-vinílica) e 6,4x50x200-400 mm (resina poliéster), encontrando valores para módulo de cisalhamento variando de 2,8 a 4,1 GPa.

Comportamento de Colunas de PRFV – Revisão Bibliográfica

A análise de colunas de PRFV submetidas a compressão centrada tem sido tema de diversas pesquisas (TOMBLIN e BARBERO, 1994, SEAGATITH e SRIBOONLUE, 1999, LANE e MOTTRAM, 2002, CARDOSO e BATISTA, 2015). Entretanto muitos trabalhos têm sido direcionados às seções duplamente simétricas, governadas por modos de flambagem caracterizados pela interação da flambagem local e global, e poucos são voltados para o comportamento de seções monossimétricas ou assimétricas.

Embora sejam utilizadas em larga escala, cantoneiras não têm recebido a devida atenção. O único trabalho de que se tem conhecimento é o de ZUREICK e STEFFEN (2000), que investigaram o desempenho de 25 cantoneiras pultrudadas, submetidas à compressão centrada, com variados índices de esbeltez e relações largura da aba por espessura, comparando resistências obtidas com as cargas de bifurcação do equilíbrio. No entanto, a proposta apresentada não representa, de fato, o real comportamento das colunas, cujas imperfeições e efeitos de segunda ordem devem ser considerados, como apontam estudos baseados em cantoneiras metálicas (DINIS *et al*, 2010, DINIS e CAMOTIM, 2015).

Neste capítulo serão abordados, através de conceitos da estabilidade estrutural, os fundamentos teóricos sobre colunas perfeitas e reais de perfis cantoneiras pultrudadas, bem como a análise do comportamento pós-flambagem das mesmas.

3.1

Considerações Iniciais

Para REIS e CAMOTIM (2001) a estabilidade é um conceito associado à capacidade das estruturas, após submetidas a um sistema de forças externas, de estabelecer uma configuração de equilíbrio, podendo esta ser estável, caso cessada a perturbação externa a estrutura retorne à posição inicial; ou instável, caso contrário. De forma ilustrativa, a Figura 3.1 mostra o conceito básico da estabilidade do equilíbrio, onde a esfera, submetida à ação de seu peso próprio, sobre superfície côncava (a) está em equilíbrio estável, sobre a superfície convexa (b) está em equilíbrio instável e sobre uma superfície horizontal (c) está em equilíbrio neutro (indiferente). O tipo de equilíbrio também pode ser entendido sob o ponto de vista da energia do sistema (TIMOSHENKO e GERE, 1961). No caso da Figura 3.1a, qualquer deslocamento eleva o centro de gravidade da esfera, aumentando a energia potencial do sistema para qualquer deslocamento da posição de equilíbrio, sendo necessário trabalho para produzir tal deslocamento (ponto de mínimo). No segundo caso, a energia potencial total é reduzida para qualquer que seja o deslocamento (ponto de máximo). No equilíbrio neutro não há variação de energia durante o deslocamento.

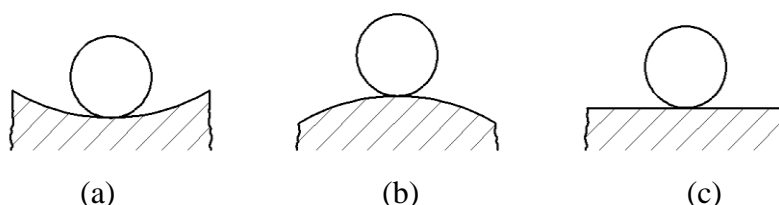


Figura 3.1 - Estabilidade do Equilíbrio: (a) equilíbrio estável, (b) equilíbrio instável e (c) equilíbrio neutro ou indiferente.

Nas análises estruturais de elementos submetidos a compressão, principalmente no caso de estruturas esbeltas, é indispensável a consideração dos conceitos associados à estabilidade do equilíbrio. Os problemas de instabilidade são normalmente estudados sob o ponto de vista da bifurcação do equilíbrio, i.e., determinação da condição para o qual a estrutura perde a capacidade de resistir a carregamentos crescentes na configuração original, passando a apresentar grandes deflexões e modificando a sua forma original (flambagem). Nesses problemas, as

colunas são assumidas perfeitas ou ideais, ou seja, perfeitamente retilíneas e submetidos à compressão centrada (TIMOSHENKO e GERE, 1961).

Entretanto, sistemas estruturais reais apresentam imperfeições geométricas e inerentes ao material que devem ser consideradas nas análises de colunas. Quando submetidas à compressão, momentos fletores de segunda ordem associados à compressão excêntrica são produzidos nas colunas, resultando no acréscimo da deflexão lateral e, conseqüentemente, reduzindo as capacidades de carga com relação às colunas perfeitas. Assim, enquanto o estudo de colunas perfeitas é realizado através de análises lineares que permitem a identificação e caracterização dos modos de instabilidade, bem como a determinação dos valores correspondentes da tensão de bifurcação, análises não-lineares de colunas contendo imperfeições permitem avaliar as trajetórias de equilíbrio pós-flambagem e os efeitos das imperfeições das colunas na resistência final (NAGAHAMA, 2003).

LEISSA (1985) sintetiza os comportamentos de elementos perfeitos e reais através de curvas força P por deslocamento transversal w de uma placa submetida à compressão no plano, onde podem ser destacados cinco ‘trechos’, de acordo com a Figura 3.2 a e b. Em colunas perfeitas, com o acréscimo da carga P , a curva segue para cima no eixo das ordenadas (I), na trajetória (caminho) fundamental ou pré-crítica, não havendo deslocamentos transversais neste trecho, até alcançar a carga crítica P_{cr} (ponto de bifurcação). Neste ponto, a curva pode continuar seguindo pelo eixo das ordenadas através da curva teórica (II) – trajetória fundamental – ou pode seguir a trajetória de flambagem horizontal (III), obtida através da análise linear, ou seguir a inclinação crescente da curva (IV), obtida através da análise não-linear. Esta última é chamada de curva pós-flambagem, pois descreve o comportamento, neste caso, da placa após alcançar a carga crítica P_{cr} . Este comportamento peculiar às placas ocorre devido à redistribuição das tensões em direção aos pontos mais rígidos, permitindo aplicação de cargas superiores à carga crítica, até que as tensões em um dado ponto se igualem à resistência do material da placa. Por fim, a curva (V) descreve o comportamento de placas reais, sujeitas às imperfeições análogas às colunas reais descritas no parágrafo anterior. Quanto menores as imperfeições, mais próxima a curva ficará da vizinhança da carga crítica P_{cr} .

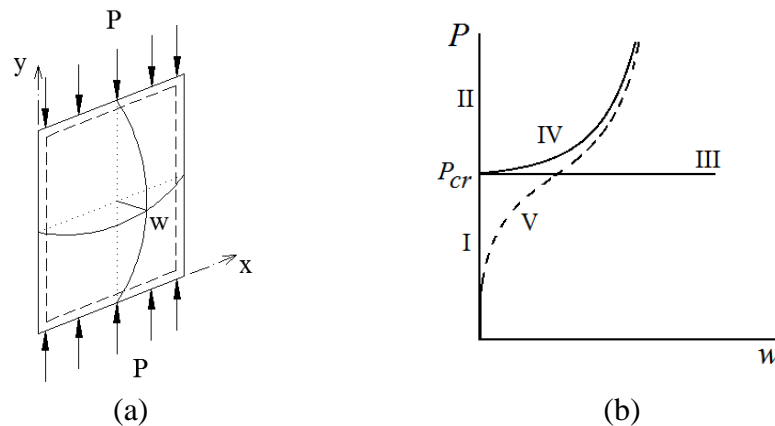


Figura 3.2 - (a) Placa comprimida. (b) Curvas representativas de força P por deslocamento transversal w (adaptado de LEISSA, 1985).

A maioria dos estudos de instabilidades existente com perfis pultrudados em PRFV são direcionados às seções I, onde foi concluído que as colunas curtas e longas são governadas, respectivamente, pelos modos de instabilidade local e global e colunas intermediárias apresentando falha por interação entre esses dois modos. (BARBERO e TOMBLIN, 1993, TOMBLIN e BARBERO, 1994, LANE e MOTTRAM, 2002, TURVEY e ZHANG, 2006). Comportamentos análogos também foram reportados em trabalhos realizados com perfis tubulares (ZUREICK e SCOTT, 1997, SEANGATITH e SRIBOONLUE, 1999, CARDOSO *et al.*, 2014b).

Na literatura, o comportamento de cantoneiras comprimidas é investigado apenas por ZUREICK e STEFFEN (2000), onde são destacados os modos de flexão, para colunas longas, e flexo-torção para colunas curtas. Embora os processos de verificação de imperfeições geométricas tenham sido investigados pelos autores, a utilização de expressões destinadas às colunas perfeitas para determinação da resistência à compressão do perfil não condiz com seu real comportamento, onde imperfeições e efeitos de segunda ordem devem ser considerados.

3.2

Colunas Perfeitas

Como previamente definidas, colunas e placas perfeitas ou ideais são elementos perfeitamente retilíneos que, quando submetidos à compressão centrada, podem ter sua capacidade de carga avaliada segundo a bifurcação do equilíbrio. Colunas perfeitas formadas por perfis cantoneiras de abas iguais podem apresentar três modos de falha: (i) por esmagamento do material, (ii) flambagem global por flexo-torção e (iii) flambagem global por flexão, sendo o primeiro modo associado à resistência do material e os dois últimos correspondentes aos limites de instabilidade.

3.2.1

Esmagamento do Material

Em materiais compósitos unidirecionais, o esmagamento do material, em geral, refere-se aos mecanismos de falhas que podem ocorrer a nível dos materiais constituintes (JELF e FLECK, 1992), onde destacam-se os seguintes modos de falha, ilustrados na Figura 3.3: (a) microflambagem elástica, onde ocorre deformação da matriz e instabilidade das fibras, predominante em compósitos unidirecionais com fração volumétrica de fibras maior que 0,30 (FLECK, 1997); (b) microflambagem plástica, em que é considerado um desalinhamento inicial das fibras envoltas em matriz de comportamento plástico perfeitamente rígido, ocorrendo então instabilidade por cisalhamento da matriz de forma não-linear e (c) esmagamento da fibra, quando a resistência e a rigidez da matriz são suficientes para prevenir as microflambagens ocorrendo, então, a falha das fibras quando a deformação axial atinge sua deformação de esmagamento intrínseca.

Embora a resistência de um material compósito unidirecional possa ser calculada através das formulações recomendadas por diversos autores (PIGGOT e HARRIS, 1980, FLECK, 1997, BARBERO et al. 1999), a aplicabilidade de pultrudados em PRFV necessita de especificações do material, como espessura e número de camadas, que nem sempre são disponibilizados pelos fabricantes,

dificultando assim a obtenção de uma formulação fechada confiável, para uso em dimensionamentos (CARDOSO, 2014).

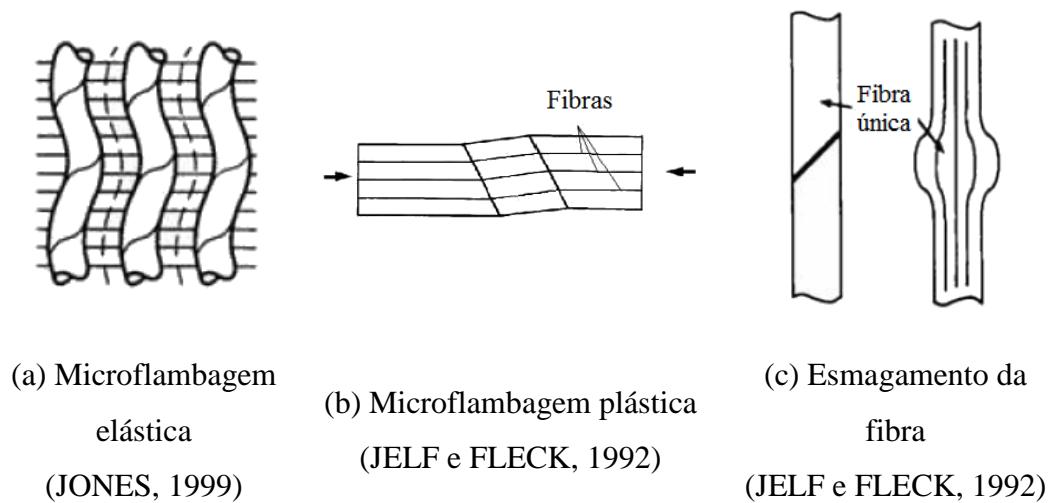


Figura 3.3 - Modos de falha por esmagamento do material.

3.2.2

Flambagem por Flexão

A flambagem global por flexão é caracterizada pela deflexão lateral da coluna em torno de um dos eixos principais de inércia da seção, cuja configuração deformada é apresentada na Figura 3.4 para flexão de um perfil cantoneira em torno do eixo de menor inércia. A equação clássica de flambagem por flexão ocorre em colunas relativamente longas (BARBERO e TOMBLIN, 1993) e a tensão crítica F_e (tensão de Euler) é dada por:

$$F_e = \frac{\pi^2 E_L}{(K_e L / r)^2} \quad (3.1)$$

onde E_L é o módulo de elasticidade longitudinal da seção transversal, K_e é o fator de efetividade (à flexão) do comprimento L da coluna, apresentado na Tabela 3.1, e r é o raio de giração da seção em relação ao eixo de flambagem.

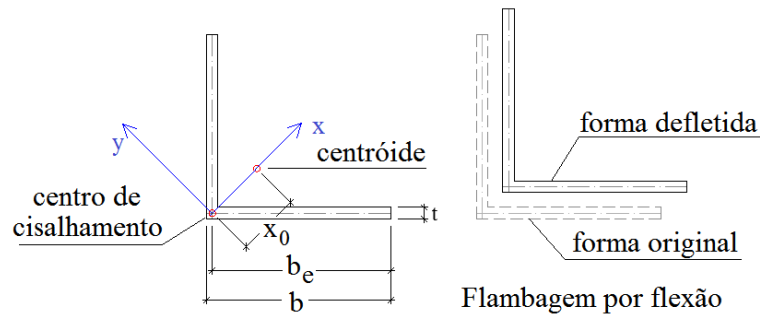


Figura 3.4 - Seção típica de uma cantoneira e o modo de flambagem por flexão.

Tabela 3.1 - Coeficiente K_e para flambagem em colunas.

	E - E	E - R	E - E*	R - R	E - L	R - E*
K_e	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0

Onde, E: engastado; R: rotulado; L: livre; E*: engastado (livre para transladar)

Análises experimentais realizadas com colunas esbeltas mostraram que a Eq. 3.1 conduz a aproximações razoáveis da tensão crítica (BARBERO e TOMBLIN, 1993, ZUREICK e SCOTT, 1997). Entretanto, devido à alta relação E_L/G_{LT} (i.e., módulo de elasticidade longitudinal por módulo de cisalhamento no plano) apresentada pelos compósitos poliméricos unidirecionais, a expressão de ENGESSER (*apud* TIMOSHENKO e GERE, 1961) que inclui o efeitos das deformações por cisalhamento é geralmente recomendada:

$$F_{cr,F} = \frac{F_e}{1 + n_s F_e / G_{LT}} \quad (3.2)$$

onde F_e é a tensão crítica de Euler definida na Eq. 3.1, G_{LT} é o módulo de cisalhamento e n_s é o fator de forma da seção para cisalhamento proposto por TIMOSHENKO (1956), que pode ser obtido em diversas fontes na literatura (e.g. COWPER, 1966, TIMOSHENKO e GERE, 1961, ZUREICK e SCOTT, 1997). TIMOSHENKO e GERE (1961) propuseram, ainda, uma equação mais precisa

considerando a deformação de um elemento mn da coluna deformada, ilustrado na Figura 3.5, dada na Eq. 3.3. CARDOSO *et al.* (2014a) estudaram o comportamento de colunas pultrudadas através da previsão teórica proposta por essa equação, encontrando boa concordância com os resultados experimentais.

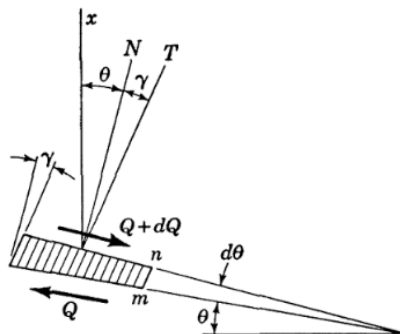


Figura 3.5 - Elemento mn da coluna deformada (TIMOSHENKO e GERE, 1961).

$$F_{cr,F} = \frac{\sqrt{1 + 4n_s F_e / G_{LT}} - 1}{2n_s / G_{LT}} \quad (3.3)$$

3.2.3

Flambagem por Torção

Por apresentarem baixa rigidez torsional, os elementos com seção transversal duplamente simétrica aberta e composta por paredes finas estão sujeitos à flambagem global por torção, caracterizada pela rotação da seção transversal em torno do seu centro de cisalhamento, conforme pode ser observado na coluna cruciforme da Figura 3.6.

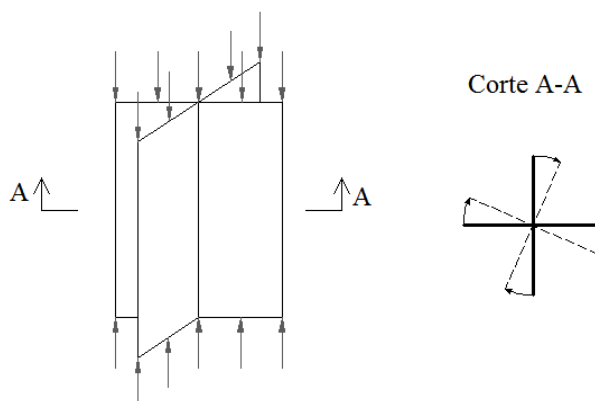


Figura 3.6 – Modo de flambagem por torção de uma coluna cruciforme.

A tensão crítica associada à torção em torno do centro de cisalhamento, $F_{cr,T}$, em cantoneiras de abas iguais é dada por (ZUREICK e STEFFEN, 2000):

$$F_{cr,T} = \frac{\pi^2 E_{L,f}}{12(1 - \nu_{LT}\nu_{TL})} \left(\frac{t}{K_t L} \right)^2 + G_{LT} \left(\frac{t}{b_e} \right)^2 \quad (3.4)$$

onde $E_{L,f}$ é o módulo de elasticidade à flexão longitudinal, ν_{LT} e ν_{TL} são o maior e menor coeficientes de Poisson, respectivamente, K_t é o coeficiente de flambagem associado às condições de apoio das paredes do perfil nas extremidades e b_e e t são, respectivamente a largura e a espessura da aba (Figura 3.7).

Conforme observado por TIMOSHENKO e GERE (1961) o comportamento de uma coluna com seção cruciforme sujeita à flexo-torção pode ser associado ao de uma placa simplesmente apoiada ao longo de um dos bordos longitudinais e livre ao longo do outro. A equação Eq. 3.4 foi obtida através dessa analogia.

3.2.4

Flambagem por Flexo-torção

No caso de seções monossimétricas, como é o caso das cantoneiras, cuja posição do centroide não coincide com o centro de cisalhamento, a torção é acompanhada de deflexão lateral em torno do eixo de maior inércia da seção, conforme mostrado na Figura 3.7. Esse modo de flambagem é denominado flexo-torção.

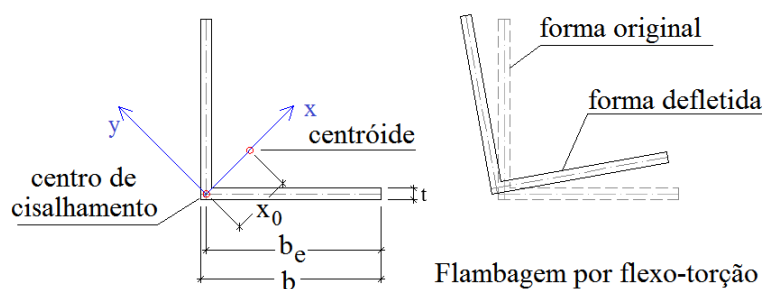


Figura 3.7 - Seção típica de uma cantoneira e o modo de flambagem por flexo-torção.

A tensão crítica de flambagem por flexo-torção para seções monossimétricas é apresentada por TIMOSHENKO e GERE (1961):

$$F_{cr,FT} = \frac{F_{e,x} + F_{cr,T}}{2[1 - (x_0 / r_0)^2]} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4F_{e,x}F_{cr,T}[1 - (x_0 / r_0)^2]}{(F_{e,x} + F_{cr,T})^2}} \right] \quad (3.5)$$

onde $F_{e,x}$ é dado em (3.1) na direção perpendicular ao eixo de simetria, r_0 é o raio de giração polar da seção em relação ao centro de cisalhamento e x_0 é a distância entre o centro de cisalhamento e o centroide (Fig. 3.7).

Se a parcela de flexão na direção de maior inércia for desprezada, ocorre apenas torção do perfil em torno do centro de cisalhamento. Nesse caso, mais uma vez, cada aba pode ser analisada como uma placa com um dos bordos longitudinais livre e o outro simplesmente apoiado e a solução se aproxima daquela obtida para o modo puramente torsional, apresentada na Eq. 3.4.

3.2.5

Curva de Assinatura

Embora os modos de instabilidades dominantes em perfis cantoneiras sejam os modos globais por flexão e flexo-torção, esses modos podem ser influenciados por deformações por cisalhamento (conforme consideradas nas equações 3.2 e 3.3) e pela flexão transversal das abas (DINIS *et al.*, 2010). As condições de apoio consideradas nas análises também influenciam nos problemas de equilíbrio. A Figura 3.8 apresenta as curvas de tensões críticas de flambagem, F_{cr} , pelo comprimento L – curva de assinatura, com eixo horizontal em escala logarítmica – para uma cantoneira 102 x 102 x 6,4 mm, traçadas a partir das equações 3.1 e 3.4, com diferentes condições de contorno. As curvas (A) e (C) representam a condição de engastamento nas extremidades, respectivamente, das paredes das placas (local) e das colunas (global) e das curvas (B) e (D), de simplesmente apoiada.

A consideração de todos estes fatores em problemas de instabilidade pode ser melhor investigada através da Teoria Generalizada de Vigas (GBT – *Generalized Beam Theory*, SCHARDT, 1994), método no qual é considerada a contribuição das deformações de placa na matriz de rigidez geométrica do elemento, possibilitando determinar a contribuição de cada modo na carga crítica de flambagem final. Com a implementação computacional deste método, através do software GBTul (BEBIANO *et al.*, 2008), é possível avaliar a ocorrência dos

L4	
b_e (mm)	98,4
t (mm)	6,35
E_{Lf} (GPa)	20,1
E_{Lc} (GPa)	30,4
G_{LT} (GPa)	2,5
ν_{LT}	0,32

3.2.6 Curva de Resistência e Pós-Flambagem

$$\chi = \frac{F_u}{F_{l,c}} \quad (3.6)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{F_{L,c}}{F_{cr}}} \quad (3.7)$$

Considerando-se cantoneira curta de abas iguais, a força crítica F_{cr} é definida de maneira aproximada conforme a Eq. 3.4. Para se obter a reserva de resistência pós crítica, é preciso obter a distribuição de tensões nas abas da cantoneira (tensões de membrana) em modo de falha por flexo-torção. Fazendo analogia com uma placa com um dos bordos longitudinais simplesmente apoiado e o outro livre, pode-se assumir distribuição de tensões com um formato curvo (PFEIL e PFEIL, 2009) onde a ruptura é caracterizada por uma tensão igual a $F_{L,c}$ no bordo de junção entre abas, enquanto a tensão no bordo livre ficaria limitada à tensão crítica F_{cr} , conforme apresentado na Figura 3.10. Assim, é possível avaliar, de forma aproximada, a curva de resistência para colunas perfeitas considerando o ganho de resistência pós-flambagem. Considerando a tensão média última equivalente à $F_u = (F_{L,c} + 3F_{cr})/4$, chega-se à equação de resistência normalizada χ para análise de cantoneiras perfeitas com resistência pós-flambagem:

$$\chi = \begin{cases} 1,0 & \text{para } \lambda \leq 1,0 \\ \frac{F_u}{F_{L,c}} = \frac{1}{4} \left(1 + \frac{3}{\lambda^2} \right) & \text{para } \lambda > 1,0 \end{cases} \quad (3.8)$$

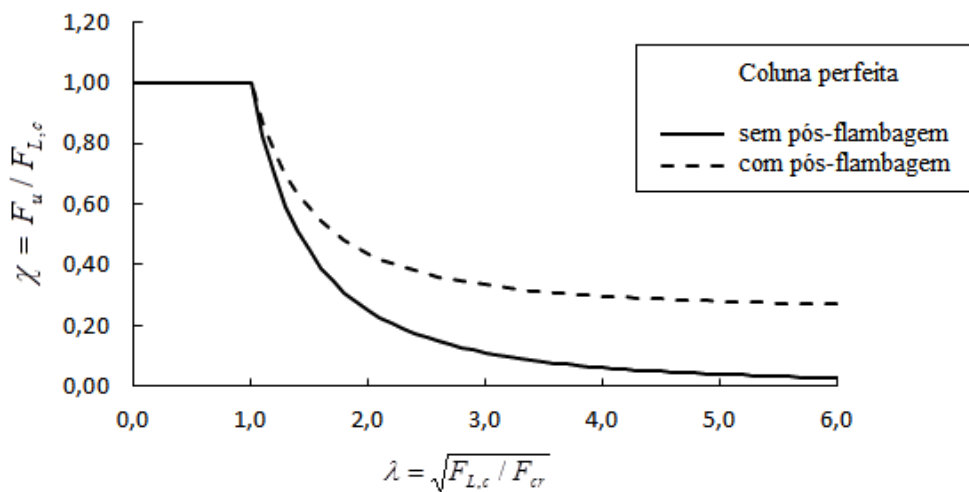


Figura 3.9 - Curvas de resistência da coluna perfeita.

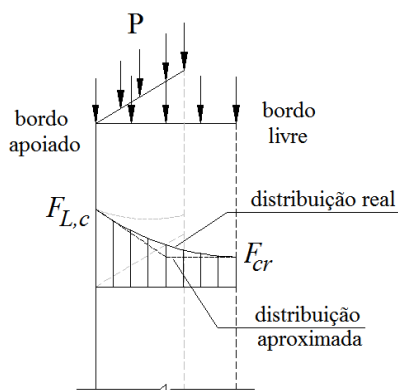


Figura 3.10 - Distribuição aproximada de tensões no modo de falha por flexo-torção.

3.3

Colunas Reais

As colunas reais apresentam imperfeições geométricas (*e.g.* falta de retilineidade) e dos materiais (*e.g.* desalinhamento e má distribuição das fibras, alterando centro geométrico). Assim, quando submetidas às forças de compressão, surgem efeitos de segunda ordem (momentos de segunda ordem) que amplificam as deflexões laterais e produzem momentos fletores adicionais, com consequente redução de resistência quando comparadas às colunas perfeitas. Um comportamento análogo é observado em placas reais (CARDOSO, 2014). Colunas reais compostas por placas reais apresentam efeitos de segunda ordem tanto na coluna quanto nas placas constituintes, produzindo acoplamento entre os dois efeitos e reduzindo a resistência final da peça. A falha pode ser caracterizada quando o estado de tensões em um determinado ponto da estrutura supera a envoltória de resistência para o referido estado.

CARDOSO (2014) estudou os modos de falha esperados em colunas reais em função das esbeltezes relativas de placa e coluna. O problema de uma cantoneira de abas iguais pode ser estudado de maneira semelhante, fazendo-se analogia entre os modos de flambagem por flexo-torção de uma cantoneira e local de uma placa, levando-se em consideração observação anterior de que o modo flexo-torsional de uma cantoneira pultrudada de PRFV é caracterizado principalmente pela rotação das paredes em torno do centro de cisalhamento. Assim, a Tabela 3.2 apresenta os modos de falha esperados de acordo com a

combinação dos índices de esbeltez à flexo-torção e à flexão, respectivamente definidos como:

$$\lambda_{FT} = \sqrt{\frac{F_{L,c}}{F_{cr,FT}}} \quad (3.9)$$

$$\lambda_F = \sqrt{\frac{F_{PP}}{F_{cr,F}}} = \sqrt{\frac{\min\{F_{L,c}, F_{cr,FT}\}}{F_{cr,F}}} \quad (3.10)$$

onde $F_{L,c}$ é a resistência ao esmagamento do material, definida em 3.2.1; $F_{cr,FT}$ é a tensão crítica de flambagem à flexo-torção; $F_{cr,F}$ é a tensão crítica de flambagem à flexão e F_{PP} é a resistência à compressão da placa perfeita, definida como o menor entre $F_{L,c}$ e $F_{cr,FT}$.

Tabela 3.2 - Classificação de colunas e placas e os modos de falha esperados (adaptada de CARDOSO, 2014).

$\lambda_{FT} \backslash \lambda_F$	Curta ($\lambda_F \leq 0,7$)	Intermediária ($0,7 < \lambda_F < 1,3$)	Longa ($\lambda_F \geq 1,3$)
Compacta ($\lambda_{FT} \leq 0,7$)	Esmagamento	Interação entre esmagamento e flambagem por flexão	Flambagem por Flexão
Intermediária ($0,7 < \lambda_{FT} < 1,3$)	Interação entre esmagamento e flambagem por flexo-torção	Interação entre esmagamento e flambagem por flexo-torção e flexão	Flambagem por Flexão
Esbelta ($\lambda_{FT} \geq 1,3$)	Flambagem por Flexo-torção	Flambagem por Flexo-torção e flexão	Flambagem por Flexão

Nesse trabalho serão estudadas apenas as cantoneiras curtas, não sendo esperada influência significativa do modo de flexão.

3.3.1

Curva de Resistência e a Pós-Flambagem

Os primeiros estudos para o desenvolvimento de uma curva de resistência para colunas pultrudadas em PRFV foram realizados por BARBERO e TOMBLIN (1994), sendo proposta uma equação empírica para a resistência última F_u de colunas de perfil I baseada na interação dos modos de flambagem

locais e globais. Desde então diversos autores contribuíram para melhores aproximações das curvas de resistência, através de resultados experimentais e numéricos ou então, por meio de expressões alternativas provenientes dos estudos de comportamentos de perfis I e tubular circular ou quadrado (BARBERO e DE VIVO, 1999, SEAGATITH e SRIBOONLUE, 1999, PUENTE *et al.*, 2006, CARDOSO *et al.*, 2014b).

Colunas formadas por perfis cantoneiras apresentam comportamentos peculiares à instabilidade de seções monossimétricas, conforme previamente expostos. Entretanto, apenas ZUREICK e STEFFEN (2000) se propuseram a desenvolver uma expressão para resistência de projeto de cantoneiras, na qual deve ser tomado o menor valor dentre os estados limites (flambagem por flexão, flexo-torção ou esmagamento do material) multiplicado por um fator de resistência ϕ ($\phi = 0,65$ para instabilidade por flexão, $\phi = 0,85$ para instabilidade por flexo-torção e $\phi = 0,50$ para a resistência ao esmagamento do material).

Assumindo que, em cantoneiras, o modo de flambagem por flexo-torção pode ser aproximado por uma rotação da seção transversal em torno do centro de cisalhamento ($F_{cr,FT} \sim F_{cr,T}$), as placas constituintes podem ser analisadas através da teoria clássica de placas, onde são consideradas as seguintes hipóteses: (i) deformações fora do plano maiores que a espessura e desprezado o cisalhamento transversal; (ii) não há resistência pós-flambagem; (iii) comportamento elástico-linear do material; (iv) espessura e propriedades mecânicas são uniformes em toda a placa; (v) tensões residuais são desprezíveis e (vi) as deflexões iniciais são descritas como funções senoidais. Assim, de forma análoga ao modelo analítico apresentado por CARDOSO (2014), a equação de resistência normalizada de flexo-torção, χ_{FT} , é dada por:

$$\chi_{FT} = \frac{F_{u,FT}}{F_{L,c}} = \frac{1 + \alpha_{FT} + \lambda_{FT}^2 - \sqrt{(1 + \alpha_{FT} + \lambda_{FT}^2)^2 - 4\lambda_{FT}^2}}{2\lambda_{FT}^2} \quad (3.11)$$

onde $F_{u,FT}$ é a tensão última associada ao modo por flexo-torção; $F_{L,c}$ é a resistência ao esmagamento do material, definido em 3.2.1; λ_{FT} é a esbeltez da placa relativa ao modo por flexo-torção, dada por $\lambda_{FT} = (F_{L,c}/F_{cr,FT})^{1/2}$ e α_{FT} é o fator de imperfeição que leva em consideração as imperfeições iniciais, geometria

da parede e rigidez das placas que compõem a seção. Quando $\alpha_{FT} = 0$, o problema é simplificado à condição de cantoneira curta perfeita.

CARDOSO (2014) mostra, através da Figura 3.11, a redução da resistência em até 40% quando comparadas curvas de resistência de placas perfeitas às tolerâncias na amplitude das placas recomendadas pelos fabricantes, sendo desconsiderada a redistribuição de tensões do comportamento pós-crítico. Os resultados experimentais obtidos no Capítulo 4 apontam, no entanto, que essa reserva de resistência é importante e deve ser considerada na proposição de uma curva de resistência.

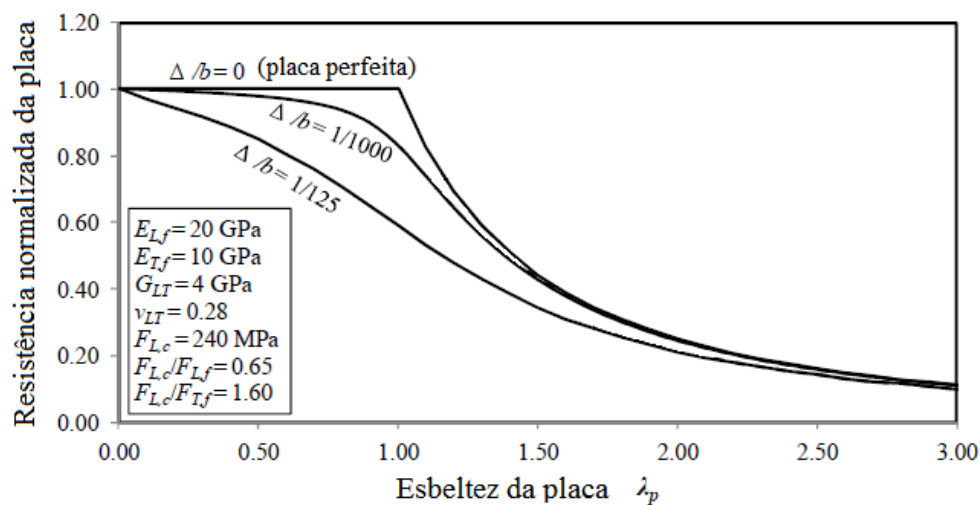


Figura 3.11 - Resistência normalizada da placa x esbeltez da placa (adaptado de CARDOSO, 2014).

4

Programa Experimental

A campanha experimental realizada teve como objetivo principal a análise da resistência e comportamento de colunas relativamente curtas formadas por perfis cantoneiras de polímero reforçado com fibra de vidro submetidas à compressão centrada e engastadas nas extremidades. O programa foi dividido em duas etapas:

- Na primeira etapa foram realizados ensaios de caracterização dos materiais para obtenção dos módulos de elasticidade e cisalhamento e das resistências, além do ensaio para determinação da fração volumétrica de fibras.

- Na segunda etapa, cantoneiras com dimensões diferentes e comprimentos variados foram submetidas à compressão centrada até o colapso, observando-se seu comportamento no decorrer do ensaio.

Todos os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-Rio, com exceção do ensaio para determinação do percentual de fibras, que foi realizado no Laboratório de Estruturas e Materiais Professor Lobo Carneiro (LABEST) da COPPE/UFRJ.

4.1

Considerações Iniciais

Os experimentos foram realizados para dois tipos de cantoneiras de abas iguais com seções transversais de dimensões $b \times t$ de 50,8 x 4,76 mm (L2 – 2 x 3/16 pol.) e 101,6 x 6,35 mm (L4 – 4 x 1/4 pol.), onde b é a largura da aba e t a espessura da parede, conforme Figura 4.1 (a) e (b). Os perfis L2 e L4 são constituídos respectivamente de matrizes poliméricas de poliéster e éster-vinílica reforçadas com fibra de vidro tipo *E-glass*.

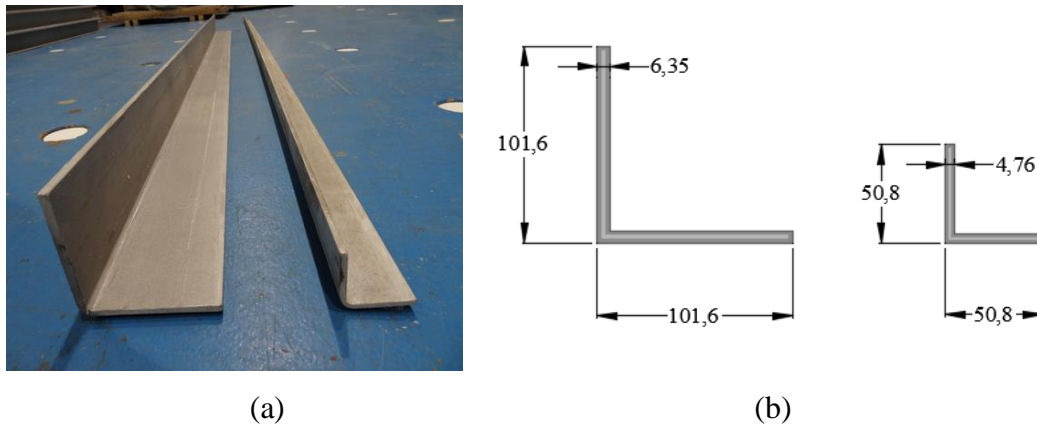


Figura 4.1 - (a) Perfis cantoneiras selecionados. (b) Seções transversais.

Uma lista com os ensaios realizados para determinação das propriedades mecânicas relevantes para a pesquisa é apresentada a seguir.

- Ensaio de tração longitudinal:
 - $F_{L,t}$ – resistência à tração longitudinal
 - $E_{L,t}$ – módulo de elasticidade à tração longitudinal
- Ensaio de compressão longitudinal:
 - $F_{L,c}$ – resistência à compressão longitudinal
 - $E_{L,c}$ – módulo de elasticidade à compressão longitudinal
- Ensaio de flexão longitudinal:
 - $E_{L,f}$ – módulo de elasticidade à flexão longitudinal
- Ensaio de flexão transversal:
 - $E_{T,f}$ – módulo de elasticidade à flexão transversal
- Ensaio de torção:
 - G_{LT} – módulo de cisalhamento no plano
- Percentual de fibras:
 - V_f – percentual de fibras por volume

Para caracterização dos materiais, procurou-se seguir os procedimentos recomendados pelas normas internacionais (e.g. ASTM e ISO). No entanto, alterações nos métodos previstos são normalmente necessárias tendo em vista os equipamentos e acessórios disponíveis, geometria e dimensões da seção transversal do perfil pultrudado (CARDOSO *et al*, 2014c).

4.2

Caracterização dos Materiais

4.2.1

Preparação das Amostras

Os corpos de prova foram obtidos a partir da extração do material das abas das cantoneiras e corte com auxílio de uma serra de fita de bancada e uma furadeira fresadora. Um croqui com a geometria dos corpos de prova confeccionados para os diferentes ensaios é apresentado na Figura 4.2. Conforme recomendação geral das normas ASTM, foi desprezada uma largura de 10 mm junto às bordas das cantoneiras.

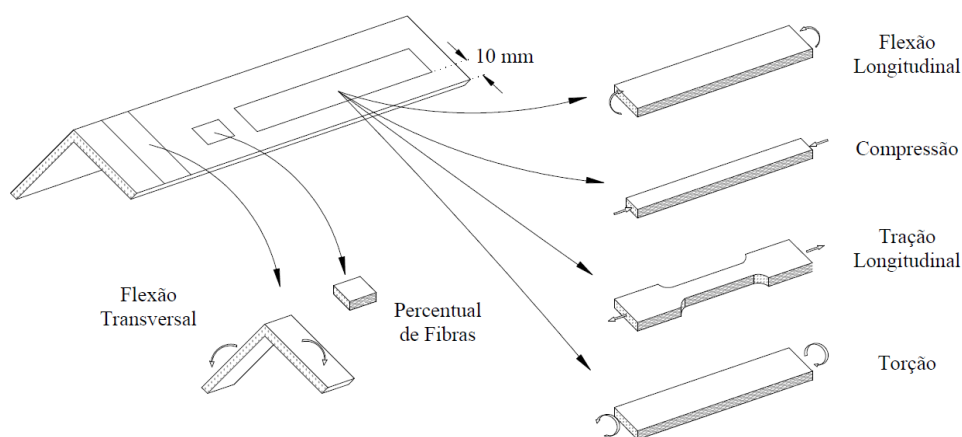


Figura 4.2 - Geometria dos corpos de prova de acordo com o ensaio a ser realizado.

Após lixados, limpos e devidamente identificados, foram marcados os eixos de cada espécime e medidas as suas dimensões com auxílio de um paquímetro. A identificação dos corpos de prova se deu através da combinação de letras e números conforme mostrado na Figura 4.3. Os dois primeiros caracteres referem-se ao perfil de onde foi retirada a amostra, ou seja, L2 para a cantoneira menor e L4 para a maior. As duas letras subsequentes indicam a matriz polimérica utilizada: PO para resina poliéster e ES para resina éster-vinílica. O tipo de ensaio a que se destina o corpo de prova é identificado pelas duas letras que seguem: TR para tração longitudinal, CO para compressão longitudinal, FL para flexão

longitudinal, FT para flexão transversal e TO para torção. Por fim, os dois últimos algarismos indicam o número do corpo de prova. A Figura 4.4 apresenta os corpos de prova dos ensaios à tração, posicionados mais a frente, e à flexão, ao fundo.



Figura 4.3 - Nomenclatura adotada para identificação dos corpos de prova.



Figura 4.4 - Corpos de prova para ensaios de tração e flexão.

4.2.2

Percentual de Fibras

Para determinação do percentual de fibra (V_f), foram seguidas as recomendações da norma EN ISO 1172:1998. Para cada tipo de cantoneira, foram extraídas quatro amostras com dimensões aproximadas de 20 mm x 20mm. As amostras foram devidamente medidas, lixadas, limpadas com álcool e pesadas individualmente numa balança de 0,1 mg de precisão. Os mesmos procedimentos de limpeza e pesagem foram feitos com os cadinhos de porcelana. Os cadinhos foram numerados para possibilitar a identificação das amostras após a queima.

Transportados por meio de um dessecador, os cadinhos contendo as amostras foram encaminhados para um forno mufla, onde foi realizada a queima a

uma temperatura de até 600 °C por um período de três horas. A Figura 4.5 mostra as etapas iniciais do ensaio.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.5 - Procedimentos iniciais do ensaio de queima: (a) pesagem do cadinho, (b) cadinhos contendo as amostras, (c) dessecador utilizado e (d) cadinhos dispostos no interior da mufla.

Após a queima, foi observado que as amostras apenas apresentavam as camadas referentes às fibras contínuas (*roving*) e mantas (*continuous strand mat*). Com auxílio de uma pinça, as mantas foram retiradas e os cadinhos, contendo somente as fibras contínuas, foram pesados novamente (Figura 4.6).

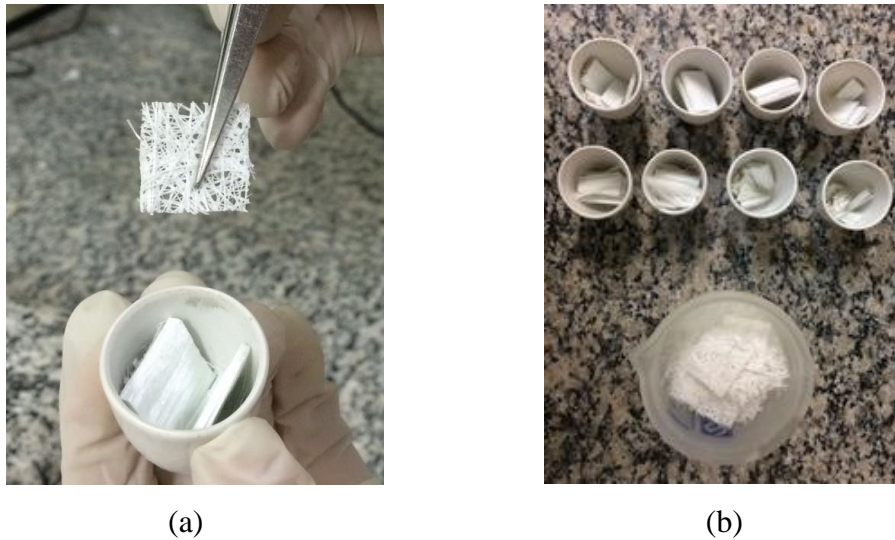


Figura 4.6 - Procedimentos após a queima. (a) Separação da manta com auxílio de pinça. (b) Fibras separadas. Acima: fibras contínuas nos cadinhos. Abaixo: mantas num frasco único.

O percentual de fibra por massa (às vezes também referido como fração de peso) e a fração volumétrica resultante são dadas pelas Equações 4.1 e 4.2, respectivamente.

$$M_{\text{vidro}} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (4.1)$$

$$V_{\text{vidro}} = \frac{m_3 - m_1}{\rho_{\text{vidro}} \times V_0} \times 100 \quad (4.2)$$

onde:

m_1 é a massa do cadinho,

m_2 é a massa inicial do cadinho com a amostra,

m_3 é a massa após a queima do cadinho com a fibra contínua (*roving*),

ρ_{vidro} é o peso específico da fibra de vidro *E-glass* (considerado 2,57 g/cm³) e

V_0 é o volume inicial da amostra.

A Tabela 4.1 apresenta os resultados de todas as amostras do ensaio. São apresentados percentuais tanto em massa quanto por volume.

Tabela 4.1 - Resultados do ensaio para determinação do percentual de fibras (V_f).

Amostra	V_0 (cm ³)	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)	Percentual de fibras (%)	
					por Massa	por Volume
L4-01	2,82	11,3491	15,6288	13,7819	56,85	33,59
L4-02	2,65	12,0078	16,1113	14,3436	56,92	34,36
L4-03	2,83	11,1493	15,5366	13,6096	56,08	33,80
L4-04	2,51	11,3162	15,2137	13,5042	56,14	33,92
Cantoneiras L4	Média				56,50	33,92
	Desvio Padrão				0,39	0,28
	Coefficiente de Variação				0,69	0,82
L2-01	2,04	11,8947	15,1227	13,2512	42,02	25,81
L2-02	1,93	11,2360	14,3839	12,6355	44,46	28,18
L2-03	1,92	11,7376	14,9617	13,2920	48,21	31,43
L2-04	1,99	11,9591	15,2490	13,4900	46,53	29,97
Cantoneiras L2	Média				45,31	28,85
	Desvio Padrão				2,32	2,10
	Coefficiente de Variação				5,11	7,28

Os percentuais de fibras encontrados nas amostras da cantoneira maior (L4) apresentou variações muito sutis. Já cantoneira menor (L2), embora tenha apresentado percentuais um pouco mais divergentes, apresentou frações volumétricas consistentes com as reportadas na literatura.

Segundo Ye *et al.*, (1995), embora o método de queima seja um modo simples e eficaz para determinação da fração volumétrica de pultrudados, em diversos casos os materiais de enchimentos acarretam em limitações para obtenção deste percentual. Assim, é possível que, nos valores da massa após a queima do cadinho com a fibra contínua (m_3), uma pequena porção seja referente aos resíduos resultantes da resina e/ou do véu (visualmente imperceptíveis) que,

por serem bastante inferiores aos demais componentes, foram consideradas junto à massa da fibra.

4.2.3

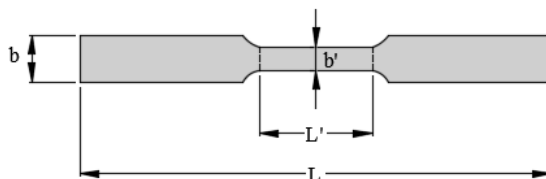
Resistência e Módulo de Elasticidade à Tração Longitudinal

4.2.3.1

Corpos de Prova

Foram preparados cinco corpos de prova para cada tipo de perfil, cujas dimensões são apresentadas na Tabela 4.2, conforme estabelecido pela ASTM D638. A escolha por esta geometria foi feita após resultados preliminares com corpos de prova retangulares terem apresentado ruptura junto à garra.

Tabela 4.2 - Dimensões dos corpos de prova do ensaio de tração longitudinal.



Parâmetros	Dimensões					
	L2			L4		
	Média (mm)	DP (mm)	CV (%)	Média (mm)	DP (mm)	CV (%)
Espessura t	4,71	0,03	0,61	6,18	0,12	1,96
Largura b	25,68	0,20	0,76	25,48	0,19	0,75
Largura b'	12,68	0,44	3,49	12,28	0,23	1,88
Comprimento L	250,08	0,02	0,01	250,04	0,04	0,01
Comprimento L'	60,41	0,09	0,14	60,93	1,52	2,50

4.2.3.2

Procedimento Experimental

O ensaio para determinação da resistência e módulo de elasticidade à tração longitudinal foi conduzido em equipamento de ensaios universal de ensaios

mecânicos MTS 311 (*Material Test System Corporation*) com a utilização de um extensômetro do tipo *clip gage* para medição do alongamento relativo (deformação). O corpo de prova foi alinhado com auxílio de um nível a laser e fixado ao equipamento pelas garras com uma pressão de 1000 psi de forma a evitar o escorregamento. Foram utilizadas placas rígidas coladas ao corpo de prova na região das garras para evitar esmagamento e falha localizada. As etapas iniciais para posicionamento do corpo de prova estão ilustradas na Figura 4.7. O ensaio foi então realizado a uma taxa de carregamento de 0,5 mm/min, após testes preliminares à taxa de 5 mm/min definida por norma conduzirem a ruptura sem tempo suficiente para aquisição precisa dos dados.



(a)



(b)

Figura 4.7 - Posicionamento do corpo de prova. (a) Extensômetro do tipo *clip gage*. (b) Utilização de nível a laser.

4.2.3.3

Resultado dos Ensaios de Resistência e Módulo de Elasticidade à Tração Longitudinal

A Figura 4.8 mostra as falhas ocorridas no ensaio no momento da ruptura. Em geral, os corpos de prova apresentaram ruptura à tração em algumas camadas, seguida por delaminação, conforme mostrado na Figura 4.8 (a). Quatro corpos de prova apresentaram ruptura no trecho central, como mostrado na Figura 4.8 (b),

de forma esperada. Embora as demais amostras tenham apresentado rupturas similares a Figura 4.8 (c), ou seja, junto à garra, os resultados obtidos foram compatíveis com os reportados por outros autores para materiais do mesmo fabricante (VIEIRA, 2008 e LANDESMANN *et al.*, 2015). Desta forma, todos os resultados foram considerados válidos para a caracterização do material quanto à resistência e módulo de elasticidade na tração longitudinal.

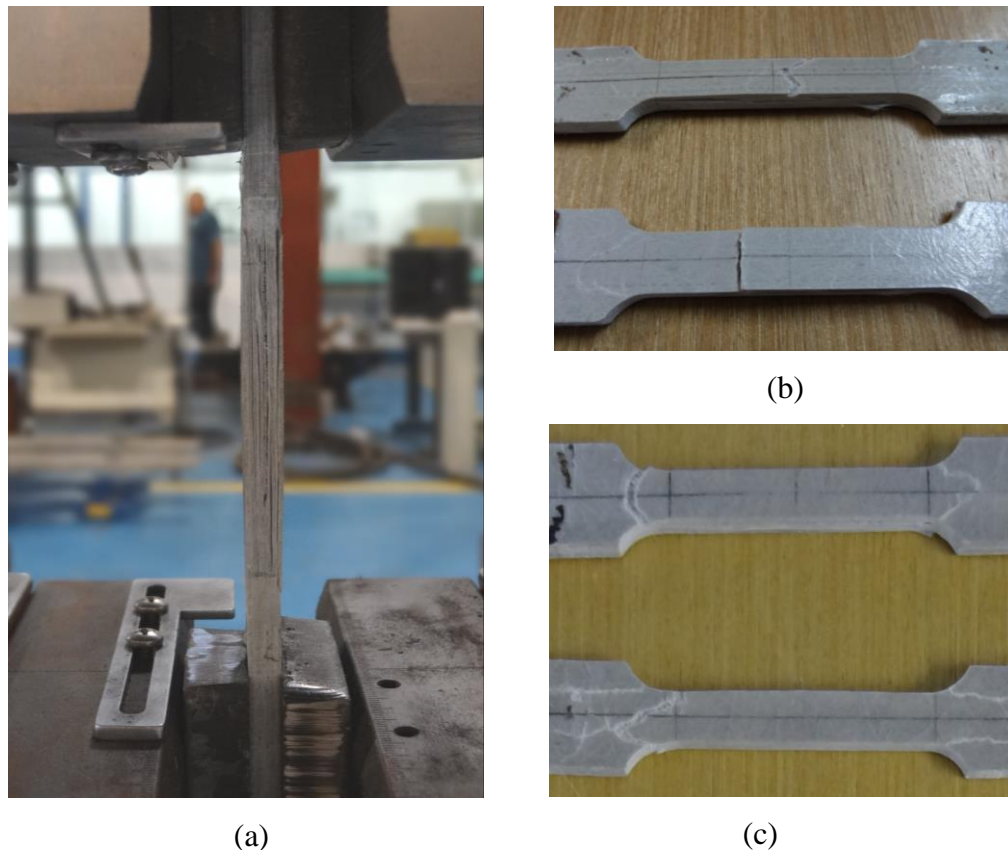


Figura 4.8 - Modos de ruptura: (a) delaminação, (b) ruptura na seção mediana e (c) ruptura próximo às garras de fixação.

A resistência à tração longitudinal $F_{L,t}$ é dada pela Equação 4.3:

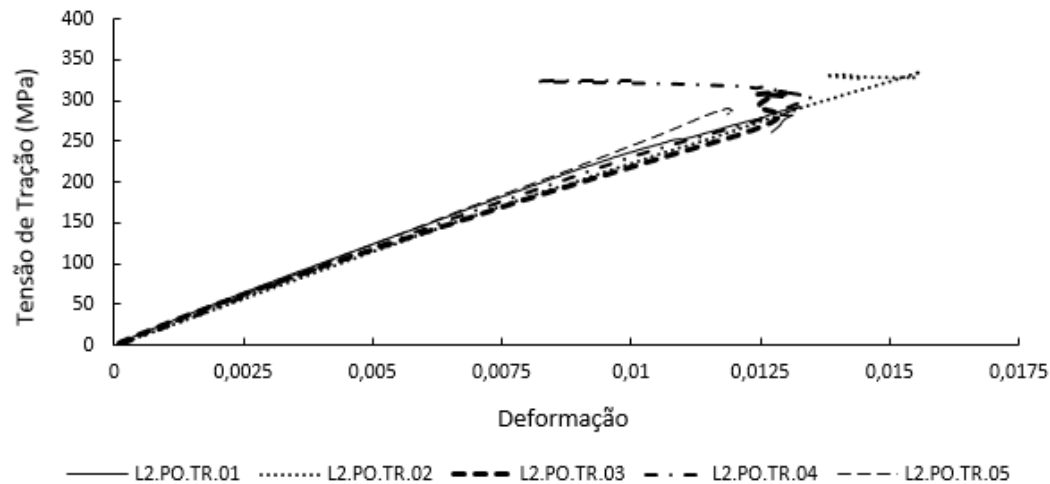
$$F_{L,t} = \frac{P}{A} \quad (4.3)$$

onde P é a força axial última aplicada e A é a área da seção transversal do corpo de prova previamente medida.

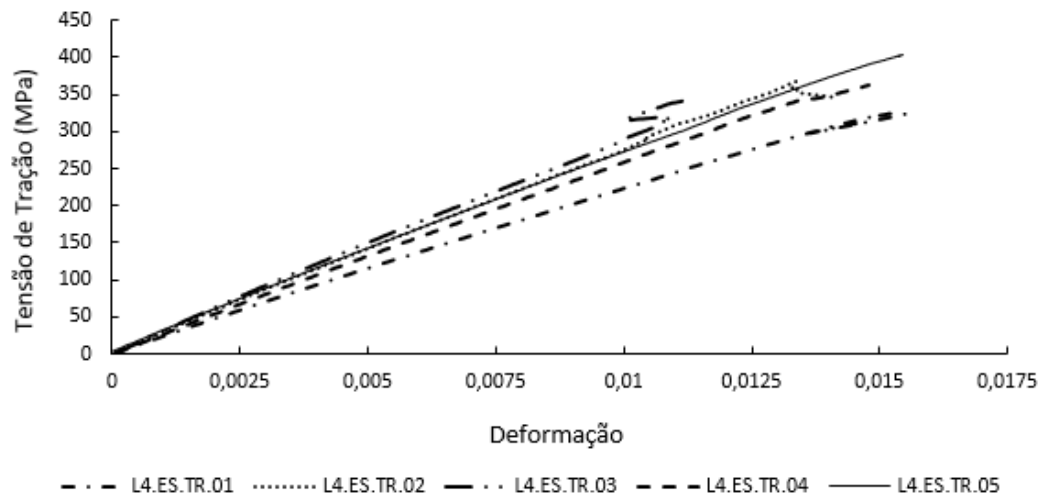
O módulo de elasticidade à tração longitudinal $E_{L,t}$, pode ser obtido através da porção linear inicial de cada uma das curvas tensão x deformação das Figura 4.9 a e b, sendo determinado pela Equação 4.4:

$$E_{L,t} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (4.4)$$

onde $\Delta\sigma$ corresponde à diferença de tensões no intervalo estudado e $\Delta\varepsilon$ à diferença das respectivas deformações, no intervalo aproximado entre $\varepsilon = 0,0005$ a $0,0025$.



(a)



(b)

Figura 4.9 - Gráficos Tensão x Deformação dos ensaios à tração longitudinal. (a) Cantoneira L2. (b) Cantoneira L4.

Dos gráficos tensão x deformação da Figura 4.9, é possível observar o comportamento predominantemente elástico linear dos materiais até o momento em que ocorre a ruptura. A Tabela 4.3 apresenta os valores médios de resistência e módulo de elasticidade à tração longitudinal obtidos nos ensaios.

Tabela 4.3 - Resistência e módulo de elasticidade à tração longitudinal.

Perfil	$F_{L,t}$			$E_{L,t}$		
	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média (GPa)	DP (GPa)	CV (%)
L2	311,68	19,23	6,17	24,56	0,90	3,67
L4	359,88	25,89	7,20	27,84	2,52	9,06

Onde:

DP: Desvio Padrão

CV: Coeficiente de Variação

4.2.4

Resistência e Módulo de Elasticidade à Compressão

Embora o método de ensaio proposto pela ASTM D695 não necessite do aparato mostrado na Figura 2.5 (a), a dificuldade na instrumentação, no alinhamento e paralelismo da amostra, cujas dimensões recomendadas o torna bastante reduzido, foi realizada, então, a caracterização das propriedades conforme a ASTM D6641.

4.2.4.1

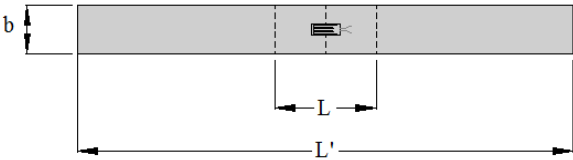
Corpos de Prova

A geometria dos corpos de prova é retangular conforme apresentado na Tabela 4.4. Seguindo as recomendações da ASTM D6641 (2009), foram preparados cinco corpos de prova para cada tipo de perfil e, então, coladas placas metálicas nas extremidades a fim de aumentar a área de ponta com a placa de extremidade e proteger o corpo de prova na região de contato com o aparato de ensaio, conforme mostrado nas Figura 4.10.

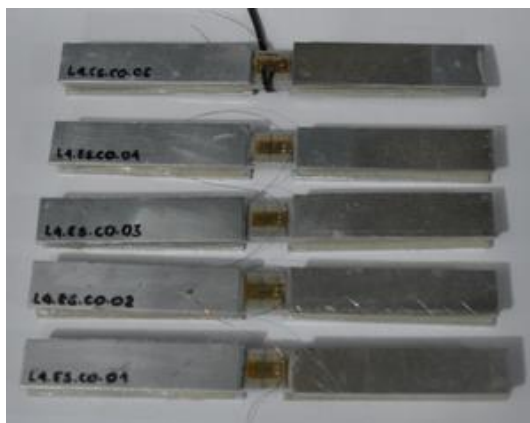
Na seção de interesse, no centro do corpo de prova, foi colado um extensômetro elétrico de resistência (*strain gage*) em uma das faces para aquisição das deformações específicas ao longo do ensaio. Dois extensômetros foram

colados em faces opostas em uma das amostras de cada tipo de perfil para validação do ensaio quanto à não ocorrência de flambagem.

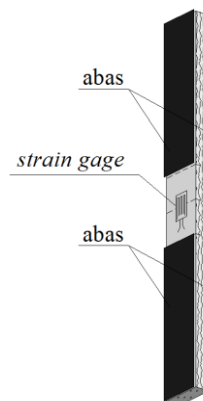
Tabela 4.4 - Dimensões dos corpos de prova do ensaio de compressão longitudinal.



Parâmetros	Dimensões					
	L2			L4		
	Média (mm)	DP (mm)	CV (%)	Média (mm)	DP (mm)	CV (%)
Espessura t	4,66	0,04	1,84	6,20	0,23	3,51
Largura b	12,17	0,22	0,76	12,32	0,43	3,79
Comprimento L	15,54	0,27	0,18	15,56	0,25	0,16
Comprimento L'	155,53	0,27	1,72	155,54	0,25	1,62



(a)



(b)

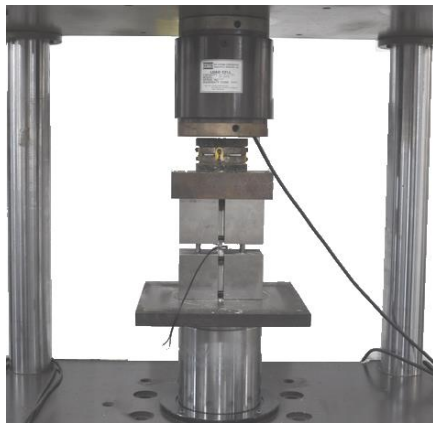
Figura 4.10 - (a) Corpos de prova para ensaio de compressão. (b) Representação do corpo de prova.

4.2.4.2

Procedimento Experimental

Cada corpo de prova foi devidamente fixado ao aparato de ensaio e o conjunto foi então posicionado de maneira centralizada em uma máquina universal de ensaios mecânicos MTS 810, conforme Figura 4.11, onde foi

submetido a compressão sob uma taxa de carregamento de 1,3 mm/min. Os ensaios foram realizados até a ruptura das amostras.



(a)



(b)

Figura 4.11 - (a) Ensaio de compressão – ASTM D6641. (b) Imagem ampliada do ensaio.

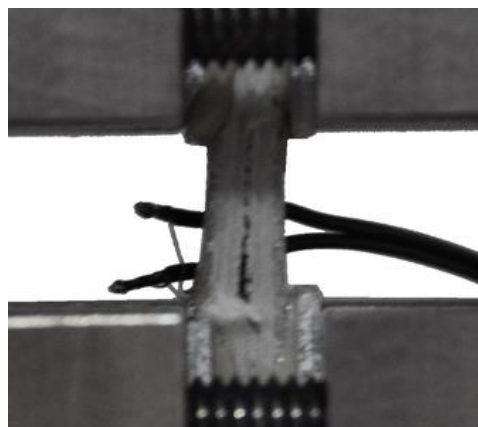
4.2.4.3

Resultado dos Ensaio de Resistência e Módulo de Elasticidade à Compressão Axial

Todos os corpos de prova apresentaram modos de falha considerados aceitáveis segundo a ASTM D6641 (2009). As rupturas das amostras L2.PO.CO.04 e L4.ES.CO.02 são apresentadas na Figura 4.12 - a e b, respectivamente.



(a)

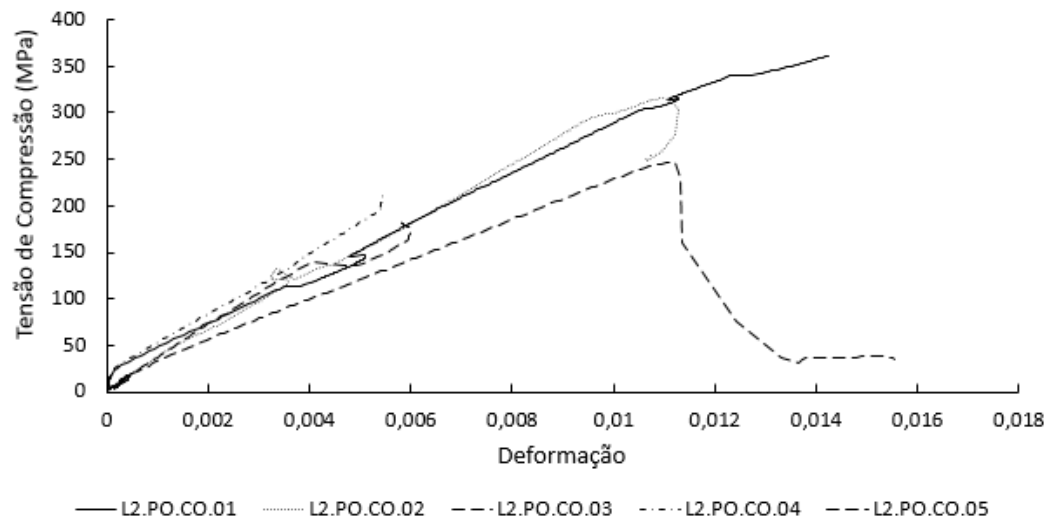


(b)

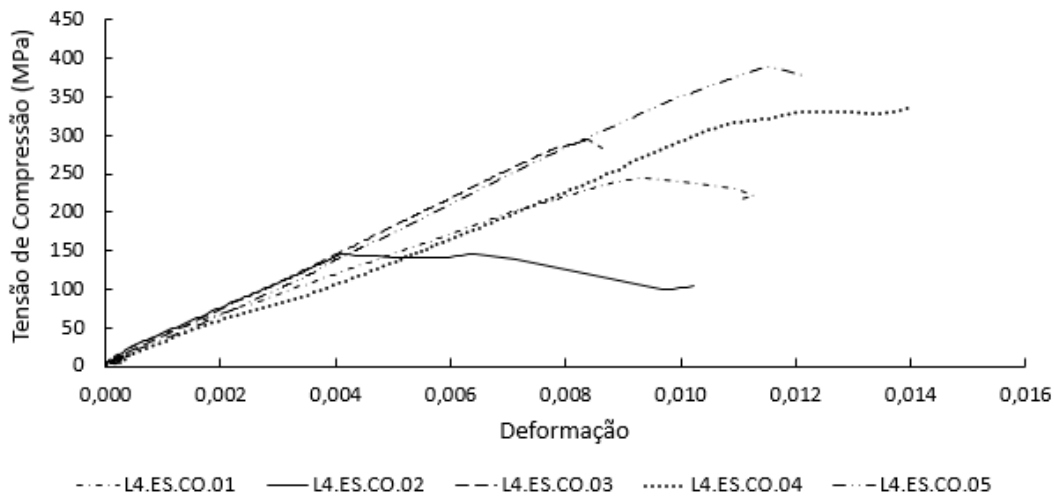
Figura 4.12 - Ruptura das amostras (a) L2.PO.CO.04 e (b) L4.ES.CO.02.

A resistência e o módulo de elasticidade à compressão longitudinal, $E_{L,c}$ e $F_{L,c}$, respectivamente, são obtidos de forma análoga às equações 4.3 e 4.4.

A Figura 4.13 - a e b, apresenta os gráficos tensão x deformação das amostras.



(a)



(b)

Figura 4.13 - Gráficos Tensão x Deformação dos ensaios à compressão longitudinal. (a) Cantoneira L2. (b) Cantoneira L4.

A Tabela 4.5 apresenta os valores médios de resistência e módulo de elasticidade à compressão longitudinal obtidos nos ensaios.

Tabela 4.5 - Resistência e módulo de elasticidade à compressão longitudinal.

Perfil	$F_{L,c}$			$E_{L,c}$		
	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média (GPa)	DP (GPa)	CV (%)
L2	289,98	54,28	18,72	28,67	3,90	13,61
L4	282,54	83,51	29,56	30,42	4,70	15,46

Onde:

DP: Desvio Padrão

CV: Coeficiente de Variação

Os elevados coeficientes de variação encontrados podem ser associados à presença de vazios, bem como à distribuição heterogênea das fibras na seção transversal dos perfis (BANK *et al.*, 1995).

Foram consideradas válidas as leituras obtidas nos ensaios de compressão uma vez analisadas as amostras instrumentadas com dois extensômetros em faces opostas. A Figura 4.14 mostra as deformações medidas nas faces da amostra L4.ES.CO.05. Há um afastamento inicial entre essas curvas cujo percentual de flexão B_y , onde $B_y = 100(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ (ASTM D6641, 2009), chega a 33%. Entretanto após as deformações iniciais, o percentual de flexão permanece dentro do limite de 10%, não caracterizando ruptura por flambagem.

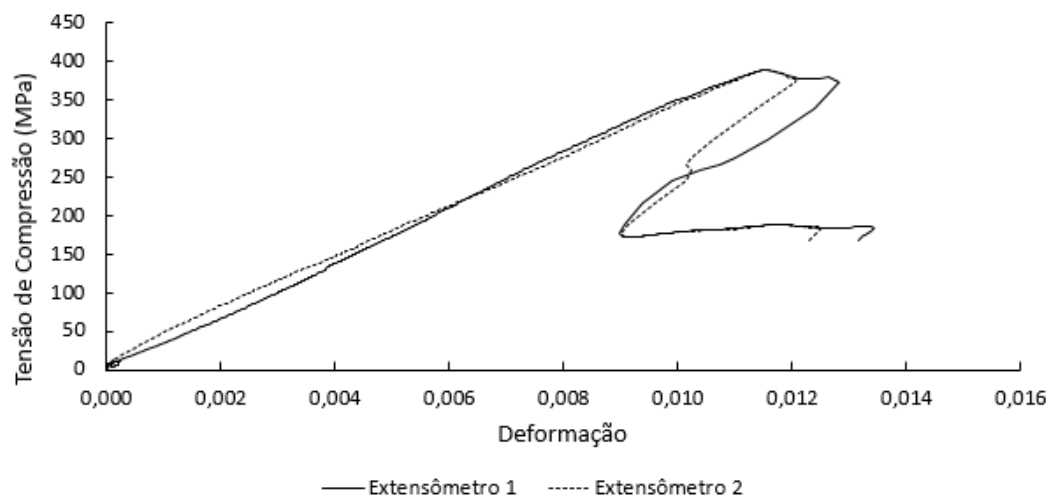


Figura 4.14 - Gráfico Tensão x Deformação do ensaio à compressão longitudinal da amostra L4.ES.CO.05.

4.2.5

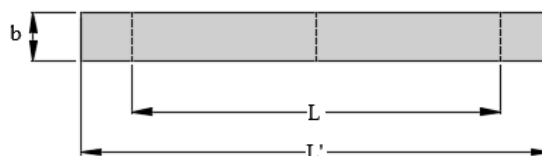
Módulo de Elasticidade à Flexão Longitudinal

4.2.5.1

Corpos de Prova

Foram preparados cinco corpos de prova para cada cantoneira, cujas dimensões são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Dimensões dos corpos de prova do ensaio à flexão longitudinal.



Parâmetros	Dimensões					
	L2			L4		
	Média (mm)	DP (mm)	CV (%)	Média (mm)	DP (mm)	CV (%)
Espessura t	4,75	0,05	0,98	6,35	0,11	1,68
Largura b	25,53	0,34	1,34	25,44	0,27	1,05
Comprimento L'	250,04	0,04	0,01	250,02	0,02	0,01

Visando minimizar a influência dos esforços de cisalhamento, é recomendada a razão entre vão e espessura (L/t) de 16:1. Os corpos de prova das duas cantoneiras foram preparados com as mesmas larguras e comprimentos médios de 25 mm e 250 mm respectivamente, com o vão de ensaio (L) fixado em 200 mm.

4.2.5.2

Procedimento Experimental

Para determinação do módulo de elasticidade à flexão longitudinal dos perfis em análise foram seguidas as recomendações da ASTM D790 (2010).

Assim, o ensaio de flexão em três pontos consistiu na aplicação de carga a uma taxa de 2,00 mm/min no meio do vão de um corpo de prova biapoado. Para as medições das deflexões foi utilizado um relógio comparador, conforme mostrado na Figura 4.15, onde cada ciclo de uma volta equivale a 1mm de deslocamento vertical e, concomitantemente, foram registradas as respectivas forças. Todos os ensaios foram realizados para uma deflexão máxima de 10 mm, não levando os corpos de prova à ruptura.

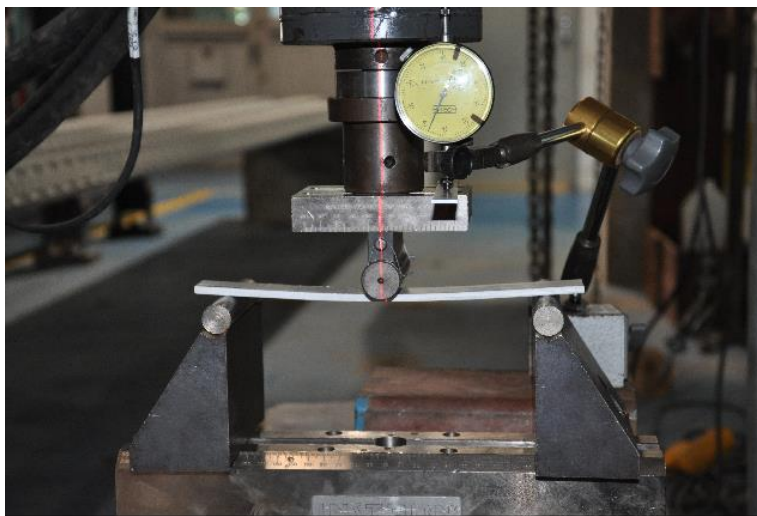


Figura 4.15 - Ensaio de flexão em três pontos.

4.2.5.3

Resultado dos Ensaio de Módulo de Elasticidade à Flexão

O módulo de elasticidade à flexão $E_{L,f}$ pode ser calculado de acordo com a Equação 4.5.

$$E_{L,f} = \frac{PL^3}{4\delta bt^3} \quad (4.5)$$

onde P é a carga aplicada, L é o vão de ensaio, b e t e são respectivamente, a largura e espessura do corpo de prova e δ é a deflexão no meio do vão.

As leituras no relógio comparador e das respectivas cargas forma tomadas a partir da deflexão $\delta = 1$ mm, a fim de evitar registros iniciais devido à possíveis acomodações do sistema. Assim, o módulo de elasticidade pode ser obtido como a

inclinação do gráfico $\Delta P \times 4\Delta\delta bt^3/L^3$. Na Figura 4.16 - a e b são apresentados os referidos gráficos para os ensaios realizados.

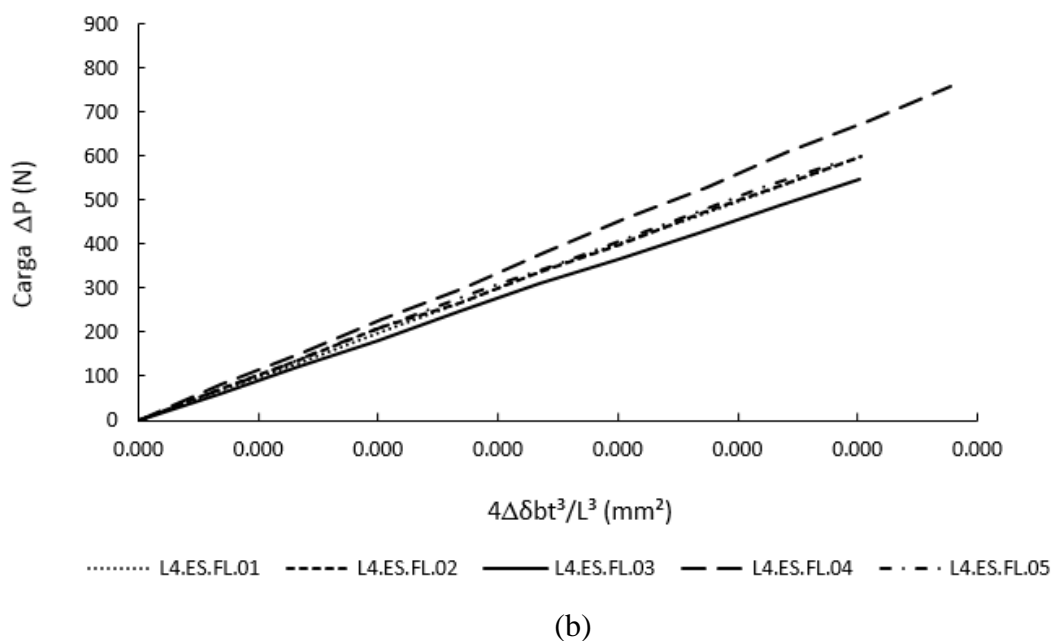
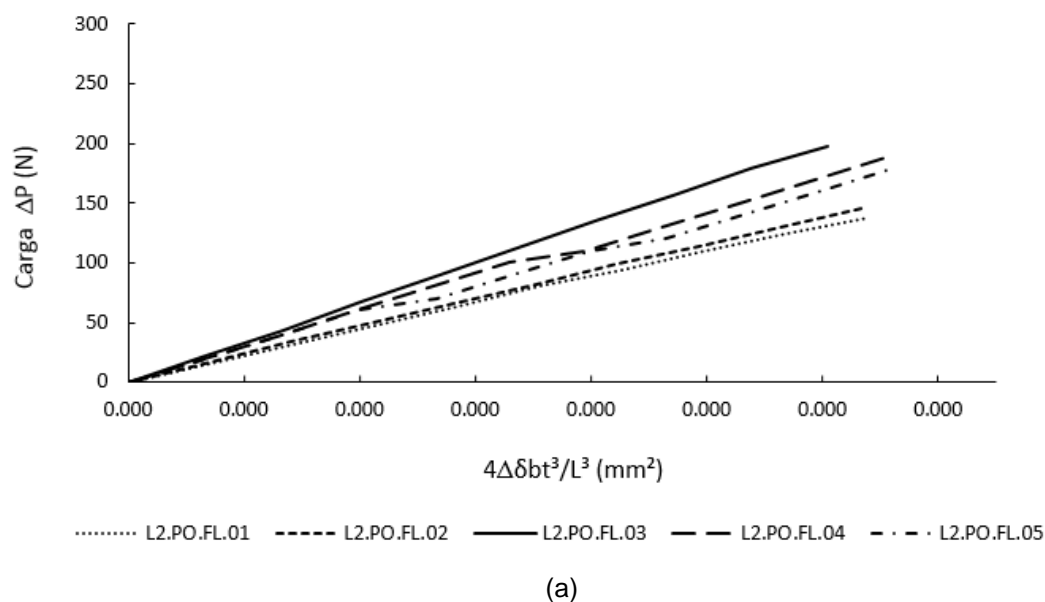


Figura 4.16 - Gráficos $\Delta P \times 4\delta bt^3/L^3$ dos ensaios à flexão. (a) Cantoneira L2. (b) Cantoneira L4.

Analisando as curvas de todas as amostras, observa-se um comportamento inicial linear elástico cujas tangentes referem-se ao módulo de elasticidade à flexão. A Tabela 4.7 mostra os valores médios dos módulos de elasticidade à flexão das duas cantoneiras.

Tabela 4.7 - Módulo de elasticidade à flexão longitudinal ($E_{L, i}$).

Perfil	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
L2	13,22	2,03	15,37
L4	20,11	1,31	6,53

Observa-se que há uma variação considerável dos resultados apresentados pela cantoneira menor (L2). É possível que esta variação esteja associada a pequenos desvios na posição dos fios de fibras contínuas (*roving*), cujas propriedades influenciam de maneira importante o módulo de elasticidade do compósito. Mesmo desvios mínimos podem ser significativos diante da pequena espessura do corpo de prova.

4.2.6

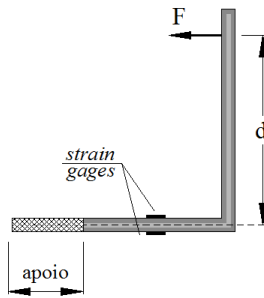
Módulo de Elasticidade à Flexão Transversal

4.2.6.1

Corpos de Prova

Para a determinação do módulo de elasticidade à flexão transversal, foram preparados três corpos de prova para cada cantoneira em estudo. Os perfis foram cortados transversalmente com cerca de 20 mm de largura e, então, colados dois extensômetros elétrico de resistência (*strain gages*) em faces opostas de uma das abas. As dimensões da seção na região do extensômetro, bem como a distância d do ponto de aplicação da carga ao eixo da aba oposta, são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Dimensões dos corpos de prova do ensaio à flexão transversal.



Parâmetros	Dimensões (mm)					
	L2			L4		
	Méd. (mm)	DP (mm)	CV (%)	Méd. (mm)	DP (mm)	CV (%)
Espessura t	5,03	0,69	13,67	6,02	0,39	6,43
Largura b	20,35	1,73	8,53	20,91	1,06	1,28
Distância d	45,86	1,22	2,66	95,94	1,28	1,34

A dimensão do trecho referente ao apoio variou conforme a largura da aba da cantoneira: 38,1 mm para a cantoneira maior e 15 mm para a cantoneira menor.

4.2.6.2

Procedimento Experimental

O ensaio de flexão transversal foi realizado com auxílio de quadro fixo da *Hi-Tech Scientific*, conforme mostrado na Figura 4.17. O corpo de prova é fixado pela extremidade de uma das abas, a mesma com extensômetros (*strain gages*) colados em faces opostas. Através de um grampo fixado na outra extremidade do corpo de prova, as cargas aplicadas no suporte são transferidas pelo sistema de roldana para o topo da aba livre. A excentricidade de carga resulta em momento fletor constante na região de leitura dos extensômetros, conforme esquematizado na Figura 4.18. É importante ressaltar que também há ocorrência de força normal na região instrumentada, mas cálculos preliminares mostraram que as deformações associadas são desprezíveis.

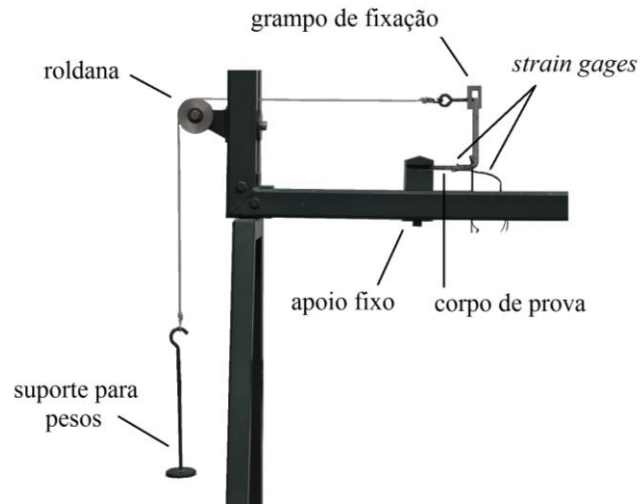


Figura 4.17 - Ensaio de flexão transversal.

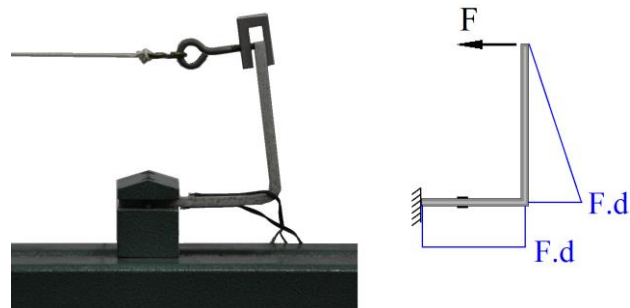


Figura 4.18 - Corpo de prova na configuração deformada e croqui do diagrama de momento fletor atuante.

4.2.6.3

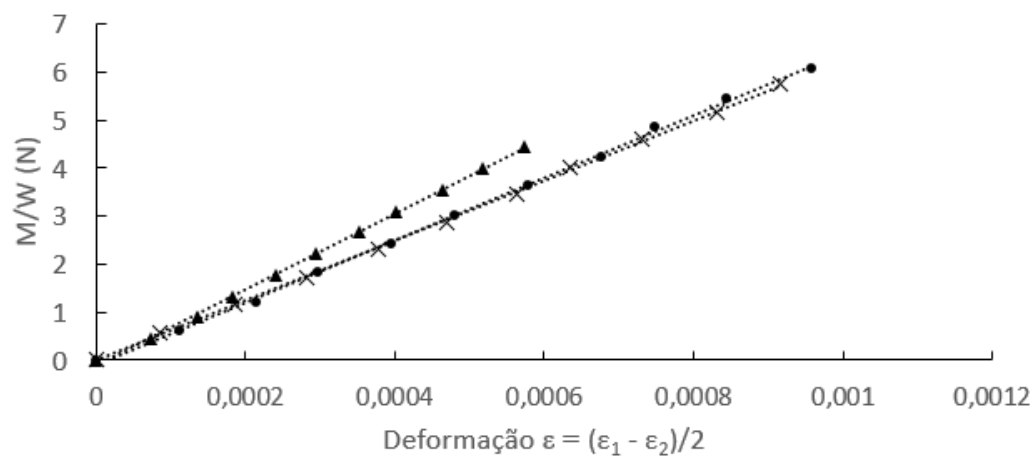
Resultado dos Ensaio de Módulo de Elasticidade à Flexão Transversal

O módulo de elasticidade à flexão transversal $E_{T,f}$ pode ser calculado de forma simplificada através da Equação 4.6.

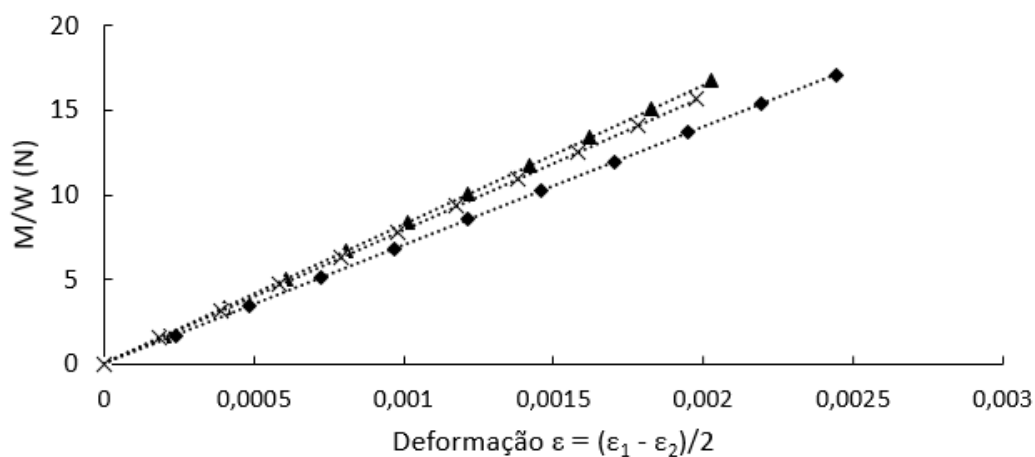
$$E_{T,f} = \frac{M}{W \cdot \varepsilon} \quad (4.6)$$

onde M é o momento fletor, W é o módulo elástico à flexão e $\varepsilon = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/2$ é a deformação, sendo ε_1 e ε_2 as deformações medidas nas faces superior e inferior da aba da cantoneira.

Assim, o módulo de elasticidade pode ser obtido através da inclinação dos gráficos $M/W \times (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/2$, apresentados na Figura 4.19.



(a)



(b)

Figura 4.19 - Gráficos $M/W \times (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/2$ dos ensaios à flexão transversal. (a) Cantoneira L2. (b) Cantoneira L4.

A Tabela 4.9 apresenta os valores obtidos para os módulos de elasticidade à flexão transversal das cantoneiras.

Tabela 4.9 - Módulo de elasticidade à flexão transversal ($E_{T,i}$).

Perfil	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
L2	6,88	0,71	10,39
L4	8,62	0,80	9,25

4.2.7

Módulo de Cisalhamento

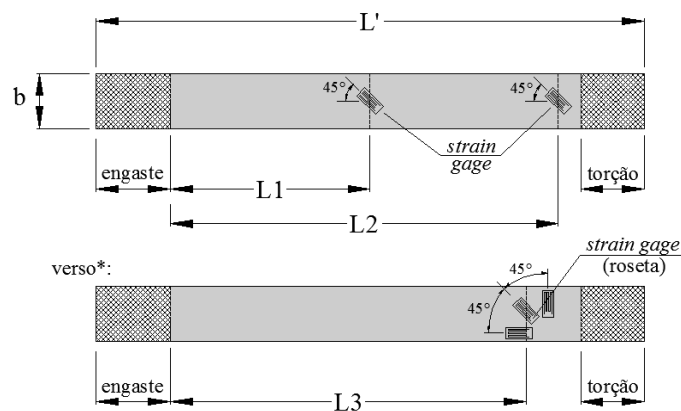
4.2.7.1

Corpos de Prova

Para determinação do módulo de cisalhamento, foram preparados dois corpos de prova da cantoneira L2 e três da cantoneira L4 com larguras b e comprimentos L' similares aos do ensaio de flexão. Com a utilização de extensômetros elétricos de resistência, outras medidas tornaram-se relevantes, tais como seus posicionamentos, conforme apresentado na Tabela 4.10.

Em todos os corpos de prova, foram utilizados dois *strain gages* na mesma face, um posicionado no centro do corpo de prova e outro cerca de 50 mm da extremidade. Em um corpo de prova de cada tipo de cantoneira foi adicionado um terceiro extensômetro (roseta de 45°) na face oposta para validação da direção da tensão principal.

Tabela 4.10 - Dimensões dos Corpos de Prova do Ensaio à Torção.



* somente para L2.PO.TO.01 e L4.ES.TO.01

Parâmetros	Dimensões (mm)					
	L2			L4		
	Méd. (mm)	DP (mm)	CV (%)	Méd. (mm)	DP (mm)	CV (%)
Espessura t	4,81	0,10	2,04	6,17	0,17	2,83
Largura b	25,78	0,11	0,43	25,41	0,22	0,86
Comprimento L'	250,05	0,06	0,02	250,05	0,00	0,00
Comprimento $L1$	87,93	1,45	1,65	86,95	0,47	0,54
Comprimento $L2$	163,35	1,19	0,73	162,10	0,62	0,38
Comprimento $L3^*$	159,18	-	-	158,35	-	-

* 1 amostra apenas de cada perfil

A dimensão do trecho destinado ao engaste foi limitada ao tamanho do dispositivo de apoio, de aproximadamente 38,1 m. O trecho destinado à torção, refere-se a garra de adaptação para aplicação do momento torsor no corpo de prova ensaiado e foi posicionado o mais próximo possível do *strain gage* da extremidade.

4.2.7.2

Procedimento Experimental

O ensaio de torção foi realizado através da adaptação do quadro da *Hi-Tech Scientific* mostrado na Figura 4.20. O aparelho de ensaio dispõe de uma cabeça de torção (mandril) em uma extremidade e um apoio fixo na outra. Foi necessária a elaboração de um adaptador para acoplar o corpo de prova na cabeça de torção. Assim, conforme são aplicadas as cargas nos suportes, o sistema de forças movimenta a engrenagem giratória e, através do binário, o corpo de prova é submetido a torção pura. A Figura 4.21 apresenta uma amostra deformada durante o ensaio de torção.

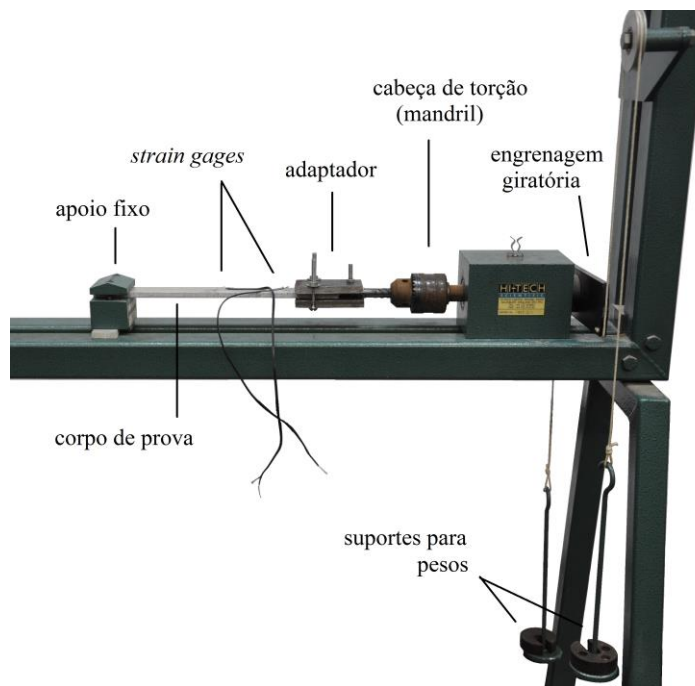


Figura 4.20 - Ensaio de Torção.

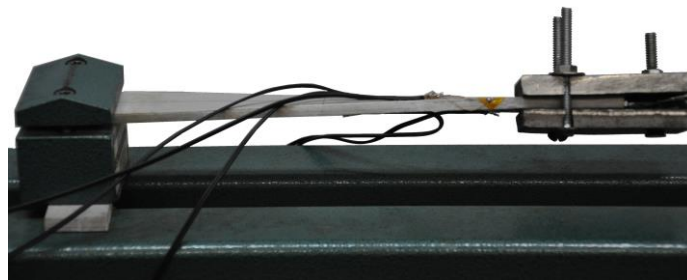


Figura 4.21 - Amostra deformada em ensaio de torção.

4.2.7.3

Resultado dos Ensaios de Módulo de Cisalhamento

Para um material ortotrópico de comportamento elástico linear submetido à torção pura, o módulo de cisalhamento G_{LT} pode ser calculado através da Equação 4.7 (TURVEY, 1998, YOOSEFINEJAD e HOGG, 1996):

$$G_{LT} = \frac{T.L}{\theta.J} \quad (4.7)$$

onde T é o momento torsor aplicado, L e θ são, respectivamente, o comprimento do trecho em torção e o ângulo de rotação e J é a constante de torção, dada por $J = bt^3\beta(c)$ onde $\beta(c)$ é uma função relacionada às seções retangulares ortotrópicas dada por (TURVEY,1998):

$$\beta = 32 \frac{c^2}{\pi^4} \sum_{k=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{k^4} \left(1 - \frac{2c}{k\pi} \tanh\left\{ \frac{k\pi}{2c} \right\} \right) \quad (4.8)$$

com

$$c = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{G_{TT}}{G_{LT}}} \quad (4.9)$$

onde G_{LT} é o módulo de cisalhamento no plano e G_{TT} é o módulo de cisalhamento perpendicular ao plano.

O ângulo de rotação ao longo do eixo é obtido através da expressão (TURVEY, 1998):

$$\Delta\theta = \frac{2\Delta L}{t} \varepsilon_{45} \quad (4.10)$$

onde L é a distância a partir do apoio até o ponto considerado, ε_{45} é a deformação específica à 45° e t é a espessura.

Substituindo a Eq. 4.10 em 4.7, é possível obter a equação do módulo de cisalhamento em função do momento torsor e da deformação específica:

$$G_{LT} = \frac{Tt}{2J\varepsilon_{45}} \quad (4.11))$$

Assim, o módulo de cisalhamento foi obtido através da curva $T \times 2J\varepsilon_{45}/t$ da Figura 4.22.

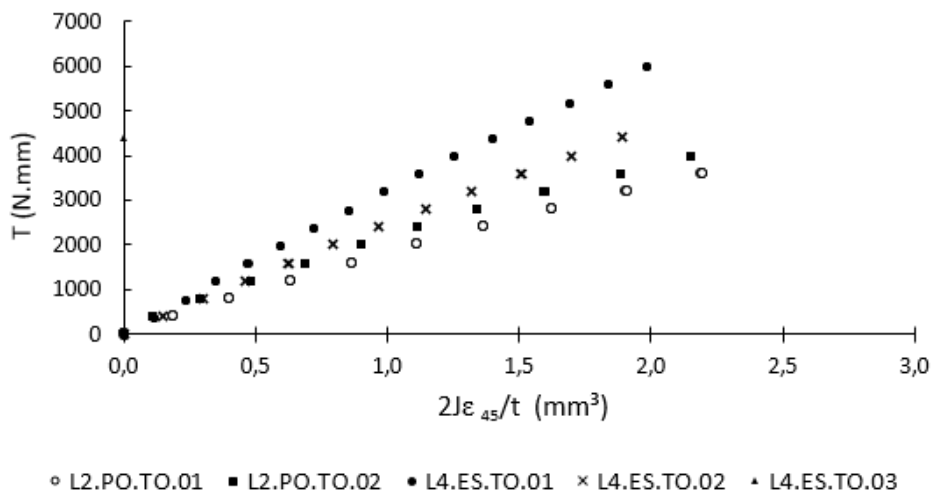


Figura 4.22 - Gráficos $T \times 2J\varepsilon_{45}/t$ dos ensaios de torção.

A Tabela 4.11 mostra os valores médios e desvios padrão dos módulos de cisalhamento das duas cantoneiras.

Tabela 4.11 - Módulo de Cisalhamento (G_{LT}).

Perfil	Média (GPa)	Desvio Padrão (GPa)	Coefficiente de Variação (%)
L2	1,73	0,10	5,52
L4	2,47	0,40	16,17

As Figura 4.23 a e b, apresentam as deformações, obtidas pelos *strain gages* tipo roseta, pelo momento torsor T , das respectivas amostras L2.PO.TO.01 e L4.ES.TO.01. As referências adotadas ε_A , ε_B e ε_C correspondem aos extensômetros posicionados na direção longitudinal, a 45° e perpendicular ao eixo longitudinal, conforme esquematizado nos gráficos. Assim, o ângulo de cisalhamento máximo θ é dado por (MURRAY e MILLER, 1992):

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\varepsilon_A - 2\varepsilon_B + \varepsilon_C}{\varepsilon_A - \varepsilon_C} \right) \quad (4.12)$$

Através das leituras dos extensômetros, constatou-se que as amostras das cantoneiras L2 e L4 apresentam direções principais a 42,2° e 43,4° respectivamente, ao longo do carregamento imposto durante o ensaio, confirmando que a utilização de apenas um único extensômetro a 45° é suficiente.

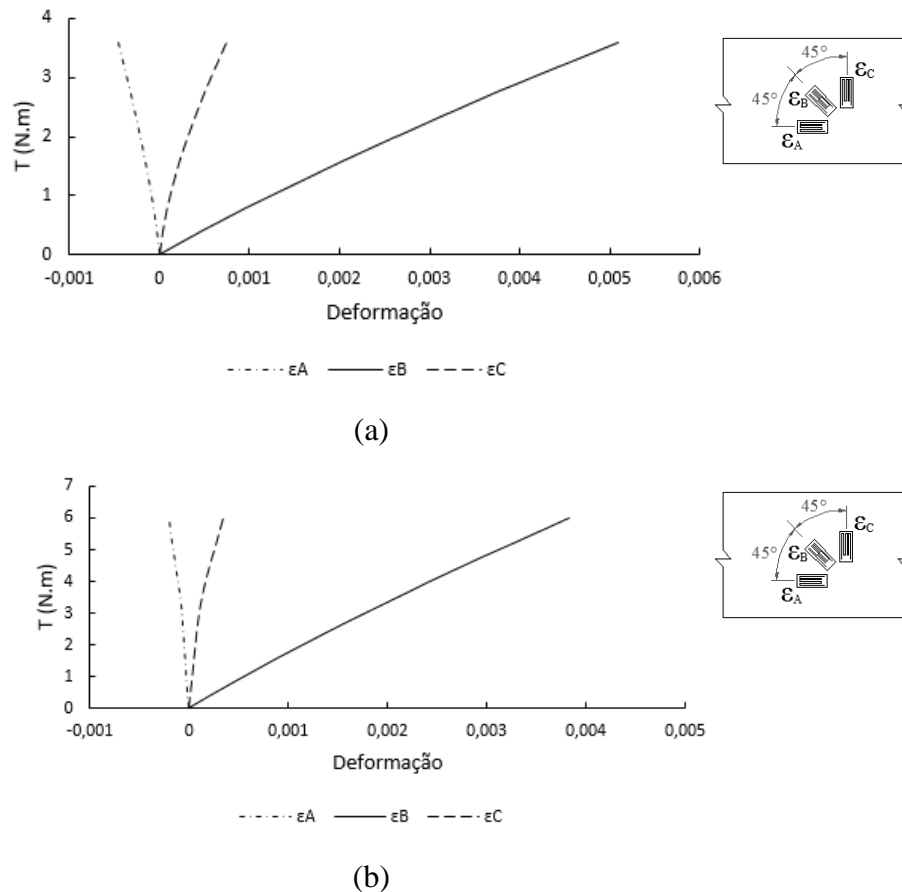


Figura 4.23 - Curvas T x Deformações da roseta nas cantoneiras (a) L2 e (b) L4.

4.2.8

Análise dos Resultados de Caracterização dos Materiais

Os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais realizados previamente são reunidos na Tabela 4.12. São apresentados também os valores previstos das respectivas propriedades elásticas, calculados através da regra da mistura, descrito no item 2.2. Os cálculos dos módulos à flexão na direção longitudinal foram realizados conforme técnica da seção homogeneizada e considerando 2 e 3 camadas de *roving* para as cantoneiras L2 e L4, respectivamente. Já o módulo à flexão na direção transversal foi assumido idêntico ao módulo à tração na direção transversal e, assim, calculado conforme item 2.2. Os resultados teóricos, conforme pode-se perceber, estão próximos dos experimentais. Desvios podem ser justificados pela presença de camadas de

mantas de filamentos contínuos aleatoriamente orientados (*CSM - continuous strand mat*).

Tabela 4.12 - Resumo das propriedades, experimentais e teóricas, dos materiais.

Propriedades Mecânicas		Cantoneira L2		Cantoneira L4	
		Exp.	Calc.	Exp.	Calc.
Resist. à tração long. (MPa)	$F_{L,t}$	311,7	-	359,9	-
Mód. elast. à tração long. (GPa)	$E_{L,t}$	24,6	23,8	27,8	26,9
Resist. à compr. long. (MPa)	$F_{L,c}$	290,0	-	285,5	-
Mód. elast. à compr. long. (GPa)	$E_{L,c}$	28,7	23,8	30,4	26,69
Mód. elast. à flexão long. (GPa)	$E_{L,f}$	13,22	13,1	20,11	18,3
Mód. elast. à flexão transv. (GPa)	$E_{T,f}$	6,88	6,0	8,62	8,3
Mód. cisalh. no plano. (GPa)	G_{LT}	1,7	2,6	2,5	2,6
Percentual de Fibras (%)	V_f	28,9		33,9	

4.3

Ensaio de Colunas

O principal objetivo deste trabalho é investigar o comportamento e a resistência de cantoneiras pultrudadas curtas quando submetidas a compressão centrada e propor, a partir da análise experimental, uma equação que expresse o real comportamento. Assim, as cargas críticas experimentais serão determinadas através do Método de Southwell (SOUTHWELL, 1932) e comparadas às previsões teóricas.

4.3.1

Preparação das Amostras

Os perfis cantoneiras provenientes do fabricante são produzidos com comprimento de três metros. Assim, com o auxílio de uma serra de fita horizontal,

os perfis foram cortados nos comprimentos previamente estabelecidos, sendo duas amostras para cada comprimento. Ao todo foram utilizados três perfis de três metros, um da cantoneira menor L2 e dois da cantoneira maior L4, totalizando 21 (vinte e uma) colunas.

Após lixadas e limpas, as colunas foram identificadas com uma combinação de letras e números análoga às amostras para caracterização do material, sendo os dois últimos pares substituídos pelo comprimento, em milímetros, e o número do corpo de prova. A Figura 4.24 mostra três colunas com comprimentos de 200, 400 e 500 mm, da esquerda para a direita, do perfil L4 (resina éster-vinílica).

No Laboratório de Metrologia Dimensional do Instituto Tecnológico da PUC-Rio (LMD/ITUC) as colunas foram inspecionadas com um calibrador de folgas, paquímetro e transferidor para a verificação das imperfeições. Devido às limitações das ferramentas adicionada à geometria das colunas, não foi possível medir com precisão as imperfeições existentes. O valor aproximado do ângulo entre as abas foi superior a 89° , enquanto o desvio da retificação das abas observado foi inferior a 1,0 mm para ambos os perfis.

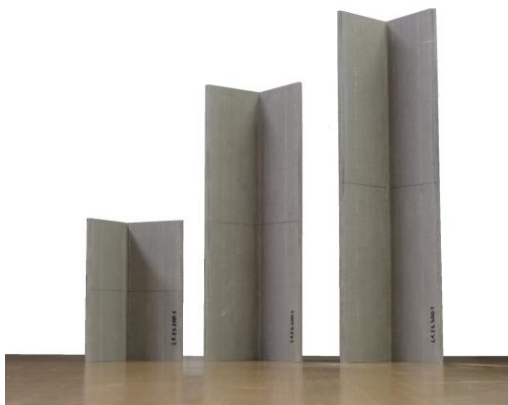
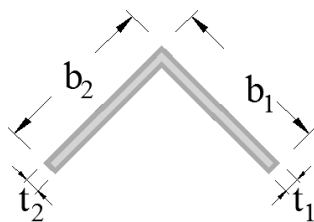


Figura 4.24 - Colunas do perfil L4 de comprimentos variados.

A Tabela 4.13 apresenta as dimensões das colunas analisadas. O comprimento L foi medido com uma régua de 1 mm de precisão e as demais dimensões, com um paquímetro digital de 0,01 mm de precisão.

Tabela 4.13 - Geometria das colunas L2 e L4 ensaiadas.



L = comprimento da coluna

		Dimensões (mm)				
Perfil	Amostra	L	b1	b2	t1	t2
L2 (50,8 x 4,76)	L2.PO.150.1	150	50,03	49,51	4,71	4,77
	L2.PO.150.2	150	49,52	50,78	4,76	4,64
	L2.PO.300.1	300	51,69	50,44	4,67	4,68
	L2.PO.300.2	300	49,95	51,94	4,76	4,78
	L2.PO.400.1	400	50,46	50,49	4,72	4,72
	L2.PO.400.2	400	51,19	49,95	4,69	4,67
	L2.PO.500.1	500	49,59	51,61	4,68	4,63
	L2.PO.500.2	500	51,56	50,55	4,69	4,57
Média (mm)			50,50	50,66	4,71	4,68
Desvio Padrão (mm)			0,82	0,75	0,03	0,07
Coeficiente de Variação (%)			1,62	1,48	0,69	1,43
L4 (101,6 x 6,35)	L4.ES.190.1	190	101,84	101,54	6,30	6,44
	L4.ES.200.1	120	100,72	101,78	6,39	6,32
	L4.ES.300.1	300	101,94	100,95	6,32	6,33
	L4.ES.300.2	300	101,87	100,80	6,30	6,37
	L4.ES.400.1	400	100,88	101,80	6,45	6,33
	L4.ES.400.2	400	100,80	101,78	6,31	6,36
	L4.ES.500.1	500	100,45	101,82	6,41	6,38
	L4.ES.500.2	500	101,20	101,87	6,40	6,48
	L4.ES.600.2	600	101,50	101,29	6,44	6,30
	L4.ES.800.1	800	101,14	101,81	6,43	6,33
	L4.ES.800.2	800	100,88	101,94	6,44	6,37
	L4.ES.1000.1	1000	101,88	100,99	6,36	6,43
	L4.ES.1000.2	1000	101,91	101,85	6,35	6,31
Média (mm)			101,31	101,56	6,38	6,37
Desvio Padrão (mm)			0,52	0,39	0,05	0,05
Coeficiente de Variação (%)			0,51	0,38	0,85	0,83

A Figura 4.25 apresenta as curvas de assinatura das colunas de seções transversais L2 (curva na cor azul) e L4 (curva na cor vermelha) utilizadas nesse trabalho, traçadas a partir das equações 3.1 e 3.4, com todas as rotações impedidas nas extremidades. O modo de flexo-torção é representado pelos trechos iniciais das curvas até coincidir com a curva que descreve o modo por flexão, com maior declividade. As tensões críticas obtidas através do GBTul foram plotadas para determinados comprimentos, tendo sido observadas diferenças de, no máximo, 7% quando comparadas às tensões calculadas pelas Eqs. 3.1 e 3.4, mostrando assim, uma boa aproximação das equações. Também são determinadas através do *software* as participações das funções de formas (*deformation modes* do GBTUL) na deformada final, sendo possível notar que a torção em torno do centro de cisalhamento prepondera sobre a flexão na maior inércia e sobre a flexão transversal da parede. A participação da deformação por cisalhamento para colunas acima de 100 mm apresentou participação modal de no máximo 14% e 8%, respectivamente para as cantoneiras L2 e L4, mas sem influência significativa na tensão crítica.

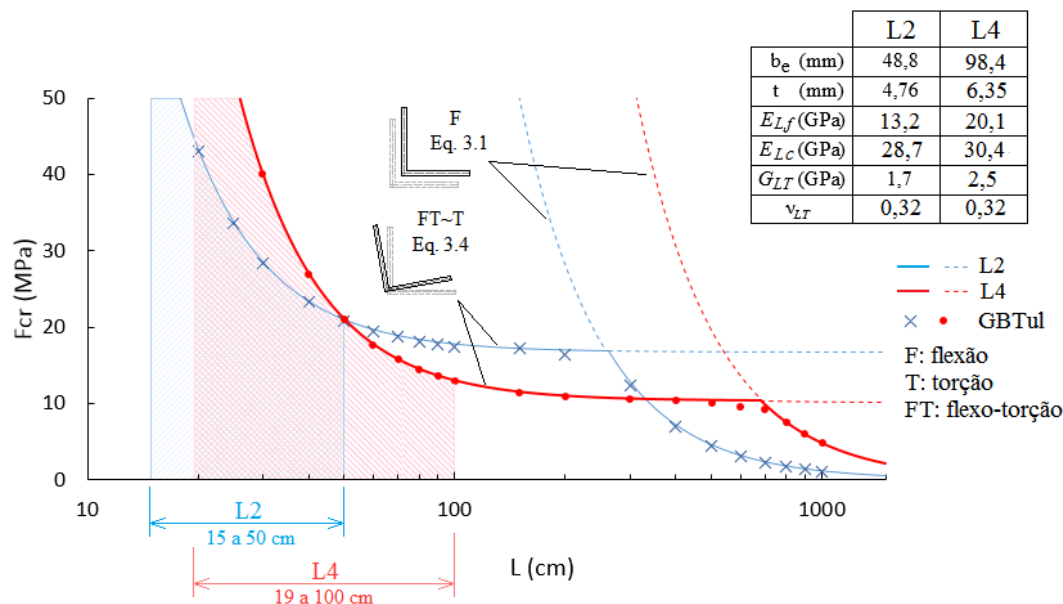


Figura 4.25 - Curvas tensão crítica (F_{cr}) x comprimento (L) para cantoneiras L2 e L4 com extremidades engastadas.

Neste trabalho, os comprimentos das cantoneiras foram escolhidos de forma a obter o modo de falha por flexo-torção. Assim, através das curvas de assinatura

foram determinadas as faixas de comprimentos suficientemente distantes da influência do modo de flexão, ou seja, as cantoneiras curtas; buscando também diferentes esbeltezes λ_{FT} para a análise do comportamento diante a variação da distância entre os valores da tensão crítica e a resistência do material. Assim, são destacadas as faixas de comprimento de 15 a 50 cm para a cantoneira L2 e 19 a 100 cm para a L4, conforme representado na Figura 4.25.

4.3.2

Procedimento Experimental

As colunas foram posicionadas em uma máquina universal de ensaios mecânicos MTS 810 com seu centro geométrico coincidindo com o eixo do equipamento. O ensaio de compressão é esquematizado na Figura 4.26 e mostrado na Figura 4.27. Para restrição quanto à torção e deslocamento das extremidades, foi utilizado um conjunto de fixação formado por uma chapa de base onde foram parafusados fixadores retangulares ajustados ao perfil e uma haste horizontal com rolamento em aço junto às colunas da máquina, possibilitando apenas o deslocamento vertical da base e, conseqüentemente, garantindo a condição de colunas bi-engastadas. Para garantir o engastamento das paredes e extremidades do perfil, as amostras foram assentadas sobre uma massa adesiva plástica a fim de preencher os possíveis espaços e vazios entre a parede do perfil e os fixadores retangulares e garantir o contato de toda área da seção transversal com chapa de base, conforme mostrado na Figura 4.28. O ensaio foi então realizado após a secagem total na massa plástica, ou seja, de 20 a 30 minutos, conforme recomendações do fabricante.

A força axial de compressão foi aplicada sob controle de deslocamento a uma taxa de 0,6 mm/min até atingir a ruptura das colunas. A aquisição de dados foi feita através de quatro transdutores de deslocamento, posicionados a meia altura das colunas, conforme esquematizado na Figura 4.29, sendo dois do tipo DWLT (*Draw Wire Linear Transduce*) e dois do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), sendo esses últimos adaptados para a leitura dos deslocamentos.

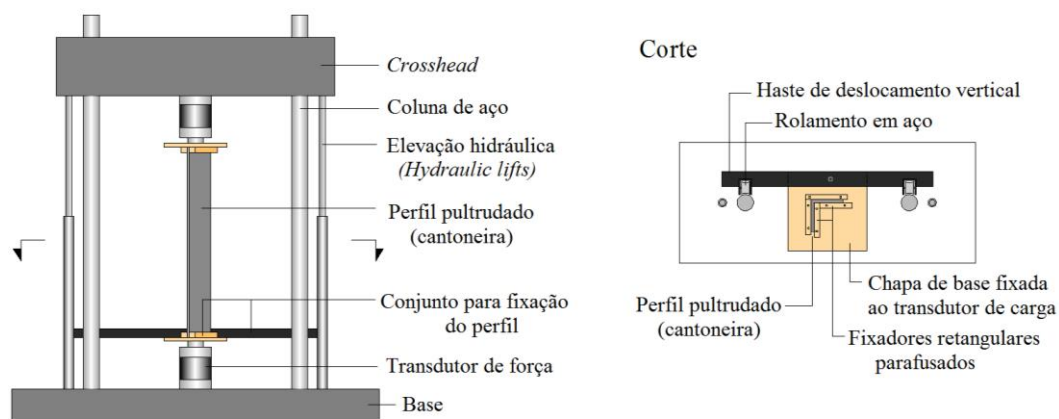


Figura 4.26 - Esquema do ensaio de compressão centrada das cantoneiras pultrudadas.



Figura 4.27 – Ensaio de compressão – perfil cantoneira L4.

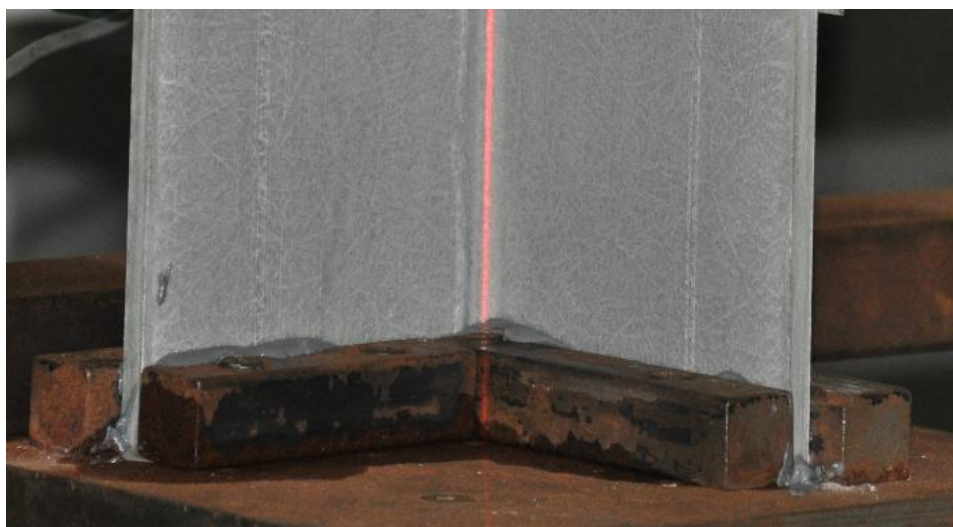


Figura 4.28 - Apoio desenvolvido para a condição de engaste das amostras.

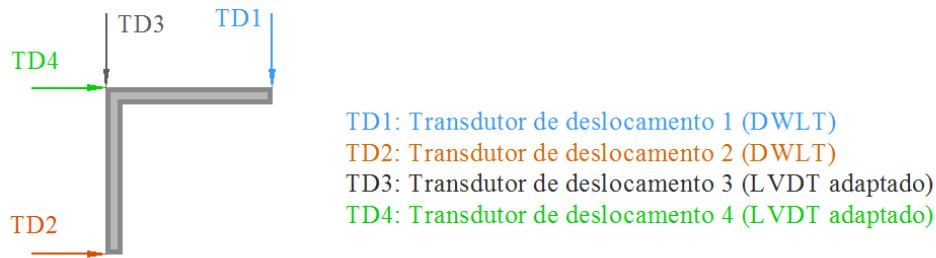


Figura 4.29 - Posicionamento dos transdutores de deslocamentos na seção transversal mediana da coluna.

4.3.3

Resultado dos Ensaios

Os índices de esbeltez à flexo-torção e à flexão são obtidos, respectivamente, através das Eq. 3.9 e 3.10, e a relação entre estes é mostrada na Figura 4.30, sendo classificadas conforme apresentado na Tabela 3.2. Assim, todas as cantoneiras são consideradas colunas curtas ($\lambda_F \leq 0,7$), compostas por placas esbeltas ($\lambda_{FT} \geq 1,3$), para as quais o modo de falha predominante é o de flexo-torção. Na Figura 4.30 também são apresentadas as faixas investigadas por ZUREICK e STEFFEN (2000) correspondendo às colunas curtas, intermediárias e longas, compostas por placas esbeltas.

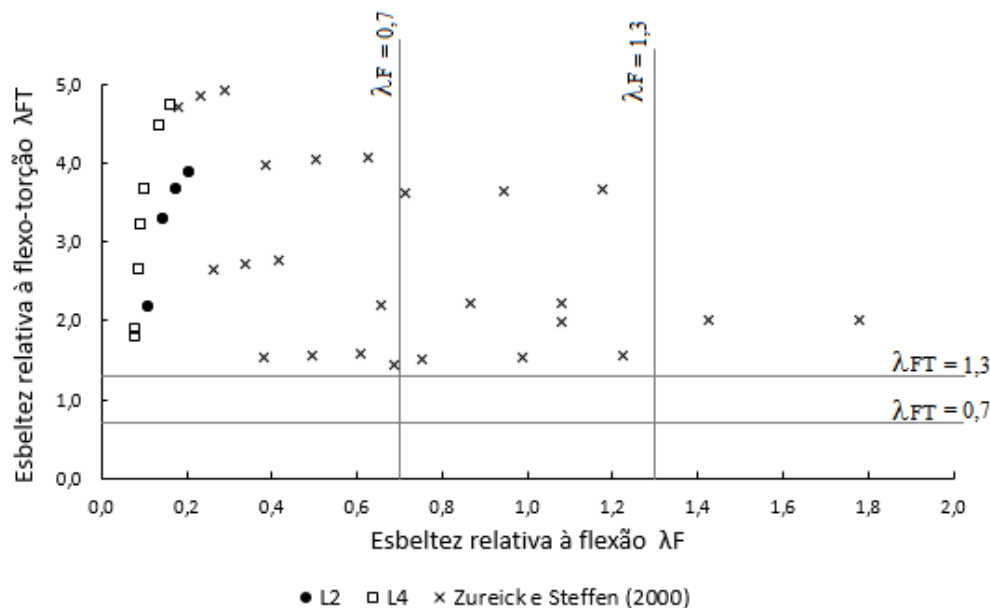


Figura 4.30 - Índices de esbeltez à flexão e flexo-torção das cantoneiras estudadas no presente trabalho e por Zureick e Steffen (2000).

Os relatórios com resultados completos dos ensaios das colunas são apresentados no Apêndice A. A Tabela 4.14 fornece o resumo das 21 colunas ensaiadas. As tensões crítica (F_{cr}) e última (F_u) experimentais são apresentadas, bem como as previsões teóricas para coluna perfeita ($F_{cr,FT}$) determinadas de acordo com a Eq. 3.4. O Método de Southwell (SOUTHWELL, 1932) foi utilizado para obtenção da carga crítica sendo determinada através da inclinação da porção linear da curva $\delta \times \delta/\sigma_c$, onde δ é a deflexão lateral e σ_c é a tensão de compressão aplicada.

Tabela 4.14 - Resumo do ensaio de compressão.

Amostras	Teórico		Experimental	
	$F_{cr,FT}$ (MPa)	λ_{FT}	F_{cr} (MPa)	F_u (MPa)
	(Eq. 3.4)	(Eq. 3.9)	(Southwell)	-
L2.PO.150.1	61	1,98	74	82
L2.PO.150.2	61	2,07	68	77
L2.PO.300.1	27	3,01	32	52
L2.PO.300.2	27	2,91	34	47
L2.PO.400.1	22	3,45	24	39
L2.PO.400.2	22	3,47	24	42
L2.PO.500.1	19	3,39	25	45
L2.PO.500.2	19	3,57	23	43
L4.ES.190.1	86	2,91	33	86
L4.ES.200.1	79	3,03	31	81
L4.ES.300.1	41	2,44	47	71
L4.ES.300.2	41	2,49	46	71
L4.ES.400.1	27	3,19	28	66
L4.ES.400.2	27	3,17	28	67
L4.ES.500.1	21	3,89	19	57
L4.ES.500.2	21	3,42	24	63
L4.ES.600.2	18	3,97	18	60
L4.ES.800.1	14	4,56	14	52
L4.ES.800.2	14	4,40	15	46
L4.ES.1000.1	13	4,40	15	47
L4.ES.1000.2	13	4,38	15	47

A elevada diferença das tensões críticas teóricas e experimentais para as cantoneiras L4 de comprimentos 190 mm e 200 mm pode estar associada a

alguma imperfeição do material ou a alguma excentricidade indesejada introduzida durante o ensaio.

Os resultados experimentais são plotados na Figura 4.31, a qual mostra as tensões últimas normalizadas em relação à esbeltez da coluna sobrepostas nas curvas teóricas mostradas na Figura 3.9. Em geral, as colunas do tipo L4 apresentaram resistências pós-flambagens maiores que as L2, possivelmente associadas à diferença das espessuras das paredes. As cantoneiras L2, por apresentarem menor espessura (4,76 mm) acabam sofrendo maiores influências quanto às imperfeições geométricas do que as cantoneiras L4, de maior espessura (6,35 mm).

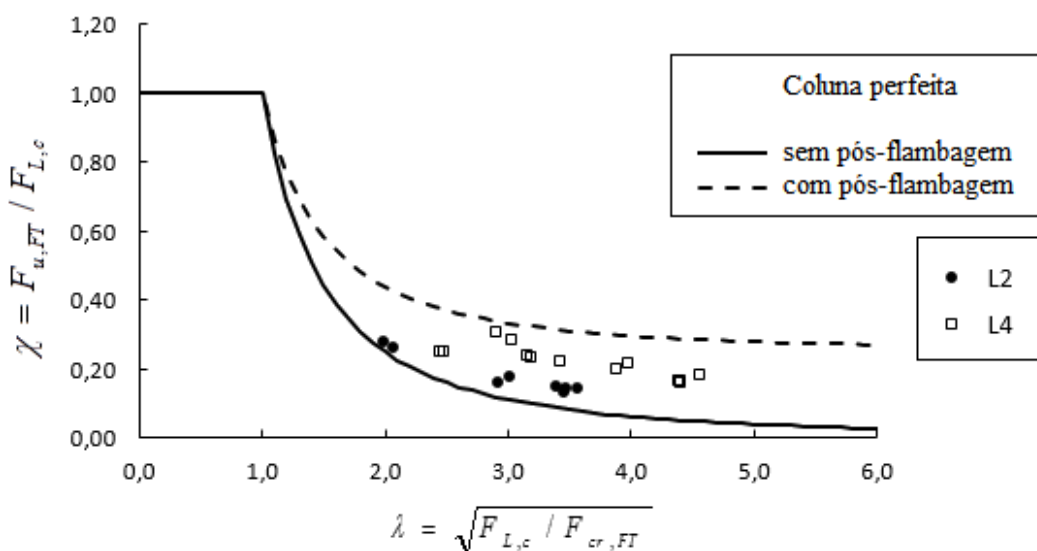


Figura 4.31 - Tensões últimas experimentais normalizadas por esbeltez.

Todas as cantoneiras foram ensaiadas até atingir o colapso. Para exemplificação dos resultados obtidos no ensaio de compressão, a Figura 4.32 apresenta a amostra L2.PO.500.1 no início (a1) e ao término (a2) do ensaio. Os descolamentos transversais medidos através dos transdutores, posicionados à altura média dispostos conforme esquematizado em (b), são plotados em função da tensão de compressão σ conforme as curvas em (c). A curva em (d) representa a curva obtida pelo método de Southwell obtida através da porção linear dos deslocamentos medidos pelo transdutor TD1.

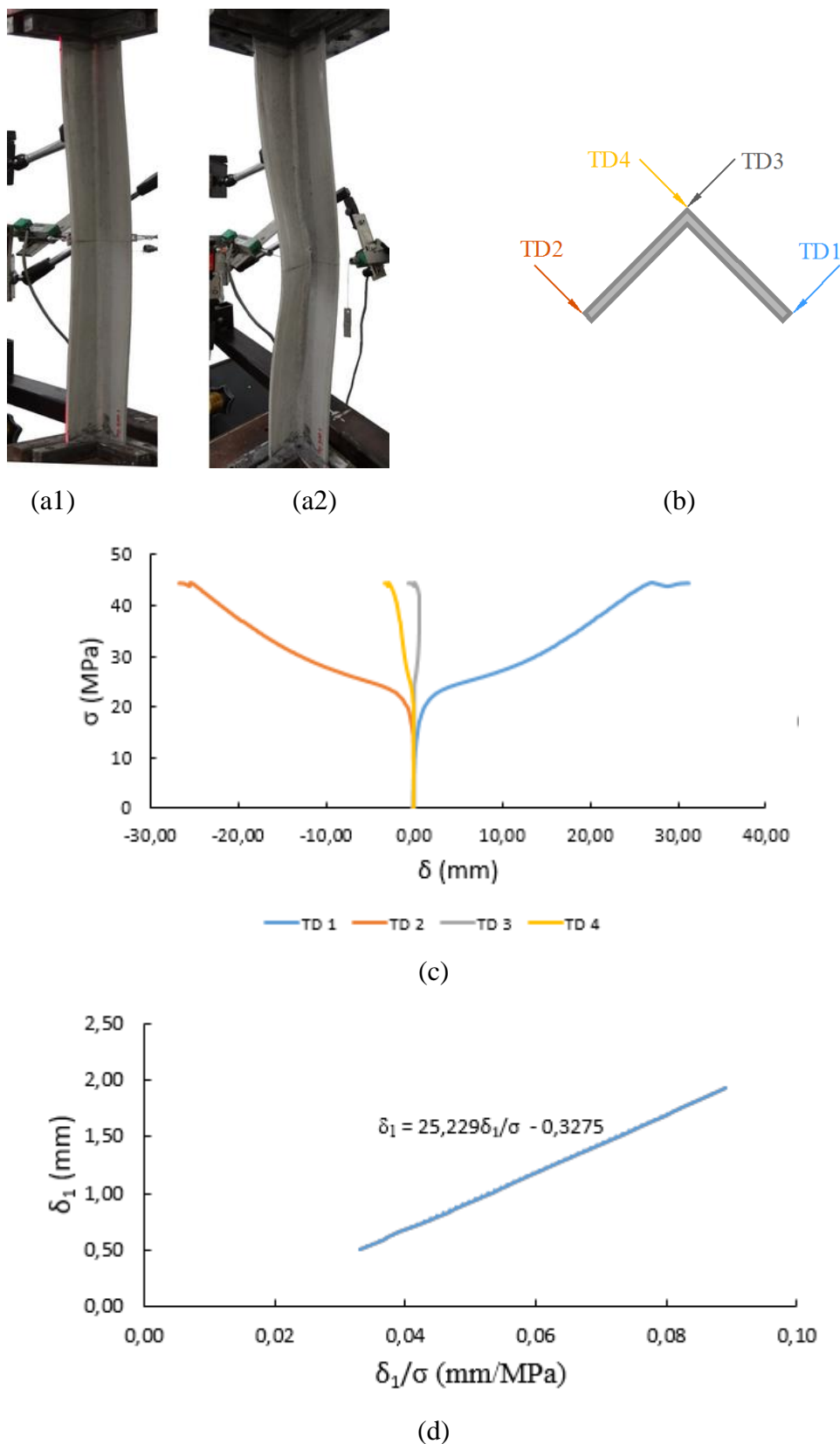


Figura 4.32 - Coluna L2.PO.500.1 (a1) durante e (a2) ao fim do ensaio. (b) Posição dos transdutores de desloc. (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_1 \times \delta_1/\sigma$.

A curva que apresenta a relação entre a força aplicada pelo deslocamento axial $P \times \delta_{axial}$ é mostrado na Figura 4.33 e pode ser analisada em dois trechos: P_I , representando o trecho pré-crítico e P_{II} ; o pós-crítico, onde é possível observar a perda de 33% na rigidez do elemento.

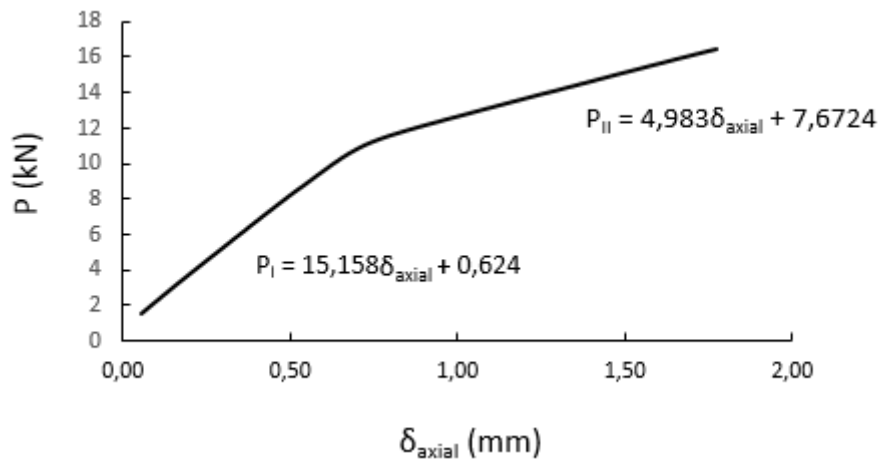


Figura 4.33 - Gráfico $P \times \delta_{axial}$.

A Figura 4.34 compara as curvas tensão σ por deflexão lateral δ de colunas L4 com três comprimentos L diferentes: 300 mm, 500 mm e 1000 mm. Quanto mais curtas forem as colunas, maiores serão as cargas críticas, aproximando da resistência do material assim, o comportamento pós-crítico não é tão demarcado como ocorre para as colunas curtas de maiores comprimentos, como ocorre com as colunas de 500 mm e 1000 mm, que possuem maiores deflexões, quando comparadas à coluna de 300 mm.

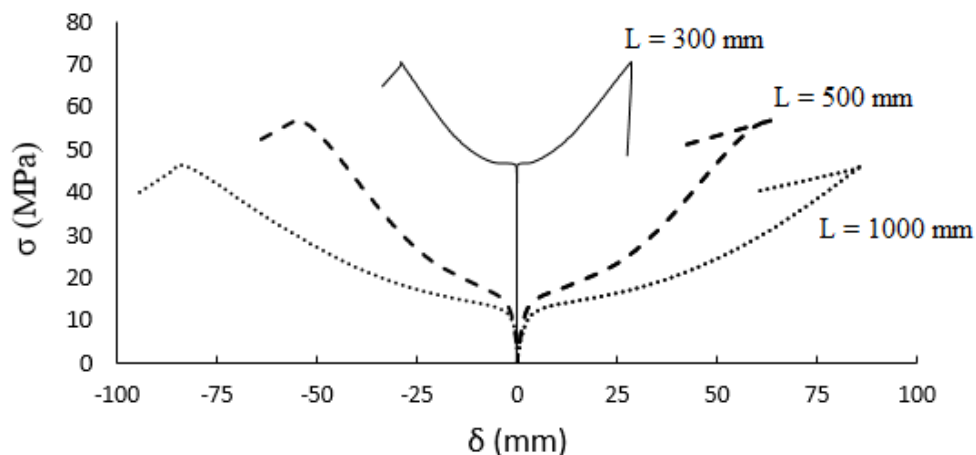


Figura 4.34 - Curvas $\sigma \times \delta$ de cantoneiras L4 com comprimentos $L = 300$ mm, 500 mm e 1000 mm.

Na literatura, não há propostas para curvas de resistência para cantoneiras pultrudadas ou mesmo para placas com consideração de pós-flambagem. Assim, uma primeira proposta para a curva de resistência são as equações de Winter, presentes nas normas de estruturas metálicas de paredes finas (AISI S100, 2012, NBR 14762, 2010), que levam em conta não-linearidades física e geométrica:

$$\frac{b_{ef}}{b} = \frac{1}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \quad (4.13)$$

onde b é a largura da placa, b_{ef} é a largura efetiva e λ_p é a esbeltez relativa da placa.

No entanto, conforme pode ser observado na Figura 4.35, a curva de Winter não se ajusta bem aos pontos experimentais, sendo necessária uma nova abordagem. Com base nos dados experimentais obtidos neste trabalho, propõe-se, portanto, a utilização da mesma curva de resistência sugerida em CARDOSO *et al.* (2014a) e descrita na Eq. 3.9, tomando-se uma esbeltez modificada como:

$$\lambda^* = 0,92\lambda_{FT} - 0,0013\lambda_{FT}^4 \quad (4.14)$$

Assim, a curva de resistência, considerando a pós-flambagem, obtida de forma semi-empírica é descrita através da Eq. 4.15, sendo representada pela curva pontilhada na Figura 4.35.

$$\chi_{FT} = \frac{F_{u,FT}}{F_{L,c}} = \frac{1 + \alpha_{FT}^* + \lambda^{*2} - \sqrt{\left(1 + \alpha_{FT}^* + \lambda^{*2}\right)^2 - 4\lambda^{*2}}}{2\lambda^{*2}} \quad (4.15)$$

onde o fator de imperfeição α_{FT}^* é adotado como $\alpha_{FT}^* = 0,10\lambda^*$ para $\lambda < 5$.

A curva traçada a partir da Eq. 3.8, para colunas perfeitas ($\alpha_{FT} = 0$), também é representada através da curva com linha cheia.

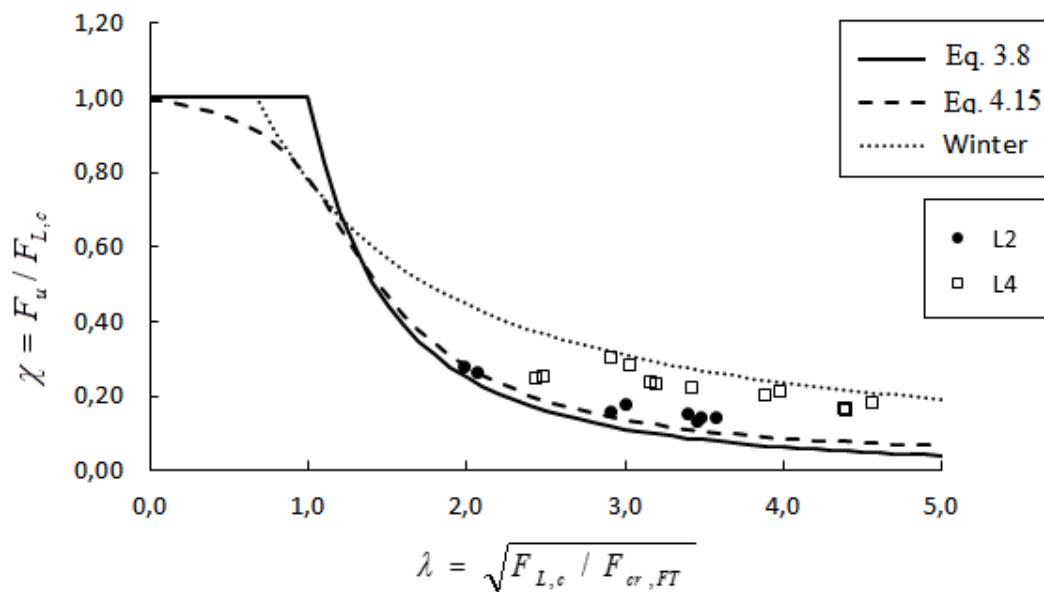


Figura 4.35 - Curvas de resistências normalizadas por esbelteza.

Ainda que a curva esteja satisfazendo os pontos obtidos nos ensaios da cantoneira menor (L2), há um maior afastamento quando comparados aos pontos da cantoneira maior (L4). Assim, embora a Eq. 4.15 contemple os dados provenientes desta pesquisa, mais ensaios são necessários para melhores ajustes da curva de forma a abranger demais faixas de esbelteza.

5

Conclusões

5.1

Considerações Finais

A presente pesquisa buscou analisar o comportamento e a resistência de colunas formadas com polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV). Através das revisões bibliográficas apresentadas, foi identificada a necessidade de preencher as lacunas do conhecimento em perfis cantoneiras submetidas à compressão, sendo então desenvolvido um programa experimental para a validação da expressão proposta para a resistência.

Apesar das dificuldades encontradas para realização da caracterização dos materiais através de ensaios padronizados e não-padronizados, os resultados experimentais apresentaram boa concordância, conforme mostrado na Tabela 4.12, com as previsões teóricas, obtidos através do Método de Halpin-Tsai.

Para o ensaio de colunas foi observado que quanto menor a esbeltez, menores as deflexões laterais e maiores as cargas críticas, com a tensão crítica aproximando-se da tensão de ruptura. Em todos os ensaios modo de falha observado foi por flexo-torção, com predominância do modo de torção ($F_{cr,FT} \sim F_{cr,T}$) com desprezíveis influências das deformações por cisalhamento. As tensões críticas de flambagem obtidas experimentalmente com auxílio do Método de Southwell apresentaram conformidade quando comparadas às tensões críticas obtidas através das formulações teóricas (Tabela 4.14).

O comportamento pós-flambagem das cantoneiras L4 apresentou maior resistência pós-crítica quando comparadas às cantoneiras L2, possivelmente associadas à diferença das espessuras das paredes, conforme descrito do item 4.3.3.

Por fim, a curva de resistência proposta, representou adequadamente o limite inferior de resistência à compressão de cantoneiras pultrudadas em PRFV, embora mais testes sejam recomendados.

5.2

Propostas para Trabalhos Futuros

Visando o aprimorar o conhecimento acerca dos fenômenos de instabilidade em perfis pultrudados em PRFV de paredes finas, são apresentadas algumas sugestões para pesquisas futuras:

- investigação do comportamento de outros perfis cantoneiras de abas iguais e desiguais, formados a partir de diferentes materiais constituintes, conferindo-lhes diferentes propriedades elásticas e percentuais volumétricos de fibras;
- análise numérica e experimental de colunas submetidas a outras condições de contorno e com comprimentos variados estabelecendo relações com os possíveis modos de instabilidade (flexão, flexo-torção e esmagamento do material), bem como a interação entre os modos.
- análise numérica não-linear considerando as imperfeições e os critérios de ruptura para materiais compósitos;
- buscar uma curva genérica de resistência que contemple a interação entre os três modos de colapso.

Referências bibliográficas

AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. **AISI S100-12**: North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, Washington, DC, 2012.

ASCE. **Pre-Standard for Load and Resistance Factor Design (LRFD) of Pultruded Fiber Reinforced Polymer (FRP) Structures (Final)**. ASCE, Reston, VA, 2010

Ascione, L., Caron, J. F., Godonou, P., van IJselmuiden, K., Knippers, J., Mottram, T., ... & Tromp, L. **Prospect for new guidance in the design of FRP: Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes**. Publications Office of the European Union, 2016.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15708**: Indústrias do petróleo e gás natural – Perfis pultrudados. Parte 1: Materiais, métodos de ensaio e tolerâncias dimensionais. Rio de Janeiro, 2011.

ASTM Standard **D638-10**: Standard test method for tensile properties of plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

ASTM Standard **D695-10**: Compressive properties of rigid plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

ASTM Standard **D790-10**: Test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

ASTM Standard **D3039/D3039M-08**: Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.

ASTM Standard **D3410/D3410M-03R08**: Compressive properties of polymer matrix composite materials with unsupported gage section by shear loading. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2008.

ASTM Standard **D3518/D3518M-13**: Practice for in-plane shear stress-strain response of unidirectional polymer matrix composite materials by tensile test of $\pm 45^\circ$ laminate. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM Standard **D4255/D4255M-01R07**: Test method for in-plane shear properties of polymer matrix composite materials by the rail shear method. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

ASTM Standard **D5379/D5379M-12**: The method for shear properties of composite materials by the V-notched beam method. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

ASTM Standard **D6272-10**: Test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials by four-point bending. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

ASTM Standard **D6641/D6641M-09**: Determining the compressive properties of polymer matrix composite laminates using a combined loading compression (CLC) test fixture. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2009.

BAKIS, Charles E. et al. **Fiber-reinforced polymer composites for construction - state-of-the-art review**. Journal of composites for construction, v. 6, n. 2, p. 73-87, 2002..

BANK, Lawrence C. **Shear properties of pultruded glass FRP materials**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 2, n. 2, p. 118-122, 1990.

BANK, Lawrence C. **Composites for construction: structural design with FRP materials**. John Wiley & Sons, 2006.

BANK, Lawrence C.; YIN, Jiansheng; NADIPELLI, Murali. **Local buckling of pultruded beams—nonlinearity, anisotropy and inhomogeneity**. Construction and Building Materials, v. 9, n. 6, p. 325-331, 1995.

BARBERO, Ever J.; DEVIVO, Liliana. **Beam-column design equations for wide-flange pultruded structural shapes**. Journal of Composites for Construction, v. 3, n. 4, p. 185-191, 1999.

BARBERO, E. J.; MAKKAPATI, S.; TOMBLIN, J. S. **Experimental determination of the compressive strength of pultruded structural shapes**. Composites Science and Technology, v. 59, n. 13, p. 2047-2054, 1999.

BARBERO, Ever; TOMBLIN, John. **Euler buckling of thin-walled composite columns**. Thin-walled structures, v. 17, n. 4, p. 237-258, 1993.

BARBERO, Ever; TOMBLIN, John. **A phenomenological design equation for FRP columns with interaction between local and global buckling**. Thin-Walled Structures, v. 18, n. 2, p. 117-131, 1994.

BEBIANO, R., PINA, P., SILVESTRE, N., CAMOTIM, D. **GBTUL – buckling and vibration analysis of thin-walled members**. DECivil/IST, Technical University of Lisbon, 2008.

BINSHAN, S. Ye; SVENSON, Alrik L.; BANK, Lawrence C. **Mass and volume fraction properties of pultruded glass fibre-reinforced composites.** Composites, v. 26, n. 10, p. 725-731, 1995.

BURGOYNE, C. J.; HEAD, P. R. **Aberfeldy Bridge—an advanced textile reinforced footbridge.** In: TechTextil Symposium. 1993. p. 7-9.

CAMPBELL JR, Flake C. (Ed.). **Manufacturing processes for advanced composites.** Elsevier, 2003.

CARLSSON, Leif A.; GILLESPIE, John W.; ZWEBEN, Carl H. **Delaware Composites Design Encyclopedia: Micromechanical Materials Modeling.** Vol. 2. Technomic Publishing Company, 1990.

CARLSSON, Leif A.; ADAMS, Donald F.; PIPES, R. Byron. **Experimental characterization of advanced composite materials.** CRC press, 2014.

CARDOSO, D.C.T. **Compressive strength of pultruded glass-fiber reinforced polymer (GFRP) columns.** Tese D.Sc., COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

CARDOSO, D. C., BATISTA, E. M. **Behavior of Pultruded GFRP Columns.** XXXVI Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Rio de Janeiro, 2015.

CARDOSO, D. C., HARRIES, K. A., BATISTA, E. M. **Compressive local buckling of pultruded GFRP I-sections: development and numerical/experimental evaluation of an explicit equation.** Journal of Composites for Construction, v. 19, n. 2, p. 04014042, 2014a.

CARDOSO, D. C., HARRIES, K. A., BATISTA, E. M. **Compressive strength equation for GFRP square tube columns.** Composites Part B: Engineering, v. 59, p. 1-11, 2014b.

CARDOSO, D. C., HARRIES, K. A., BATISTA, E. M. **On the determination of material properties for pultruded GFRP sections**. 7th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE), Vancouver, 2014c.

CHIAO, C. C.; MOORE, R. L.; CHIAO, T. T. **Measurement of shear properties of fibre composites: Part 1**. Evaluation of test methods. Composites, v. 8, n. 3, p. 161-169, 1977.

CLARKE, J. L. **Structural Design of Polymer Composites: Eurocomp Design Code and Handbook**. 1996, E & FN Spon, London. Maxiflow MV Vent Duct used in underground mining.

CNR, National Research Council of Italy. **CNR-DT 205/2007: Guide for the design and construction of structures made of thin FRP pultruded elements**. Rome, 2008.

COGUMELO INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. **Produtos pultrudados e injetados em fibra de vidro**. Disponível em: <http://www.cogumelo.com.br/images/linha-industrial/downloads/Catalogo_Geral_Produtos.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2016.

COMPOSITES UK. **Composites UK Trade Association. Case Studies. Construction Sector Group Publication**. Updated: September 2015. Disponível em: <<http://compositesuk.co.uk>>. Acesso em 09 de março de 2017.

CORREIA, J. R., FRANCO, F. A., SILVA, N. M. F., CAMOTIM, D., SILVESTRE, N. **First-order, buckling and post-buckling behavior of GFRP pultruded beams, part 1: experimental study**. Comput Struct, 89(21), pp. 2052–64, 2011.

COWPER, G.R. **The shear coefficient in Timoshenko's beam theory**. ASME J. Appl. Mech., 33 (1966), pp. 335-340, 1966.

CREATIVE PULTRUSIONS, INC. **The new and improved pultex® pultrusion design manual of standard and custom fiber-reinforced polymer structural profiles.** Vol. 5, Alum Bank, PA: Creative Pultrusions, 2015.

DAVALOS, J. F., SALIM, H. A., QIAO, P., LOPEZ-ANIDO, R., & BARBERO, E. J. **Analysis and design of pultruded FRP shapes under bending.** Composites Part B: Engineering, 27(3-4), 295-305, 1996.

DINIS, P. B., CAMOTIM, D. **A novel DSM-based approach for the rational design of fixed-ended and pin-ended short-to-intermediate thin-walled angle columns.** Thin-Walled Structures, v. 87, p. 158-182, 2015.

DINIS, P. B., CAMOTIM, D., SILVESTRE, N. **On the local and global buckling behaviour of angle, T-section and cruciform thin-walled members.** Thin-Walled Structures, 48(10), 786-797, 2010.

FLECK, N. A. **Compressive failure of fiber composites.** Hutchinson, J.W., Wu, T.Y., editors, Advances in Applied Mechanics, 33, pp. 43-117, 1997.

FIBERLINE. **Fiberline Composites.** Disponível em: <<http://fiberline.com>>. Acesso em 09 de março de 2017.

GRAY, E. F. **Structural plastics design manual.** ASCE, New York, 1984.

GREEN, A., BISARNSIN, T., & LOVE, E. A. **Pultruded reinforced plastics for civil engineering structural applications.** Journal of Reinforced Plastics and Composites, 13(10), 942-951, 1994.

HEWSON, P. **Buckling of pultruded glass fibre-reinforced channel sections.** Composites, 9(1), 56-60, 1978.

HULL, D. **An introduction to composite materials.** Editions Eyrolles, New York, 1981.

ISO (International Organization for Standardization). **ISO 1172**: Textile-glass-reinforced plastics – Prepregs, moulding compounds and laminates – Determination of the textile-glass and mineral-filler content – Calcination methods. Geneva, Switzerland, 1998.

JELF, P. M., & FLECK, N. A. **Compression failure mechanisms in unidirectional composites**. Journal of Composite Materials, 26(18), 2706-2726, 1992.

JONES, R. M. **Mechanics of composite materials**. Taylor Francis, London, 1999.

LANDESMANN, A., SERUTI, C. A., BATISTA, E. D. M. (2015). **Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymers Members for Structural Applications**. Materials Research, v. 18(6), p. 1372-1383, 2015.

LANE A., MOTTRAM J. T. **The influence of modal coupling upon the buckling of concentrically PFRP columns**. Inst Mech Engrs Part L: J Mater, Des Appl, 216(12), pp. 133–144, 2002.

LEE, S. S., YOON, S. J., CHO, S. K., & PARK, J. M. **Buckling Behavior of Pultruded Monosymmetric Members**. In Key Engineering Materials (Vol. 297, pp. 1259-1264). Trans Tech Publications, 2005.

LEISSA A. W. **Buckling of laminated composite plates and shell panels**. AFWAL-TR-85-3069, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, Wright-Patterson AFB, Ohio 45433, Junho, 1985.

MESACASA, E. C. **Comportamento estrutural e dimensionamento de cantoneiras de aço formadas a frio e submetidas à compressão**. Dissertação M.Sc., Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2012.

MCCLURE, G., & MOHAMMADI, Y. **Compression creep of pultruded E-glass-reinforced-plastic angles**. Journal of materials in civil engineering, 7(4), 269-276, 1995.

MURRAY, W. M., & MILLER, W. R. (1992). **The bonded electrical resistance strain gage: an introduction**. Oxford University Press, 1992.

NAGAHAMA, K. **Análise de estabilidade local em perfis de seção aberta em aço e em resina reforçada com fibra de vidro**. Tese D.Sc., COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.

NAUGHTON, B. P., PANHUIZEN, F., VERMEULEN, A. C. **The elastic properties of chopped strand mat and woven roving in GR laminae**. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 4(2), pp. 195-204, 1985.

PFEIL, W., & PFEIL, M. **Estruturas de Aço: Dimensionamento Prático de acordo com a NBR 8800:2008**. 8ª Edição, Grupo Gen-LTC, 2009.

PIGGOTT, M. R., HARRIS, B. **Compression Strength of Carbon, Glass, and Kevlar 49 Fibre Reinforced Polyester Resins**. Journal of Materials Science, 15, pp. 2523-2538, 1980.

PUENTE, I., INSAUSTI, A., AZKUNE, M. **Buckling of GFRP columns: An empirical approach to design**. Journal of Composites for Construction, 10(6), 529-537, 2006.

RASMUSSEN, K. J. **Design of slender angle section beam-columns by the direct strength method**. Journal of structural engineering, 132(2), 204-211, 2006.

REIS, A., CAMOTIM, D. **Estabilidade Estrutural**. McGraw-Hill, Lisboa, 2001.

SCHARDT, R. **Generalized Beam Theory – Na Adequate Method for Couples Stability Problems**. Thin-Walled Structures 19: 161-180, 1994.

SERUTI, C.A. **Caracterização mecânica e desempenho estrutural de Elementos Pultrudados**. Dissertação M.Sc., COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

SILVESTRE, N., & CAMOTIM, D. **GBT buckling analysis of pultruded FRP lipped channel members**. Computers & structures, 81(18), 1889-1904, 2003.

SMITH, C. S. **Design of submersible pressure hulls in composite materials**. Marine structures, 4(2), 141-182, 1991.

SEANGATITH, S., SRIBOONLUE, W. **Axially loaded glass-fiber reinforced plastic composite columns**. Seventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, Kochi, Japan, pp. 1307-1312, 1999.

SONTI S. S., BARBERO, E. **Material characterization of pultruded maninates and shapes**. J. Reinforced Plastics and Compos., 15, 701-717, 1996.

SOUTHWELL, E. V. **On the analysis of experimental observations in problems of elastic stability**. Proceedings of Royal Society of London, 135, pp. 601-616, 1932.

STRATFORD, T. **The condition of the Aberfeldy Footbridge after 20 years in service**. In Structural Faults and Repair, 2012.

STRATUS. **Stratus Compostos Estruturais Ltda**. Disponível em: <<http://www.stratus.com.br>>. Acesso em 09 de março de 2017.

STRONGWELL. **Fiberglass Reinforced Polymer (FRP) – Structural Shapes / Plate and Fabrications**. 2016. Disponível em <http://www.strongwell.com/wp-content/uploads/2015/08/StrongwellSpecs-FRP-Structural-Shapes-and-Plate.pdf>. Acessado em 08 de dezembro de 2016.

TIMOSHENKO, S., TIMOSHENKO, S. P., TIMOSHENKO, S. P., & TIMOSHENKO, S. P. **Strength of materials**. Vol. 210. New York: van Nostrand, 1956.

TIMOSHENKO, S. P., GERE, J. M. **Theory of elastic stability**. McGraw-Hill, Nova Iorque, 1961.

TOMBLIN, J., BARBERO, E. J. **Local buckling experiments on FRP columns**. Thin Walled Structures, 18, pp. 97-116, 1994.

TURVEY, G.J. **Torsion tests on pultruded GRP sheet**. Composites Science and technology, 58 (8), pp. 1343-1351, 1998.

TURVEY, G. J., & ZHANG, Y. **Local buckling of axially compressed, pultruded GRP, WF-section, short columns-comparison of experimental and FE analysis buckling loads**. In Applied Mechanics and Materials (Vol. 1, pp. 87-92). Trans Tech Publications, 2004.

VIEIRA, J.D. **Estudo do comportamento estrutural de perfis pultrudados sob efeito de alta temperatura**. Tese D.Sc., COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

WHITNEY, J.M. **Elastic moduli of Unidirectional Composites with Anisotropic Filaments**. J. Comp. Mat., v.1, p.188, 1967.

YOOSEFINEJAD, A., HOGG, P.J. **Determination of in-plane and out-of-plane shear properties of glass/vinyl ester composite materials using a rectangular bar torsion specimen**. ECCM-7, Seventh European Conference on Composite Materials, v.2, p.105-112, 1996.

ZIEMIAN, R. D., **Guide to stability design criteria for metal structures**. 6th Edition, John Wiley & Sons, New York, 2010.

ZUREICK, A., & SCOTT, D. **Short-term behavior and design of fiber-reinforced polymeric slender members under axial compression.** Journal of Composites for Construction, 1(4), 140-149, 1997.

ZUREICK, A., STEFFEN, R. **Behavior and design of concentrically loaded pultruded angle struts.** ASCE Journal of Structural Engineering, 126 (3), pp. 406-416, 2000.

Apêndice A – Relatórios de Ensaios das Colunas

Serão apresentados a seguir os relatórios dos ensaios realizados com as cantoneiras pultrudadas em polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV) submetidas à compressão centrada.

Os ensaios das cantoneiras maiores (L4) ocorreram no período de junho a setembro, já os das cantoneiras menores (L2) foram realizados nos meses de outubro e novembro, ambos no ano de 2016.

A geometria dos corpos de prova é conforme a Figura 7.1. Para determinação das dimensões reais da seção transversal, no plano médio da altura das colunas, foi utilizado um paquímetro e um transferidor foi utilizado para medir o ângulo de dobra. Entretanto, devido às limitações da ferramenta, não foi possível medir com precisão o ângulo de dobra que apresentou valor de 89° aproximadamente para os dois tipos de perfil (L2 e L4).

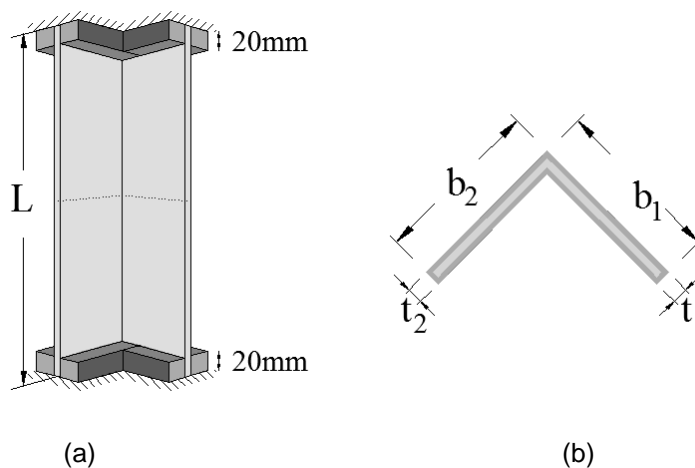


Figura 7.1 - Detalhe genérico do corpo de prova: (a) altura h e (b) seção transversal.

7.1
L2.PO.150.1

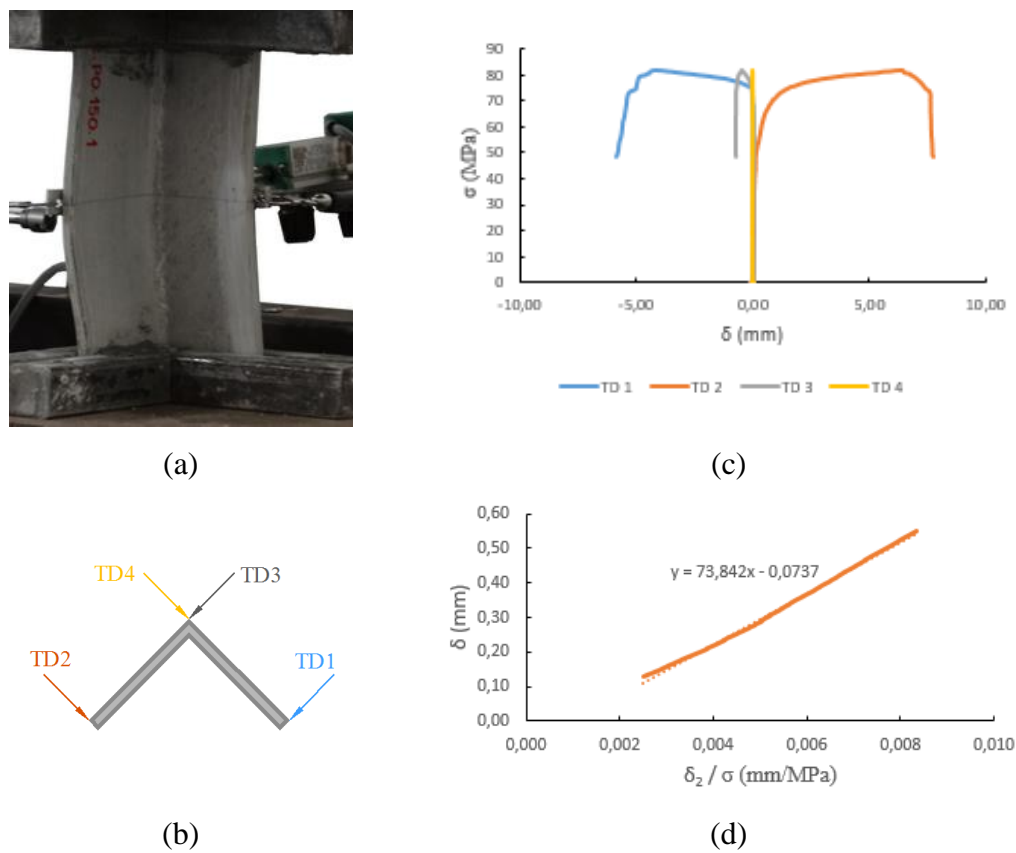


Figura A-1 – (a) Coluna L2.PO.150.1 durante o ensaio. (b) Posição dos transdutores de deslocamento (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_2 \times \delta_2 / \sigma$.

Tabela A-1.1 – Geometria inicial da coluna L2.PO.150.1

Dimensões (mm)				
b_1	b_2	t_1	t_2	L
50,03	49,51	4,71	4,77	150

Tabela A-1.2 – Tensões obtidas na coluna L2.PO.150.1

Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
74	82

* Considerando a área nominal.

- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 1,98$
- Observações visuais:
 - Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.
 - Modo de colapso: ruptura do perfil, ligeiramente abaixo da meia altura, na ligação entre as abas.

7.2
L2.PO.150.2

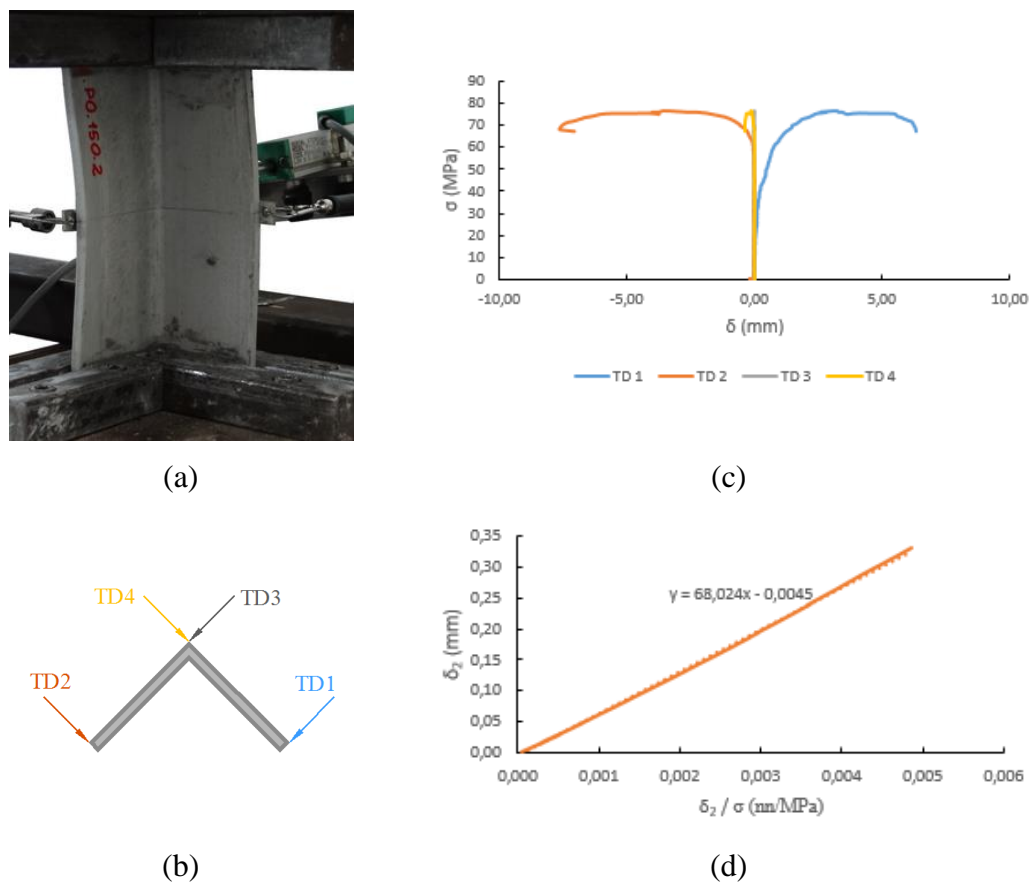


Figura A-2 – (a) Coluna L2.PO.150.2 durante o ensaio. (b) Posição dos transdutores de deslocamento (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_2 \times \delta_2 / \sigma$.

Tabela A-2.1 – Medições iniciais da coluna L2.PO.150.2

Dimensões (mm)				
b ₁	b ₂	t ₁	t ₂	L
49,52	50,78	4,76	4,64	150

Tabela A-2.2 – Tensões obtidas na coluna L2.PO.150.2

Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
68	77

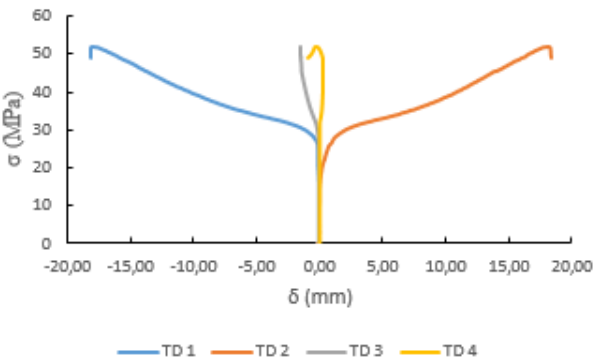
* Considerando a área nominal.

- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 2,07$
- Observações visuais:
 - Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.
 - Modo de colapso: ruptura do perfil, ligeiramente acima da meia altura, na ligação entre as abas.

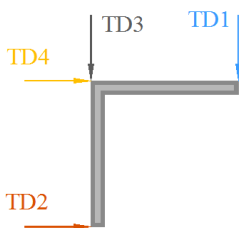
7.3
L2.PO.300.1



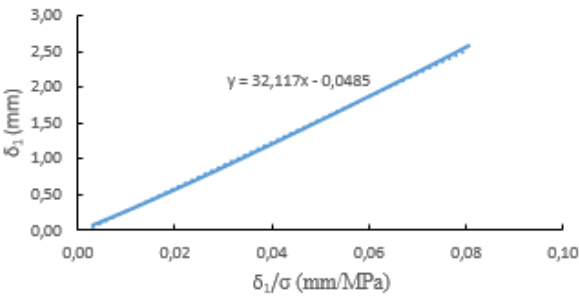
(a)



(c)



(b)



(d)

Figura A-3 – (a) Coluna L2.PO.300.1 durante o ensaio. (b) Posição dos transdutores de deslocamento (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_1 \times \delta_1/\sigma$.

Tabela A-3.1 – Medições iniciais da coluna
L2.PO.300.1

Dimensões (mm)				
b ₁	b ₂	t ₁	t ₂	L
51,69	50,44	4,67	4,68	300

Tabela A-3.2 – Tensões obtidas na coluna
L2.PO.300.1

Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
32	52

* Considerando a área nominal.

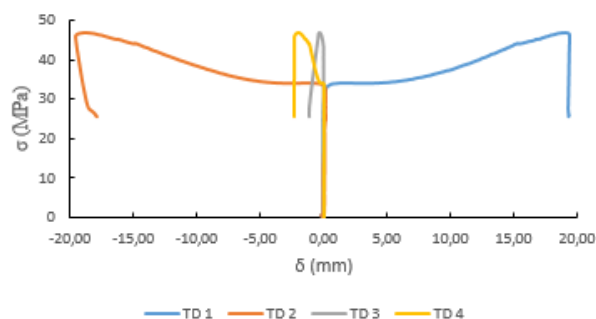
- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 3,01$
- Observações visuais:
 - Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.
 - Modo de colapso: ruptura do perfil à meia altura, na ligação entre as abas.

7.4

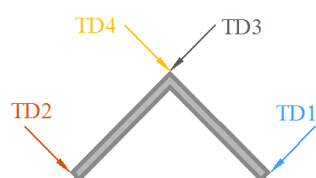
L2.PO.300.2



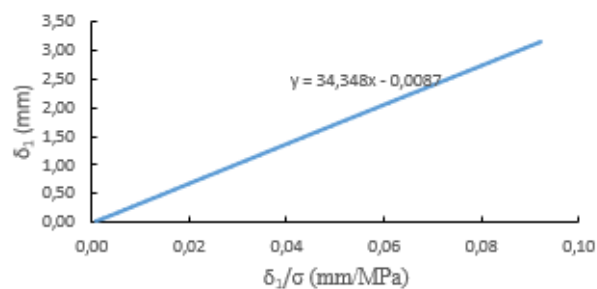
(a)



(c)



(b)



(d)

Figura A-4 – (a) Coluna L2.PO.300.2 durante o ensaio. (b) Posição dos transdutores de deslocamento (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_1 \times \delta_1 / \sigma$.

Tabela A-4.1 – Medições iniciais da coluna L2.PO.300.2

Dimensões (mm)				
b_1	b_2	t_1	t_2	L
49,95	51,94	4,76	4,78	300

Tabela A-4.2 – Tensões obtidas na coluna L2.PO.300.2

Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
34	47

* Considerando a área nominal.

- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 2,91$
- Observações visuais:

Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.

Modo de colapso: ruptura do perfil à meia altura, na ligação entre as abas.

7.5

L2.PO.400.1

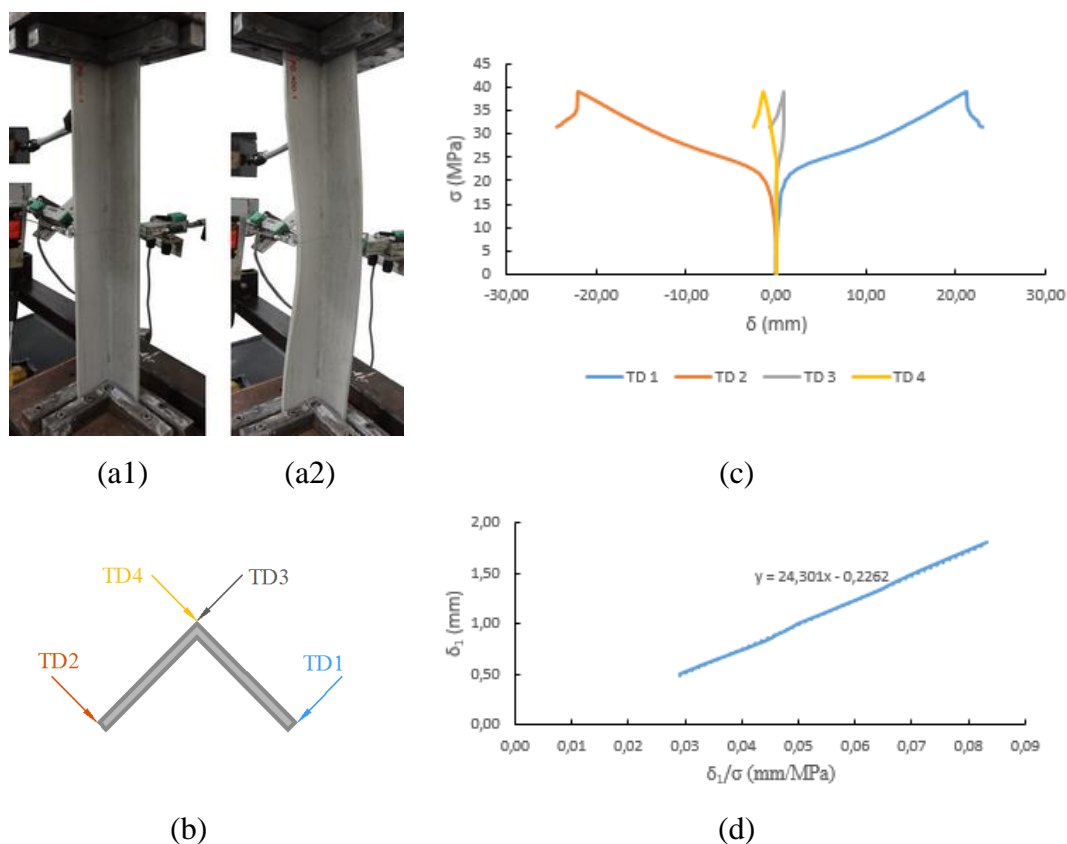


Figura A-5 – Coluna L2.PO.400.1 (a1) antes e (a2) durante o ensaio. (b) Posição dos transdutores de desloc. (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_1 \times \delta_1 / \sigma$.

Tabela A-5.1 – Medições iniciais da coluna L2.PO.400.1

Dimensões (mm)				
b_1	b_2	t_1	t_2	L
50,46	50,49	4,72	4,72	400

Tabela A-5.2 – Tensões obtidas na coluna L2.PO.400.1

Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
24	39

* Considerando a área nominal.

- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 3,45$
- Observações visuais:

Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.

Modo de colapso: ruptura do perfil à meia altura, na ligação entre as abas.

7.6
L2.PO.400.2

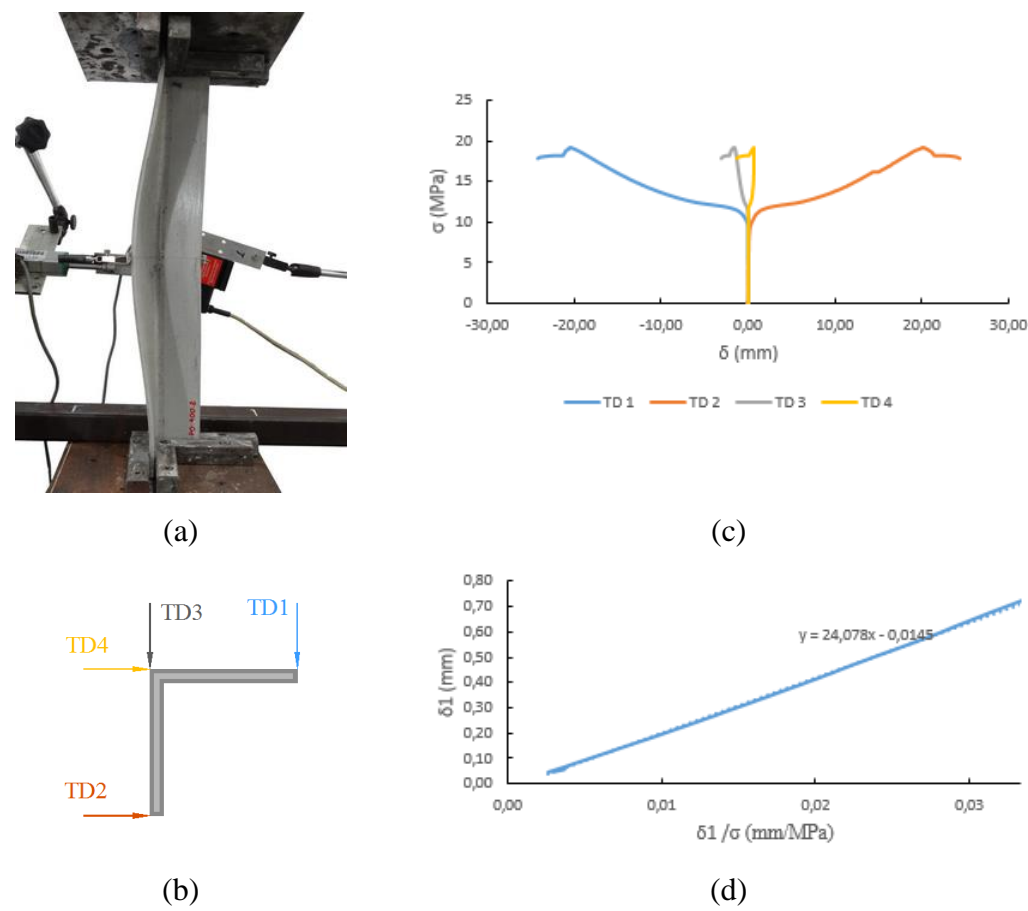


Figura A-6 – (a) Coluna L2.PO.400.2 ao fim do ensaio. (b) Posição dos transdutores de deslocamento (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_1 \times \delta_1/\sigma$.

Tabela A-6.1 – Medições iniciais da coluna L2.PO.400.2

Dimensões (mm)				
b_1	b_2	t_1	t_2	L
51,19	49,95	4,69	4,67	400

Tabela A-6.2 – Tensões obtidas na coluna L2.PO.400.2

Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
24	42

* Considerando a área nominal.

- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 3,47$
- Observações visuais:
 - Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.
 - Modo de colapso: ruptura do perfil à meia altura, na ligação entre as abas.

7.7

L2.PO.500.1

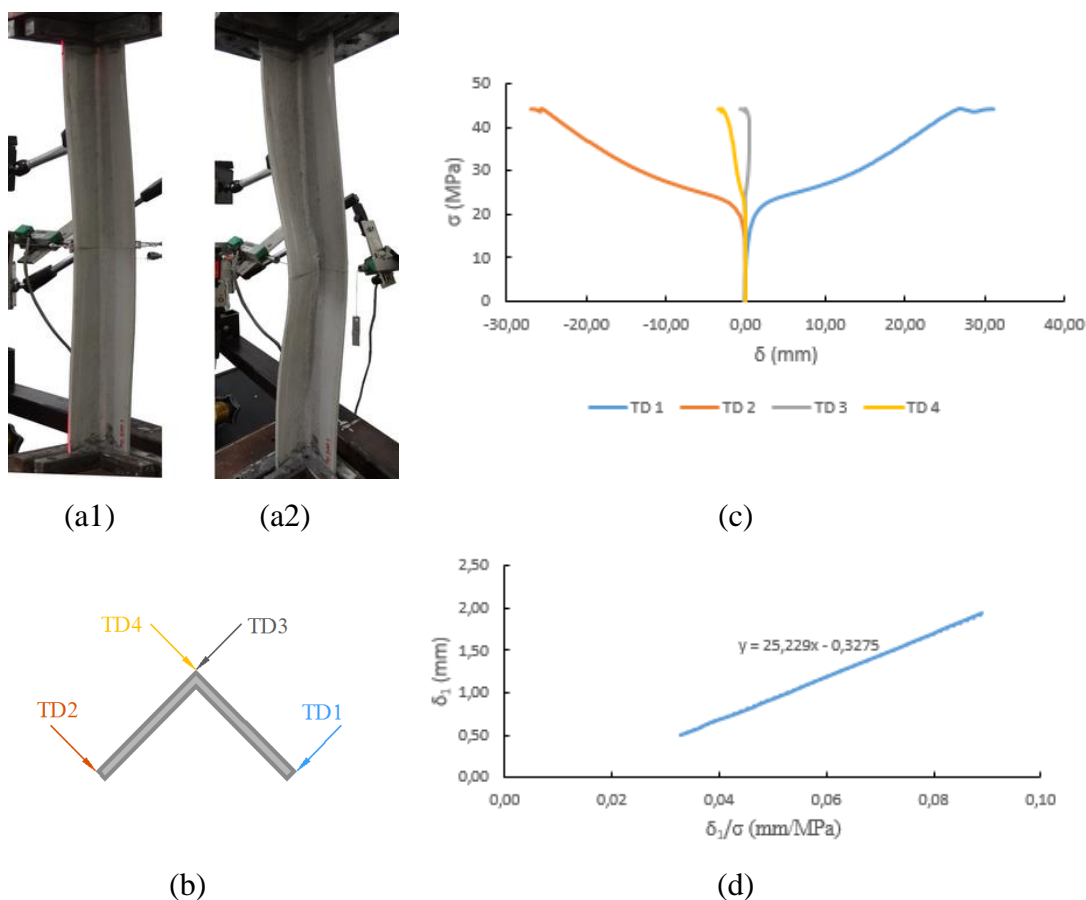


Figura A-7 – Coluna L2.PO.500.1 (a1) durante e (a2) ao fim do ensaio. (b) Posição dos transdutores de desloc. (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_1 \times \delta_1 / \sigma$.

Tabela A-7.1 – Medições iniciais da coluna L2.PO.500.1

Dimensões (mm)				
b_1	b_2	t_1	t_2	L
49,59	51,61	4,68	4,63	500

Tabela A-7.2 – Tensões obtidas na coluna L2.PO.500.1

Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
25	45

* Considerando a área nominal.

- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 3,39$
- Observações visuais:

Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.

Modo de colapso: ruptura do perfil à meia altura, na ligação entre as abas.

7.8
L2.PO.500.2

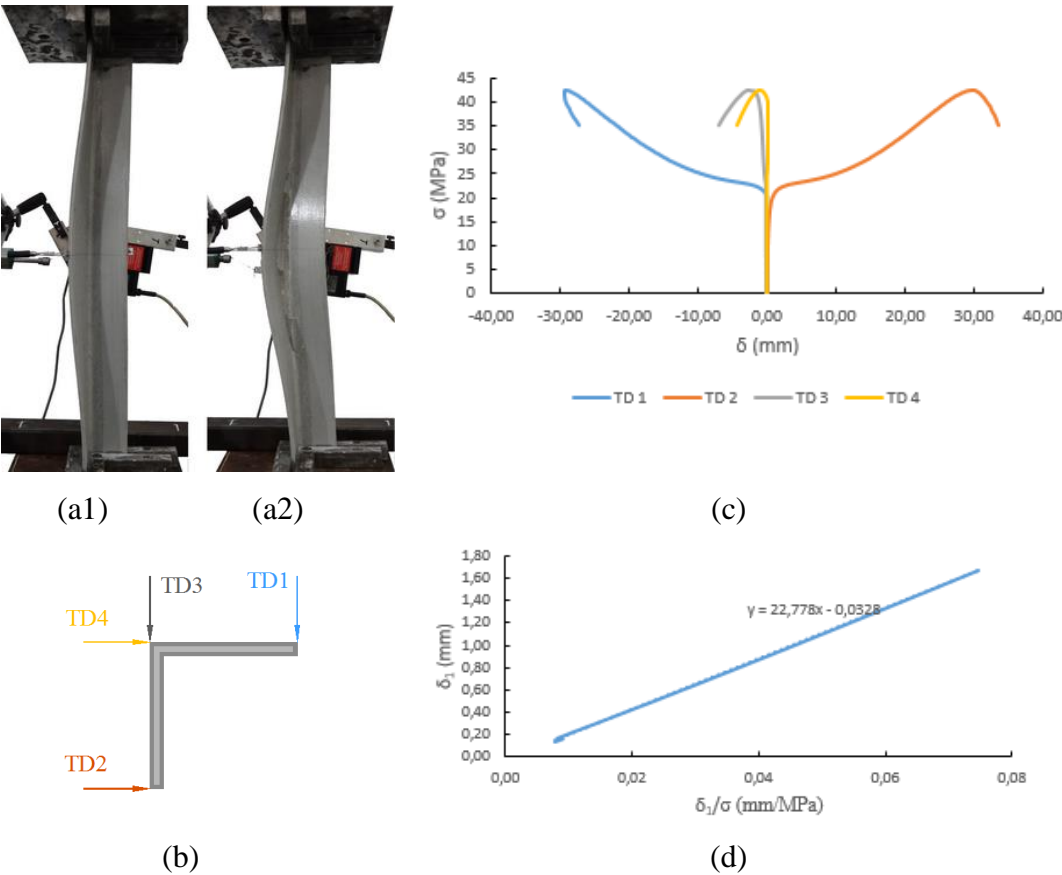


Figura A-8 – Coluna L2.PO.500.2 (a1) durante e (a2) ao fim do ensaio. (b) Posição dos transdutores de desloc. (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_1 \times \delta_1 / \sigma$.

Tabela A-8.1 – Medições iniciais da coluna L2.PO.500.2

Dimensões (mm)				
b ₁	b ₂	t ₁	t ₂	L
51,56	50,55	4,69	4,57	500

Tabela A-8.2 – Tensões obtidas na coluna L2.PO.500.2

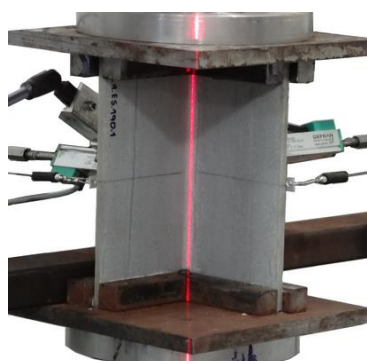
Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
23	43

* Considerando a área nominal.

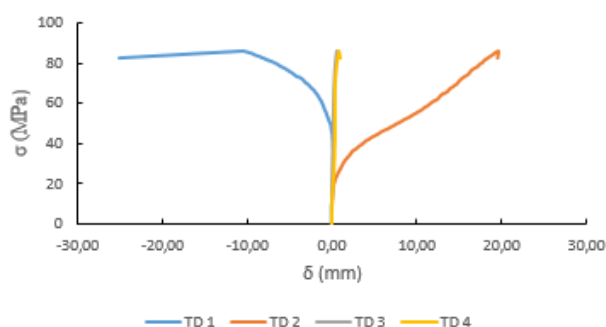
- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 3,57$
- Observações visuais:
 - Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.
 - Modo de colapso: ruptura do perfil à meia altura, na ligação entre as abas.

7.9

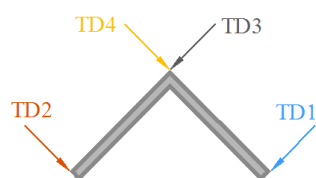
L4.ES.190.1



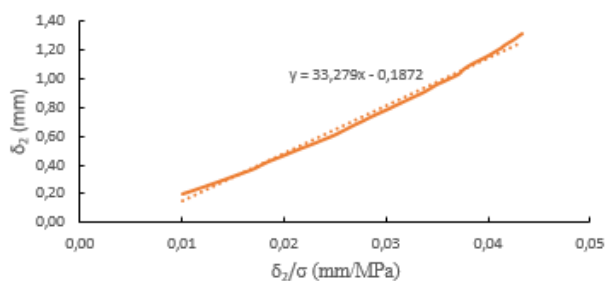
(a)



(c)



(b)



(d)

Figura A-9 – (a) Coluna L4.ES.190.1 antes do ensaio. (b) Posição dos transdutores de deslocamento (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_2 \times \delta_2 / \sigma$.

Tabela A-9.1 – Medições iniciais da coluna L4.ES.190.1

Dimensões (mm)				
b_1	b_2	t_1	t_2	L
101,84	101,54	6,30	6,44	190

Tabela A-9.2 – Tensões obtidas na coluna L4.ES.190.1

Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
33	86

* Considerando a área nominal.

- Índice de esbelteza associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 2,91$

- Observações visuais:

Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.

Modo de colapso: ruptura do perfil à meia altura, na ligação entre as abas.

7.10

L4.ES.200.1

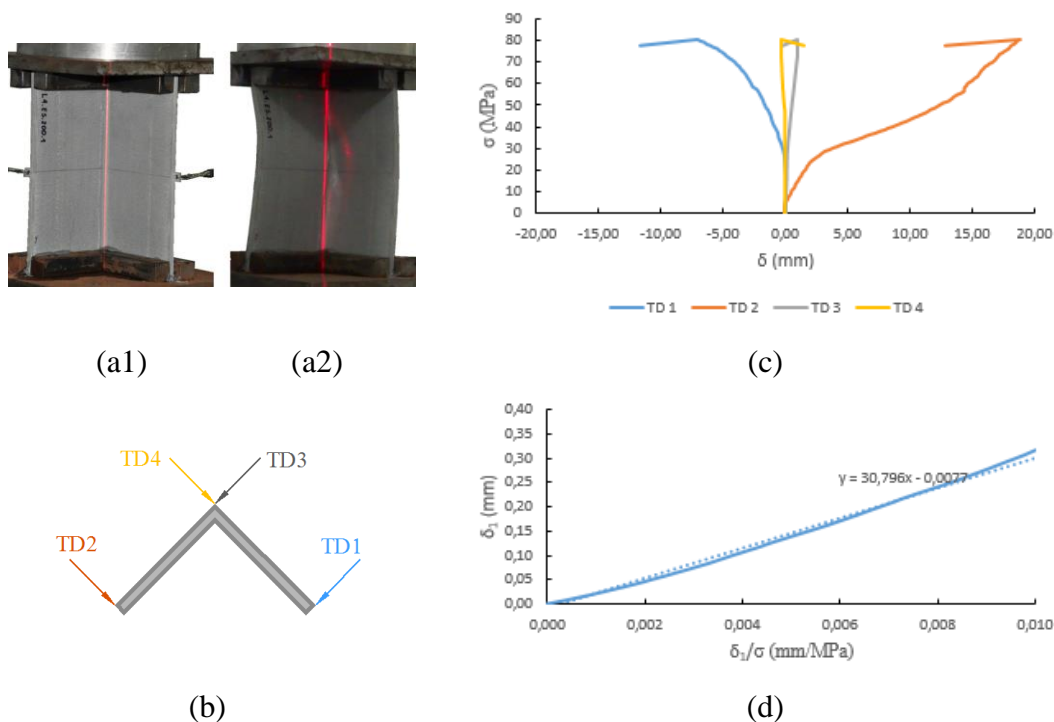


Figura A-10 – Coluna L4.ES.200.1 (a1) antes e (a2) ao fim do ensaio. (b) Posição dos transdutores de desloc. (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_1 \times \delta_1 / \sigma$.

Tabela A-10.1 – Medições iniciais da coluna L4.ES.200.1

Dimensões (mm)				
b_1	b_2	t_1	t_2	L
100,72	101,78	6,39	6,32	200

Tabela A-10.2 – Tensões obtidas na coluna L4.ES.200.1

Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
31	81

* Considerando a área nominal.

- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 3,03$
- Observações visuais:
 - Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.
 - Modo de colapso: ruptura do perfil à meia altura, na ligação entre as abas.

7.11

L4.ES.300.1

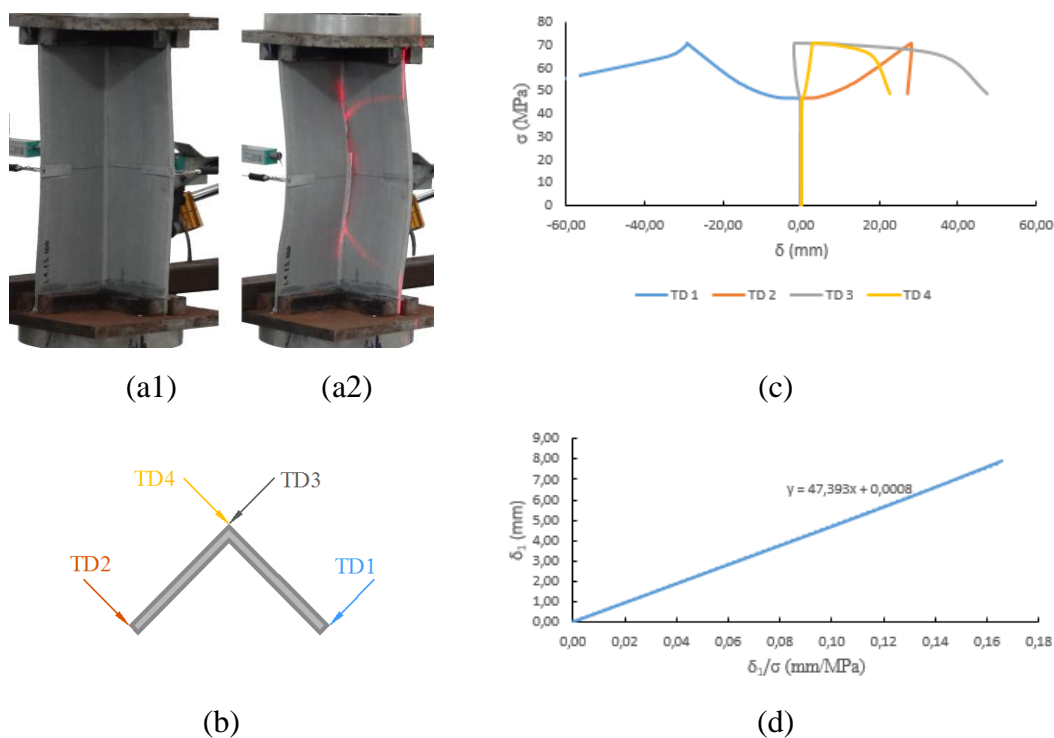


Figura A-11 – Coluna L4.ES.300.1 (a1) durante e (a2) ao fim do ensaio. (b) Posição dos transdutores de desloc. (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_1 \times \delta_1 / \sigma$.

Tabela A-11.1 – Medições iniciais da coluna L4.ES.300.1

Dimensões (mm)				
b_1	b_2	t_1	t_2	L
101,94	100,95	6,32	6,33	300

Tabela A-11.2 – Tensões obtidas na coluna L4.ES.300.1

Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
47	71

* Considerando a área nominal.

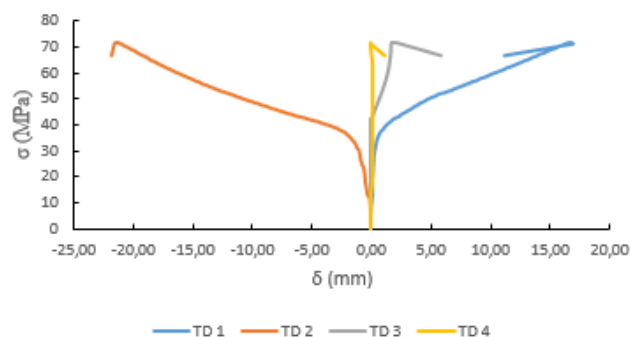
- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 2,44$
- Observações visuais:
 - Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.
 - Modo de colapso: ruptura do perfil à meia altura, na ligação entre as abas.

7.12

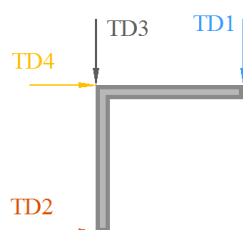
L4.ES.300.2



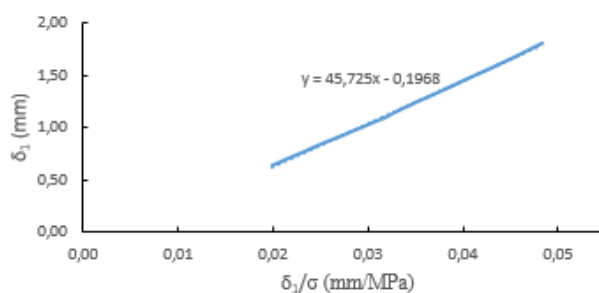
(a)



(c)



(b)



(d)

Figura A-12 – (a) Coluna L4.ES.300.2 durante o ensaio. (b) Posição dos transdutores de desloc. (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_1 \times \delta_1 / \sigma$.

Tabela A-12.1 – Medições iniciais da coluna L4.ES.300.2

Dimensões (mm)				
b_1	b_2	t_1	t_2	L
101,87	100,80	6,30	6,37	300

Tabela A-12.2 – Tensões obtidas na coluna L4.ES.300.2

Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
46	71

* Considerando a área nominal.

- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 2,49$
- Observações visuais:

Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.

Modo de colapso: ruptura do perfil à meia altura, na ligação entre as abas.

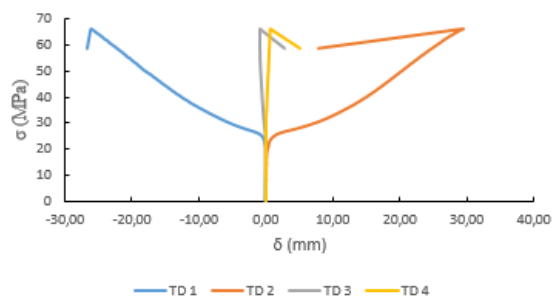
7.13

L4.ES.400.1

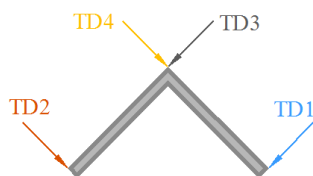


(a1)

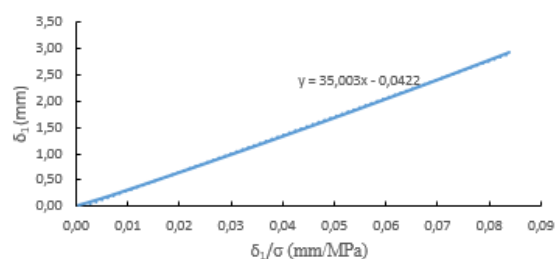
(a2)



(c)



(b)



(d)

Figura A-13 – Coluna L4.ES.400.1 (a1) durante e (a2) ao fim do ensaio. (b) Posição dos transdutores de desloc. (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_1 \times \delta_1/\sigma$.

Tabela A-13.1 – Medições iniciais da coluna L4.ES.400.1

Dimensões (mm)				
b_1	b_2	t_1	t_2	L
100,88	101,80	6,45	6,33	400

Tabela A-13.2 – Tensões obtidas na coluna L4.ES.400.1

Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
28	66

* Considerando a área nominal.

- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 3,19$
- Observações visuais:

Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.

Modo de colapso: ruptura do perfil à meia altura, na ligação entre as abas.

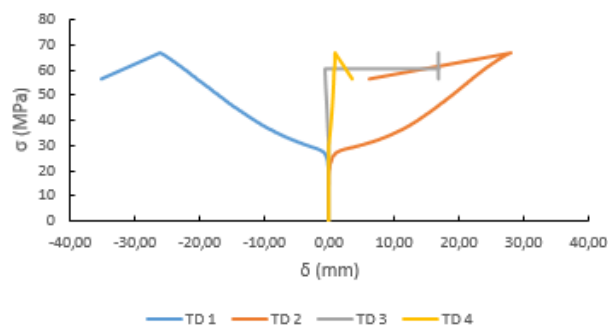
7.14

L4.ES.400.2

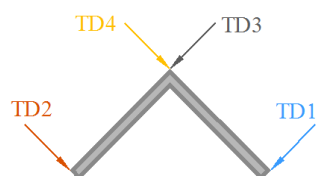


(a1)

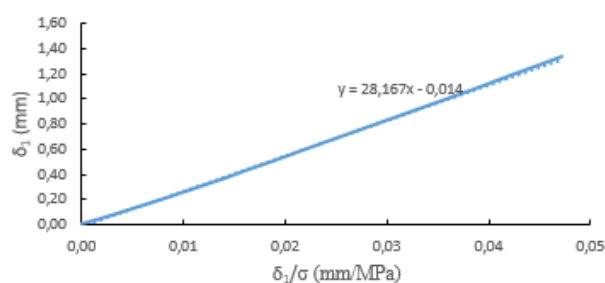
(a2)



(c)



(b)



(d)

Figura A-14 – Coluna L4.ES.400.2 (a1) antes e (a2) ao fim do ensaio. (b) Posição dos transdutores de desloc. (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_1 \times \delta_1 / \sigma$.

Tabela A-14.1 – Medições iniciais da coluna L4.ES.400.2

Dimensões (mm)				
b_1	b_2	t_1	t_2	L
100,80	101,78	6,31	6,36	400

Tabela A-14.2 – Tensões obtidas na coluna L4.ES.400.2

Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
28	67

* Considerando a área nominal.

- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 3,17$
- Observações visuais:

Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.

Modo de colapso: ruptura do perfil à meia altura, na ligação entre as abas.

7.15
L4.ES.500.1

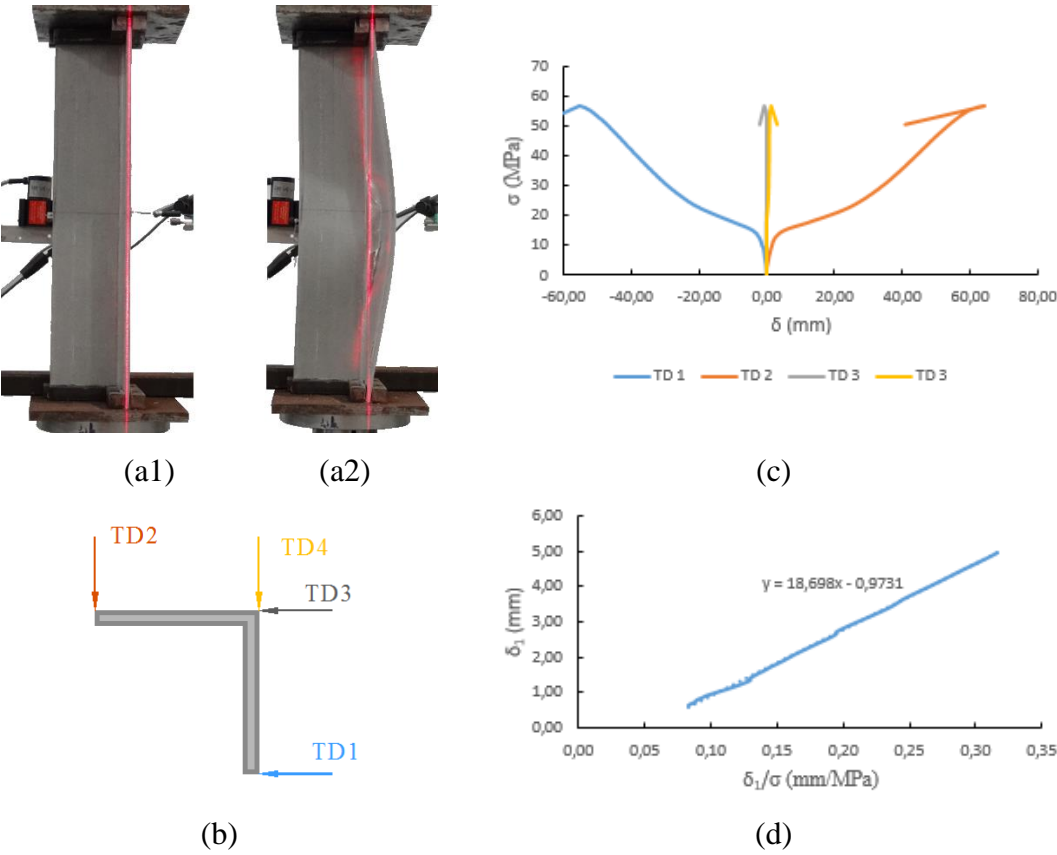


Figura A-15 – Coluna L4.ES.500.1 (a1) antes e (a2) ao fim do ensaio. (b) Posição dos transdutores de desloc. (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_1 \times \delta_1/\sigma$.

Tabela A-15.1 – Medições iniciais da
coluna L4.ES.500.1

Dimensões (mm)				
b ₁	b ₂	t ₁	t ₂	L
100,45	101,82	6,41	6,38	500

Tabela A-15.2 – Tensões obtidas na
coluna L4.ES.500.1

Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
19	57

* Considerando a área nominal.

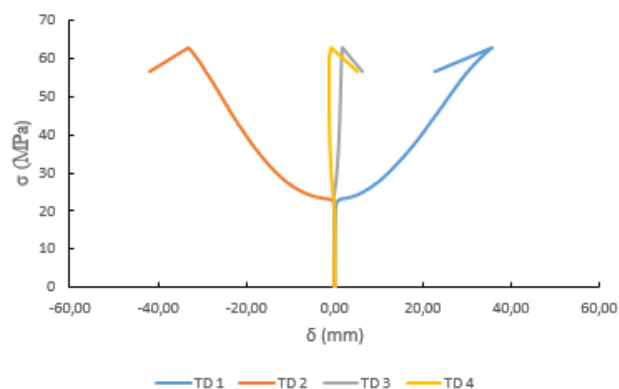
- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 3,89$
- Observações visuais:
 - Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.
 - Modo de colapso: ruptura do perfil à meia altura, na ligação entre as abas.

7.16

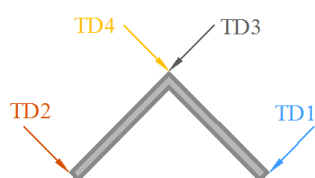
L4.ES.500.2



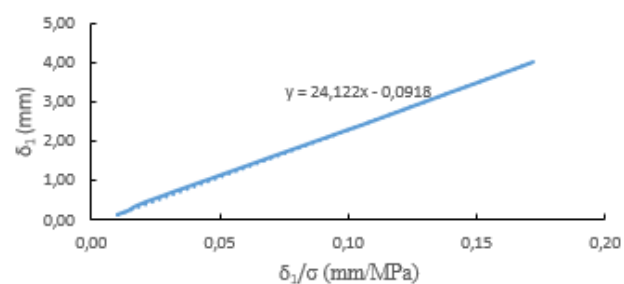
(a)



(c)



(b)



(d)

Figura A-16 – (a) Coluna L4.ES.500.2 durante o ensaio. (b) Posição dos transdutores de desloc. (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_1 \times \delta_1 / \sigma$.

Tabela A-16.1 – Medições iniciais da coluna L4.ES.500.2

Dimensões (mm)				
b_1	b_2	t_1	t_2	L
101,20	101,87	6,40	6,48	500

Tabela A-16.2 – Tensões obtidas na coluna L4.ES.500.2

Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
24	63

* Considerando a área nominal.

- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 3,42$

- Observações visuais:

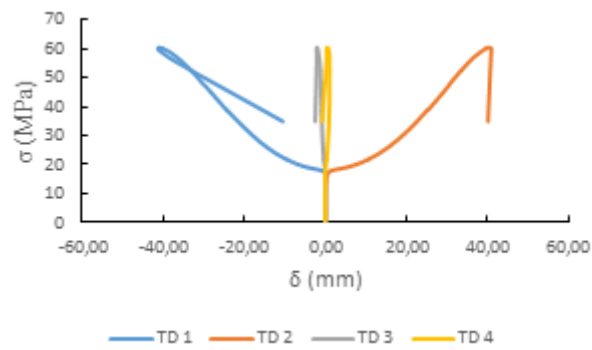
Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.

Modo de colapso: ruptura do perfil à meia altura, na ligação entre as abas.

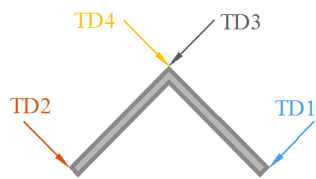
7.17
L4.ES.600.2



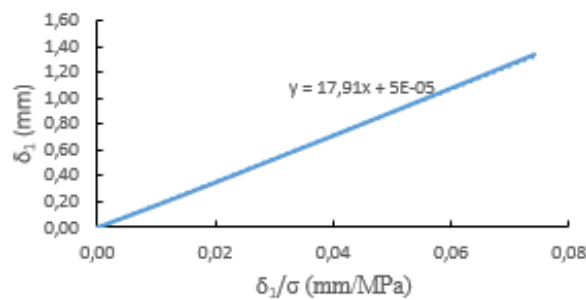
(a)



(c)



(b)



(d)

Figura A-17 – (a) Coluna L4.ES.600.2 durante o ensaio. (b) Posição dos transdutores de desloc. (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_1 \times \delta_1/\sigma$.

Tabela A-17.1 – Medições iniciais da
coluna L4.ES.600.2

Dimensões (mm)				
b ₁	b ₂	t ₁	t ₂	L
101,50	101,29	6,44	6,30	600

Tabela A-17.2 – Tensões obtidas na
coluna L4.ES.600.2

Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
18	60

* Considerando a área nominal.

- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 3,97$
- Observações visuais:
 - Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.
 - Modo de colapso: ruptura do perfil à meia altura, na ligação entre as abas.

7.18

L4.ES.800.1

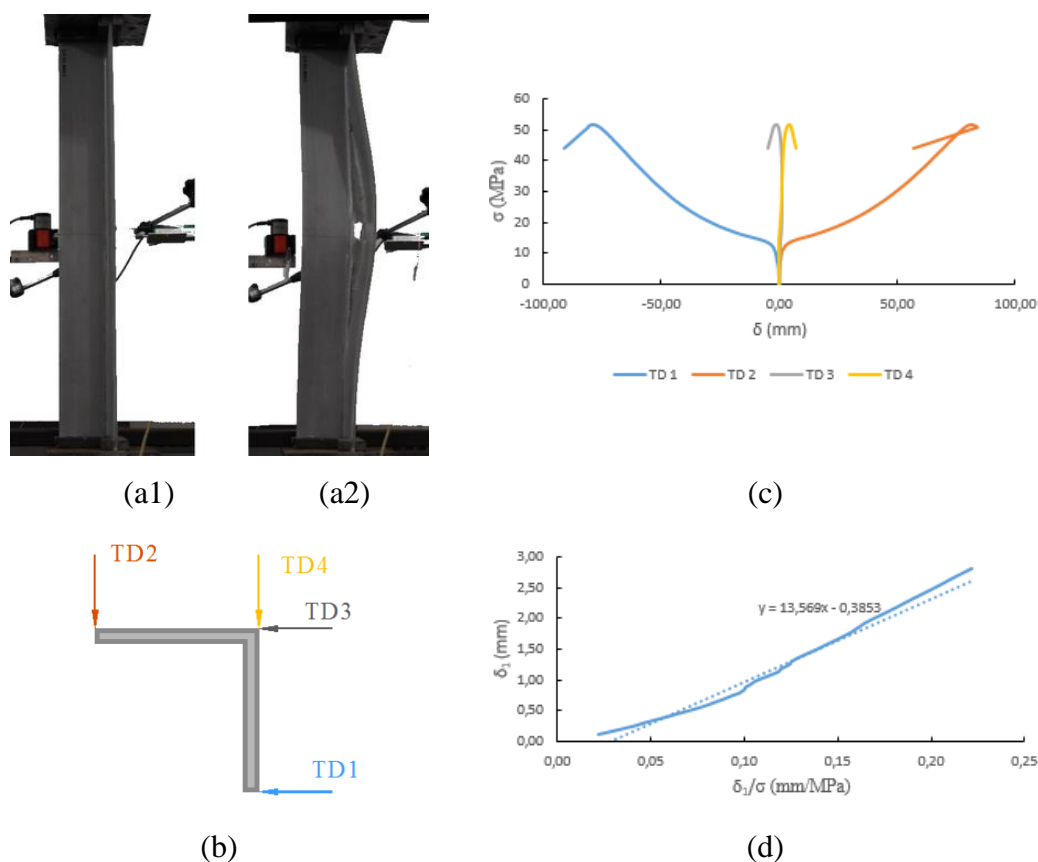


Figura A-18 – Coluna L4.ES.800.1 (a1) antes e (a2) ao fim do ensaio. (b) Posição dos transdutores de desloc. (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_1 \times \delta_1 / \sigma$.

Tabela A-18.1 – Medições iniciais da coluna L4.ES.800.1

Dimensões (mm)				
b_1	b_2	t_1	t_2	L
101,14	101,81	6,43	6,33	800

Tabela A-18.2– Tensões obtidas na coluna L4.ES.800.1

Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
14	52

* Considerando a área nominal.

- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 4,56$
- Observações visuais:

Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.

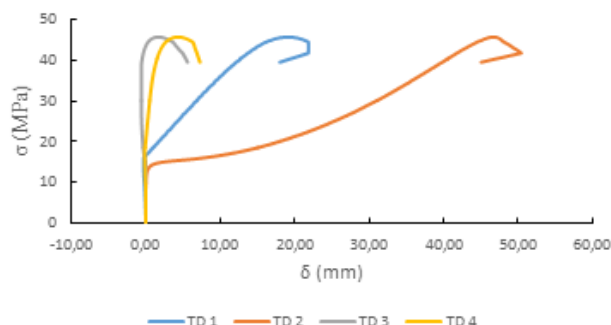
Modo de colapso: ruptura do perfil à meia altura, na ligação entre as abas.

7.19

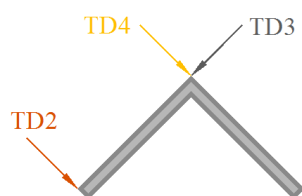
L4.ES.800.2



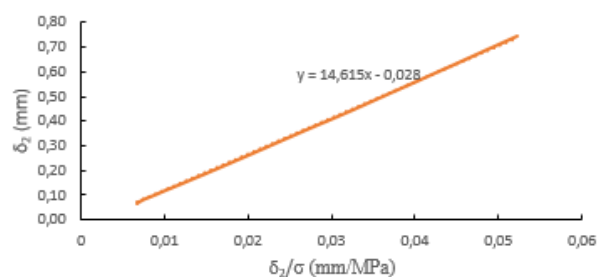
(a)



(c)



(b)



(d)

Figura A-19 – (a) Coluna L4.ES.800.2 durante o ensaio. (b) Posição dos transdutores de desloc. (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_2 \times \delta_2 / \sigma$.

Tabela A-19.1 – Medições iniciais da coluna L4.ES.800.2

Dimensões (mm)				
b_1	b_2	t_1	t_2	L
100,88	101,94	6,44	6,37	800

Tabela A-19.2 – Tensões obtidas na coluna L4.ES.800.2

Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
15	46

* Considerando a área nominal.

- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 4,40$
- Observações visuais:

Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.

Modo de colapso: ruptura do perfil, ligeiramente abaixo da meia altura, na ligação entre as abas.

Não foram registrados os dados do transdutor 1 (TD1).

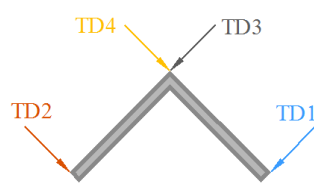
7.20

L4.ES.1000.1

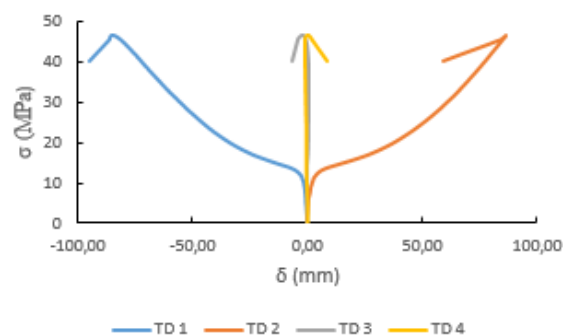


(a1)

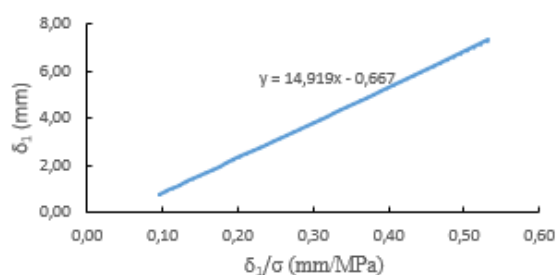
(a2)



(b)



(c)



(d)

Figura A-20 – Coluna L4.ES.1000.1 (a1) antes e (a2) ao fim do ensaio. (b) Posição dos transdutores de desloc. (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_1 \times \delta_1/\sigma$.

Tabela A-20.1 – Medições iniciais da coluna L4.ES.1000.1

Dimensões (mm)				
b_1	b_2	t_1	t_2	L
101,88	100,99	6,36	6,43	1000

Tabela A-20.2 – Tensões obtidas na coluna L4.ES.1000.1

Tensões* (MPa)	
Fcr	Fu
15	47

* Considerando a área nominal.

- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 4,40$
- Observações visuais:

Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.

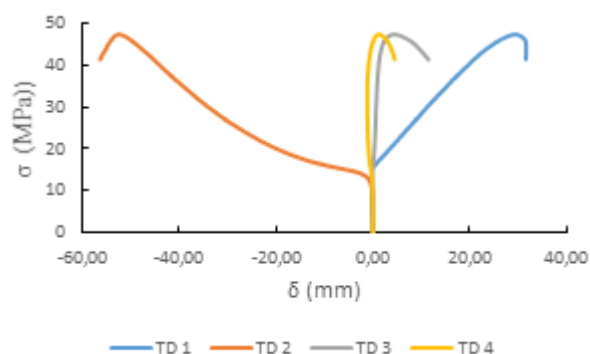
Modo de colapso: ruptura do perfil à meia altura, na ligação entre as abas.

7.21

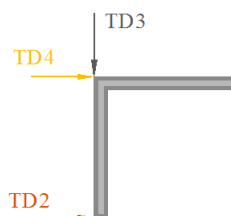
L4.ES.1000.2



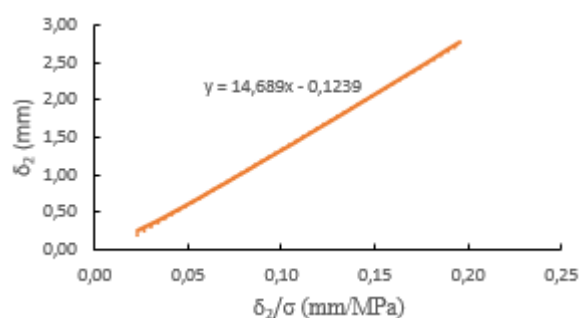
(a)



(c)



(b)



(d)

Figura A-21 – (a) Coluna L4.ES.1000.2 durante o ensaio. (b) Posição dos transdutores de desloc. (TD) na seção mediana da altura. (c) $\sigma \times \delta$. (d) $\delta_2 \times \delta_2 / \sigma$.

Tabela A-21.1 – Medições iniciais da coluna L4.ES.1000.2

Dimensões (mm)				
b ₁	b ₂	t ₁	t ₂	L
101,91	101,85	6,35	6,31	1000

Tabela A-21.2– Tensões obtidas na coluna L4.ES.1000.2

Tensões* (MPa)	
F _{cr}	F _u
15	47

* Considerando a área nominal.

- Índice de esbeltez associado à flambagem global por flexo-torção: $\lambda_{FT} = 4,38$
- Observações visuais:

Modo de instabilidade: flambagem global por flexo-torção.

Modo de colapso: ruptura do perfil na metade inferior da altura, na ligação entre as abas.

Não foram registrados os dados do transdutor 1 (TD1).