

ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE PERFIS PULTRUDADOS
SOB EFEITO DE ALTA TEMPERATURA.

Janine Domingos Vieira

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA CIVIL

Aprovada por:

Prof. Eduardo de Miranda Batista, D.Sc.

Prof. José Roberto Moraes d'Almeida, D.Sc.

Prof. Juan Carlos Garcia de Blas, Dr.Ing.

Prof^ª Michèle Schubert Pfeil, D.Sc.

Prof. Romildo Dias Toledo Filho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2008

VIEIRA, JANINE DOMINGOS

Estudo do Comportamento Estrutural de
Perfis Pultrudados sob Efeito de Alta
Temperatura [Rio de Janeiro] 2008

XXVI, 170 p. 29.7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,
(Engenharia Civil, 2008)

Tese – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Materiais Compósitos.
2. Alta Temperatura
3. Perfis Pultrudados.
4. Flambagem elástica.

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Aos meus pais
com muito amor.

*Quem passou pela vida em branca nuvem
E em plácido repouso adormeceu;
Quem não sentiu o frio da desgraça,
Quem passou pela vida e não sofreu,
Foi espectro de homem - não foi homem,
Só passou pela vida - não viveu.*

(Francisco Otaviano)

Agradecimentos

Cada pessoa que passa em nossa vida, passa sozinha, é porque cada pessoa é única e nenhuma substitui a outra! Cada pessoa que passa em nossa vida passa sozinha e não nos deixa só porque deixa um pouco de si e leva um pouquinho de nós. Essa é a mais bela responsabilidade da vida e a prova de que as pessoas não se encontram por acaso.

Charles Chaplin

A Deus por tudo.

Aos meus pais, Vanda e Vieira, pelo apoio e incentivo para a realização deste sonho, mesmo que isso significasse estar ausente de casa em vários momentos.

Aos meus irmãos, Janaina e Robson e aos meus cunhados, Tatiana e Lúcio que mesmo estando longe sempre me incentivaram ao longo do trabalho.

Agradeço de coração ao Guilherme que desde que começou a participar de minha vida me incentivou e apoiou com bastante carinho e sempre esteve ao meu lado nos momentos difíceis. Agradeço pelas várias horas dedicadas em me ajudar no programa experimental com várias idéias ou com soluções dos problemas ocorridos.

Ao meu orientador Eduardo Batista, pelos ensinamentos, pela disponibilidade e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também a sensibilidade em muitas vezes em perceber e me ajudar em muitos momentos difíceis nesse período.

Ao professor Juan Carlos Garcia de Blas pelas horas dedicadas em ajudar no desenvolvimento das estufas utilizadas no programa experimental.

Ao professor Romildo Dias Toledo Filho por disponibilizar o laboratório de fluência para realização de alguns ensaios e por empréstimos de equipamentos.

A todos os professores de COPPE, pelo apoio e muitas vezes por empréstimos de equipamentos em especial, aos professores Carlos Magluta, Ney Roitman e Ronaldo Batista.

Aos técnicos e funcionários que foram de grande importância para o desenvolvimento do programa experimental, do Laboratório de Estruturas da COPPE: Anísio, Santiago, Arnaldo, Manoel, Flávio Sarquis, José Maria, do Laboratório de Metalurgia e Materiais da COPPE: ao Laércio, e aos funcionários: Bruna, Clodoaldo e Flávio que me ajudaram dentro do possível.

A Luzidelle, Sandra, Thelmo e Rosângela que sempre me atenderam com muito carinho. Não se esquecendo do Jô e da Cristina que sempre me receberam com sorrisos.

A Capes pelo suporte financeiro.

À Empresa Cogumelo – Pultrudados em fibras de vidro pela doação dos perfis utilizados neste trabalho.

E aos amigos:

Ao Adcleides, pela amizade e por ser uma pessoa extremamente atenciosa que em vários momentos se dispôs a me ajudar.

A Eugênia, pelas longas conversas e filosofias sobre o que é viver bem e pelos bons momentos de descontração.

Ao Gadea pela amizade e pelas horas dedicadas a me ajudar, principalmente na parte de programação em LabView.

Ao Tiago e a Maurício que não estão mais na COPPE, mas se dedicaram bastante em me ajudar, principalmente no início do programa experimental.

A Ana Maria, pela amizade e pelas conversas e trocas de experiências referentes aos materiais compósitos.

Ao Emerson, Walber e Alexandre pelas palavras confortantes em vários momentos.

A Reila pela grande simpatia e delicadeza estando sempre disposta a ajudar.

Aos colegas de laboratório: Paulo, Cíntia, Vivian, Margareth, Ederli, João, Rita, Luiz, Carlos, George, Daniel, Marcos, Luiz Fernando, pelos encontros nos corredores ou na copa, para um cafezinho.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE PERFIS PULTRUDADOS SOB EFEITO DE ALTA TEMPERATURA

Janine Domingos Vieira

Março/2008

Orientador: Eduardo de Miranda Batista

Programa: Engenharia Civil

O objetivo da presente pesquisa é a investigação do desempenho estrutural de perfis estruturais em resinas reforçadas com fibras de vidro, fabricados por pultrusão. Em especial, foi destacado o efeito de altas temperaturas no desempenho estrutural, utilizando para isso perfis pultrudados de seção H, muito utilizados em montagens de estruturas.

A pesquisa se desenvolveu com ensaios experimentais de compressão centrada e flexão simples, em temperatura ambiente e a altas temperaturas, com o objetivo de identificar o efeito da temperatura no desempenho estrutural. Adicionalmente, foram identificados fenômenos de fluência do material em presença de alta temperatura, conduzindo à redução da capacidade de carga dos perfis.

A caracterização do material incluiu a determinação das frações volumétricas de fibras de vidro e da resistência à tração.

A avaliação teórica do desempenho dos perfis pultrudados foi desenvolvida com base na análise de flambagem elástica, associada à interpretação do mecanismo de colapso identificado experimentalmente. A comparação entre os resultados teóricos e experimentais permitiu definir procedimentos para cálculo da resistência, com especial ênfase na flambagem local de placa. Nesse caso, verificou-se a inconveniência da aplicação do tradicional método das larguras efetivas, o qual resulta não apropriado para o caso de perfis formados por resina reforçados com fibras.

Abstract of Thesis presented to COPPE/ UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for degree of Doctor of Science (D.Sc.)

STUDY OF THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF THE PULTRUDED PROFILES
UNDER HIGH TEMPERATURE EFFECT

Janine Domingos Vieira

March/2008

Advisor: Eduardo de Miranda Batista

Departament: Civil Engineering

The objective of the present research is the investigation of the structural performance of pultruded members manufactured with glass fiber reinforced resin. The research included an experimental program with concentric compression and flexural tests at room and high temperatures, in order to identify the temperature effect in the structural behavior of the pultruded members. Material creep was also identified during structural tests due to high temperature effect, resulting in reduction of the strength capacity.

The composite material was characterized, including its fiber volume fraction, tensile strength and modulus of elasticity.

The theoretical structural performance of pultruded members was also evaluated with the help of elastic stability theory, by combining computational buckling analysis and experimental observation of collapse mechanism. The comparison between experimental and theoretical results allowed defining procedures to compute structural strength, with special emphasis in the local plate buckling mode. In this case it was verified that the traditional effective width method is not appropriate to be applied in the case of pultruded members. Finally, the contribution of temperature in the structural performance of composite glass fiber reinforced pultruded members was included in the evaluation of its ultimate limit state.

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Motivação	4
1.2.	Objetivos	6
1.3.	Organização da Tese	7
2.	Materiais Compósitos	9
2.1	Considerações Gerais sobre Materiais Compósitos	9
2.1.1.	Propriedades da Matriz.....	10
2.1.2.	Propriedades da Fibra.....	12
2.2.	Pultrudados Reforçados com Fibra de Vidro	14
2.3.	Pesquisas sobre Pultrudados Reforçados com Fibras – Aplicações em Engenharia Civil.....	17
3.	Pesquisa Experimental: Ensaio Realizados.....	23
3.1.	Considerações Iniciais.....	23
3.2.	Descrição dos Ensaio à Flexão Simples	24
3.2.1.	Descrição dos Ensaio à Flexão Simples da Etapa 1.....	24
3.2.2.	Descrição dos Ensaio à Flexão Simples da Etapa 2.....	28
3.3.	Descrição dos Ensaio de Compressão Centrada.....	34
3.4.	Descrição dos Ensaio de Deformação Lenta	41
4.	Resultados Experimentais	47
4.1.	Propriedades dos Materiais	48
4.1.1.	Determinação da Fração Volumétrica de Fibras	50
4.1.2.	Análise Microestrutural das Fibras de Vidro	53
4.1.3.	Resistência à Tração Direta.....	56
4.2.	Resultados dos Ensaio de Flexão.....	61

4.2.1. Ensaio para Obtenção da Carga Última.....	62
4.2.2. Ensaio de Flexão Simples a Alta Temperatura.....	71
4.3. Ensaio de Compressão Centrada.....	93
4.3.1. Ensaio para Obtenção da Resistência.....	94
4.3.2. Ensaio de Compressão Centrada a Altas Temperaturas.....	97
4.4. Ensaio de Deformação Lenta.....	108
4.4.1. Deformação Lenta na Compressão a Temperatura Ambiente.....	108
4.4.2. Deformação Lenta na Tração a Temperatura Ambiente.....	112
4.5. Análise Microestrutural da Ruptura.....	116
5. Análise Teórica da Resistência dos Perfis Pultrudados.....	120
5.1. Análise Computacional da Flambagem.....	120
5.2. Resultados para a Compressão Centrada.....	124
5.3. Resultados para a Flexão Simples.....	132
6. Considerações Finais.....	137
6.1. Conclusões.....	137
Referências Bibliográficas.....	141
Anexo A – Determinação da Fração Volumétrica de Fibras.....	145
Anexo B – Ensaio de Tração Direta.....	164

Lista de Figuras

Capítulo 1

- Figura 1.1 – Componentes elaborados com materiais compósitos: (a) e (b) materiais esportivos; (c) aeronaves 2
- Figura 1.2 – Seções transversais obtidas a partir da pultrusão..... 3
- Figura 1.3 – Aplicações de perfis pultrudados em plataformas industriais: (a) guarda corpos; (b) grade de piso 5
- Figura 1.4 – Aplicações estruturais de perfis pultrudados: (a) plataforma de acesso, Camaçari, BA; (b) escada em Angra dos Reis, RJ..... 6
- Figura 2.1 – Classificação dos tipos de materiais compósitos (Figura retirada de Daniel [7]). 10

Capítulo 2:

- Figura 2.2 – Esquema do processo da pultrusão – Bank [1]. 14
- Figura 2.3 – Sistema de fibras utilizada no processo de pultrusão: (a) fibras longitudinais em roving; (b) manta de fibras e (c) véu de fibras..... 15
- Figura 2.4 – Seções transversais típicas de perfis pultrudados..... 16
- Figura 2.5 – Resultados experimentais obtidos para redução: (a) do módulo de deformação na flexão, E_f , (b) da tensão de colapso na zona comprimida, σ_{uc} , em função da temperatura (ensaios em regime permanente), para testes de perfis pultrudados reforçados com fibras de vidro, Batista [11]. 18
- Figura 2.6 – Ensaio de flexão de perfil pultrudado a alta temperatura, Batista [11]..... 18

Capítulo 3

- Figura 3.1 - Dimensões nominais do perfil pultrudado H adotado para os ensaios (medidas em mm). 24
- Figura 3.2 – Esquema da ligação das duas vigas gêmeas: (a) ligação dos perfis no apoio;(b) ligação dos perfis nos pontos de aplicação de carga..... 25

Figura 3.3 – Ligação das duas vigas gêmeas: (a) ligação dos perfis no apoio; (b) ligação dos perfis nos pontos de aplicação de carga, terço do vão; (c) detalhe da ligação nos pontos de aplicação de carga; (d) configuração final da peça a ser ensaiada.....	27
Figura 3.4 – Esquema dos ensaios de flexão simples para obtenção da resistência das vigas, (medidas em mm).....	28
Figura 3.5 - Montagem final do ensaio de resistência a flexão simples.	28
Figura 3.6 – Esquema geral dos ensaios de flexão a alta temperatura (medidas em mm).	29
Figura 3.7 – Estufa utilizada nos ensaios de flexão: (a) visão geral da estufa; (b) sistema de aquecimento da estufa.....	30
Figura 3.8 – Processo de nivelamento da estufa.....	31
Figura 3.9 – Mecanismo de bilha para impedir a deslocabilidade lateral do tubo de aplicação de carga.....	32
Figura 3.10 - Ensaio de flexão no interior da estufa: (a) esquema da posição dos transdutores de deslocamentos; (b) detalhes da montagem dos ensaios a temperatura ambiente.	32
Figura 3.11 – Transdutores de deslocamentos: (a) detalhe do alongamento das hastes dos transdutores de deslocamentos (b) vista geral dos transdutores de deslocamentos após a adaptação feita para os ensaios com a estufa fechada.	33
Figura 3.12 – Sistema de aquisição de dados.	33
Figura 3.13 – Esquema geral dos ensaios de compressão centrada a temperatura ambiente.	35
Figura 3.14 – Primeiro modo de flambagem obtido pela ferramenta computacional SAP 2000: flexão global.	35
Figura 3.15 – Primeiro modo de flambagem obtido pela ferramenta computacional SAP 2000 para o sistema estrutural bi-engastado: flambagem local de placa.....	36
Figura 3.16 – Configuração dos ensaios de compressão centrada à temperatura ambiente (T.D – transdutor de deslocamento).	37
Figura 3.17 – Estufa desenvolvida para os ensaios de compressão: (a) corpo da estufa e o pórtico de aço utilizado; (b) sistema de aquecimento – circuito fechado.....	38

Figura 3.18 – Configuração final dos ensaios de compressão a altas temperaturas: (a) e (b) posicionamento dos transdutores de deslocamentos; (c) detalhe da montagem em vista externa da estufa e (d) detalhes da montagem dos tubos de cerâmica e fios de aço, em vista interna da estufa.	40
Figura 3.19 – Sistema de aquisição para os ensaios de compressão centrada.....	41
Figura 3.20 – Dimensões nominais dos corpos de prova utilizados nos ensaios de fluência a tração do material compósito extraído dos perfis pultrudados de seção H (medidas em mm).	41
Figura 3.21 – Estrutura utilizada para realização dos ensaios de fluência à tração: (a) pórtico de aço com sistema de braço de alavancas; (b) vista frontal do pórtico com os corpos de prova.....	42
Figura 3.22 – Reforço feito nas extremidades dos corpos de prova.....	43
Figura 3.23 – Instrumentação utilizada nos ensaios de deformação lenta: (a) posição dos extensômetros elétricos de resistência na direção longitudinal da face do corpo de prova; (b) detalhe do extensômetro.	44
Figura 3.24 – Ensaios de deformação lenta a compressão: (a) dispositivo para ensaio de deformação lenta a compressão; (b) vista do sistema de pressão hidráulica controlada.	45
Figura 3.25 – Instrumentação utilizada nos ensaios de deformação lenta a compressão: (a) vista da posição dos extensômetros elétricos utilizados nos ensaios;(b) detalhe do extensômetro posicionado na direção longitudinal da mesa do perfil H.	46
Figura 3.26 – Sistema de aquisição de dados para os ensaios de fluência.	46

Capítulo 4

Figura 4.1 – Estrutura do perfil pultrudado: (a) amostra após a queima; (b) vista da camada de manta; (c) vista da camada de fibras longas de vidro e (d) vista da seqüência das camadas que compõem o perfil pultrudado.....	49
Figura 4.2 – Posição de retirada das amostras para o ensaio de perda de massa.	50
Figura 4.3 – Morfologia das fibras: (a) aspecto do conjunto de fibras após a queima e a orientação das fibras; (b) detalhe da extremidade da fibra; (c) vista lateral da fibra com seu respectivo diâmetro (as imagens foram obtidas por MEV).	55

Figura 4.4 – Morfologia da manta: (a) e (b) aspectos da forma da manta após a queima; (c) detalhes das fibras que compõem a manta; (d) malha desestruturada.	55
Figura 4.5 – Prensa utilizada nos ensaios de tração direta.	57
Figura 4.6 – Dimensões nominais dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração direta, medidas em mm.	57
Figura 4.7 – Exemplo de curva tensão-deformação obtida dos materiais compósitos pultrudados em estudo.	60
Figura 4.8 – Configuração do ensaio V1_Iso.	63
Figura 4.9 – Deslocamentos obtidos no ensaio V1_Iso.	63
Figura 4.10 – Flambagem local de placa na mesa comprimida das vigas do ensaio V1_Iso.	64
Figura 4.11 – Colapso na junção mesa e alma das vigas no ensaio V1_Iso.	65
Figura 4.12 – Configuração final do Ensaio V1_Ester.	65
Figura 4.13 – Deslocamentos obtidos no Ensaio V1_Ester.	66
Figura 4.14 – (a) Flambagem local de placa na mesa superior das vigas; (b) início da flambagem lateral com torção.	66
Figura 4.15 – Colapso da viga na junção da mesa com a alma no Ensaio V1_ester.	67
Figura 4.16 – Configuração do ensaio V2_Ester: (a) e (b) posição dos transdutores de deslocamento e dos relógios analógicos laterais para medição os deslocamentos laterais; (b) e (c) posição dos relógios analógicos superiores para medição do modo de flambagem local de placa.	68
Figura 4.17 – Deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento vertical no ensaio V2_Ester.	69
Figura 4.18 – Deslocamentos obtidos pelos relógios analógicos no Ensaio V2_Ester. .	69
Figura 4.19 – (a) Resultado da distribuição da temperatura nos regimes transiente, estabilização e resfriamento para temperatura máxima de 90°C; (b) posicionamento dos termopares T1 a T5 no interior da estufa.	73

Figura 4.20 – (a) Resultado da distribuição da temperatura em torno dos perfis no interior da estufa para ensaio com temperatura prescrita de 40°C; (b) posição dos termopares.	74
Figura 4.21 – Posicionamento dos transdutores de deslocamento dos ensaios de flexão simples.	75
Figura 4.22 – Resultados dos ensaios de flexão V2_Iso para tensão máxima de 10MPa: (a) carga F registrada durante todos os ensaios; (b) gráfico das temperaturas medidas somente pelo termopar da estufa (Figura 4.21b), registradas durante todo o ensaio, (c) a (f) deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento; (g) e (h) redução do módulo de elasticidade da cada viga.	76
Figura 4.23 - Resultados dos ensaios de flexão V2_Iso para tensão aplicada de 30MPa: (a) carga F registrada durante os ensaios; (b) gráfico das temperaturas registradas somente pelo termopar da estufa (Figura 4.21b), durante os ensaios; (c) a (f) deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento, (g) e (h) redução do módulo de elasticidade da cada viga.	78
Figura 4.24 – Resultados dos ensaios de flexão V3_Iso para tensão máxima aplicada de 10MPa: (a) registro da carga F; (b) a (f) gráfico das temperaturas registradas durante todos os ensaios; (g) a (j) deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento; (k) e (l) redução do módulo de elasticidade da cada viga.	80
Figura 4.25 – Resultados dos ensaios de flexão V3_Iso para tensão aplicada de 20MPa: (a) registro da carga F aplicada nos ensaios; (b) e (c) gráfico das temperaturas registradas durante todos os ensaios; (d) a (g) deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento; (h) e (i) redução do módulo de elasticidade da cada viga.....	82
Figura 4.26 – Resultados dos ensaios de flexão V3_Ester para tensão máxima aplicada de 40MPa: (a) registro da carga F aplicada nos ensaios; (b) gráfico das temperaturas registradas somente pelo termopar da estufa; (c) a (f) deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento; (g) e (h) redução do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura para cada perfil.....	83
Figura 4.27 – Resultados dos ensaios de flexão V4_Ester para tensão aplicada de 40MPa: (a) registro da carga F aplicada nos ensaios; (b) gráfico das temperaturas registradas; (c) a (f) deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento; (g) e	

(h) redução do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura para cada perfil.	85
Figura 4.28 – Resultados dos ensaios de flexão V5_Ester para tensão máxima aplicada de 10MPa: (a) registro da carga F; (b) a (f) temperaturas registradas pelos termopares durante os ensaios; (g) a (j) deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento; (k) e (l) redução do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura para cada perfil.	87
Figura 4.29 – Resultados dos ensaios de flexão V5_Ester para tensão máxima aplicada de 20MPa: (a) carga F aplicada nos ensaios; (b) a (f) temperaturas registradas pelos termopares durante os ensaios; (g) a (j) deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento; (k) e (l) redução do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura para cada perfil.	89
Figura 4.30 – Mecanismo típico de colapso: (a) e (b) localização do colapso (V5_ester); (b) detalhe (vista superior) do colapso na mesa superior comprimida do perfil (V2_Iso).	91
Figura 4.31 – Redução do modulo de elasticidade aparente na flexão simples: (a) e (b) ensaio V3_Ester; (c) e (d) ensaio V4_Ester; (e) e (f)ensaio V5_Ester; (g) ensaio V2_Iso e (h) ensaio V3_Iso.....	93
Figura 4.32 – Posicionamento dos transdutores de deslocamentos para o ensaio a temperatura ambiente.	95
Figura 4.33 – Deslocamentos obtidos pelos transdutores de deslocamentos no ensaio C1_Ester: (a) deslocamentos referidos às alturas [L/3 (i) e (s)] e L/2 medidos pelos transdutores posicionados nos bordos livres da mesa; (b) deslocamentos medidos pelos transdutores posicionados a meia altura da coluna, no plano de menor inércia.....	95
Figura 4.34 – Deslocamentos obtidos pelos transdutores no ensaio C1_Iso: (a) deslocamentos referidos às alturas [L/3 (i) e (s)] e L/2 medidos pelos transdutores posicionados nos bordos livres da mesa; (b) deslocamentos medidos pelos transdutores posicionados a meia altura da coluna, no plano de menor inércia.	95
Figura 4.35 – (a) Início do desenvolvimento da flambagem local de placa; (b) estado .	96
Figura 4.36 – (a) Colapso por compressão da mesa; (b) ruptura na ligação da mesa com a alma.....	97

Figura 4.37 – Resultados da distribuição da temperatura em torno da coluna no interior da estufa;(a) distribuição das temperaturas medidas; (b) posicionamento dos termopares (T1, T2, T3 e T4).....	98
Figura 4.38 – Posicionamento dos transdutores de deslocamentos dos ensaios de compressão centrada.....	99
Figura 4.39 – Resultados dos ensaios de compressão para colunas pultrudadas compostas de resina éster vinílica: (a) ensaio para temperatura de 60°C- (a1) deslocamentos medidos e (a2) registro da temperatura; (b) ensaio para temperatura de 70°C- (b1) deslocamentos medidos e (b2) registro da temperatura; (c) ensaio para temperatura de 80°C- (c1) deslocamentos medidos e (c2) registro da temperatura; (d) ensaio para temperatura de 90°C- (d1) deslocamentos medidos e (d2) registro da temperatura.....	100
Figura 4.40 – Resultados dos ensaios de compressão para colunas pultrudadas compostas de resina poliéster isoftálica: (a) ensaio para temperatura de 60°C- (a1) deslocamentos medidos e (a2) registro da temperatura; (b) ensaio para temperatura de 70°C- (b1) deslocamentos medidos e (b2) registro da temperatura; (c) ensaio para temperatura de 80°C- (c1) deslocamentos medidos e (c2) registro da temperatura; (d) ensaio para temperatura de 90°C- (d1) deslocamentos medidos e (d2) registro da temperatura.....	102
Figura 4.41 – Redução da resistência a compressão das colunas pultrudadas ensaiadas.....	103
Figura 4.42 - Resultados do ensaio CDL6_Ester de deformação lenta à temperatura de 60°C : (a) registro da temperatura durante ensaio; (b) registro da carga aplicada; (c) a (e) deslocamentos transversal medidos para carga de compressão igual a de 40%, 50% e 60% da carga máxima de colapso (experimental).....	104
Figura 4.43 – Resultados do ensaio CDL7_Ester de deformação lenta à temperatura de 80°C : (a) registro da temperatura durante ensaio; (b) registro da carga aplicada; (c) a (e) deslocamentos transversais medidos para carga de compressão igual à de 35%, 55% e 80% da carga máxima de colapso (experimental).....	105
Figura 4.44 – Resultados do ensaio CDL6_Iso de deformação lenta à temperatura de 60°C : (a) registro da temperatura durante ensaio; (b) registro da carga aplicada; (c) a (f)	

deslocamentos transversais medidos para carga de compressão igual à de 50%, 60% 70% e 80% da carga máxima de colapso (experimental).....	106
Figura 4.45 – Resultados do ensaio CDL7_Iso de deformação lenta à temperatura de 80°C : (a) registro da temperatura durante ensaio; (b) registro da carga aplicada; (c) a (f) deslocamentos transversais medidos para carga de compressão igual à de 30%, 60% 70% e 80% da carga máxima de colapso (experimental).....	107
Figura 4.46 – Resultados dos ensaios de deformação lenta a temperatura ambiente: (a) deformações medidas para 30% da carga máxima de colapso; (b) deformações medidas para 60% da carga máxima de colapso; (c) deformações medidas para 90% da carga máxima de colapso; (d) deformações medidas a carga máxima de colapso.	109
Figura 4.47 – Colapso do perfil pultrudado composto de resina poliéster isoftálica à temperatura ambiente: (a) início da flambagem local; (b) e (c) colapso da peça após aproximadamente 6000 minutos.....	110
Figura 4.48 – Colapso do perfil pultrudado composto de resina éster vinílica à temperatura ambiente: (a) corpo de prova após colapso; (b) e (c) ruptura do material na junção entre a mesa e a alma.	111
Figura 4.49 – Resultados dos ensaios de deformação lenta a tração de corpos de prova de perfis pultrudados compostos de resina éster vinílica para força de tração equivalente a 10 a 80% da tensão máxima σ_{max} obtida previamente dos ensaios de tração simples. Corpos de prova extraídos da mesa e da alma da seção H.	113
Figura 4.50 – Resultados dos ensaios de deformação lenta a tração de corpos de prova de perfis pultrudados compostos de resina poliéster isoftálica para força de tração equivalente a 10 a 80% da tensão máxima σ_{max} obtida previamente dos ensaios de tração simples. Corpos de prova extraídos da mesa e da alma da seção H.	114
Figura 4.51- Colapso dos corpos de prova do ensaio de deformação lenta a tração e a temperatura ambiente; (a) vista da ruptura do corpo de prova; (b) detalhe a ruptura; (c) colapso do corpo de prova; (d) ruptura por delaminação.	116
Figura 4.52 – Fotomicrografias das superfícies de ruptura dos perfis pultrudados ensaiados, obtidas por MEV.....	117
Figura 4.53 – Fotomicrografias da região de vazios dos perfis pultrudados ensaiados (as imagens foram obtidas por MEV).	119

Capítulo 5

Figura 5.1– Discretização de perfis de chapa fina: (a) Método dos elementos finitos, MEF; (b) Método das faixas finitas, MFF.....	121
Figura 5.2 – Resultados das análises computacionais da flambagem e resultados experimentais da resistência para perfis pultrudados comprimidos, compostos de resina éster vinílica.....	125
Figura 5.3 – Resultados das análises computacionais da flambagem e resultados experimentais da resistência para perfis pultrudados comprimidos, compostos de resina poliéster isoftálica.....	126
Figura 5.4 – Resultados das análises numéricas da flambagem e resultados experimentais da resistência para perfis pultrudados comprimidos, compostos de resina éster vinílica – Caso 2.....	127
Figura 5.5 – Resultados das análises numéricas da flambagem e resultados experimentais da resistência para perfis pultrudados comprimidos, compostos de resina poliéster isoftálica – Caso 2.....	128
Figura 5.6 – Resultados das análises numéricas da flambagem e resultados experimentais da resistência para perfis pultrudados comprimidos, compostos de resina éster vinílica – Caso 3.....	129
Figura 5.7 – Resultados das análises numéricas da flambagem e resultados experimentais da resistência para perfis pultrudados comprimidos, compostos de resina poliéster isoftálica – Caso 3.....	130
Figura 5.8 – Modo de flambagem local de placa obtidos pelas análises numéricas: (a) SAP 2000; (b) CUSFM	132
Figura 5.9 – Resultados das análises numéricas da flambagem local e resultado experimental da resistência, a temperatura ambiente, para perfis pultrudados a flexão, compostos de resina éster vinílica – Caso 3.	133
Figura 5.10 – Resultados das análises numéricas da flambagem local e resultado experimental da resistência, a temperatura ambiente, para perfis pultrudados a flexão, compostos de resina poliéster isoftálica – Caso 3.	134

Figura 5.11 – Configurações da flambagem local da mesa superior nos ensaios de flexão: (a) vista lateral; (b) seção transversal S1, com modo de flambagem livre; (c) seções transversais S2 e S3 com o modo de flambagem local com restrição provocada na alma..... 135

Figura 5.12 – Modo de flambagem local de placa a flexão obtidos pelas análises numéricas: (a) SAP 2000; (b) CUSFM 136

Lista de Tabelas

Capítulo 2

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas das matrizes, segundo o EUROCOMP [9]..... 12

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas da fibra de vidro, segundo o EUROCOMP [9].. 13

Capítulo 4

Tabela 4.1 – Nomenclatura dos ensaios realizados..... 47

Tabela 4.2 – Fração volumétrica de fibras dos perfis pultrudados para os ensaios de flexão simples compostos por resina éster vinílica. 51

Tabela 4.3 – Fração volumétrica de fibras dos perfis pultrudados para os ensaios de flexão simples compostos por poliéster isoftálica 51

Tabela 4.4 – Fração volumétrica de fibras dos perfis pultrudados para os ensaios de compressão centrada compostos por resina éster vinílica 52

Tabela 4.5 – Fração volumétrica de fibras dos perfis pultrudados para os ensaios de compressão centrada compostos por resina poliéster isoftálica 52

Tabela 4.6 – Fração volumétrica de fibras dos corpos de prova para os ensaios de deformação lenta compostos por resina éster vinílica..... 53

Tabela 4.7 – Fração volumétrica de fibras dos corpos de prova para os ensaios de deformação lenta compostos por resina poliéster isoftálica..... 53

Tabela 4.8 – Propriedades mecânicas do material compósito composto de resina éster vinílica utilizado nos ensaios de flexão simples..... 58

Tabela 4.9 - Propriedades mecânicas do material compósito composto de resina poliéster isoftálica utilizado nos ensaios de flexão simples. 58

Tabela 4.10 – Propriedades mecânicas do material compósito composto de resina éster vinílica utilizado nos ensaios de compressão centrada e de deformação lenta. 59

Tabela 4.11 – Propriedades mecânicas do material compósito composto de resina poliéster isoftálica utilizado nos ensaios de compressão centrada e de deformação lenta 59

Tabela 4.12 – Comparação entre os valores do módulo de elasticidade experimental e valores calculados pela regra da mistura para perfis dos ensaios de flexão simples.....	61
Tabela 4.13 – Comparação entre os valores do módulo de elasticidade experimental e valores calculados pela regra da mistura para perfis dos ensaios de compressão centrada e de deformação lenta.....	61
Tabela 4.14 – Propriedades mecânicas a flexão simples dos ensaios realizados.....	70
Tabela 4.15 – Características dos ensaios de flexão simples a alta temperatura realizados.....	72
Tabela 4.16 – Resultados da flutuação da temperatura prescrita durante os ensaios em regime estável: medições dos termopares T1 a T8, conforme a Figura 4.21.....	74
Tabela 4.17 – Características dos ensaios de compressão centrada realizados.....	94
Tabela 4.18 – Flutuação máxima da temperatura durante os testes realizados, FL.....	98
Tabela 4.19 – Resultados experimentais da resistência à compressão de colunas pultrudadas compostas de resina éster vinílica: ensaios C1 a C5_Ester.....	102
Tabela 4.20– Resultados experimentais da resistência a compressão de colunas pultrudadas compostas de resina poliéster isoftálica: ensaios C1 a C5_Iso.....	102

Capítulo 5

Tabela 5.1 – Comparação do número de graus de liberdade para análises feitas por MFF e MEF.....	122
Tabela 5.2 – Descrição dos casos analisados pelo método MEF e MFF.....	122
Tabela 5.3 – Propriedades do material adotadas nas análises pelo MEF e MFF, para os perfis pultrudados compostos de resina éster vinílica – Caso 1.....	125
Tabela 5.4 – Propriedades do material adotadas nas análises pelo MEF e MFF, para os perfis pultrudados compostos de resina poliéster isoftálica – Caso 1.....	125
Tabela 5.5 – Comparação entre os resultados das análises computacionais e experimentais, Caso 1.....	126
Tabela 5.6 – Propriedades do material adotados nas análises pelo MEF e MFF, para os perfis pultrudados compostos de resina éster vinílica – Caso 2.....	127

Tabela 5.7 – Propriedades do material adotados nas análises pelo MEF e MFF, para os perfis pultrudados compostos de resina poliéster isoftálica – Caso 2.	127
Tabela 5.8 – Comparação entre os resultados das análises computacionais e experimentais, Caso 2.....	128
Tabela 5.9 – Propriedades do material adotados nas análises pelo MEF e MFF, para perfis pultrudados compostos de resina éster vinílica – Caso 3.	129
Tabela 5.10 – Propriedades do material adotados nas análises pelo MEF e MFF, para perfis pultrudados compostos de resina poliéster isoftálica – Caso 3.	129
Tabela 5.11 – Comparação entre os resultados das análises computacionais e experimentais, Caso 2.....	130
Tabela 5.12 – Propriedades do material adotados nas análises pelo MEF e MFF, para os perfis pultrudados compostos de resina éster vinílica – Caso 3.	133
Tabela 5.13 – Propriedades do material adotados nas análises pelo MEF e MFF, para os perfis pultrudados compostos de resina poliéster isoftálica – Caso 3.	133
Tabela 5.14 – Comparação entre os resultados das análises computacionais e experimentais.....	134

Símbolos e Abreviaturas

Letras Romanas Maiúsculas

A	Área da seção transversal
E_c	Módulo de elasticidade longitudinal a compressão
E_f	Módulo de elasticidade da fibra
E_m	Módulo de elasticidade da matriz
E_l	Módulo de elasticidade longitudinal a tração
E_t	Módulo de elasticidade transversal
$E_{l,25}$	Módulo de elasticidade longitudinal a temperatura de 25°C
$E_{l,60}$	Módulo de elasticidade longitudinal a temperatura de 60°C
$E_{l,70}$	Módulo de elasticidade longitudinal a temperatura de 70°C
$E_{l,80}$	Módulo de elasticidade longitudinal a temperatura de 80°C
$E_{l,90}$	Módulo de elasticidade longitudinal a temperatura de 90°C
$E_{t,25}$	Módulo de elasticidade transversal a temperatura de 25°C
$E_{t,60}$	Módulo de elasticidade transversal a temperatura de 60°C
$E_{t,70}$	Módulo de elasticidade transversal a temperatura de 70°C
$E_{t,80}$	Módulo de elasticidade transversal a temperatura de 80°C
$E_{t,90}$	Módulo de elasticidade transversal a temperatura de 90°C
F	Carga aplicada
F_u	Carga máxima de ruptura
G	Módulo de elasticidade ao cisalhamento
$G_{,25}$	Módulo de elasticidade ao cisalhamento a temperatura de 25°C
$G_{,60}$	Módulo de elasticidade ao cisalhamento a temperatura de 60°C

$G_{,70}$	Módulo de elasticidade ao cisalhamento a temperatura de 70°C
$G_{,80}$	Módulo de elasticidade ao cisalhamento a temperatura de 80°C
$G_{,90}$	Módulo de elasticidade ao cisalhamento a temperatura de 90°C
I	Momento de inércia da seção transversal
I_x	Momento de inércia máximo da seção transversal
L	Comprimento do vão
L_0	Base de medida do extensômetro mecânico
M	Momento fletor
P	Força axial aplicada
T	Temperatura
V_f	Fração volumétrica de fibras
V_m	Fração volumétrica da matriz

Letras Romanas Minúsculas

a	Distância da posição da carga aplicada até o apoio
y	Distância do eixo neutro

Letras Gregas

δ	Deslocamento vertical (flecha)
ε	Deformação
ν_l	Coefficiente de poisson longitudinal
ν_t	Coefficiente de poisson transversal
σ	Tensão calculada
σ_{max}	Tensão máxima aplicada

σ_u	Tensão máxima de ruptura
ΔL	Alongamento específico

Abreviaturas

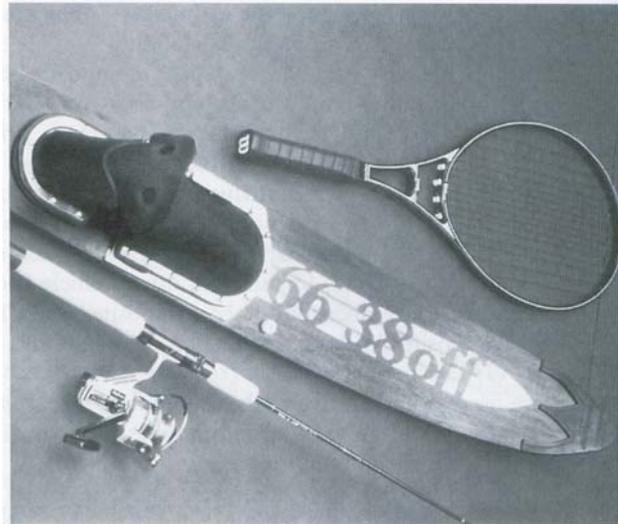
ASTM	American Society for Testing and Materials
C	Colunas
CUSFM	Programa computacional baseado em faixas finitas
DL	Deformação lenta
Ester	Resina éster vinílica
EUROCOMP	Design Code and Handbook
FL	Flutuação máxima entre termopares
Iso	Resina poliéster isoftálica
MEF	Método dos elementos finitos
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MFF	Método das faixas finitas
SAP 2000	Programa computacional baseado em elementos finitos
T1 a T8	Termopares
V	Vigas

1. Introdução

O desenvolvimento de novos materiais e a utilização de novas concepções estruturais, na tentativa de buscar estruturas com elevada resistência, duráveis, pouco deformáveis, mais leves e com baixo custo, justificam o estudo de materiais compósitos, para uso em diversas áreas. A princípio, o emprego dos materiais compósitos limitava-se a componentes estruturais secundários ou em combinações com outros materiais como o aço, o alumínio e a madeira, muito empregados nas indústrias automobilísticas, naval, ferroviária, aeroespacial e esportiva. Com o desenvolvimento de novos compósitos poliméricos com fibras de vidro, de carbono e kevlar, por exemplo, um melhor desempenho estrutural foi alcançado. Neste caso, é possível conjugar a elevada rigidez e resistência da fibra de vidro com a ductilidade do polímero (na faixa adequada de temperatura). Assim, compósitos de matriz polimérica vem sendo utilizados em estruturas principais de navios, barcos, automóveis, bicicletas, aeronaves, naves espaciais, etc. (Figura 1.1).

Um dos principais fatores responsáveis pelo crescimento do emprego de materiais compósitos foi o desenvolvimento de processos modernos de fabricação, dentre os quais se destaca a pultrusão. A pultrusão consiste em um processo contínuo automatizado para produção de perfis estruturais, que consiste no “puxamento” de fibras secas que são impregnadas com resina de baixa viscosidade e guiadas para um molde metálico aquecido, onde são curados [1]. Esse método foi desenvolvido em 1950 nos Estados Unidos e permite a produção, com alta qualidade, de seções transversais de perfis de material compósito. Inicialmente foram produzidos pequenos perfis para

aplicações industriais [1]. Posteriormente, perfis estruturais com seções transversais variadas (Figura 1.2), com altas taxas de fibras e alta resistência mecânica, foram produzidos, tornando esses produtos uma excelente alternativa a outros materiais, como o aço.



(a)



(b)



(c)

Figura 1.1 – Componentes elaborados com materiais compósitos: (a) e (b) materiais esportivos; (c) aeronaves.

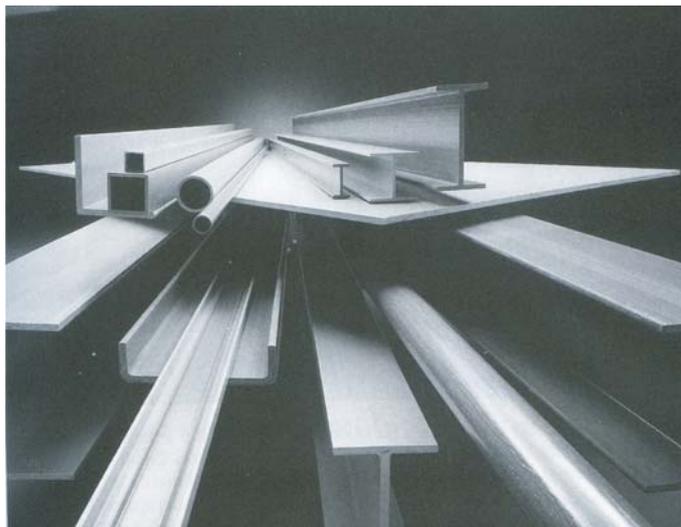


Figura 1.2 – Seções transversais obtidas a partir da pultrusão.

A aplicação de perfis pultrudados na construção civil no Brasil ainda se dá de forma acanhada, ao contrário de outros países onde estes perfis encontram utilização intensiva.

Zureick [2] e Thornburrow [3] afirmam que nos últimos 30 anos o alto desempenho dos materiais compósitos poliméricos tem alcançado uma importância substancial nas construções industriais, devido a características importantes, tais como: baixo peso específico, resistência à corrosão, rapidez na montagem, entre outras. Os autores afirmam que, a princípio, os materiais compósitos eram bastante utilizados em estruturas secundárias como: decorações para telhados, sótão, painéis para telhado, forros, portas de garagem, etc. Contudo, por apresentarem grandes vantagens no que se refere à durabilidade e baixa manutenção em relação aos materiais convencionais, os materiais compósitos podem ser utilizados em estruturas auxiliares de pontes, passarelas de pedestres, edifícios, estruturas off-shore e estruturas de telecomunicações, bem como o seu uso em reparação e reforço de estruturas de pontes e edifícios.

Apesar das inúmeras vantagens apontadas, o uso em larga escala de compósitos poliméricos ainda prescinde da resolução de algumas deficiências, sobretudo associadas a eventos térmicos. Em geral, a temperatura de fusão dos polímeros é superior à temperatura de transição vítrea. Assim, é necessário conhecer essa propriedade uma vez que ela interfere em algumas propriedades como: (i) módulo de elasticidade, (ii) coeficiente de expansão, (iii) calor específico. Segundo Ashby e Jones [4], a integridade dos polímeros é determinada por dois tipos de ligações químicas: covalentes e secundárias. Na temperatura de transição vítrea, que representa a temperatura de

passagem do estado vítreo para um estado “maleável”, sem a ocorrência de uma mudança estrutural [1], as ligações secundárias se fundem deixando apenas as ligações covalentes. Trabalhando em uma faixa de temperatura acima ou muito próxima da temperatura de transição vítrea, corre-se o risco de redução das propriedades mecânicas provocando assim uma degradação no desempenho estrutural desses compósitos. Portanto, a utilização de compósitos poliméricos requer estudos minuciosos dos efeitos que dependem do tempo, principalmente associados à temperatura de trabalho.

1.1. Motivação

Em relação ao histórico dos materiais compósitos, a engenharia estrutural tem manifestado grande interesse na aplicação destes materiais. No entanto, ainda são necessários estudos adicionais a fim de aprimorar o conhecimento sobre o comportamento destes materiais.

A utilização de perfis pultrudados de resina reforçada com fibra de vidro tem aumentado no Brasil, principalmente na indústria de petróleo – *off-shore* e *on-shore*. Isto ocorre devido ao fato do material composto apresentar algumas características importantes, tais como: alta durabilidade, baixo peso específico, não condutor de eletricidade e resistência à corrosão. Este assunto é tratado, inclusive, em normas técnicas dirigidas para a qualificação de produtos estruturais para emprego em instalações da indústria de petróleo, como é o caso da norma Petrobrás N-2617 [5], dirigida a grades de piso em perfis pultrudados. Neste caso, um dos critérios para qualificação estrutural do produto é o seu desempenho na flexão sob efeito de alta temperatura. Na Figura 1.3 são apresentados exemplos de utilização de grades de piso e guarda corpos em plataformas industriais.

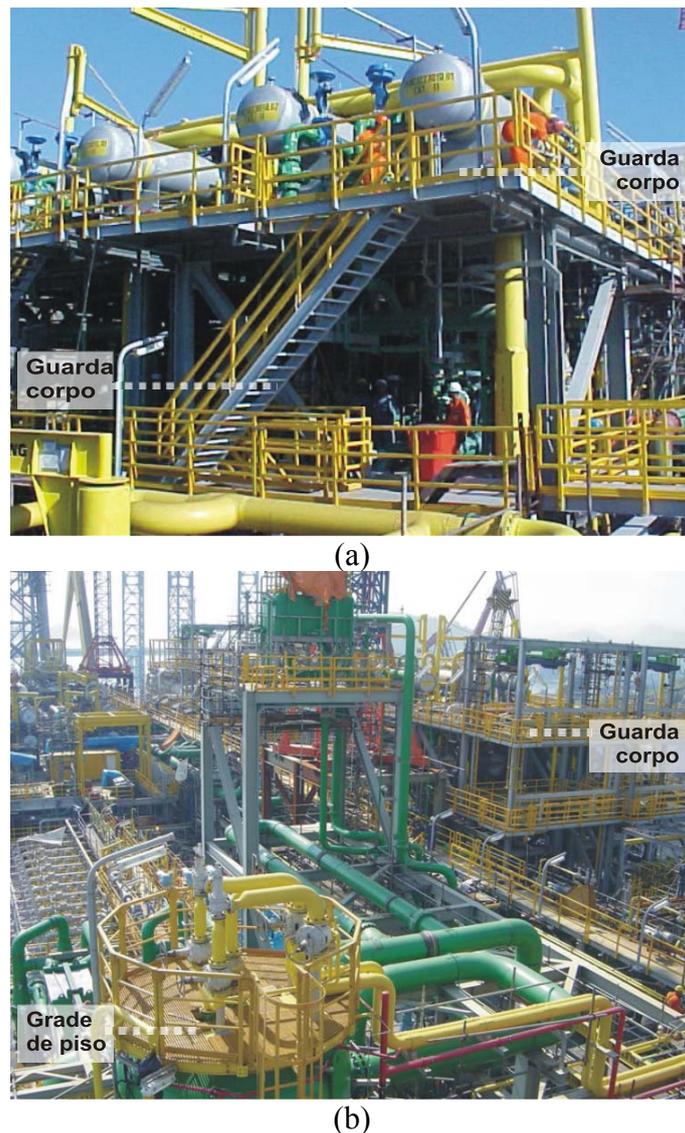


Figura 1.3 – Aplicações de perfis pultrudados em plataformas industriais: (a) guarda corpos; (b) grade de piso.

O interesse das indústrias e da engenharia para a aplicação dos perfis pultrudados vai além das estruturas de guarda corpo e grade de pisos. Perfis pultrudados podem ser utilizados em estruturas principais como pontes, passarelas de pedestres, edifícios e estruturas de telecomunicações. Algumas dessas aplicações são vistas na plataforma de acesso do Complexo Petroquímico de Camaçari, Bahia conforme a Figura 1.4a, e na escada de marinheiro no terminal GBIB da Petrobrás em Angra dos Reis, Rio de Janeiro, na Figura 1.4b.

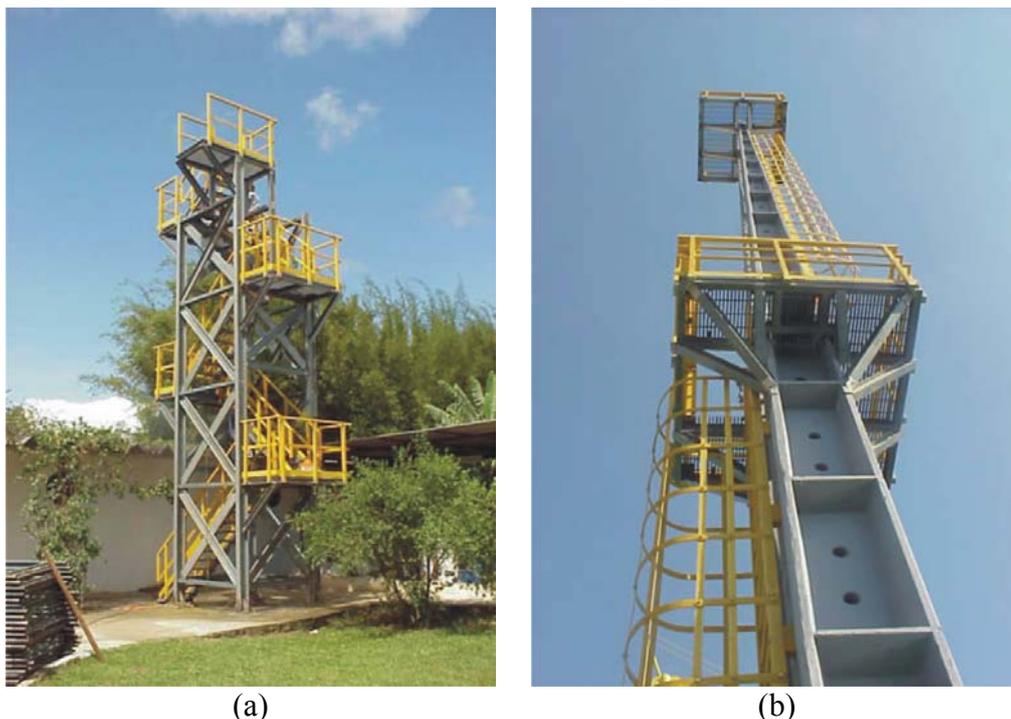


Figura 1.4 – Aplicações estruturais de perfis pultrudados: (a) plataforma de acesso, Camaçari, BA; (b) escada em Angra dos Reis, RJ.

O emprego de perfis pultrudados, como elementos estruturais, está se tornando comum em plantas industriais. Frequentemente esses elementos não recebem proteção contra aumento da temperatura ambiente. Sabe-se que a ocorrência de acidentes com princípios de incêndios, mesmo que localizados, não são muito raros em muitos tipos de instalações industriais. Diante deste problema, surgiu o interesse em investigar o efeito da temperatura no comportamento estrutural dos perfis pultrudados. Pesquisas anteriores permitiram a observação do fenômeno da redução das propriedades mecânicas do material com o aumento da temperatura, bem como as características do modo de colapso, do tipo frágil, conforme está apresentado no item 2.3 da presente Tese.

1.2. Objetivos

O objetivo central da presente pesquisa é a investigação do desempenho estrutural dos perfis pultrudados de seção “H”. Para isso, foi previsto um programa experimental que englobou ensaios de flexão simples e de compressão centrada a altas temperaturas. Especificamente, dois tipos de compósitos com fibras de vidro longas e

unidirecionais são estudados: com matriz de resina de poliéster isoftálica e com matriz de resina éster vinílica. Os ensaios de flexão simples e de compressão centrada foram conduzidos a temperaturas entre 25 e 90°C.

Como objetivos secundários, foi estimada a fração volumétrica de fibras de vidro dos perfis compósitos, com ensaios de perda ao fogo, característica essa essencial no desempenho estrutural dos perfis. Foram igualmente medidos a tensão máxima resistente e o módulo de elasticidade através de ensaios de tração direta. Por fim, foi investigada a deformação lenta à temperatura ambiente do material dos perfis pultrudados em estudo, para duas condições: tração e compressão simples.

Ainda como objetivos da pesquisa foram realizadas análises computacionais com auxílio dos Métodos dos Elementos Finitos e das Faixas Finitas, para caracterização do modo de flambagem dominante nos perfis em estudo. Os resultados dessas análises foram adotados para aferir procedimento de cálculo da resistência dos perfis na compressão centrada e na flexão simples.

1.3. Organização da Tese

Em relação à Tese, adotou-se a seguinte organização:

- No Capítulo 2 são apresentadas as características dos materiais compósitos, incluindo fibras e matrizes poliméricas. Definições de processos de fabricação de materiais compósitos com ênfase para a pultrusão. Por fim, é apresentada pesquisa sobre o estado da arte dos materiais compósitos do tipo GFRP (glass fiber reinforced plastic) no exterior e Brasil.
- O Capítulo 3 apresenta a descrição dos ensaios experimentais realizados no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ, incluindo a definição dos perfis a serem estudados, montagem dos ensaios, descrição das estufas projetadas, instrumentações utilizadas e sistemas de aquisição de dados experimentais.
- No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios experimentais. São apresentadas a caracterização dos materiais

utilizados, o comportamento a flexão simples, o comportamento a compressão centrada e evidências sobre a deformação lenta do material.

- O Capítulo 5 aborda análises numéricas de perfis pultrudados utilizando o Método dos Elementos Finitos e Método das Faixas Finitas, através de programas computacionais. Os resultados são comparados com os resultados experimentais.
- As conclusões deste trabalho e as propostas para trabalhos futuros estão apresentadas no Capítulo 6
- Como complemento, no Anexo A são apresentadas de forma detalhada o procedimento de determinação da fração volumétrica de fibras dos perfis utilizados nos ensaios e os resultados completos da fração volumétrica. No Anexo B podem ser vistas as curvas de tensão-deformação do material em estudo, obtidas dos ensaios de tração direta de corpos de prova padronizados.

2. Materiais Compósitos

2.1 Considerações Gerais sobre Materiais Compósitos

Segundo Broutman [6], material compósito é definido como a combinação de dois materiais quimicamente distintos com uma interface separando os componentes. Esses materiais são usados muitas vezes devido ao fato de proporcionarem propriedades não encontradas isoladamente em um dos componentes.

Os materiais compósitos são formados por uma matriz e por um reforço, sendo estes componentes dependentes do interesse da utilização deste compósito. Assim, as matrizes podem ser de: argamassas cimentícias, polímeros, metais ou cerâmicas, de acordo com Daniel [7]. O reforço é feito geralmente por fibras e estas podem ser de: fibras naturais (como sisal), vidro, carbono, aramida, boro ou alumínio oxidado, sendo que as duas últimas citadas são pouco utilizadas.

É importante destacar que o tipo, a quantidade e a orientação das fibras são muito importantes e têm influência em algumas propriedades dos materiais compósitos, como a densidade, a resistência e o módulo de tração, a resistência e o módulo de compressão, a resistência à fadiga, o mecanismo de falha, a condutividade elétrica e térmica e principalmente, sobre o custo da produção do material. Na Figura 2.1 é apresentada a classificação dos tipos de materiais compósitos.

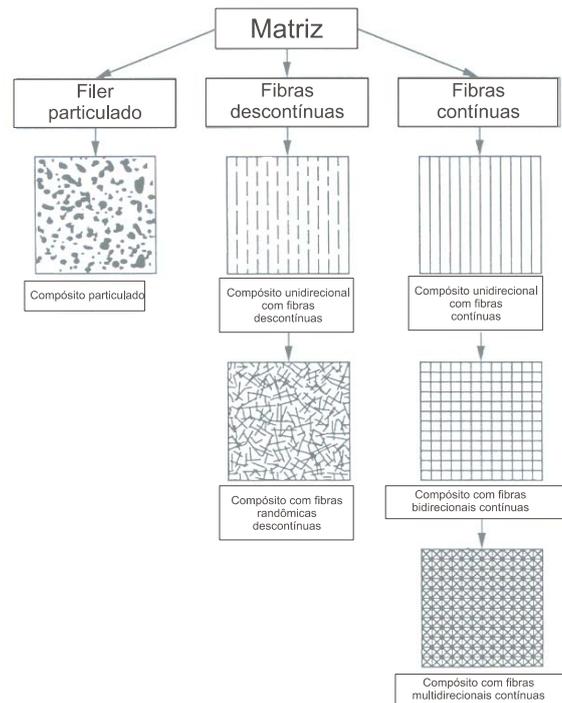


Figura 2.1 – Classificação dos tipos de materiais compósitos (Figura retirada de Daniel [7]).

Finalmente, considera-se que a interface entre matriz e fibra é de fundamental importância para integridade da estrutura e para uma distribuição uniforme dos esforços.

2.1.1. Propriedades da Matriz

As matrizes são responsáveis pela transferência dos esforços entre as fibras e servem de proteção das fibras contra os meios agressivos e a abrasão. Contribuem pouco para a resistência à tração, e têm, no entanto, maior influência na resistência às tensões de cisalhamento e de compressão.

Dentre as matrizes citadas, a mais utilizada é a polimérica. É possível determinar através das características das resinas onde esta será mais bem aplicada, como por exemplo, a matriz metálica é recomendada para aplicações sujeitas a altas temperaturas, aproximadamente 800°C, já as matrizes cerâmicas são recomendadas para temperaturas acima de 1000°C.

Apesar de serem mais baratos e de fácil produção, os polímeros possuem baixa resistência estrutural a temperatura ambiente (20°C) e importante redução dessa

resistência para temperatura acima de 60°C. Os polímeros têm baixa condutividade elétrica e térmica e possuem grande resistência química, de acordo com Chawla [8].

Os polímeros podem ser classificados em termoplásticos, que são moldáveis quando aquecidos, e termofixos, que não amolecem com o aumento da temperatura e por isso, uma vez produzidos não podem ser re-processados. As matrizes poliméricas mais utilizadas são:

- Epóxi, que possui grande resistência à umidade, alta resistência à temperatura, boa adesão com fibras de vidro e baixa retração durante a cura, em comparação com poliéster e éster vinílico. A resina epóxi pode ser curada a temperatura ambiente ou a alta temperatura.
- Poliéster, que possui grande resistência química, resistência a desgastes por ações atmosféricas, resistência ao envelhecimento, boa adesão com fibras de vidro e, por fim, tem baixo custo.

As resinas de poliéster são muito utilizadas em compósito reforçadas com fibras em produtos comerciais pelo seu baixo custo e facilidade na sua produção. Baseado no tipo de ácido usado para produção da resina, três tipos de resinas poliéster tem se destacado por suas propriedades físicas e mecânicas: ortoftálica, isoftálica e a teraftálica, [1]. Dentre as resinas de poliéster, pode-se destacar a resina isoftálica, formada pelo ácido isoftálico (IPA), a qual possui boas propriedades mecânicas, químicas e térmicas, [9].

Há outro tipo, as resinas éster-vinílicas, derivadas de componentes das resinas epóxi. O emprego de tais resinas deve-se ao fato de apresentarem melhor desempenho que as de poliéster isoftálicas, pois oferecem maior resistência a ataques químicos, bem como maior resistência e rigidez mecânica a altas temperaturas, e por terem alta dureza.

Finalmente as resinas fenólicas apresentam melhores desempenho a altas temperaturas, por conservarem suas propriedades sob condições de incêndio e por propiciar baixa emissão de gases tóxicos. Além disso, trata-se de uma resina que possui baixa retração, se comparadas com as resinas poliéster, segundo o EUROCOMP [9].

De acordo com Bank [1] o efeito térmico exerce uma influência processamento, nas propriedades e no comportamento dos polímeros. Sólidos puramente cristalinos como os metais mudam de estado físico, sólido-liquido, a uma determinada temperatura de transição, denominada de temperatura de fusão, T_m . Como os polímeros são sólidos

semicristalinos, ocorre outra transição térmica a temperaturas mais baixas que T_m . Essa temperatura de transição, que particularmente é de interesse da engenharia estrutural é denominada de temperatura de transição vítrea, T_g . Na T_g as propriedades físicas e mecânicas dos polímeros irão se alterar. Quando a temperatura se aproxima da T_g o polímero muda a sua forma de rígida para uma forma viscosa. A temperatura de transição vítrea da resina poliéster isoftálica é entre 40 a 110°C e éster vinílica entre 40 e 120°C, de acordo com Bank [1]. Existe uma variabilidade muito grande de valores de temperatura de transição vítrea para essas duas resinas.

Na Tabela 2.1, a seguir, apresentam-se algumas propriedades mecânicas das resinas adotadas como matrizes de materiais compósitos.

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas das matrizes, segundo o EUROCOMP [9].

Propriedades Mecânicas	Resina		
	Poliéster isoftálica	Éster vinílica	Fenólica
Resistência a tração (MPa)	55 – 65	68 – 82	24 – 40
Módulo de elasticidade na tração (GPa)	3,7 – 4,1	3,5	1,5 – 2,5
Resistência a flexão (MPa)	100 – 125	125 – 131	60 – 80
Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	3,7	-	-
Alongamento na ruptura (%)	1,5 – 2,5	3 – 6	1,8

2.1.2. Propriedades da Fibra

Propriedades dos compósitos como resistência, rigidez e relação tensão – deformação dependem do teor de fibras, do tipo de resina que compõe a matriz e da orientação das fibras em relação ao estado de tensões.

Existe uma grande variedade de fibras que podem ser usadas como reforço nos materiais compósitos. As características mais importantes destas fibras são: alta resistência, alta dureza e densidade relativamente baixa.

Na fabricação de materiais compósitos, verificamos emprego freqüente da fibra de vidro, graças à sua alta resistência à tração, ao seu baixo custo, à facilidade de aquisição e fabricação.

O EUROCOMP [9] e Daniel [7] destacam alguns tipos de fibras de vidro:

- E-glass – possui alta resistência somada a boa resistência elétrica;
- C- glass – possui alta resistência química, mas uma resistência mecânica inferior à da fibra E-glass;
- S – é a mais resistente sob ação da temperatura.

O diâmetro individual de uma fibra de vidro está na faixa de 3 a 24 μm . O diâmetro da fibra mais utilizada em materiais compósitos para aplicação estrutural é de 17 μm , [1].

Segundo Bank [1] as fibras de vidro são particularmente sensíveis à umidade, especialmente na presença de sais e meios alcalinos e precisam ser bem protegidas pela resina. As fibras de vidro também são susceptíveis à deformação lenta perdendo sua resistência com carregamento constante.

Na Tabela 2.2, a seguir, relaciona-se algumas propriedades mecânicas das fibras de vidro.

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas da fibra de vidro, segundo o EUROCOMP [9].

Propriedades	Fibras		
	E-glass	C-glass	S-glass
Resistência a Tração (MPa)	3400	3000	4480
Módulo de Elasticidade (GPa)	72	69	85
Densidade (g/cm^3)	2,5	2,5	2,5

2.2. Pultrudados Reforçados com Fibra de Vidro

Dentre os vários processos utilizados para se promover a união da fibra com a matriz, Morley [10] destaca os seguintes:

- *Laminação manual* - as fibras em forma de fios e mantas são colocadas em um molde aberto e com as mãos, como uma pintura, a resina é aplicada;
- *Moldagem por injeção* - as fibras em forma de fios e manta são colocadas em um molde que será fechado, e a resina é então aplicada até impregnar totalmente as fibras;
- *Moldagem por compressão* – o compósito é formado sob pressão entre moldes do tipo “macho – e – fêmea”.

Dentre os vários processos de fabricação de produtos formados com material compósito, devemos considerar, adicionalmente, a pultrusão. A pultrusão é um processo automatizado e contínuo para produção de peças estruturais, que consiste no “puxamento” de fibras (mantas, fios e tecidos) impregnadas por uma resina, através de um molde metálico aquecido. Com este processo tem-se flexibilidade nas formas da seção transversal, variação de espessuras consegue-se um bom alinhamento das fibras e alto volume das mesmas no interior do material, resultando em boas propriedades mecânicas. O esquema do processo da pultrusão pode ser visto na Figura 2.2

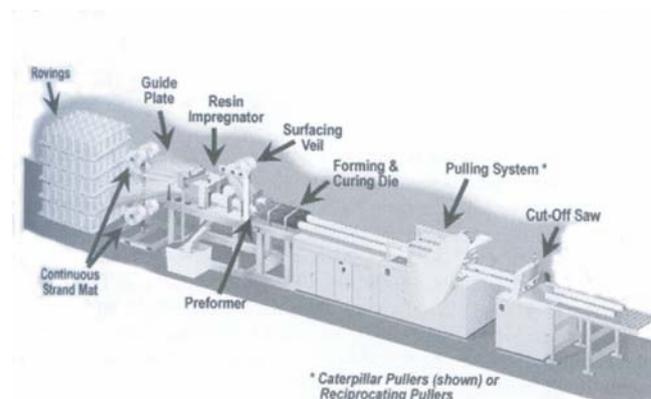


Figura 2.2 – Esquema do processo da pultrusão – Bank [1].

O sistema de fibra utilizado na fabricação nos compósitos pultrudados consiste em diferentes tipos e arquiteturas: fibras na forma roving, manta de fibras e véu de fibras. Na pultrusão as fibras em roving são alinhadas longitudinalmente. É a parte mais importante do perfil pultrudado, responsável pelas propriedades dos perfis, Figura 2.3(a). As mantas são utilizadas para aumentar a resistência e rigidez transversal do perfil e também tem como função proteger as fibras de danos em sua superfície e auxiliar a adesão da fibra com a matriz, Figura 2.3(b). Os véus são responsáveis pela qualidade da superfície do perfil pultrudado, Figura 2.3(c).

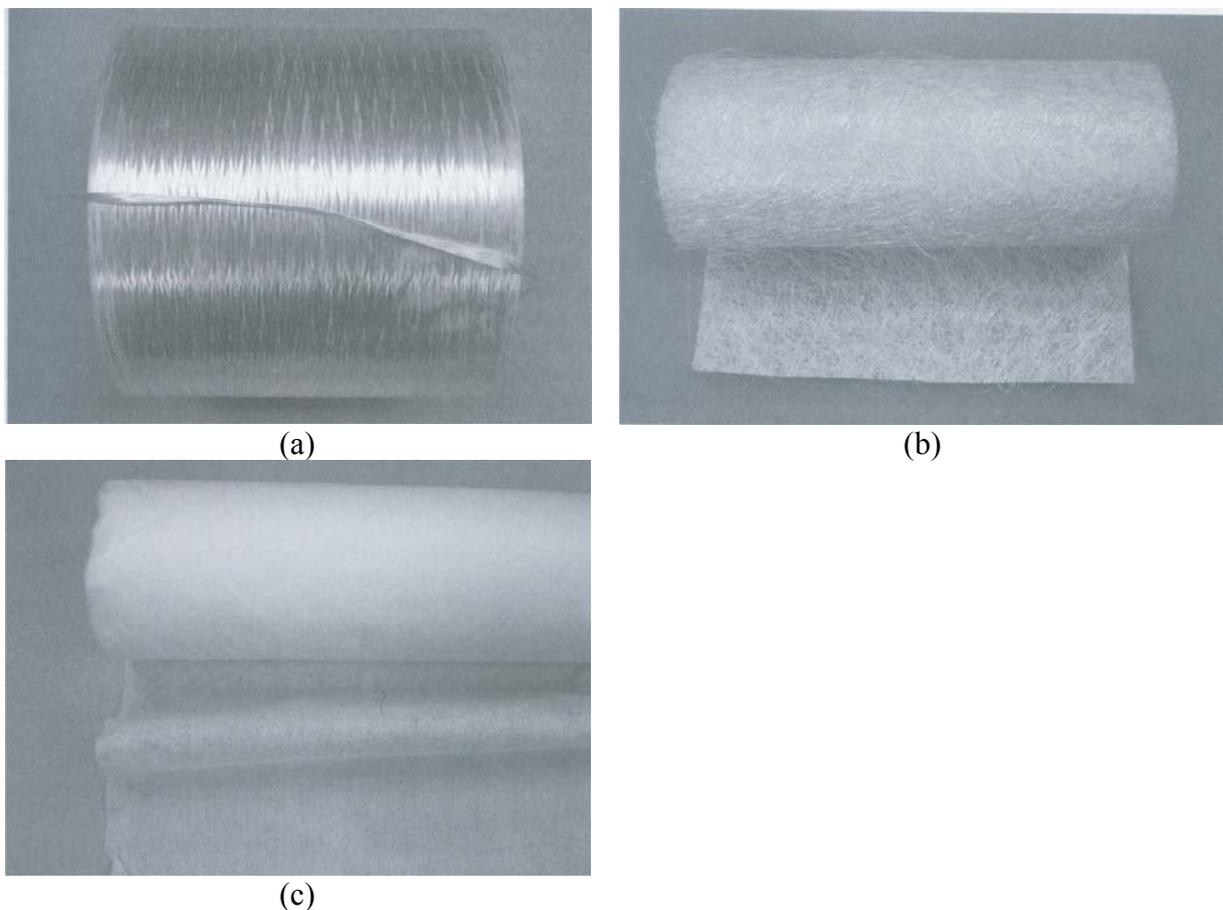


Figura 2.3 – Sistema de fibras utilizadas no processo de pultrusão: (a) fibras longitudinais em roving; (b) manta de fibras e (c) véu de fibras.

Tanto o processamento quanto os defeitos da fabricação do compósito são resultantes das características físicas e térmicas apresentadas, tais como viscosidade, temperatura de cura e ponto de fusão da matriz. Assinale-se que o tempo de cura depende da química da resina, da reação catalisadora, da temperatura de cura e da presença de inibidores ou aceleradores.

O ponto crítico na produção é a impregnação da resina nas fibras, pois estas devem ser bem umedecidas para que o elemento final resulte com o menor índice de vazios possível. Os vazios resultantes no interior do material representam defeitos a serem evitados.

Durante o processo de fabricação de um material compósito, são vários os defeitos que devem ser considerados. Dentre eles, a presença de vazios é considerada por Broutman [6], o mais crítico na influência das propriedades mecânicas. A causa mais comum que gera os vazios é a incapacidade da resina de expulsar o ar existente na superfície das fibras, quando aplicada sobre elas. Podem-se destacar outros fatores que colaboram para a presença de vazios como a viscosidade da resina, a manipulação mecânica das fibras na resina, o volume de fibras, etc.

Para resolver este problema, algumas soluções são adotadas durante a fabricação do compósito, como aplicação de vácuo no processo de moldagem e a utilização de uma resina mais fluida.

A Figura 2.4 apresenta a variação de seções transversais de perfis compósitos possíveis com a pultrusão.

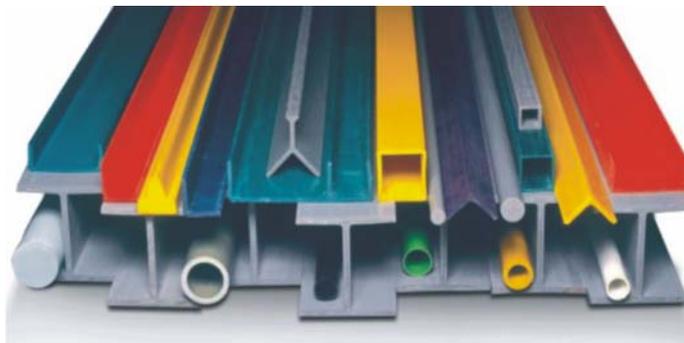


Figura 2.4 – Seções transversais típicas de perfis pultrudados.

2.3. Pesquisas sobre Pultrudados Reforçados com Fibras – Aplicações em Engenharia Civil

O desenvolvimento dos processos de fabricação dos materiais compósitos reforçados com fibras, com destaque para a pultrusão, tem permitido a produção de perfis estruturais com seções transversais variadas e para diversas aplicações.

Os perfis pultrudados vêm conseguindo grande aplicabilidade no que se refere a materiais com grande resistência química e leveza, sendo intensamente aplicadas em ambientes industriais agressivos, com destaque nas indústrias de petróleo e petroquímica – *off shore e on shore*.

A aplicação destes perfis na construção civil se dá de forma acanhada, tendo em vista o seu potencial. Exemplos dessas aplicações podem ser vistas em:

- Torres treliçadas para telefonia e outros fins;
- Passarelas para pedestre em geral suspensas em cabos, pela leveza e facilidade na montagem;
- Estruturas de uso geral em plantas industriais, como passarelas, escadas, giraus, entre outros.

Batista [11] investigou a redução das propriedades mecânicas de perfis pultrudados reforçados com fibras com o aumento da temperatura; (a) redução do módulo de deformação; (b) redução da resistência na flexão e (c) características do mecanismo de colapso. A pesquisa constatou uma importante redução do módulo de deformação na flexão de perfis pultrudados em resina - reforçado com fibras de vidro - para temperaturas a partir de 60°C, conforme ilustra a Figura 2.5.

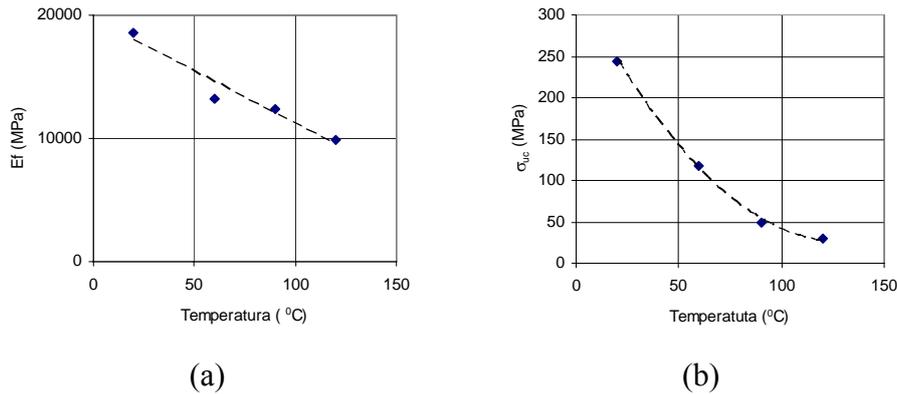


Figura 2.5 – Resultados experimentais obtidos para redução: (a) do módulo de deformação na flexão, E_f , (b) da tensão de colapso na zona comprimida, σ_{uc} , em função da temperatura (ensaios em regime permanente), para testes de perfis pultrudados reforçados com fibras de vidro, Batista [11].

A Figura 2.6 apresenta a montagem empregada para os ensaios de flexão com alta temperatura, Batista [11].

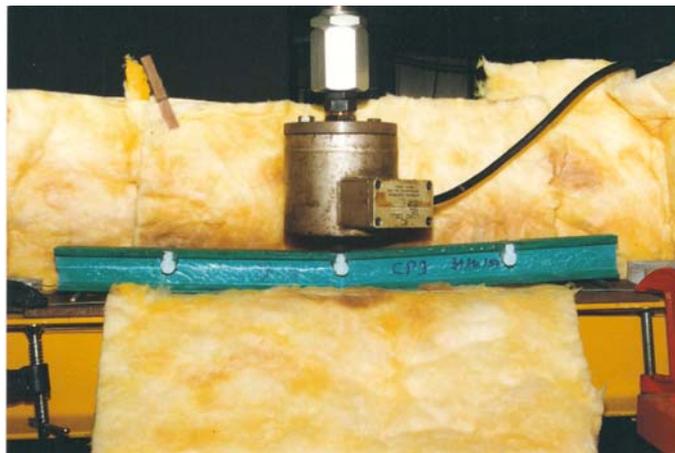


Figura 2.6 – Ensaio de flexão de perfil pultrudado a alta temperatura, Batista [11].

Nagahama [12] analisou, através do Método dos Elementos Finitos (MEF) e do Método das Faixas Finitas (MFF), fenômenos relativos ao comportamento estrutural de perfis pultrudados. O autor adotou análises lineares e não lineares para materiais ortotrópicos (perfis pultrudados com fibra de vidro). As análises levaram em consideração as condições de apoios nas extremidades do perfil, forma e dimensões da seção transversal do perfil, distribuição do carregamento aplicado e comportamento do material ortotrópico em regime elástico.

A pesquisa constatou que o efeito da ortotropia do material é nítido sobre o fenômeno da flambagem, afetando tanto os valores da carga crítica como a configuração deformada (modo de flambagem).

Almeida [13] caracterizou as principais propriedades mecânicas e físicas de compósitos pultrudados de matriz polimérica com reforço de fibra de vidro: (a) módulo de elasticidade, (b) resistência à tração, (c) módulo de elasticidade na flexão e (d) características do modo de colapso. Esta caracterização foi realizada através de ensaios de tração, ensaios de flexão por quatro pontos, avaliação da fração volumétrica por ensaios de queima e metalografia através da técnica de análise de imagens.

Os resultados foram comparados com os dados indicados pelo fabricante, obtendo variações dos mesmos e apontando para a necessidade de se qualificar melhor o produto fornecido ao consumidor. Foram encontradas irregularidades na fabricação dos perfis estudados, comprometendo as propriedades mecânicas e físicas do material.

Neto [14] apresentou uma metodologia para ensaio experimental de vigas em material PRF (plástico reforçado com fibras) submetidas à flexão simples, que permite a determinação simultânea do módulo de elasticidade longitudinal e do módulo de cisalhamento, diante da constatação de que a baixa relação entre o módulo de cisalhamento e o módulo de elasticidade longitudinal pode resultar em significativas quantidades de deformação por cisalhamento nas deformações totais dos elementos.

Desse modo, Neto [14] realizou uma modelagem por meio do Método dos Elementos Finitos e em comparação com outros trabalhos verificou resultados satisfatórios. Os ensaios demonstraram a importância de ser considerado o efeito da deformação por cisalhamento no cálculo da flecha de perfis PRV e ainda da verificação dos modos de instabilidade local e global no projeto de vigas com seções de parede finas.

Teixeira [15] investigou a distribuição de tensões ao redor dos furos de chapas parafusadas de materiais compósitos, uma vez que o material se caracteriza pela grande deformabilidade e pelo comportamento essencialmente linear. Foi constatado que nas ligações parafusadas estas duas características promovem um comportamento local não-linear geométrico com acentuada ovaliação do furo e grandes concentrações de tensões. Para estudar a distribuição de tensões ao redor dos furos, Teixeira [15] utilizou um modelo numérico analisado por meio do aplicativo computacional ANSYS.

Os resultados obtidos na modelagem foram comparados com valores experimentais disponíveis na literatura e com as recomendações do EUROCOMP [9]. Houve uma boa aproximação dos resultados experimentais com os resultados numéricos

em termos da rigidez da ligação. A folga entre o furo da chapa e o parafuso, mesmo sendo bem pequena, influi na distribuição das tensões ao redor do furo, principalmente nas tensões radiais, pelo fato de quanto maior for a folga entre o furo da chapa e o parafuso menor é a área de contato entre esses elementos, implicando no aumento da tensão radial de compressão nesta região.

Oliveira [16] destacou a preocupação com o processo de envelhecimento dos materiais compósito, considerando efeitos da temperatura, oxidação, radiação UV, etc. Diante deste fato, Oliveira apresentou um modelo analítico-numérico adequado para compilação, interpretação e aplicação de dados experimentais em análises de projetos de estruturas. A formulação proposta incluiu relações constitutivas elásticas anisotrópicas com envelhecimento, relações constitutivas viscoelásticas anisotrópicas com envelhecimento em termos de variáveis de estado, análises de falhas com critério de degradação ajustado à idade do material considerando grandes deslocamentos e pequenas deformações.

Ainda com a preocupação da durabilidade dos materiais compósitos, Correia [17] investigou a degradação de perfis pultrudados expostos a condições: (i) de umidade; (ii) temperatura; (iii) radiação UV e testes para determinar a resistência a incêndio de perfis pultrudados com e sem sistemas proteção (ativa e passiva) contra fogo. Como resultado, identificou a perda de resistência à flexão de aproximadamente de 19% devido à umidade e esse efeito acelerou com o aumento da temperatura. Da mesma forma identificou que a radiação UV tem influência limitada nas propriedades mecânicas do material, afetando praticamente a superfície dos perfis. Em relação à resistência ao fogo, pode ser concluída a eficácia e a possibilidade de utilizar diferentes sistemas de proteções, passiva ou ativa.

Svenson et al. [18] destaca a grande importância em estudar as propriedades de materiais pultrudados, devido a sua expansão nas construções industriais e, propôs a mostrar experimentalmente, através de corpos de provas, a variação do volume de fibras de vidro e tipo da disposição das fibras, utilizados nestes pultrudados.

Os resultados obtidos mostraram que existe uma grande variabilidade de volume de filler, de fibras e de resina de peças de um mesmo fabricante. Destaca também que, dois compósitos com um mesmo volume de fibras, mas com disposição das fibras de forma diferente, afeta a resistência da peça. Svenson investigou ainda que o filler,

adicionado ao material compósito para melhorar a resistência ao fogo e reduzir o custo, pode reduzir significativamente às propriedades mecânicas destes materiais.

O fenômeno da deformação lenta dos materiais compósitos, principalmente os pultrudados, tem despertado interesses nos pesquisadores. Fenômeno este a ser levado em conta nos projetos de perfis estruturais pultrudados.

Com isso, Zureick et al. [19] propôs investigar experimentalmente a deformação lenta de corpos de provas de perfis pultrudados sob carga de compressão. Nos ensaios, os corpos de prova foram submetidos a diferentes níveis de tensões, com durações superiores a 10000 horas. Os resultados foram comparados com a lei de potência desenvolvida por Findley [20] em que foi atestada uma boa aproximação entre os resultados experimentais com os resultados teóricos.

Magid et al [21] teve o interesse em estudar a deformação lenta à flexão de dois tipos de compósitos, mostrando que as os dois tipos apresentaram propriedades mecânicas similares a curto tempo enquanto que a longo tempo os compósitos apresentaram diferenças significativas. Foram ensaiados corpos de prova a flexão em três pontos, com aplicação de tensão de 20 a 90% da resistência última do material e foram realizados ensaios para temperatura ambiente a 50°C.

Como conclusão, Magid et al adverte a necessidade de caracterizar o material em relação à deformação lenta, que é influenciada pelo tipo de matriz utilizada e pela interface da fibra/matriz.

Ainda em relação a estudo de deformação lenta de materiais compósitos, Dutta e Hui [22] investigaram a ruptura por deformação lenta em placas de compósito formadas por fibra de vidro e resina poliéster a tração e a compressão para três temperaturas, 25, 50 e 80°. Um modelo empírico foi desenvolvido para prever o tempo de ruptura do material compósito. O modelo leva em conta a superposição de efeitos de tempo-temperatura. Os resultados experimentais foram comparados com os resultados numéricos mostrando-os satisfatório e validando o modelo empírico desenvolvido.

Tommaso et al. [23] com interesse nas aplicações de estruturas de FRP (plástico reforçados com fibras) investigou a flambagem nessas estruturas, propondo um modelo numérico baseado no Método dos Elementos Finitos. O método desenvolvido a princípio era aplicado para problemas de pequenos deslocamentos e pequenas deformações, mas depois, foi desenvolvido para problemas de grandes deslocamentos e

grandes deformações. Diferentemente da modelagem clássica em que se aplicavam as propriedades anisotrópicas destes materiais, Tommaso et al. utilizou somente de propriedades mecânicas das fibras e da matriz juntamente com o volume de fibras e orientação das mesmas, para tal modelagem. Os resultados obtidos na modelagem numérica foram comparados com valores experimentais. Houve uma boa aproximação dos resultados experimentais com os resultados numéricos em termos da carga limite de flambagem, validando assim, a eficiência da modelagem.

Os projetos estruturais de elementos formados por perfis pultrudados são governados, em geral por limites de flecha para carga de serviço e limites de estabilidade. Assim, Pierin e La Rovere [24] realizaram análises lineares de estabilidade de perfis estruturais de seção aberta por meios de programas computacionais baseados no Método dos Elementos Finito (MEF) e Método das Faixas Finitas (MFF). Pierin e La Rovere observaram que as diferenças relativas nos exemplos executados entre os métodos apresentados foram consideradas satisfatórias. Foram efetuados estudos sobre a influência que o comprimento do perfil exerce sobre a natureza do modo de instabilidade e no respectivo valor da tensão de bifurcação. Na mesma linha, Pierin e La Rovere [25] também investigaram, numericamente, o efeito da não homogeneidade nas tensões de flambagem dos perfis pultrudados, utilizando os MEF e MFF apresentado anteriormente.

Por fim, é importante destacar as seguintes pesquisas recentemente desenvolvida no país envolvendo o uso de perfis pultrudados para fins estruturais:

- Desenvolvimento de sistema de piso misto, com associação de concreto e perfis pultrudados, Neto [26].
- Desenvolvimento de ponte desmontável, para uso em situações emergenciais. Teixeira [27] que propõe uma nova concepção de ponte desmontável caracterizada pela utilização de perfis pultrudados, que possuem características favoráveis ao atendimento dos necessários requisitos de facilidade de transporte, rapidez de montagem além de baixo custo de manutenção e armazenamento.

3. Pesquisa Experimental: Ensaaios Realizados

Neste capítulo serão descritos os ensaios experimentais realizados no Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ para avaliar o comportamento de perfis pultrudados sob a ação da temperatura. Tais ensaios fazem parte do programa experimental previsto na presente pesquisa.

O objetivo da pesquisa experimental é a identificação do comportamento estrutural de perfis pultrudados submetidos à alta temperatura.

3.1. Considerações Iniciais

Nos ensaios experimentais, foram testados perfis pultrudados de seção “H”, muito utilizados na montagem de estruturas. O objetivo central da pesquisa é a investigação do desempenho estrutural destes perfis à flexão simples e à compressão centrada. As dimensões da seção transversal desse perfil estão apresentadas na Figura 3.1.

Nos ensaios foram utilizados perfis pultrudados compostos de fibras de vidro do tipo E-glass impregnadas por resina. Foram analisados perfis com dois tipos de resinas:

- Resina 1 – poliéster isoftálica;
- Resina 2 – éster-vinílica;

Os perfis utilizados nos ensaios foram doados pela empresa Cogumelo Pultrudados em Fibra de Vidro, situada na cidade do Rio de Janeiro.

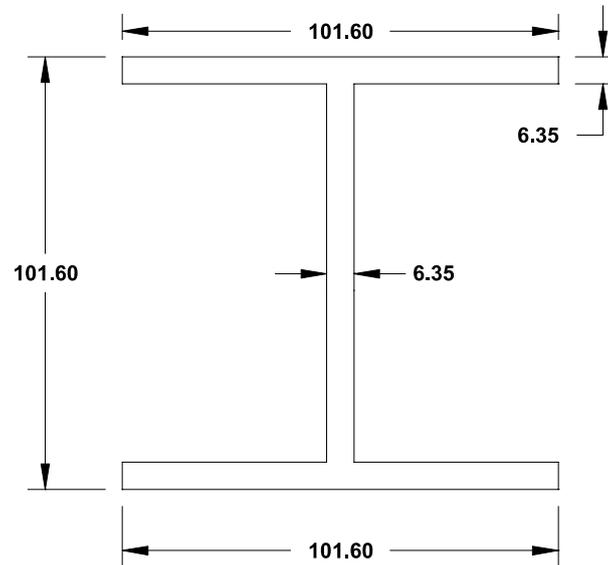


Figura 3.1 - Dimensões nominais do perfil pultrudado H adotado para os ensaios (medidas em mm).

3.2. Descrição dos Ensaios à Flexão Simples

O programa experimental a flexão simples foi dividido em duas etapas:

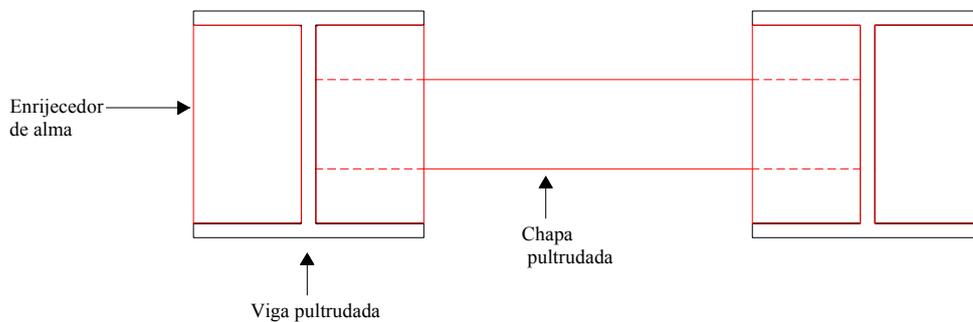
- **Etapa 1:** ensaios a temperatura ambiente para obtenção da resistência a flexão simples;
- **Etapa 2:** ensaios de flexão com controle da tensão máxima aplicada e controle da temperatura.

3.2.1. Descrição dos Ensaios à Flexão Simples da Etapa 1

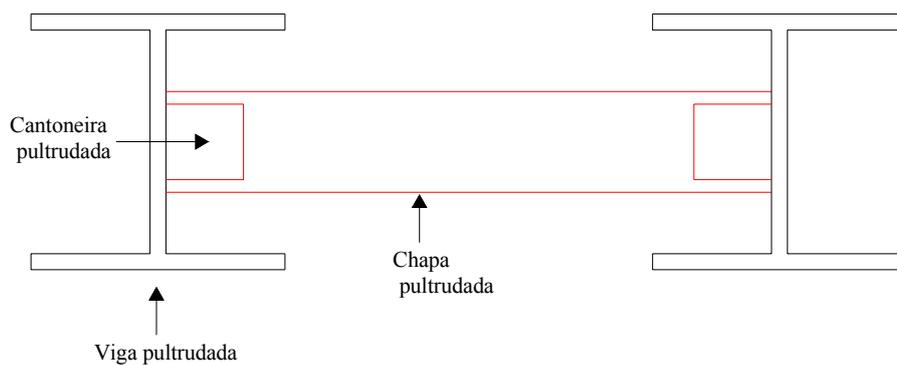
Nos ensaios para obtenção da resistência das vigas, foram utilizados perfis H com as dimensões apresentada anteriormente na Figura 3.1.

Foi adotada uma estrutura de duas vigas gêmeas, ligadas por transversinas, de modo a impedir a flambagem lateral com torção (FLT), propensas a este tipo de perfil.

As vigas foram travadas entre si por meio de chapas do próprio material compósito. Nos apoios utilizou-se enrijecedores de alma e a chapa transversina como ligação. Adicionalmente, como não era suficiente travar as vigas somente nos apoios, adotaram-se travamentos nos pontos de aplicação de carga, nos terços de vão, com o auxílio de cantoneiras pultrudadas e chapas de compósito. As chapas foram coladas e aparafusadas. Na Figura 3.2 são apresentadas as ligações das vigas gêmeas de forma esquemática, e na Figura 3.3 são apresentadas as fotos da ligação realizada nas vigas de ensaio.

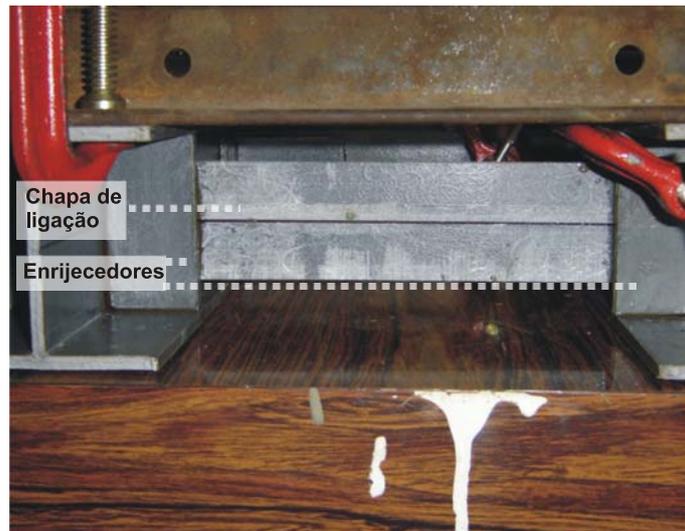


(a)

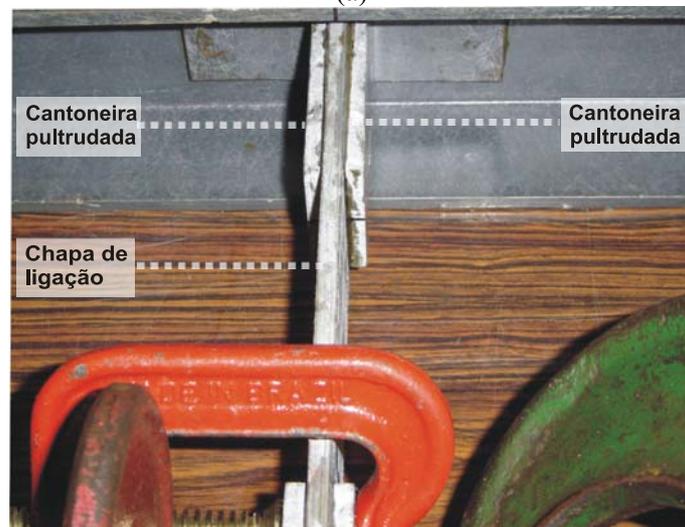


(b)

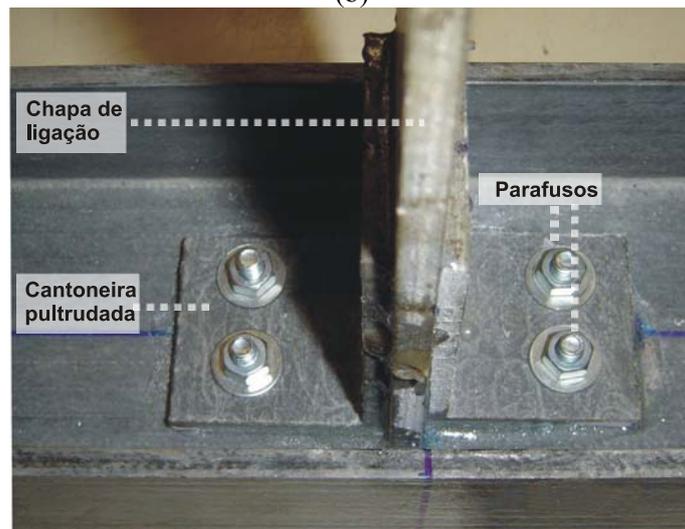
Figura 3.2 – Esquema da ligação das duas vigas gêmeas: (a) ligação dos perfis no apoio; (b) ligação dos perfis nos pontos de aplicação de carga.



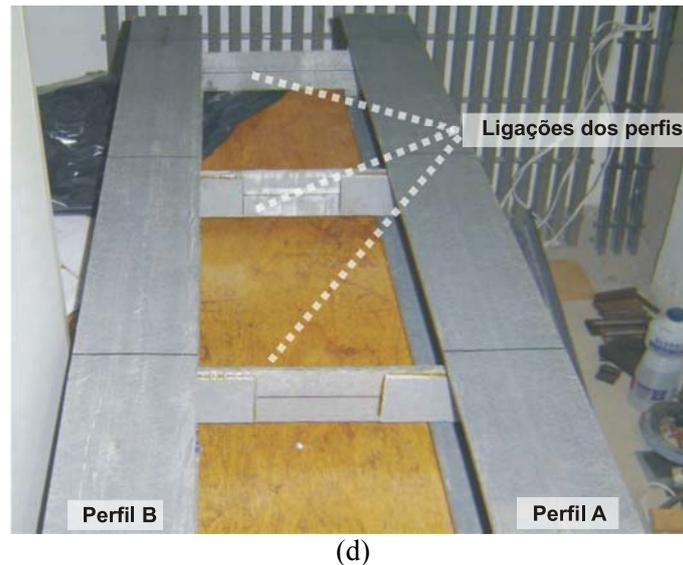
(a)



(b)



(c)



(d)
 Figura 3.3 – Ligação das duas vigas gêmeas: (a) ligação dos perfis no apoio; (b) ligação dos perfis nos pontos de aplicação de carga, terço do vão; (c) detalhe da ligação nos pontos de aplicação de carga; (d) configuração final da peça a ser ensaiada.

O sistema estrutural adotado foi de flexão em quatro pontos, Figura 3.4. A carga transversal foi aplicada, de forma incremental até atingir a carga máxima (colapso), através de um cilindro hidráulico acionado com força controlada, o qual reage contra um pórtico rígido de aço. Para o controle de carga foi utilizada uma célula de carga¹ calibrada.

Os deslocamentos foram obtidos através de transdutores de deslocamentos². A princípio se desejava obter os deslocamentos no meio do vão, mas, devido à configuração do ensaio concluiu-se que somente era possível situá-los nos terços, nos pontos de aplicação de carga e em cima da chapa de ligação. A montagem final do ensaio de flexão para obtenção da resistência pode ser vista na Figura 3.5.

¹ Célula de carga, marca Kyowa, tipo LC20TD, capacidade :20 tf, constante de calibração: $K = 0,004994 \text{ tf}/10\text{E}-6$

² Transdutores lineares de deslocamento, marca Kyowa, DTH 50A (50 mm de curso), DTH – 100A (100 mm de curso).

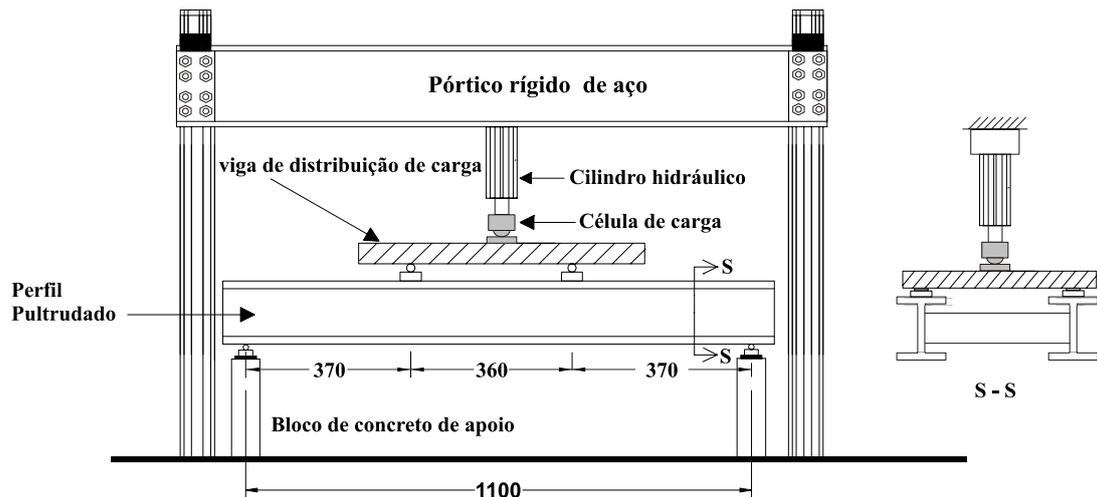


Figura 3.4 – Esquema dos ensaios de flexão simples para obtenção da resistência das vigas, (medidas em mm).

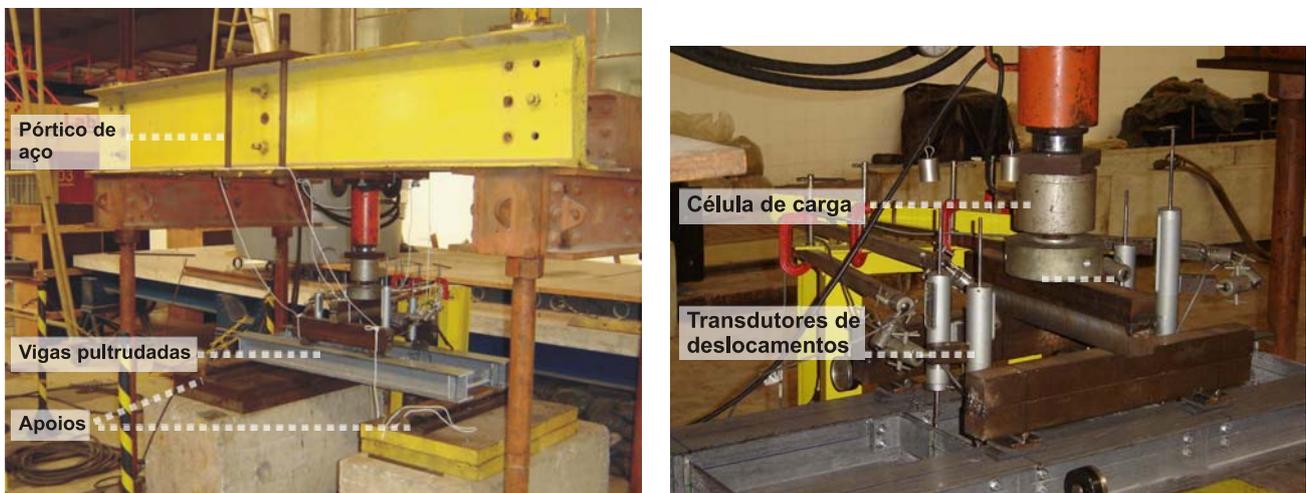


Figura 3.5 - Montagem final do ensaio de resistência à flexão simples.

3.2.2. Descrição dos Ensaios à Flexão Simples da Etapa 2

Para os ensaios a altas temperaturas, foi adotada a mesma configuração de ensaio utilizado nos ensaios para determinação da resistência à flexão das vigas, apresentado na Figura 3.4. Nestes ensaios, algumas adaptações foram necessárias uma vez que os ensaios foram realizados com o auxílio de uma estufa especialmente projetada para esta finalidade. O esquema geral da montagem dos ensaios a alta temperatura no interior da estufa pode ser visto na Figura 3.6. A Figura 3.7 apresenta a estufa utilizada nos ensaios de flexão simples. A temperatura foi medida através de

termopares³, os quais serviam igualmente para alimentar o sistema de controle de temperatura da estufa.

A carga transversal também foi aplicada através de um cilindro hidráulico, como no ensaio de resistência. A diferença foi que, nesses ensaios o carregamento aplicado não foi incremental até atingir a carga máxima (colapso), e sim em diferentes níveis previamente estipulados a partir do conhecimento da resistência da viga.

Como o objetivo do ensaio era observar o comportamento das vigas com o aumento da temperatura, o tempo de duração de cada ensaio foi estipulado de três a oito horas, considerando a aplicação total da carga, o aquecimento da estufa até a temperatura pré-estabelecida e a permanência da peça completamente carregada e aquecida. Primeiramente foram realizados os ensaios à temperatura ambiente (como referência) e em seguida procedia-se aos ensaios com as temperaturas pré-estabelecidas.

Os deslocamentos foram medidos pelos mesmos transdutores de deslocamento utilizados nos ensaios de resistência a flexão e também foram posicionados nos pontos de aplicação de carga (terços do vão).

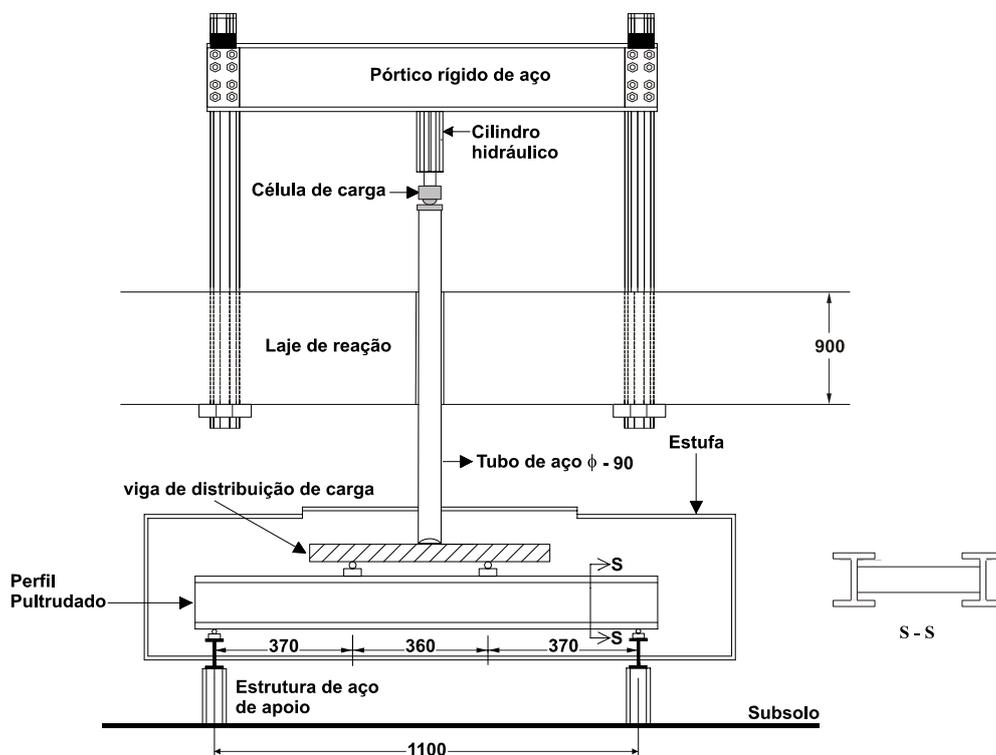
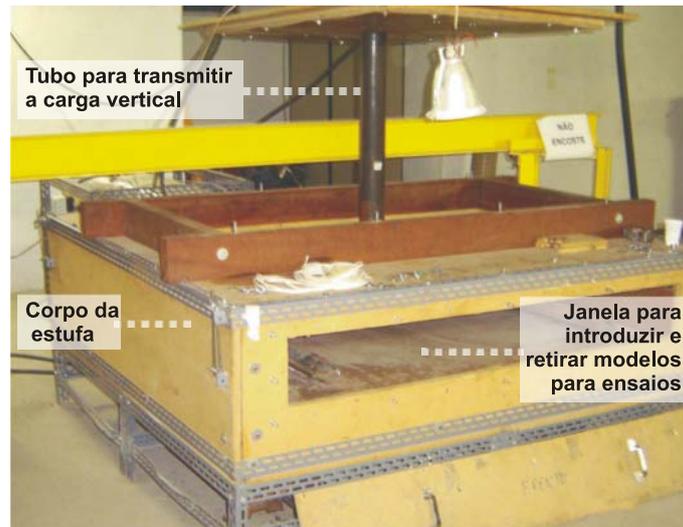
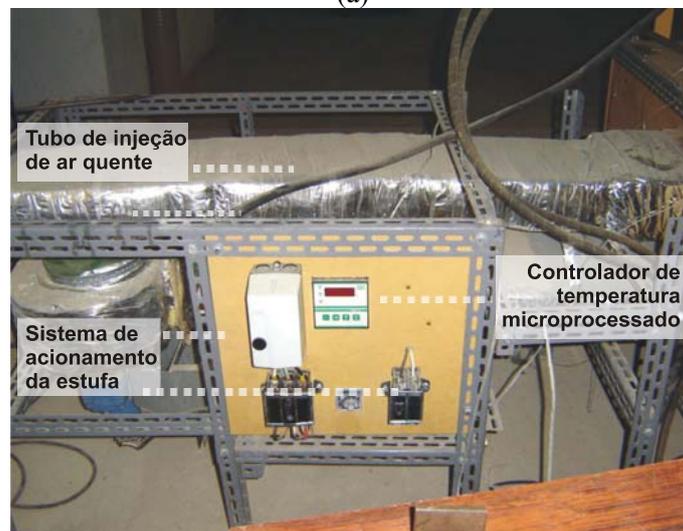


Figura 3.6 – Esquema geral dos ensaios de flexão a alta temperatura (medidas em mm).

³ Termopares do tipo K.



(a)



(b)

Figura 3.7 – Estufa utilizada nos ensaios de flexão: (a) visão geral da estufa; (b) sistema de aquecimento da estufa.

Com a definição do sistema estrutural para os ensaios, houve a necessidade de verificar o nivelamento da estufa e o alinhamento e deslocamento lateral do tubo de aplicação de carga.

Para verificar se a estufa estava ou não nivelada, foi utilizado um catetômetro⁴ (nível) para varrer toda a estufa, ver Figura 3.8. As medidas obtidas pelo catetômetro foram tiradas de pontos, previamente determinados, a fim de se obter o alinhamento horizontal e vertical.

⁴ Catetômetro KM 1001 – Willd, luneta KM 343, precisão de 0.1 mm.

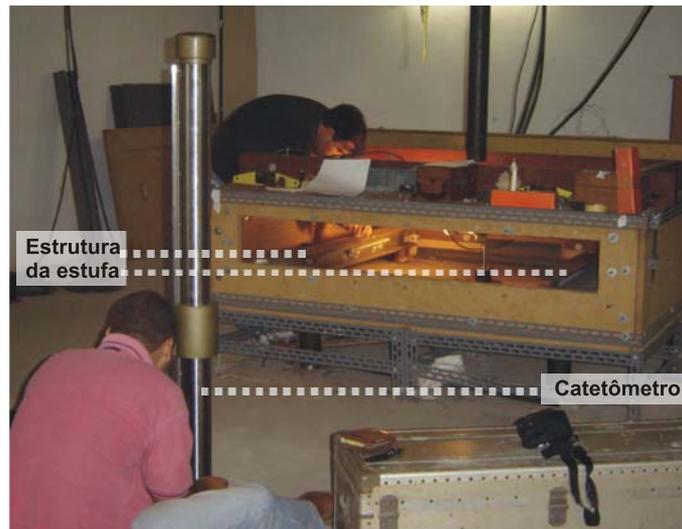


Figura 3.8 – Processo de nivelamento da estufa.

Para impedir o deslocamento lateral do tubo de transmissão da carga, foi criado um mecanismo do tipo rolamento de bilhas, fixado na parte inferior da placa de reação como mostra a Figura 3.9. O mecanismo criado é composto por oito bilhas posicionadas nas cabeças dos parafusos. A deslocabilidade do tubo foi controlada a partir de aperto manual desses parafusos.

Nos ensaios com alta temperatura, em que é necessário fechar a estufa, foi necessário um alongamento das hastes dos transdutores de deslocamentos uma vez que as hastes originais não permitiam a medição dos deslocamentos com a estufa fechada. Para impedir a perda de contato e a mudança do ponto de medição das hastes dos transdutores de deslocamentos, foram coladas pequenas porcas como guias. A Figura 3.10 apresenta de forma esquemática a posição dos transdutores de deslocamentos e detalhes da montagem do ensaio a temperatura ambiente Nesta figura. A Figura 3.11 apresenta a adaptação das hastes dos transdutores de deslocamentos para os ensaios e a configuração final dos ensaios com altas temperaturas.

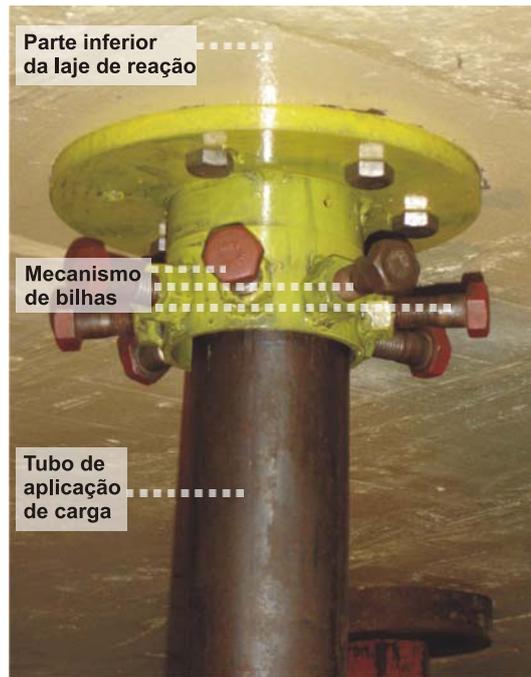


Figura 3.9 – Mecanismo de bilha para impedir a deslocabilidade lateral do tubo de aplicação de carga.

Como metodologia de ensaio foi adotada a aplicação prévia da carga transversal, seguida do aquecimento da estufa até a temperatura pré-estabelecida. As temperaturas utilizadas nos ensaios variaram na faixa de 25 (ambiente) a 100°C.

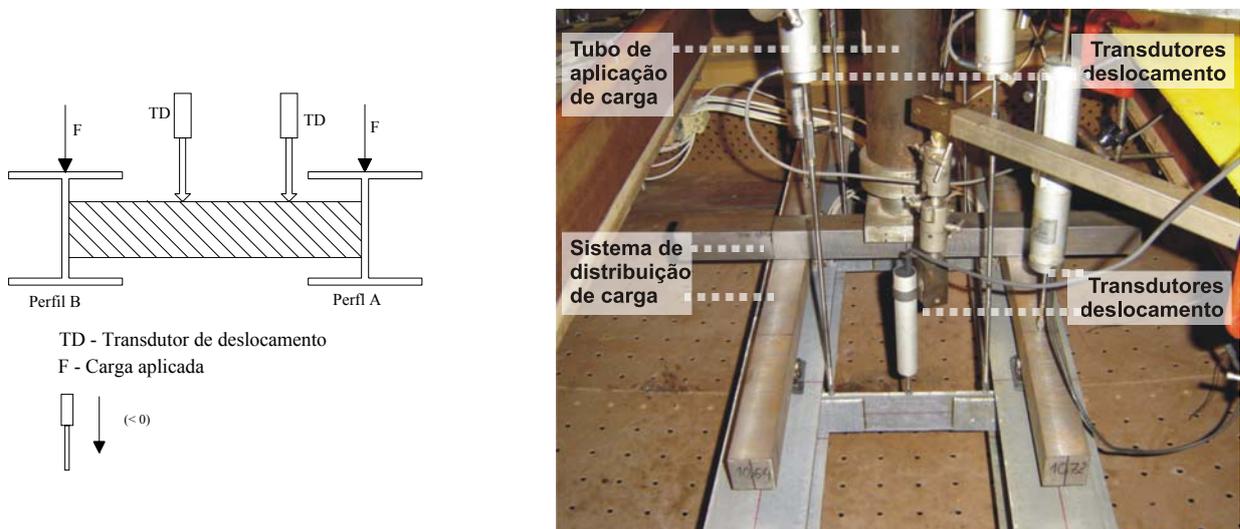


Figura 3.10 - Ensaio de flexão no interior da estufa: (a) esquema da posição dos transdutores de deslocamentos; (b) detalhes da montagem dos ensaios a temperatura ambiente.

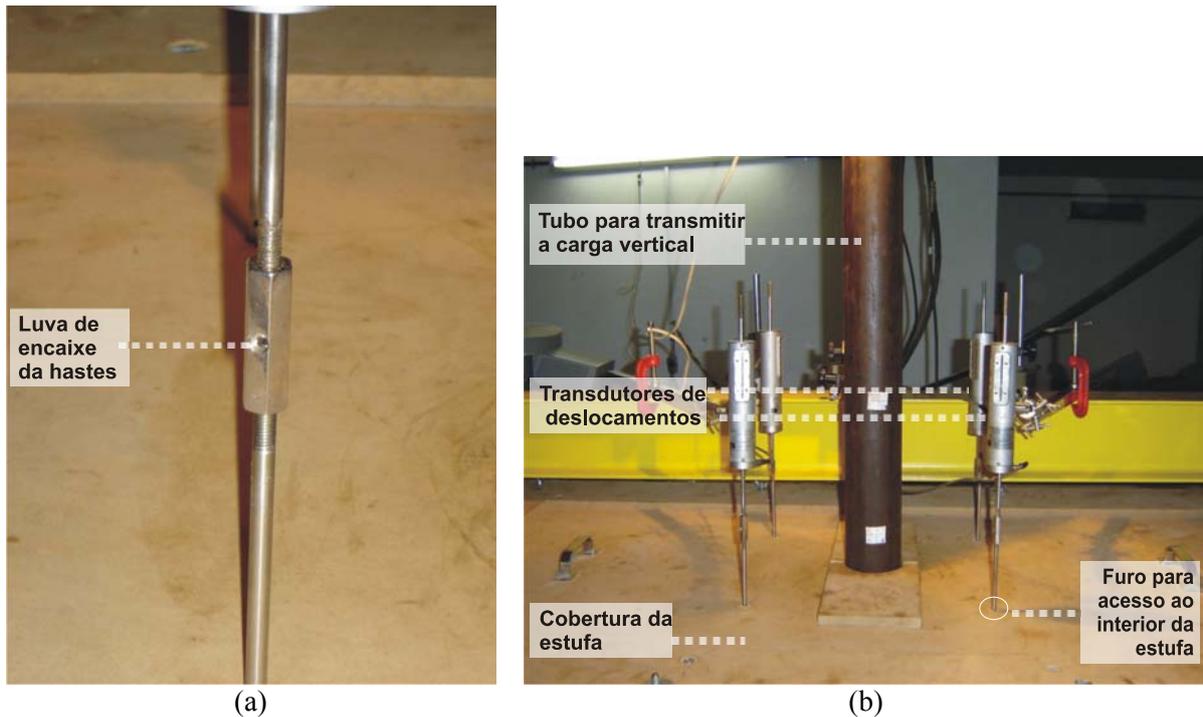


Figura 3.11 – Transdutores de deslocamentos: (a) detalhe do alongamento das hastes dos transdutores de deslocamentos (b) vista geral dos transdutores de deslocamentos após a adaptação feita para os ensaios com a estufa fechada.

Uma vez instrumentados e identificados os componentes de ensaio, os sensores foram conectados a um sistema de aquisição de dados⁵, conforme a Figura 3.12.

Os circuitos da extensometria foram alimentados por uma fonte⁶ elétrica, com uma voltagem de aproximadamente 2 Volts. A aquisição de dados foi executada por um programa computacional em linguagem LABVIEW, desenvolvido para este fim.



Figura 3.12 – Sistema de aquisição de dados.

⁵ Data Logger – equipamento eletrônico da Hewlett Packard, modelo: 3497A.

⁶ Fonte DC Minipa, modelo: MPS – 303D. Fornece tensão de saída de 0 a 30 V DC e corrente de 0 a 3 A DC.

3.3. Descrição dos Ensaios de Compressão Centrada

O principal objetivo dos ensaios de compressão foi avaliar a resistência estrutural dos perfis pultrudados com o aumento da temperatura. Foram utilizados perfis com mesma seção transversal apresentado nos ensaios de flexão simples (Figura 3.1) e com as mesmas resinas.

O programa experimental se iniciou com a realização de ensaios de compressão centrada à temperatura ambiente de modo a obter a resistência última experimental do perfil (resinas poliéster isoftálica e éster vinílica) e a identificação do modo de flambagem.

O sistema estrutural adotado foi o bi-rotulado com a utilização de rótulas esféricas. Para definição da altura do perfil a ser utilizado, foram realizadas várias modelagens com a ferramenta computacional SAP 2000 de modo a obter o comprimento mínimo necessário para verificar o modo de flambagem global da peça. Foi determinada uma altura de 1200 milímetros para o perfil, comprimento este suficiente para avaliação do modo de flambagem global e desenvolvimento da estufa vertical para aplicação da temperatura. Na Figura 3.13 é apresentado o esquema geral dos ensaios de compressão centrada e na Figura 3.14 é apresentado o modo de flambagem global obtido para o modelo numérico da peça em estudo.

Após a realização de ensaios experimentais prévios, não foi observado o desenvolvimento do primeiro modo de flambagem, na flexão (Figura 3.14). Concluiu-se que as rótulas esféricas ofereceram restrições a rotações, levando os ensaios à condição de bi-engastados. A análise numérica da flambagem no modelo bi-engastado comprovou o modo de flambagem local como modo crítico, em correspondência com os resultados experimentais. O resultado dessa modelagem pode ser vista na Figura 3.15.

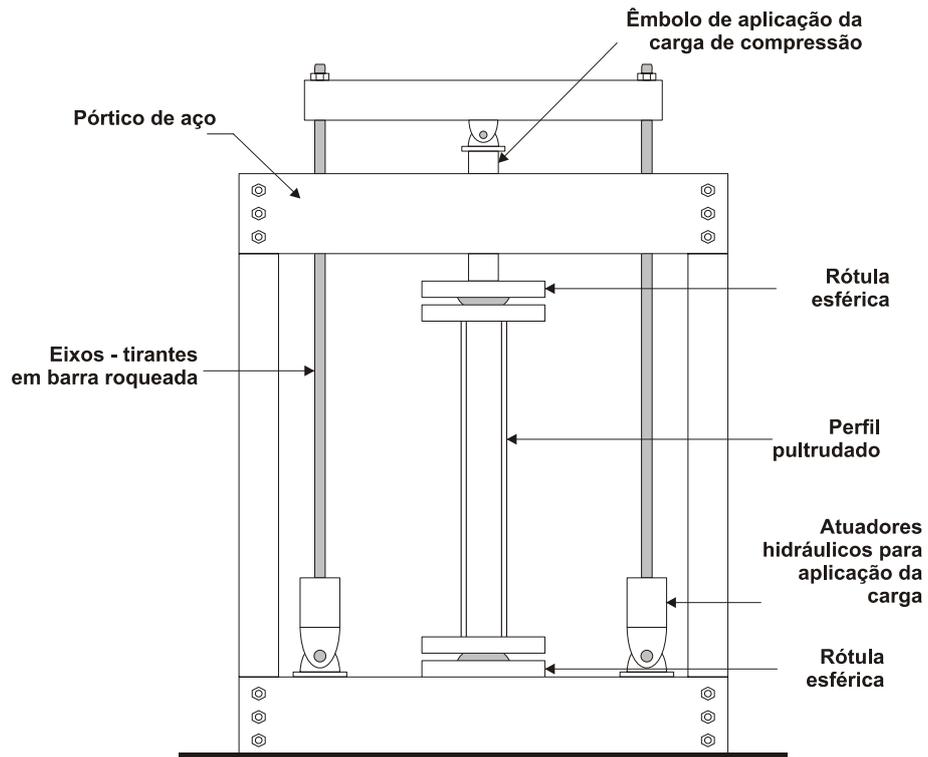


Figura 3.13 – Esquema geral dos ensaios de compressão centrada a temperatura ambiente.

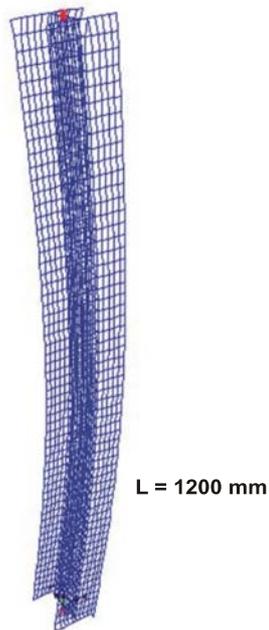


Figura 3.14 – Primeiro modo de flambagem obtido pela ferramenta computacional SAP 2000: flexão global.

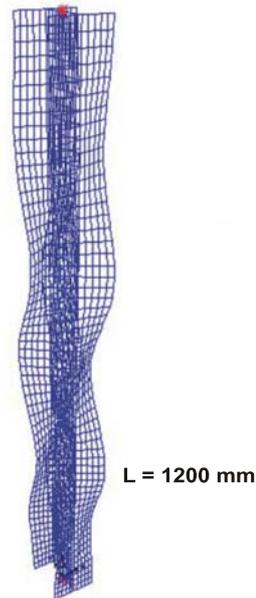


Figura 3.15 – Primeiro modo de flambagem obtido pela ferramenta computacional SAP 2000 para o sistema estrutural bi-engastado: flambagem local de placa.

Nos ensaios a temperatura ambiente foram utilizados quatro transdutores de deslocamentos⁷: dois foram posicionados nos bordos livres da mesa, para observar a flambagem local, e dois posicionados a meia altura do perfil, orientados no plano de menor inércia, para obter o modo global. Os transdutores de deslocamentos posicionados nos bordos livre da mesa eram liberados para varrer toda a altura do perfil a cada passo de carga aplicada, permitindo o registro do desenvolvimento do modo de flambagem local. A Figura 3.16 apresenta a configuração dos ensaios de compressão centrada à temperatura ambiente. Dois atuadores hidráulicos⁸ servo-controlados, conectados a um sistema de ensaios⁹, foram utilizados para a aplicação da carga nos ensaios.

⁷ Transdutores lineares de deslocamento, marca Kyowa, DTH 20A (20 mm de curso), DTH – 50A (50 mm de curso).

⁸ Atuador hidráulico modelo 202.32, capacidade 55Kip (≈ 245 kN); Célula de carga modelo 661.22, capacidade: ≈ 250 kN.

⁹ MTS System Corporation, Minneapolis, Minnesota.

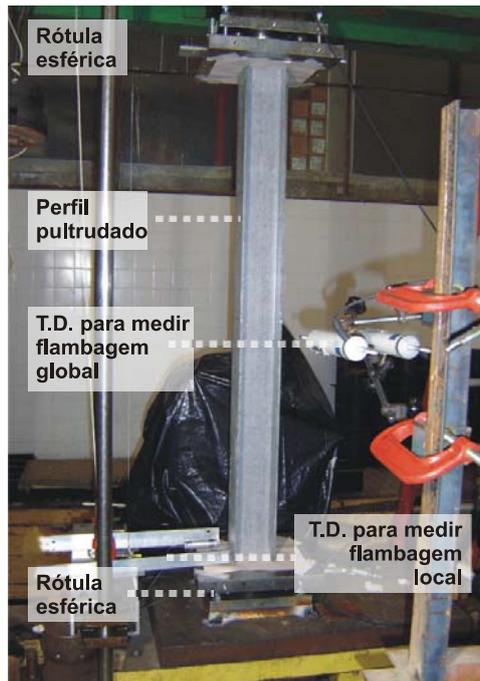


Figura 3.16 – Configuração dos ensaios de compressão centrada à temperatura ambiente (T.D – transdutor de deslocamento).

Para os ensaios a alta temperatura foi desenvolvida uma estufa, que envolveria o perfil pultrudado, no próprio pórtico utilizado nos ensaios à temperatura ambiente. A aplicação da temperatura se deu por transferência de calor por convecção. A temperatura foi medida através de termopares¹⁰, os quais serviam igualmente para alimentar o sistema de controle de temperatura da estufa.

Na Figura 3.17 é apresentada a estufa desenvolvida para os ensaios de compressão a altas temperaturas.

¹⁰ Termopares do tipo K.

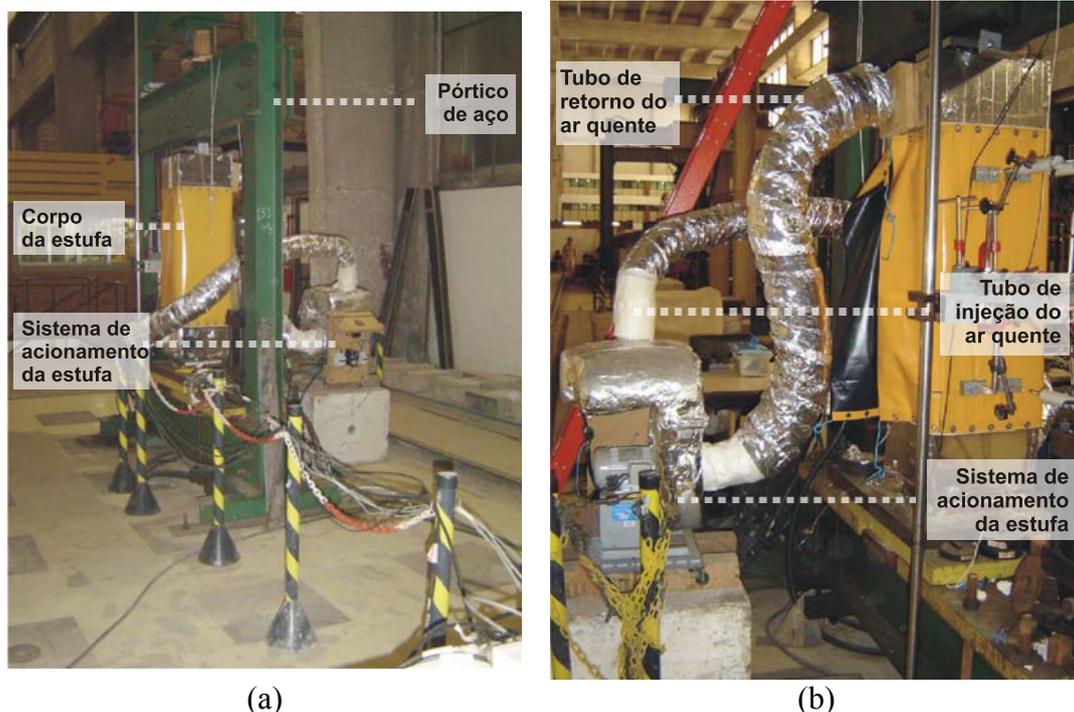
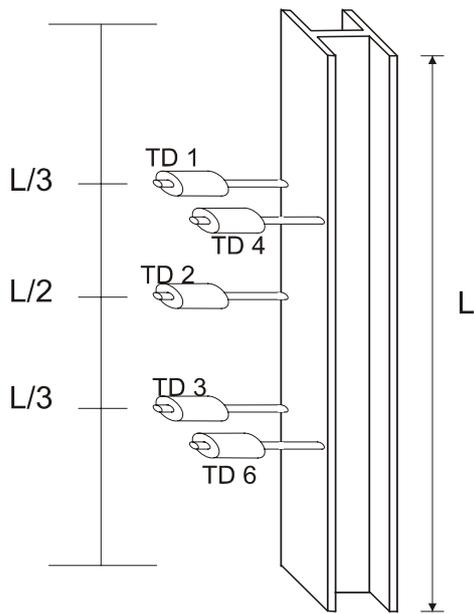


Figura 3.17 – Estufa desenvolvida para os ensaios de compressão: (a) corpo da estufa e o pórtico de aço utilizado; (b) sistema de aquecimento – circuito fechado.

Com a realização prévia dos ensaios a temperatura ambiente, foi possível observar a geometria do modo de flambagem local no perfil, determinando então o posicionamento dos transdutores de deslocamentos, de modo a obter a evolução do modo de flambagem local. Assim, foram utilizados cinco transdutores de deslocamentos¹¹ para os ensaios de compressão a alta temperatura. Quatro foram posicionados nas posições de pico do modo de flambagem local (nos terços do vão do perfil) e um posicionado a meia altura do comprimento do perfil. Os transdutores de deslocamentos não foram posicionados diretamente em contato com o perfil, para a proteção dos mesmos a alta temperatura. Assim, fios de aço foram utilizados para ligação entre a posição de medição no perfil e os transdutores de deslocamentos. Para a proteção dos fios de aço foram utilizados tubos cerâmicos. A Figura 3.18 apresenta a disposição e detalhes da montagem dos transdutores de deslocamentos para os ensaios de compressão a altas temperaturas.

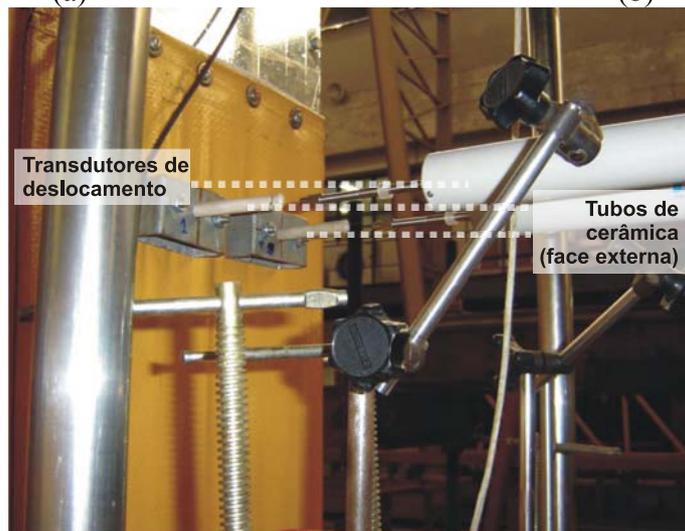
¹¹ Transdutores lineares de deslocamento, marca Kyowa, DTH – 50A (50 mm de curso).



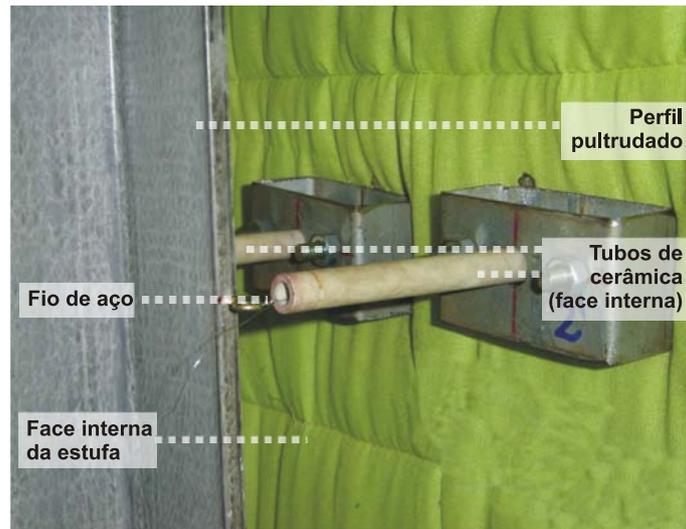
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.18 – Configuração final dos ensaios de compressão a altas temperaturas: (a) e (b) posicionamento dos transdutores de deslocamentos; (c) detalhe da montagem em vista externa da estufa e (d) detalhes da montagem dos tubos de cerâmica e fios de aço, em vista interna da estufa.

Uma vez instrumentados e identificados os componentes de ensaio, os sensores (transdutores de deslocamentos e as células de carga dos atuadores hidráulicos) foram conectados a um sistema de aquisição de dados¹², conforme a Figura 3.19. Com o sistema Lynx (AqDados e AqDanalysis) os dados adquiridos eram apresentados em tempo real. Apesar disso, era necessário um pós-processamento¹³ dos dados adquiridos. A leitura da temperatura durante os ensaios foi realizada por um sistema de aquisição¹⁴, para leitura de termopares. Os dados da temperatura foram registrados e gravados por um programa computacional em linguagem LabView desenvolvido para este fim.

¹² Sistema ADS 2000 da Lynx de 24 canais

¹³ O processamento dos dados adquiridos é feito com o programa AqDanalysis

¹⁴ National Instruments – NI cRio - 9211

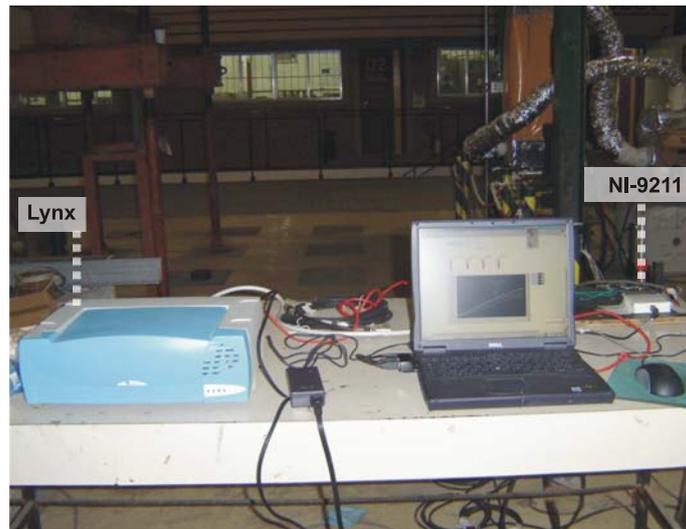


Figura 3.19 – Sistema de aquisição para os ensaios de compressão centrada.

3.4. Descrição dos Ensaios de Deformação Lenta

O objetivo dos ensaios de deformação lenta foi de avaliar e identificar à ocorrência de fluência nos materiais compósitos em estudo a temperatura ambiente. Foram realizados ensaios de tração e de compressão do material, em uma sala com controle de temperatura ($20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) e de umidade ($55\% \pm 4$).

Para os ensaios de tração, foram confeccionados corpos de prova retirados do perfil H em estudo. Devido à diferença de fração volumétrica de fibras entre as mesas e alma, foram confeccionados corpos de prova das mesas e corpos de prova das almas, para as duas resinas. As dimensões dos corpos de prova são apresentadas na Figura 3.20.



Figura 3.20 – Dimensões nominais dos corpos de prova utilizados nos ensaios de fluência a tração do material compósito extraído dos perfis pultrudados de seção H (medidas em mm).

Os ensaios de deformação lenta a tração foram realizados em um pórtico especialmente projetado para ensaios de deformação lenta a tração com razão de carregamento de 1:21, ver Figura 3.21.

Para evitar a ruptura ou deformação excessiva das extremidades dos corpos de prova fixadas nas garras e, ao mesmo tempo, evitar medições irregulares de deformações, foram necessários reforços dessas extremidades. Estes reforços foram feitos com chapas de aço coladas com resina epoxi¹⁵ nas duas faces, como é mostrado na Figura 3.22.

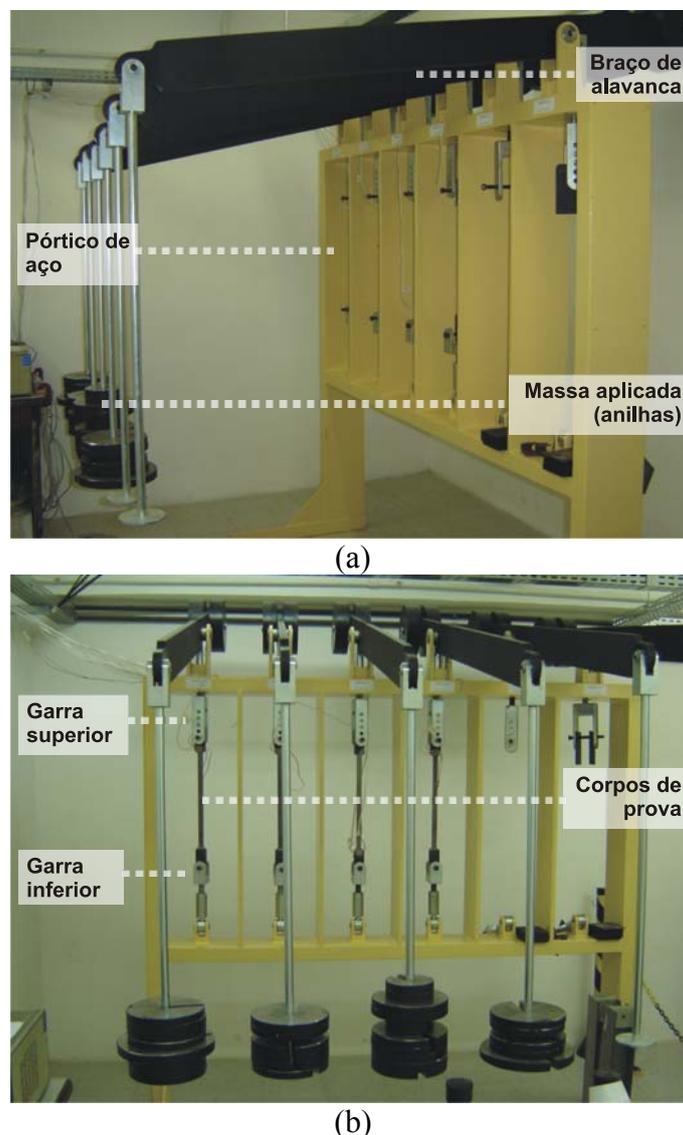


Figura 3.21 – Estrutura utilizada para realização dos ensaios de fluência à tração: (a) pórtico de aço com sistema de braço de alavancas; (b) vista frontal do pórtico com os corpos de prova.

¹⁵ Resina epoxi – Sikadur 32.

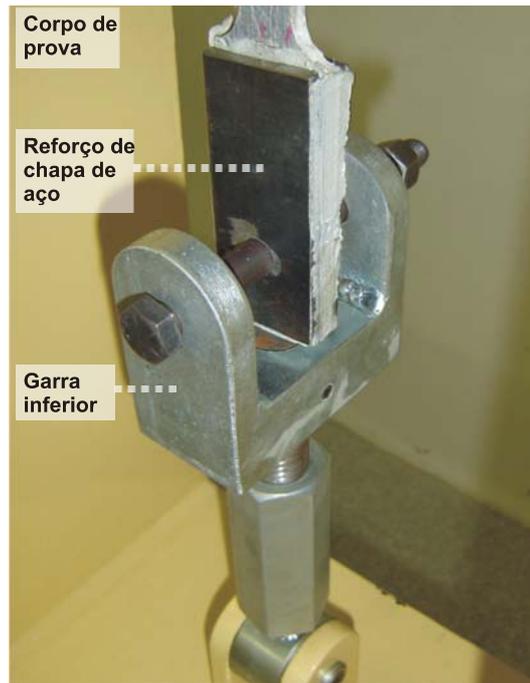


Figura 3.22 – Reforço feito nas extremidades dos corpos de prova.

A carga mecânica foi aplicada através de massas calibradas (anilhas de aço) que transmitem através do braço de alavanca a carga prevista. Foram realizados ensaios para níveis de tensão normal média de 10 a 80 % da tensão normal média de ruptura, obtida previamente por ensaios de tração direta.

As deformações foram obtidas através de dois extensômetros¹⁶ elétricos de resistência posicionados a meia altura do vão, na linha média de cada uma das faces, conforme apresentado na Figura 3.23.

¹⁶ Extensômetro elétrico de resistência da ≡M≡M≡ - Micro Measurements group, inc.: EA-06-125AD-120 (Resistência: 120Ω; comprimento: 3.2 mm; gage factor: 2.04 ±0.5%)

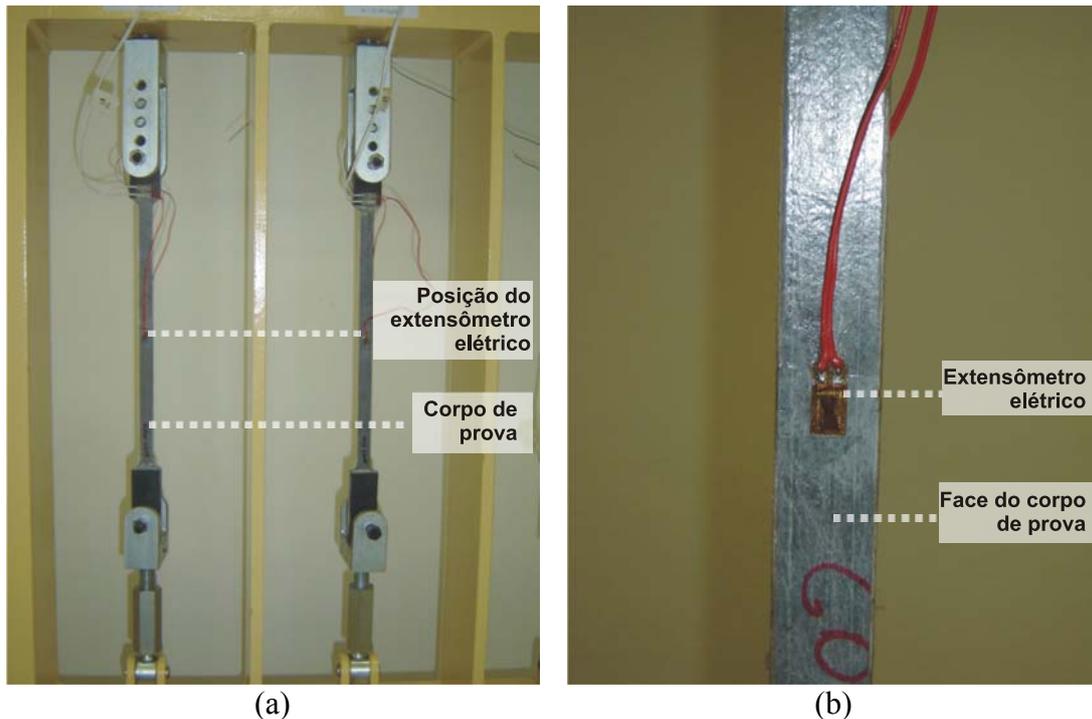


Figura 3.23 – Instrumentação utilizada nos ensaios de deformação lenta: (a) posição dos extensômetros elétricos de resistência na direção longitudinal da face do corpo de prova; (b) detalhe do extensômetro.

Para os ensaios de deformação lenta a compressão foram utilizados corpos de prova dos perfis pultrudados com secção transversal “H”, comprimento de 600 milímetros. A carga mecânica foi aplicada através de um cilindro hidráulico acionado com pressão controlada, o qual reage contra um pórtico rígido de aço. O monitoramento da pressão foi feito por meio de manômetros digitais. As correções da pressão aplicada foram realizadas regularmente, de modo a minimizar eventuais variações na carga de compressão. A Figura 3.24 apresenta o sistema de ensaio adotado.

Foram realizados ensaios para quatro níveis de força aplicada de compressão na seção transversal: (a) para força aplicada correspondente a 30% da força máxima (resistência) à compressão previamente obtida experimentalmente; (b) para força aplicada correspondente a 60% da resistência à compressão; (c) para força aplicada correspondente a 90% da resistência à compressão e (d) para força aplicada correspondente a 100% da resistência à compressão.

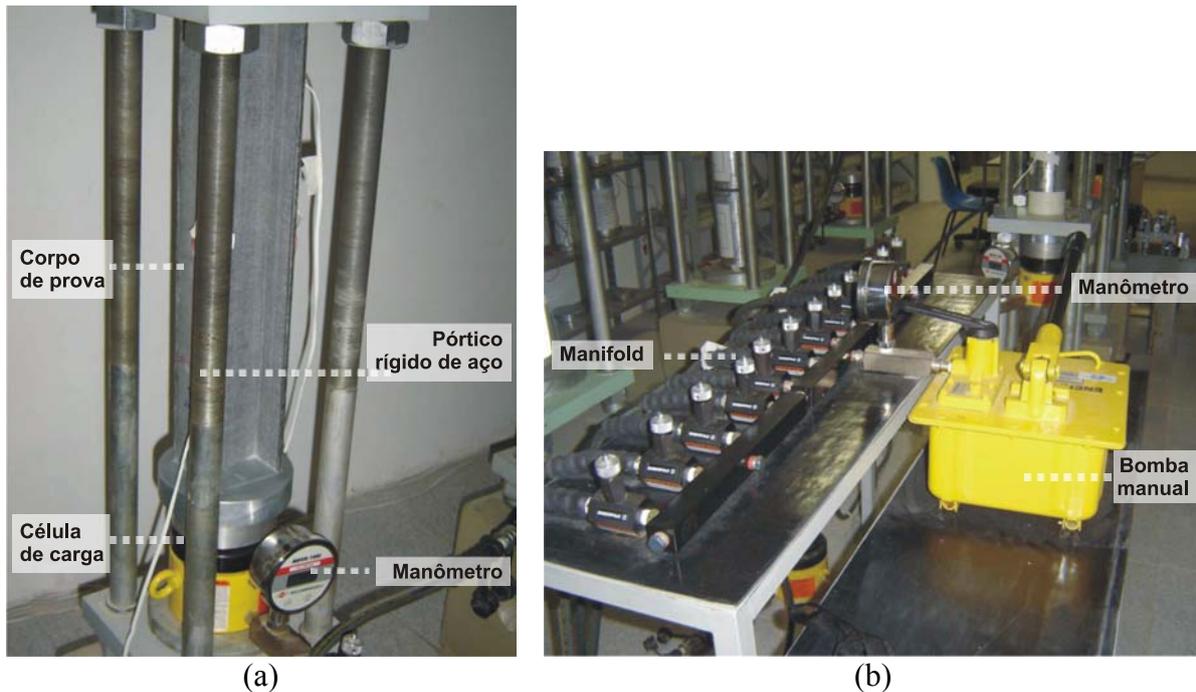


Figura 3.24 – Ensaio de deformação lenta a compressão: (a) dispositivo para ensaio de deformação lenta a compressão; (b) vista do sistema de pressão hidráulica controlada.

As deformações foram obtidas através de dois extensômetros elétricos de resistência posicionados a meia altura do vão, na linha média da cada uma das mesas, conforme apresentado na Figura 3.25 .

Os resultados experimentais de força de compressão (medida a partir da pressão no cilindro hidráulico) foram registrados manualmente. As deformações obtidas pelos extensômetros elétricos de resistência foram registradas por um sistema de aquisição de dados¹⁷. Os circuitos da extensometria foram alimentados por uma fonte¹⁸ elétrica, com uma voltagem de aproximadamente de 2 Volts. A aquisição de dados foi executada por um programa computacional em linguagem LABVIEW. A Figura 3.26 apresenta o sistema de aquisição de dados adotado.

¹⁷ Data Logger – Hewlett Packard, modelo: 3497A.

¹⁸ Fonte PS 1500. Fornece tensão de saída de 0 a 15 V DC e corrente de 0 a 3 A DC.

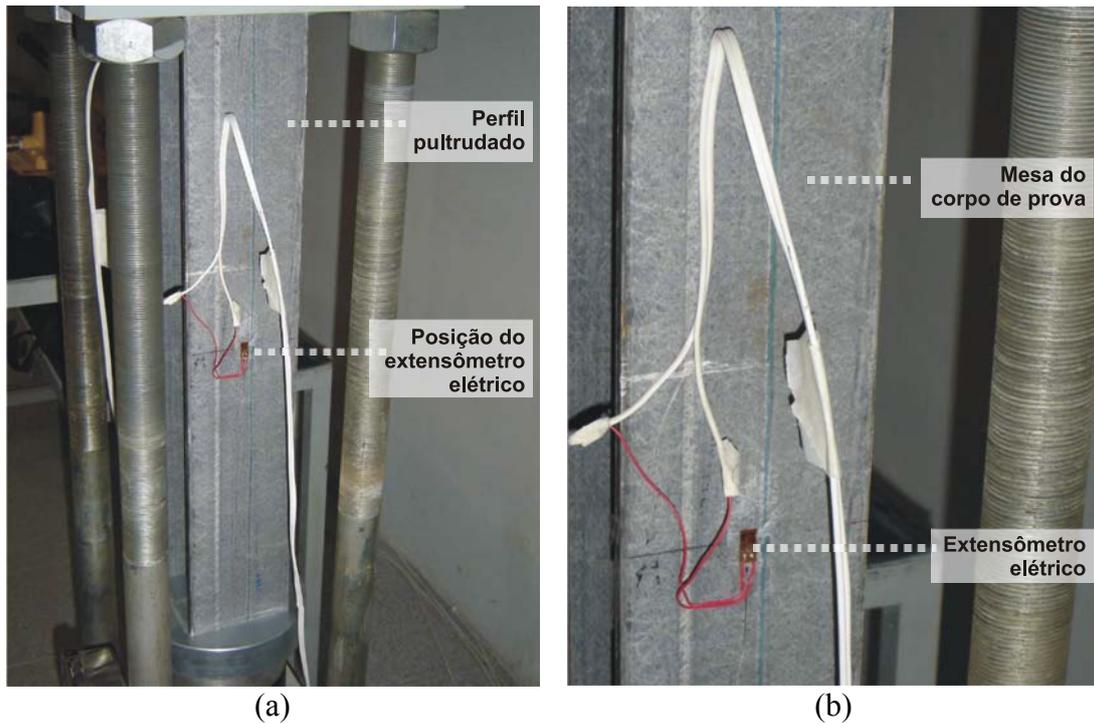


Figura 3.25 – Instrumentação utilizada nos ensaios de deformação lenta a compressão: (a) vista da posição dos extensômetros elétricos utilizados nos ensaios; (b) detalhe do extensômetro posicionado na direção longitudinal da mesa do perfil H.



Figura 3.26 – Sistema de aquisição de dados para os ensaios de fluência.

4. Resultados Experimentais

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos ensaios realizados de flexão simples, de compressão centrada e de deformação lenta dos perfis pultrudados. Serão apresentados também resultados de caracterização dos materiais utilizados.

Para um melhor entendimento deste capítulo, na Tabela 4.1 é apresentada a nomenclatura para identificação dos ensaios realizados, a qual segue a seguinte regra geral:

V – “viga”, ensaios de flexão simples;

C – “coluna”, ensaios de compressão centrada;

DL – “deformação lenta”, ensaios de tração e compressão;

Ester – resina éster vinílica;

Iso – resina poliéster isoftálica.

Tabela 4.1 – Nomenclatura dos ensaios realizados.

Nomenclatura	Tipo de resina	Tipo de ensaio
V1_Ester	Éster vinílica	Flexão simples a temperatura ambiente
V2_Ester	Éster vinílica	Flexão simples a temperatura ambiente
V3_Ester	Éster vinílica	Flexão simples a altas temperaturas
V4_Ester	Éster vinílica	Flexão simples a altas temperaturas
V5_Ester	Éster vinílica	Flexão simples a altas temperaturas
V1_Iso	Poliéster isoftálica	Flexão simples a temperatura ambiente
V2_Iso	Poliéster isoftálica	Flexão simples a altas temperaturas
V3_Iso	Poliéster isoftálica	Flexão simples a altas temperaturas
C1_Ester	Éster vinílica	Compressão centrada a temperatura ambiente

C2_Ester	Éster vinílica	Compressão centrada a temperatura de 60°C
C3_Ester	Éster vinílica	Compressão centrada a temperatura de 70°C
C4_Ester	Éster vinílica	Compressão centrada a temperatura de 80°C
C5_Ester	Éster vinílica	Compressão centrada a temperatura de 90°C
CDL6_Ester	Éster vinílica	Deformação lenta a compressão centrada a temperatura de 60°C
CDL7_Ester	Éster vinílica	Deformação lenta a compressão centrada a temperatura de 80°C
C1_Iso	Poliéster isoftálica	Compressão centrada a temperatura ambiente
C2_Iso	Poliéster isoftálica	Compressão centrada a temperatura de 60°C
C3_Iso	Poliéster isoftálica	Compressão centrada a temperatura de 70°C
C4_Iso	Poliéster isoftálica	Compressão centrada a temperatura de 80°C
C5_Iso	Poliéster isoftálica	Compressão centrada a temperatura de 90°C
CDL6_Iso	Poliéster isoftálica	Deformação lenta a compressão centrada a temperatura de 60°C
CDL7_Iso	Poliéster isoftálica	Deformação lenta a compressão centrada a temperatura de 80°C
CDL_Ester	Éster vinílica	Deformação lenta a compressão a temperatura ambiente
TDL1_Ester	Éster vinílica	Deformação lenta a tração a temperatura ambiente
TDL2_Ester	Éster vinílica	Deformação lenta a tração a temperatura ambiente
CDL_Iso	Poliéster isoftálica	Deformação lenta a compressão a temperatura ambiente
TDL1_Iso	Poliéster isoftálica	Deformação lenta a tração a temperatura ambiente
TDL2_Iso	Poliéster isoftálica	Deformação lenta a tração a temperatura ambiente

4.1. Propriedades dos Materiais

Para todos os ensaios realizados foram adotados corpos de prova de perfis pultrudados de seção transversal “H” com as seguintes dimensões, em mm: 101.6 x 101.6 x 6.35 (Figura 3.1). Os compósitos foram produzidos com camadas alternadas de fibras de vidro longas, tipo *E-glass*, unidirecionais e de mantas impregnadas com resina poliéster isoftálica ou éster vinílica, ver Figura 4.1.



(a)

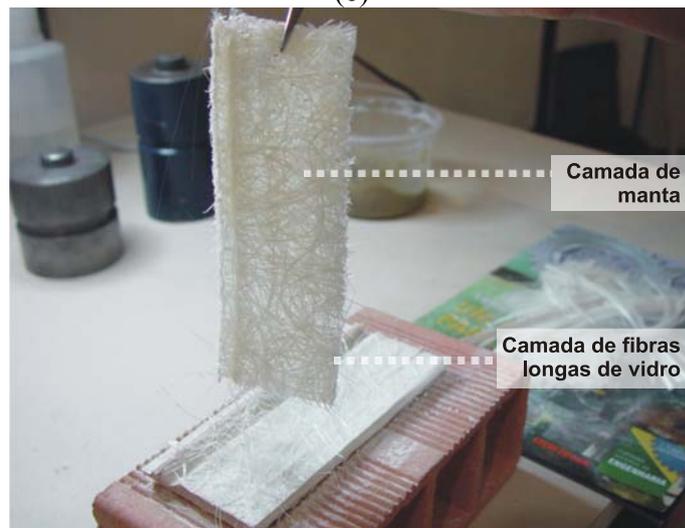
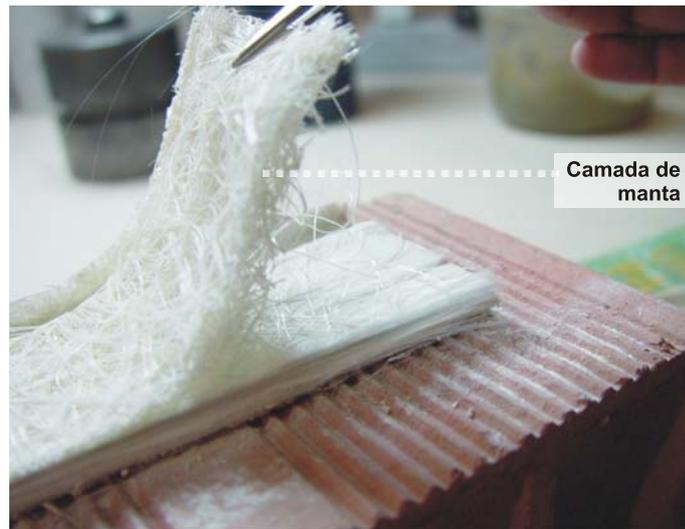


Figura 4.1 – Estrutura do perfil pultrudado: (a) amostra após a queima; (b) vista da camada de manta; (c) vista da camada de fibras longas de vidro e (d) vista da seqüência das camadas que compõem o perfil pultrudado.

4.1.1. Determinação da Fração Volumétrica de Fibras

Cada corpo de prova dos perfis pultrudados utilizado nos ensaios foi previamente caracterizado por ensaio de perda ao fogo, para determinação da fração volumétrica de fibras, já que esta é uma característica fundamental para as propriedades mecânicas dos materiais compósitos.

A determinação da fração volumétrica de fibras dos corpos de prova foi obtida através do ensaio de perda de massa realizado em um forno¹⁹. Foi empregada taxa de aquecimento de 10°C/min, temperatura máxima de 600°C e tempo de residência (patamar) de três horas. O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM – D 297 – 93 [28]. A fração volumétrica de fibra foi obtida pela média aritmética das amostras, sendo seis amostras para cada corpo de prova de mesmo lote de fabricação e 12 amostras para corpos de prova de lotes de fabricação diferentes, como para o caso dos ensaios de flexão simples em que foram utilizadas vigas gêmeas (sendo seis do perfil A e seis do perfil B) conforme a Figura 4.2.

O processo detalhado para obtenção da fração volumétrica através do ensaio de perda ao fogo está descrito no Anexo A.

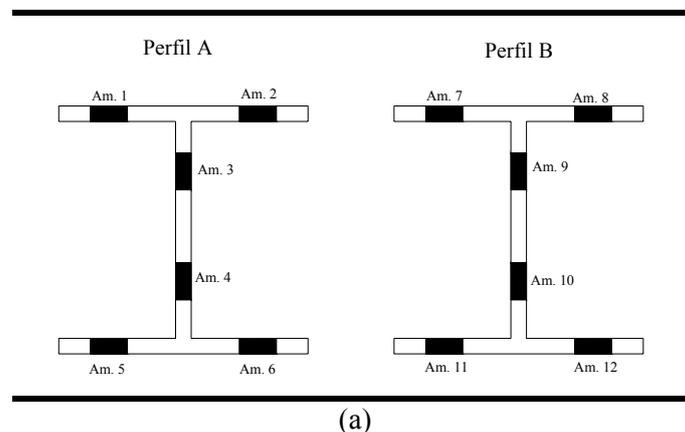


Figura 4.2 – Posição de retirada das amostras para o ensaio de perda de massa.

O teor de fibras foi calculado através da razão entre a massa de fibras de vidro, remanescentes da queima e a massa inicial do compósito. Após a queima as fibras

¹⁹ Forno tipo mufla (M.S. Mistura) do Labest/COPPE com controle das condições de queima.

foram separadas das mantas para a obtenção da fração volumétrica de fibras considerando somente as fibras longas. Na Tabela 4.2 e na Tabela 4.3 são apresentados, de forma resumida (média das amostras), a fração volumétrica de fibras dos perfis pultrudados para os ensaios de flexão simples. As tabelas completas com os resultados da fração volumétrica de fibras podem ser vistas no Anexo A.

1. Ensaio de Flexão Simples:

Tabela 4.2 – Fração volumétrica de fibras dos perfis pultrudados para os ensaios de flexão simples compostos por resina éster vinílica.

Fração volumétrica de fibras								
Éster vinílica								
Corpo de prova	Mesa				Alma			
	Total		Fibras longas		Total		Fibras longas	
	Média (%)	D.P.* (%)	Média (%)	D.P.* (%)	Média (%)	D.P.* (%)	Média (%)	D.P.* (%)
V1_Ester	63,1	3,0	43,6	3,9	58,7	2,5	26,1	3,5
V2_Ester	63,9	1,6	46,1	2,5	57,4	0,9	29,4	1,9
V3_Ester	64,4	2,8	54,3	2,4	58,8	5,0	42,8	1,0
V4_Ester	66,0	1,0	53,2	5,3	62,7	0,4	44,2	1,1
V5_Ester	62,1	1,7	44,8	0,9	55,0	0,3	37,9	0,2

* D.P. – desvio padrão

Tabela 4.3 – Fração volumétrica de fibras dos perfis pultrudados para os ensaios de flexão simples compostos por poliéster isoftálica.

Fração volumétrica de fibras								
Poliéster isoftálica								
Corpo de prova	Mesa				Alma			
	Total		Fibras longas		Total		Fibras longas	
	Média (%)	D.P.* (%)	Média (%)	D.P.* (%)	Média (%)	D.P.* (%)	Média (%)	D.P.* (%)
V1_Iso	63,2	4,4	51,1	8,2	59,4	0,7	30,4	0,5
V2_Iso	61,1	2,0	44,2	1,8	58,0	1,1	36,6	1,3
V3_Iso	62,8	2,1	45,6	3,5	57,0	0,4	34,3	1,1

* D.P. – desvio padrão

2. Ensaio de Compressão Centrada:

Na Tabela 4.4 e na Tabela 4.5 são apresentados os resultados da fração volumétrica de fibras para os perfis pultrudados usados nos ensaios de compressão centrada. As tabelas completas com os resultados podem ser vistas no Anexo A.

Tabela 4.4 – Fração volumétrica de fibras dos perfis pultrudados para os ensaios de compressão centrada compostos por resina éster vinílica.

Fração volumétrica de fibras								
Éster vinílica								
Corpo de prova	Mesa				Alma			
	Total		Fibras longas		Total		Fibras longas	
	Média (%)	D.P.* (%)	Média (%)	D.P.* (%)	Média (%)	D.P.* (%)	Média (%)	D.P.* (%)
C1_Ester	63,6	1,5	48,4	2,8	57,1	0,6	33,0	0,01
C2_Ester	65,5	2,4	47,7	1,2	57,9	0,4	20,0	1,2
C3_Ester	66,3	1,1	47,5	3,1	60,1	1,0	22,7	0,9
C4_Ester	64,4	0,8	46,4	1,9	56,9	1,2	24,4	0,9
C5_Ester	68,7	2,1	50,4	2,0	59,5	0,04	26,4	2,2
CDL6_Ester	64,0	1,6	46,1	0,9	56,3	1,7	23,8	2,6
CDL7_Ester	63,3	1,5	45,8	2,2	56,4	0,04	25,6	5,0

* D.P. – desvio padrão

Tabela 4.5 – Fração volumétrica de fibras dos perfis pultrudados para os ensaios de compressão centrada compostos por resina poliéster isoftálica.

Fração volumétrica de fibras								
Poliéster isoftálica								
Corpo de prova	Mesa				Alma			
	Total		Fibras longas		Total		Fibras longas	
	Média (%)	D.P.* (%)	Média (%)	D.P.* (%)	Média (%)	D.P.* (%)	Média (%)	D.P.* (%)
C1_Iso	64,4	1,0	46,4	3,0	57,7	3,9	29,4	2,3
C2_Iso	62,5	2,7	46,4	7,2	57,2	1,5	35,2	1,3
C3_Iso	65,5	1,9	46,0	1,9	57,1	0,6	22,1	1,8
C4_Iso	61,4	2,5	43,6	1,6	55,9	1,1	22,5	4,6
C5_Iso	63,4	2,6	43,5	3,2	57,0	0,2	24,6	5,4
CDL6_Iso	63,1	3,2	44,8	3,0	54,5	4,1	22,1	5,7
CDL7_Iso	63,0	1,9	47,1	6,4	58,8	1,3	32,1	2,2

* D.P. – desvio padrão

3. Ensaio de Deformação Lenta:

Na Tabela 4.6 e na Tabela 4.7 são apresentados os resultados da fração volumétrica de fibras para os corpos de prova usados nos ensaios de deformação lenta a

tração e a compressão. As tabelas completas com os resultados podem ser vistas no Anexo A.

Tabela 4.6 – Fração volumétrica de fibras dos corpos de prova para os ensaios de deformação lenta compostos por resina éster vinílica.

Corpo de prova	Fração volumétrica de fibras							
	Poliéster isoftálica							
	Mesa				Alma			
	Total		Fibras longas		Total		Fibras longas	
Média	D.P.*	Média	D.P.*	Média	D.P.*	Média	D.P.*	
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
CDL_Ester	63,4	1,5	45,8	2,2	56,4	0,04	25,6	5,0
TDL1_Ester	64,2	0,8	46,4	1,9	-	-	-	-
TDL2_Ester	-	-	-	-	56,9	1,2	24,4	0,9

* D.P. – desvio padrão

Tabela 4.7 – Fração volumétrica de fibras dos corpos de prova para os ensaios de deformação lenta compostos por resina poliéster isoftálica.

Corpo de prova	Fração volumétrica de fibras							
	Poliéster isoftálica							
	Mesa				Alma			
	Total		Fibras longas		Total		Fibras longas	
Média	D.P.*	Média	D.P.*	Média	D.P.*	Média	D.P.*	
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
CDL_Iso	63,1	3,2	44,8	3,0	54,5	4,1	22,1	5,7
TDL1_Iso	63,4	2,6	43,5	3,2	-	-	-	-
TDL2_Iso	-	-	-	-	57,0	0,2	24,6	5,4

* D.P. – desvio padrão

Vale destacar que os resultados das frações volumétrica de fibras apresentados nas Tabelas 4.2 a 4.7, apresentam a presença de carga inorgânica, *filler*, que é adicionado na fabricação dos perfis pultrudados. Este componente pode influenciar a fração volumétrica de fibras obtida pelo processo de perda ao fogo.

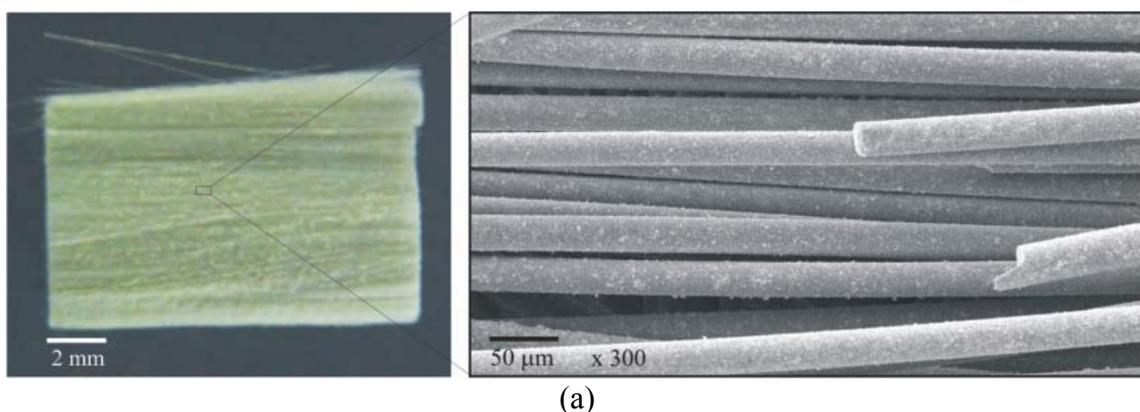
4.1.2. Análise Microestrutural das Fibras de Vidro

Com a realização do ensaio de queima e conseqüente decomposição da matriz, foi possível separar as fibras e a manta. Desta forma, procedeu-se à caracterização das fibras com a determinação de suas características geométricas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). As análises foram realizadas em microscópio

eletrônico²⁰, do Laboratório de Microscopia do Programa de Engenharia Metalúrgica e Materiais (PEMM / COPPE). As amostras foram aderidas com cola à base de prata ao portas-amostra e recobertas com uma camada de ouro para garantir a condução elétrica.

Na Figura 4.3 observa-se a quantidade e a orientação das fibras existentes nos perfis ensaiados. Houve comprovação do alinhamento unidirecional (longitudinalmente) das fibras, como especificado pelo fabricante dos perfis. Outro aspecto importante a ser notado, foi que todas as fibras apresentaram aproximadamente o mesmo o mesmo diâmetro (19 μm), mostrando uma uniformidade na fabricação.

As características da superfície das fibras são extremamente importantes porque pequenas imperfeições podem comprometer as suas propriedades mecânicas e aderência à resina. Essas imperfeições podem ocorrer com certa facilidade, quando as superfícies destas fibras entraram em choque com uma outra superfície mais rígida. O uso da manta de fibra de vidro foi uma forma criada pela indústria para a proteção da superfície das fibras contra danos. Além disso, a manta pode auxiliar na adesão da fibra com a matriz e melhorar o comportamento mecânico dos perfis. A microestrutura da manta pode ser vista na Figura 4.4. Vale destacar que, para a observação da manta por MEV, foi necessário aplicação de uma resina (cola) para a manutenção do arranjo entre suas fibras (Figura 4.4(d)). Assim, a microestrutura apresentada nas Figuras 4.4 (a) e (b), é característica da malha impregnada com resina. As fibras que compõem a malha são apresentadas nas Figuras 4.4 (c) e (d).



²⁰ Microscópio eletrônico Jeol JXA 840 – A.

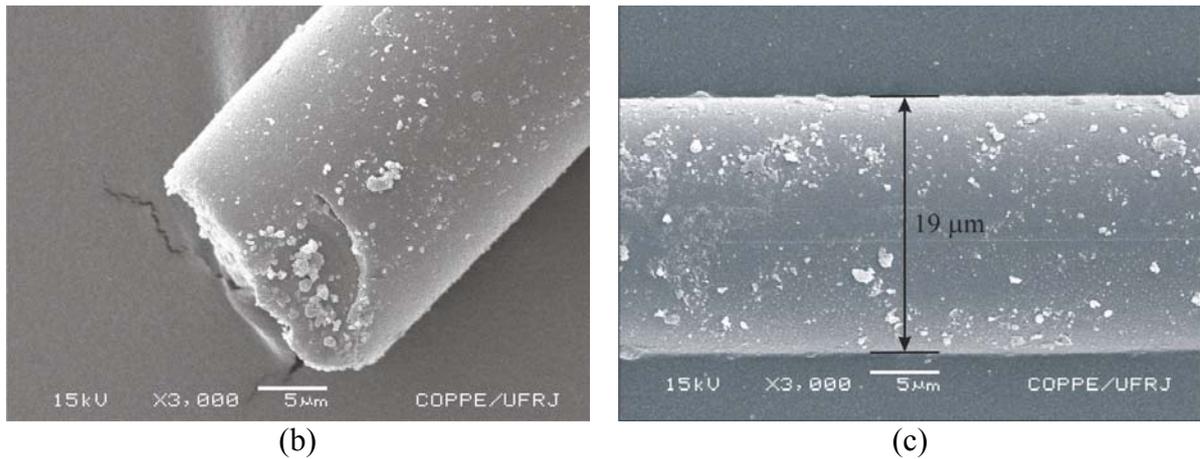


Figura 4.3 – Morfologia das fibras: (a) aspecto do conjunto de fibras após a queima e a orientação das fibras; (b) detalhe da extremidade da fibra; (c) vista lateral da fibra com seu respectivo diâmetro (as imagens foram obtidas por MEV).

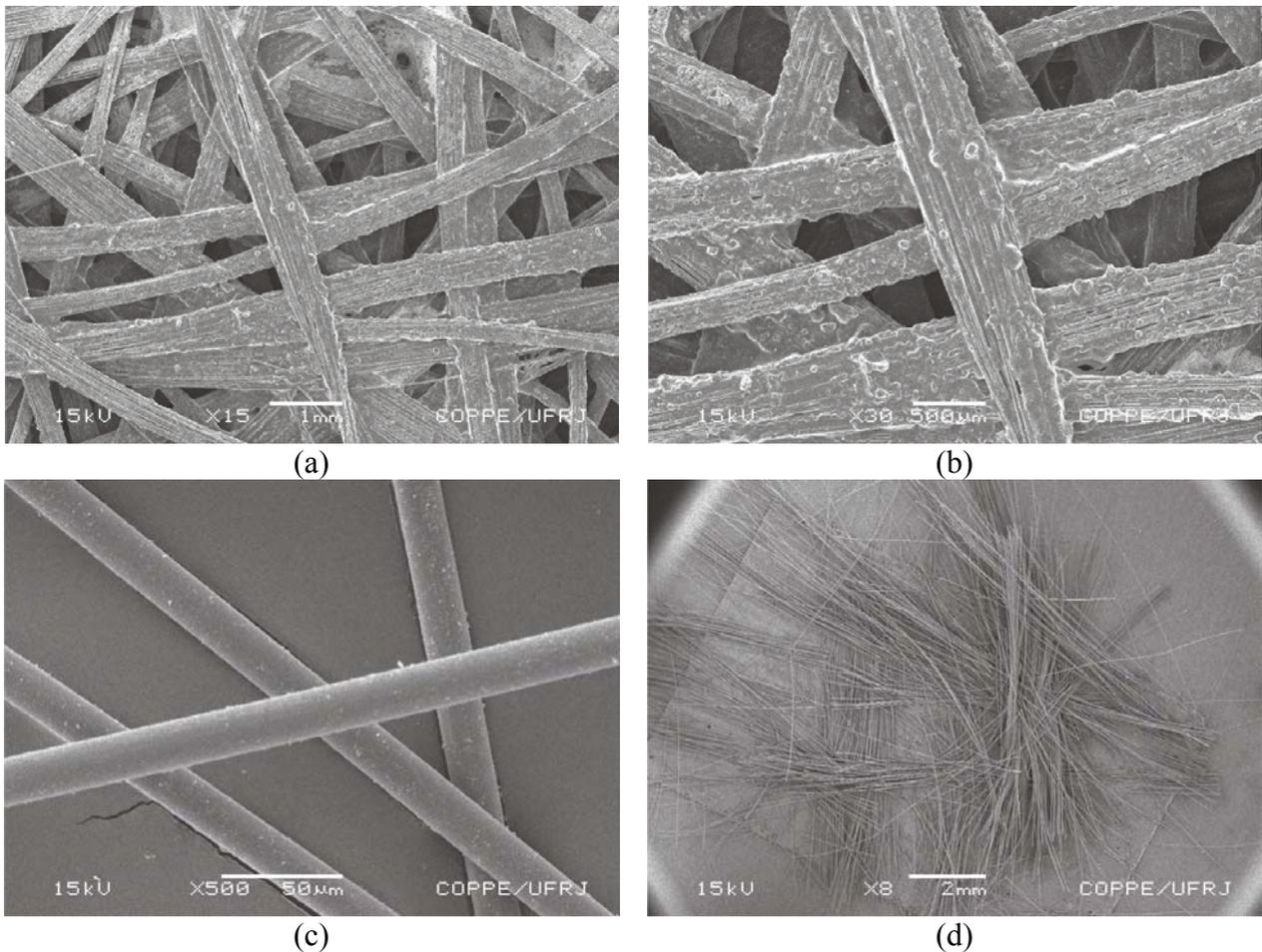


Figura 4.4 – Morfologia da manta: (a) e (b) aspectos da forma da manta após a queima; (c) detalhes das fibras que compõem a manta; (d) malha desestruturada.

4.1.3. Resistência à Tração Direta

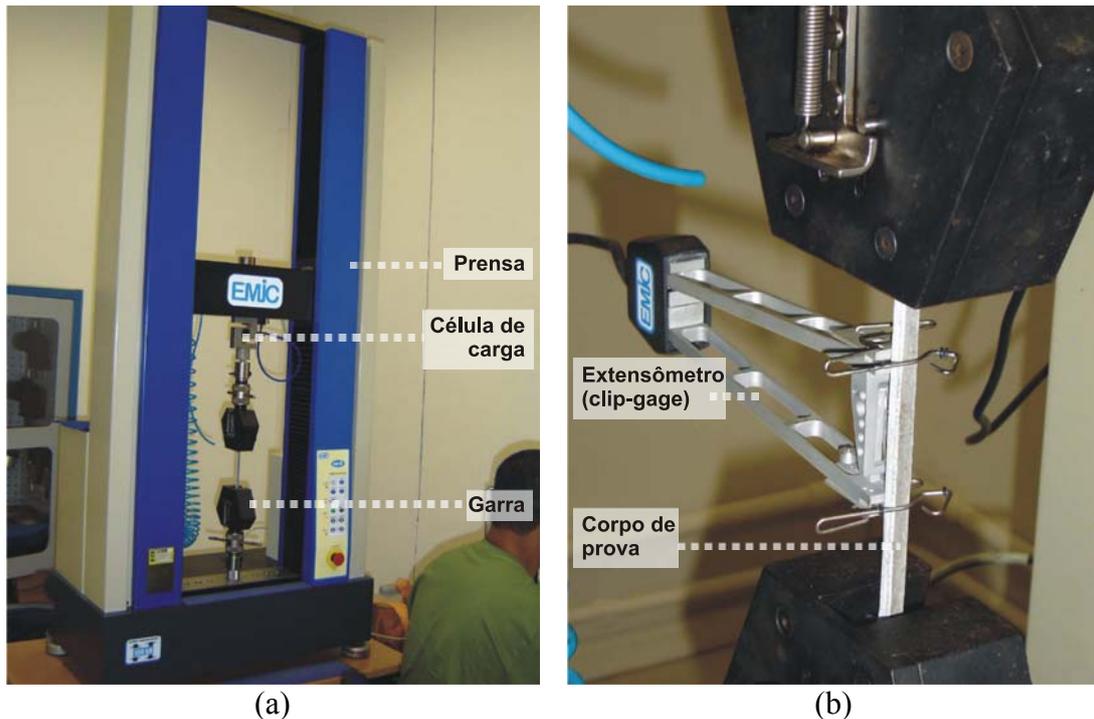
Foram realizados ensaios de tração simples para a obtenção da tensão máxima de tração no material e o módulo de elasticidade. Os ensaios de tração direta foram feitos em uma prensa²¹ universal de ensaios com velocidade de 0,5 mm/min, com uma célula de carga com capacidade de 20 kN e com um extensômetro mecânico²², para a leitura das deformações. Na Figura 4.5 é apresentada a prensa utilizada nos ensaios de tração direta.

Foram ensaiados 24 corpos de prova retirados dos perfis em estudo, sendo estes da mesa superior, mesa inferior e da alma. Dos 24 corpos de prova, doze são da resina poliéster isoftálica e doze são da resina éster vinílica. Como houve diferença entre fração volumétrica de fibras dos perfis utilizados nos ensaios de flexão simples e a dos perfis utilizados nos ensaios de compressão centrada, por não pertencerem ao mesmo lote de fabricação, foram confeccionados corpos de prova para os ensaios de tração direta com as duas frações volumétricas.

Os corpos de prova foram confeccionados com base na norma ASTM D 3039 [29]. As dimensões dos corpos de prova podem ser vistas na Figura 4.6.

²¹ Prensa servo-controlada EMIC, modelo DL 10000, capacidade máxima de 100kN do Laboratório de Propriedades Mecânicas do Programa de Engenharia Metalúrgica e Materiais (PEMM / COPPE).

²² Extensômetro mecânico EMIC com base de medida de 50 mm.



(a) (b)
 Figura 4.5 – Prensa utilizada nos ensaios de tração direta.

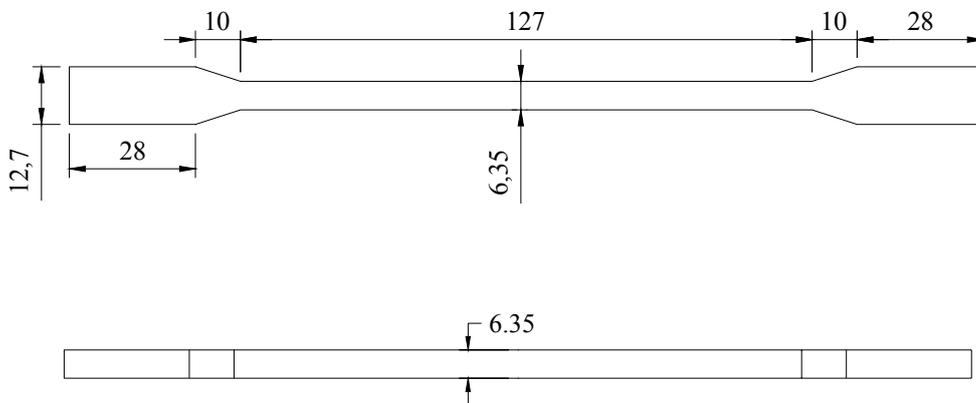


Figura 4.6 – Dimensões nominais dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração direta, medidas em mm.

A tensão de tração foi calculada pela equação:

$$\sigma = \frac{P}{A} \tag{Eq. 4.1}$$

em que:

$P = \text{força axial aplicada};$

$A = 6.35 \times 6.35 = 40.32 \text{ mm}^2$, área da seção transversal.

A deformação foi calculada pela equação:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{Eq. 4.2}$$

em que:

$\Delta L = \text{alongamento específico};$

$L_0 = 50 \text{ mm}$, base de medida do extensômetro mecânico (clip gage).

Na Tabela 4.8 e na Tabela 4.9 são apresentadas as propriedades mecânicas medidas do material compósito pultrudado utilizado nos ensaios de flexão simples.

Tabela 4.8 – Propriedades mecânicas do material compósito composto de resina éster vinílica utilizado nos ensaios de flexão simples.

Corpo de prova	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (E) (GPa)
CP-1 (mesa)	209,0	16,0
CP-2 (mesa)	246,0	22,1
CP-3 (alma)	152,0	13,8
CP-4 (alma)	150,0	14,8
CP-5 (mesa)	254,0	23,3
CP-6 (mesa)	258,0	22,1
Mesa		
Media	253,0	22,5
Desvio Padrão	6,1	0,7
Coefficiente de Variação (%)	2,4	3,1

Tabela 4.9 - Propriedades mecânicas do material compósito composto de resina poliéster isoftálica utilizado nos ensaios de flexão simples.

Corpo de prova	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (E) (GPa)
CP-1 (mesa)	217,0	22,3
CP-2 (mesa)	221,0	18,1
CP-3 (alma)	240,0	16,8
CP-4 (alma)	233,0	17,6
CP-5 (mesa)	257,0	22,3
CP-6 (mesa)	155,0	13,2
Mesa		
Media	232	20,9
Desvio Padrão	22	2,4
Coefficiente de Variação (%)	9,5	11,6

Na Tabela 4.10 e na Tabela 4.11 são apresentadas as propriedades mecânicas medidas do material compósito pultrudado utilizado nos ensaios de compressão centrada e de deformação lenta.

Tabela 4.10 – Propriedades mecânicas do material compósito composto de resina éster vinílica utilizado nos ensaios de compressão centrada e de deformação lenta.

Corpo de prova	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (E) (GPa)
CP-1 (mesa)	209,0	18,2
CP-2 (mesa)	187,0	18,4
CP-3 (alma)	198,0	15,7
CP-4 (alma)	164,0	13,5
CP-5 (mesa)	291,0	23,4
CP-6 (mesa)	303,0	24,6
Mesa		
Media	247,5	21,15
Desvio Padrão	58,1	3,3
Coefficiente de Variação (%)	15,7	3,1

Tabela 4.11 – Propriedades mecânicas do material compósito composto de resina poliéster isoftálica utilizado nos ensaios de compressão centrada e de deformação lenta.

Corpo de prova	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (E) (GPa)
CP-1 (mesa)	237,0	23,2
CP-2 (mesa)	264,0	24,5
CP-3 (alma)	174,0	12,1
CP-4 (alma)	176,0	15,2
CP-5 (mesa)	210,0	19,8
CP-6 (mesa)	244,0	20,9
Mesa		
Media	238,75	22,1
Desvio Padrão	22,3	2,1
Coefficiente de Variação (%)	9,3	9,7

O valor do Módulo de Elasticidade apresentado nas Tabelas 4.8 a 4.11 foi obtido através do coeficiente angular da parte linear do diagrama de tensão-deformação. A Figura 4.7 mostra um exemplo de uma curva tensão –deformação obtida dos ensaios de caracterização. As curvas tensão-deformação de todos os corpos de prova ensaiados estão apresentadas no Anexo B.

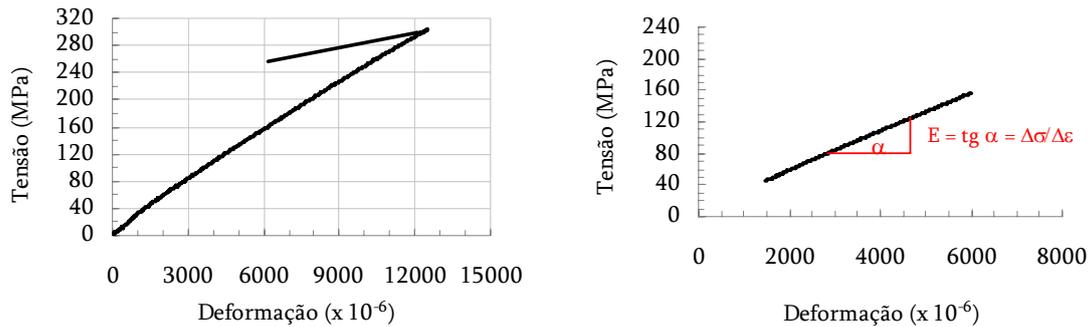


Figura 4.7 – Exemplo de curva tensão-deformação obtida dos materiais compósitos pultrudados em estudo.

Nos materiais compósitos é possível prever o módulo de elasticidade, E , pela regra da mistura. Segundo Bentur [30] a regra da mistura atesta que as propriedades do material compósito são a média ponderada das propriedades dos componentes individuais e é dada pela equação:

$$E = E_m V_m + E_f V_f \quad \text{Eq. 4.3}$$

Em que:

E – Módulo de elasticidade do material compósito;

E_m – Módulo de elasticidade da matriz;

V_m – Fração volumétrica da matriz;

E_f – Módulo de elasticidade da fibra;

V_f – Fração volumétrica da fibra.

Pelo EUROCOMP [9] temos que:

$E_m = 3.5$ GPa para resina éster vinílica e 3.7 GPa para resina poliéster isoftálica (Tabela 2.1);

$E_f = 72$ GPa para fibra de vidro (E-glass, Tabela 2.2).

Pelas Tabelas 4.2 a 4.5, foi observada uma diferença de fração volumétrica de fibras entre a mesa e a alma. Assim, a aplicação direta da regra da mistura para esses perfis pultrudados não pode ser feita utilizando valores uniformes em toda a seção transversal e sim de forma individual, valores distintos para mesa e alma. Na Tabela 4.12 e na Tabela 4.13 são apresentados os valores do módulo de elasticidade

experimentais obtidos pelos ensaios de tração direta (Tabelas 4.8 a 4.11) comparados com os valores calculados pela regra da mistura.

Tabela 4.12 – Comparação entre os valores do módulo de elasticidade experimental e valores calculados pela regra da mistura para perfis dos ensaios de flexão simples.

Módulo de Elasticidade – E (GPa)				
	Poliéster isoftálica		Éster vinílica	
	Mesa	Alma	Mesa	Alma
Experimental	18-22	16-17	22-24	13-14
Teórico*	39	28	37	28

* valores calculados pela regra da mistura, Eq. 4.3

Tabela 4.13 – Comparação entre os valores do módulo de elasticidade experimental e valores calculados pela regra da mistura para perfis dos ensaios de compressão centrada e de deformação lenta.

Módulo de Elasticidade experimental – E (GPa)				
	Poliéster isoftálica		Éster vinílica	
	Mesa	Alma	Mesa	Alma
Experimental	18-24	12-15	18-24	13-15
Teórico*	35	21	36	21

* valores calculados pela regra da mistura, Eq. 4.3

Pelos resultados pode-se notar que os valores obtidos pela regra da mistura são bem diferentes em relação aos resultados experimentais.

O conceito da regra da mistura somente é válido se a união entre os componentes (matriz e fibra) for perfeita [30]. Quanto mais deficiente for a condição de união entre os componentes (fibras e matriz) pior serão os resultados da aplicação da regra da mistura.

4.2. Resultados dos Ensaios de Flexão

Os resultados experimentais de flexão das vigas serviram para se obter os valores do módulo de deformação aparente na flexão, E_{fT} (módulo de elasticidade aparente a flexão), ou da rigidez aparente, $E_{fT} \cdot I_x$, para a temperatura T, em que I_x é o momento de inércia máximo da seção. Adicionalmente, os resultados experimentais identificaram indícios de deformação lenta no material, em função do aumento da temperatura de ensaio.

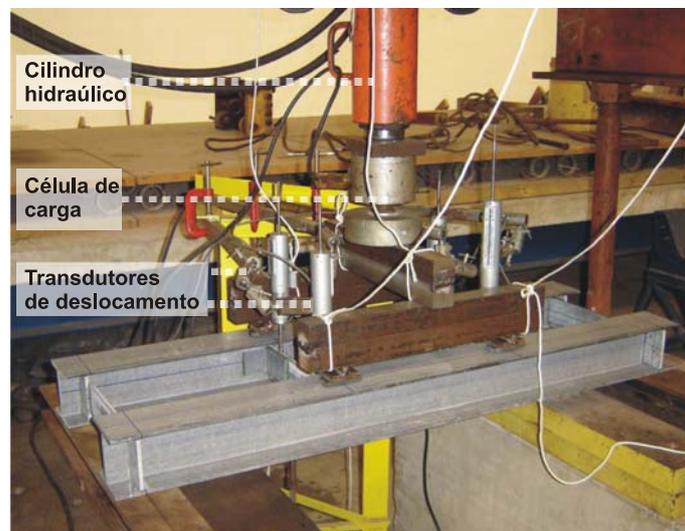
4.2.1. Ensaio para Obtenção da Carga Última

Antes da realização dos ensaios de flexão simples a altas temperaturas, foram realizados ensaios para obtenção da resistência a flexão dos corpos de prova dos perfis pultrudados. Foram realizados dois ensaios com perfis compostos da resina éster vinílica, denominados V1_Ester e V2_Ester, e um ensaio com perfis compostos da resina poliéster isoftálica, denominado V1_Iso.

1. Ensaio V1_Iso

A Figura 4.8 apresenta a configuração do Ensaio V1_Iso.

Os deslocamentos apresentados na Figura 4.9 correspondem às leituras obtidas pelos quatro transdutores de deslocamento apresentado na Figura 4.9b. O gráfico mostra a ruptura brusca das vigas, característica de material do tipo frágil, com uma carga de aproximadamente 45 kN (carga total do cilindro hidráulico), equivalente a cargas F iguais a 11.25 kN em cada uma das vigas.



(a)

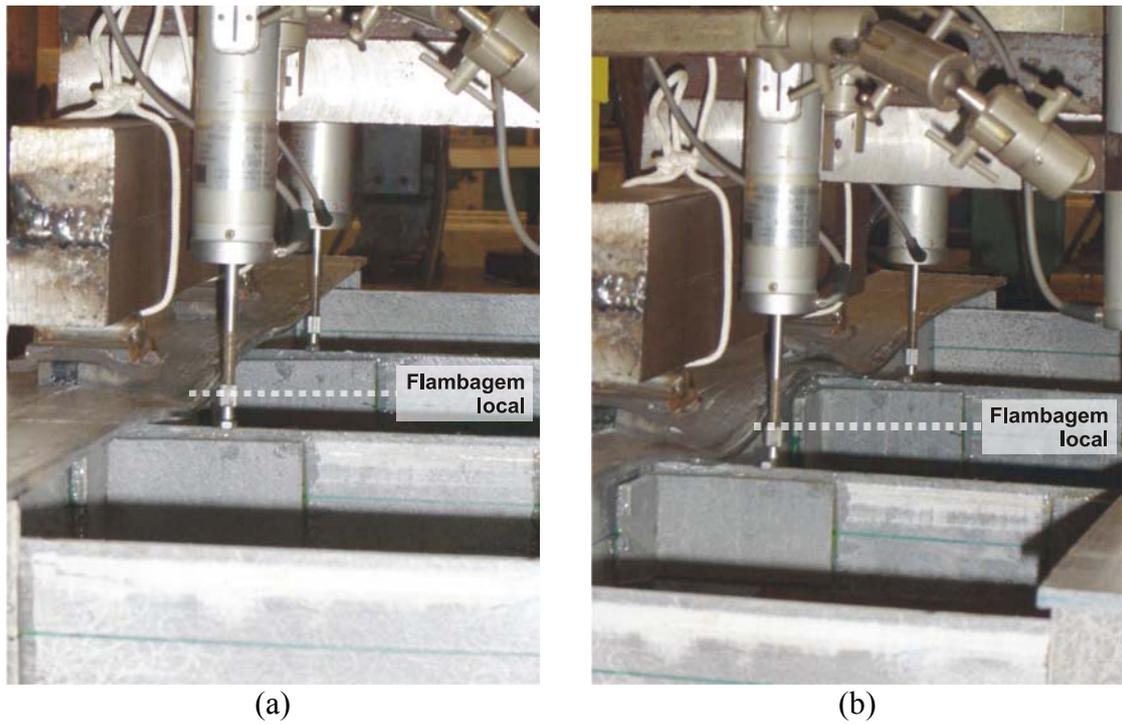
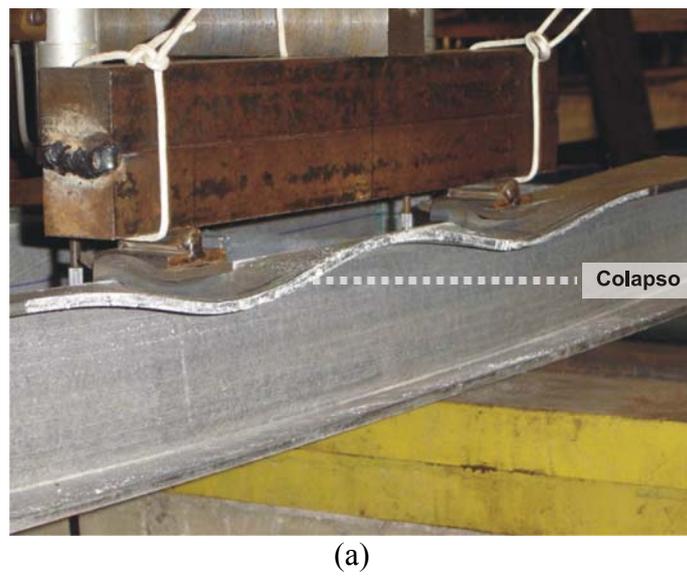
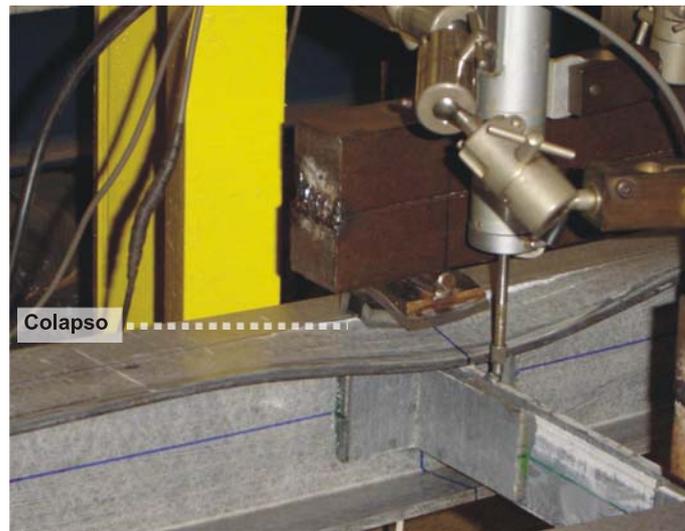


Figura 4.10 – Flambagem local de placa na mesa comprimida das vigas do ensaio V1_Iso.





(b)

Figura 4.11 – Colapso na junção mesa e alma das vigas no ensaio V1_Iso.

2. Ensaio V1_Ester

A Figura 4.12 apresenta a configuração do Ensaio V1_Ester, a qual repete a configuração de ensaio da V1_Iso.

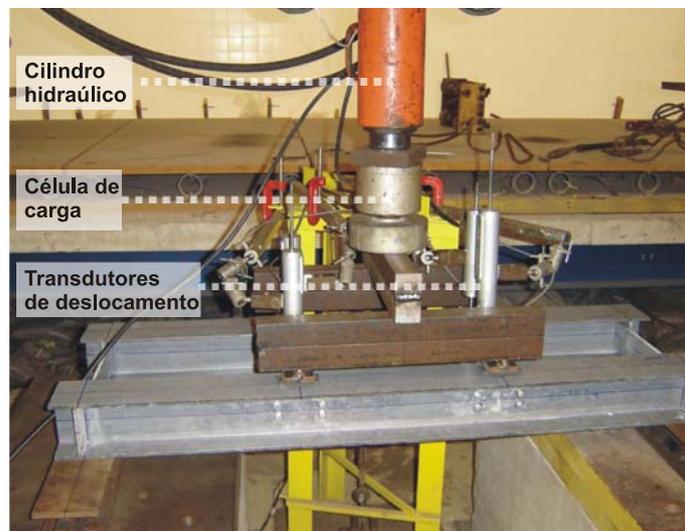


Figura 4.12 – Configuração final do Ensaio V1_Ester.

Os deslocamentos apresentados na Figura 4.13 correspondem às leituras obtidas pelos quatro transdutores de deslocamento apresentado na Figura 4.9b. O gráfico também mostra a ruptura brusca das vigas, como em V1_Iso, com uma carga de aproximadamente 60 kN (carga total do cilindro hidráulico), equivalente a cargas F iguais a 15 kN em cada uma das vigas.

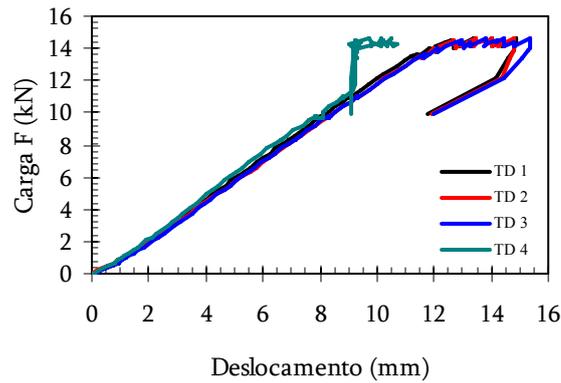


Figura 4.13 – Deslocamentos obtidos no Ensaio V1_Ester.

Mais uma vez foi observada a flambagem local na mesa superior das vigas, como no ensaio V1_Iso. Notou-se também um deslocamento lateral das peças. Houve uma perda de registro do transdutor de deslocamentos TD 4 a partir de uma determinada carga aplicada. Isto ocorreu pela perda de contato do transdutor de deslocamento com a viga. A Figura 4.14 mostra a flambagem local de placa e o deslocamento lateral. O colapso também ocorreu na junção da mesa com a alma e é apresentado na Figura 4.15.

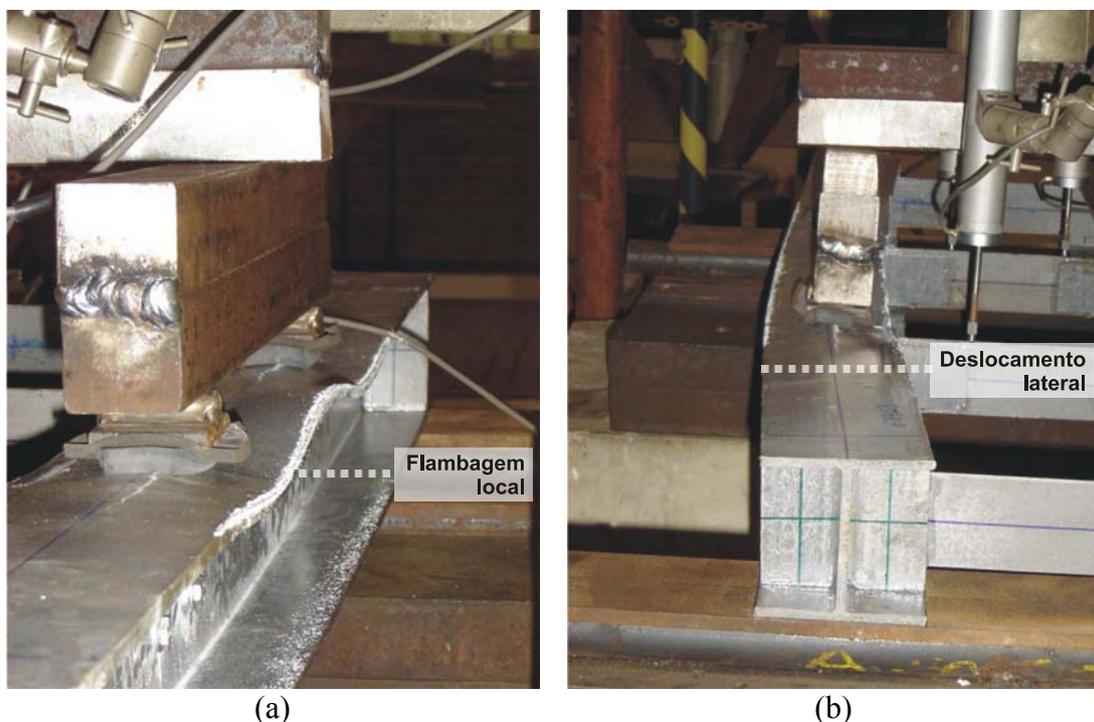
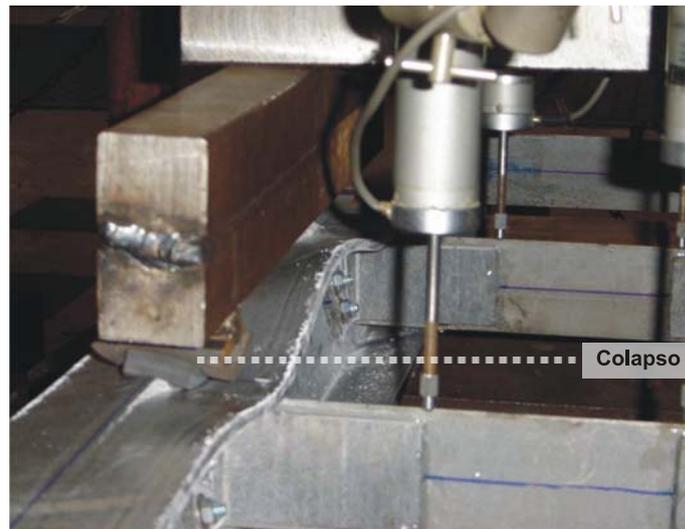
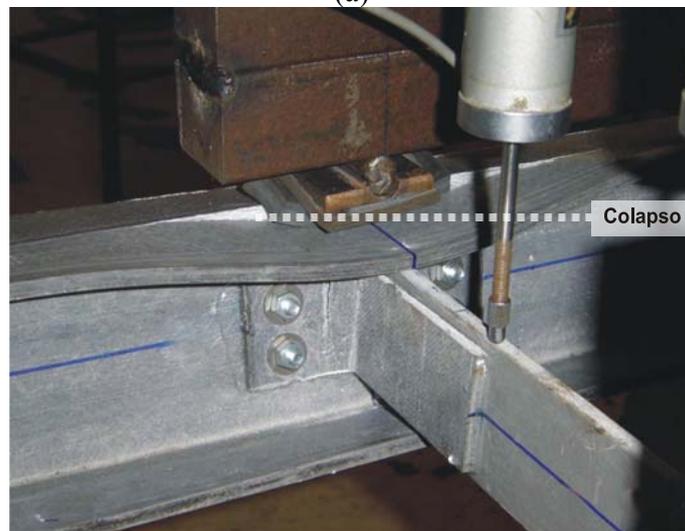


Figura 4.14 – (a) Flambagem local de placa na mesa superior das vigas; (b) início da flambagem lateral com torção.



(a)

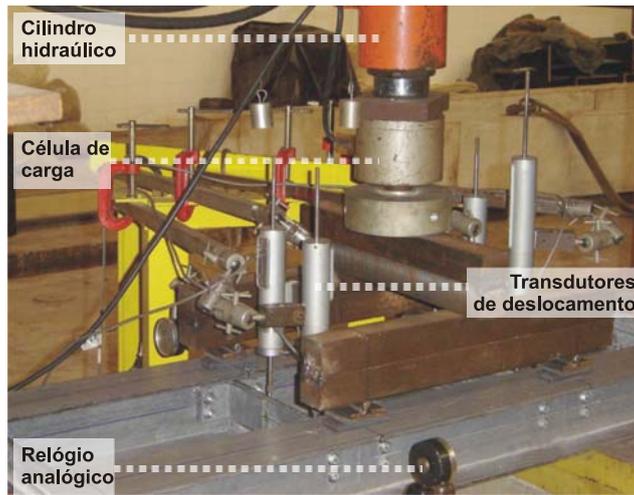


(b)

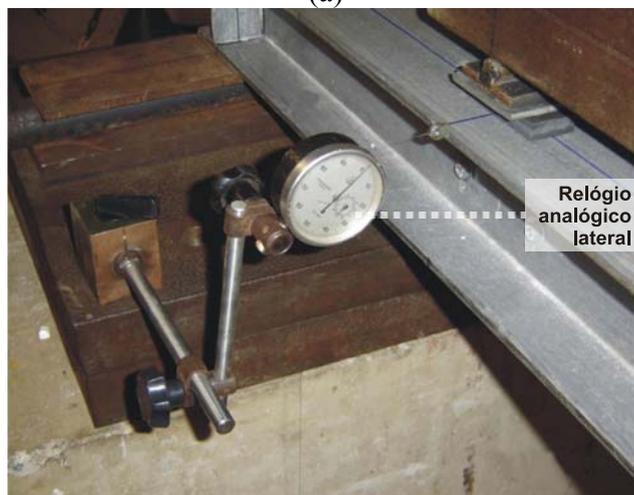
Figura 4.15 – Colapso da viga na junção da mesa com a alma no Ensaio V1_ester.

3. Ensaio V2_Ester

Com a identificação do modo de flambagem local de placa e a observação do deslocamento lateral das peças, foram incluídos no ensaio V2_Ester quatro relógios analógicos para o acompanhamento desses dois fenômenos. Dois relógios analógicos foram posicionados na lateral dos perfis (um em cada viga, na espessura da mesa), na direção do ponto de aplicação de carga, para acompanhar o deslocamento lateral. Os outros dois foram posicionados na mesa superior (um em cada viga) também no ponto de aplicação de carga, para acompanhar o desenvolvimento da flambagem local. A configuração do ensaio V2_Ester é apresentada na Figura 4.16.



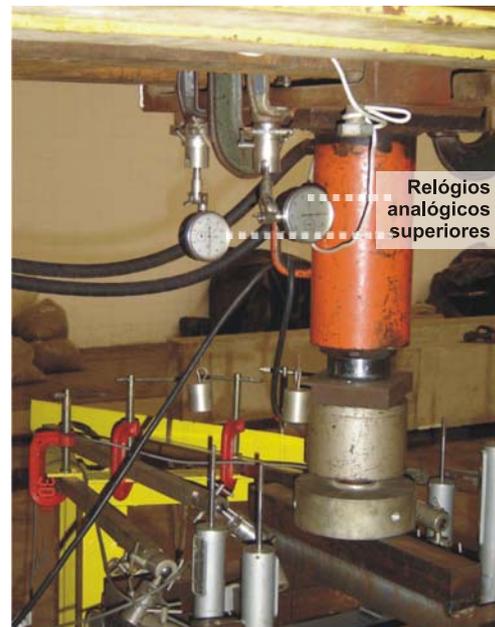
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.16 – Configuração do ensaio V2_Ester: (a) e (b) posição dos transdutores de deslocamento e dos relógios analógicos laterais para medição os deslocamentos laterais; (b) e (c) posição dos relógios analógicos superiores para medição do modo de flambagem local de placa.

Os deslocamentos apresentados na Figura 4.17 correspondem às leituras obtidas pelos quatro transdutores de deslocamento apresentados na Figura 4.9b. O gráfico também mostra a ruptura brusca das vigas, como nos ensaios anteriores, com uma carga de aproximadamente 62 kN (carga total do cilindro hidráulico), equivalente a cargas F iguais a 15.5 kN em cada uma das vigas. Na Figura 4.18 são apresentados os deslocamentos obtidos pelos quatro relógios analógicos. É possível notar no gráfico o exato momento (carga aplicada) do início da flambagem local, relógios 3 e 4, e a evidência de deslocamentos laterais, medidos pelos relógios 1 e 2.

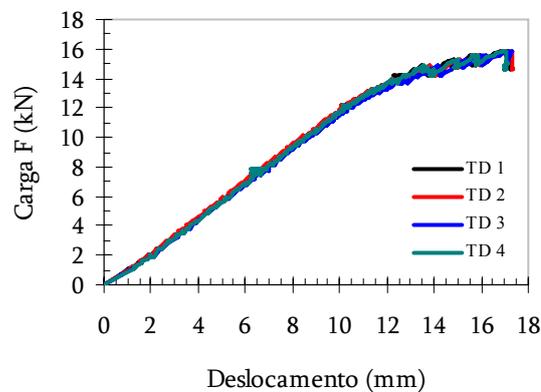
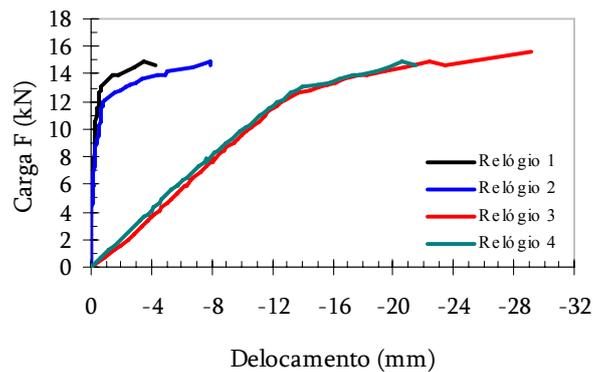
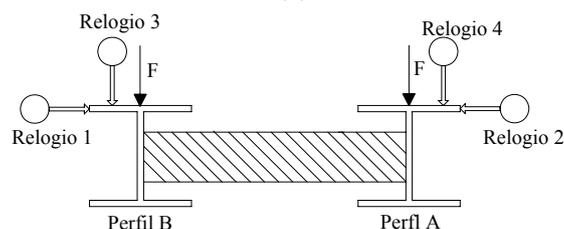


Figura 4.17 – Deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento vertical no ensaio V2_Ester.



(a)



(b)

Figura 4.18 – Deslocamentos obtidos pelos relógios analógicos no Ensaio V2_Ester.

Com a realização destes três ensaios, V1_Iso, V1_Ester e V2_Ester, foi possível notar que as vigas se comportaram de maneira semelhante, apresentando flambagem local de placa e o mesmo tipo de colapso. A diferença notada foi em relação à resistência das vigas, em que para vigas compostas de resina poliéster isoftálica obteve uma menor resistência que as vigas compostas de resina éster vinílica. Na Tabela 4.14 são apresentados os valores medidos das propriedades mecânicas obtidos nos ensaios, em que:

E_f – Módulo de Elasticidade aparente na flexão;

F_u – Carga máxima de ruptura em cada uma das vigas;

σ_u – Tensão máxima de ruptura

Tabela 4.14 – Propriedades mecânicas a flexão simples dos ensaios realizados.

Propriedades mecânicas dos ensaios realizados			
Ensaio	E_f (GPa)	F_u (kN)	σ_u (MPa)
V1_Iso	12.7	11.25	64
V1_Ester	15.2	15	85
V2_Ester	16.0	15.5	88

O valor do Módulo de Elasticidade apresentado na Tabela 4.14 foi obtido através dos deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamentos e utilizando a equação de flexão de vigas simplesmente apoiada. Já a tensão máxima de ruptura foi obtida pela equação das tensões normais da viga.

$$\delta = \frac{Fa}{6EI} (3aL - 3a^2 - a^2) \quad \text{Eq. 4.4}$$

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad \text{Eq. 4.5}$$

em que:

F – carga aplicada;

I – momento de inércia da área da seção transversal;

δ – deslocamento obtido pelos transdutores de deslocamentos;

a – distância da posição da carga aplicada até o apoio;

L – vão entre os apoios;

M – momento fletor;

y – distância do eixo neutro

O modo de flambagem local de placa observado nos ensaios realizados é um fenômeno esperado em perfis pultrudados por apresentarem baixo módulo de elasticidade, associado à esbeltez dos elementos de placa. Em perfis com seção transversal I ou H a mesa é particularmente susceptível à flambagem local em função de sua condição de contorno, com um bordo livre e outro parcialmente engastado na junção da mesa com a alma. Com isso, o modo de colapso apresentado nos ensaios é também típico para este tipo de perfil, acentuado pela falta de reforço de fibras na região de junção da mesa com a alma, transversalmente à direção das fissuras observadas em todos os ensaios.

4.2.2. Ensaios de Flexão Simples a Alta Temperatura

Após a realização dos ensaios a temperatura ambiente para a obtenção da resistência dos perfis, se iniciou a campanha de ensaios as altas temperaturas para avaliar o comportamento destes perfis pultrudados à medida que se eleva a temperatura. Estes ensaios foram realizados com carga constante. O tempo de ensaio variou de 2 a 8 horas, em função da resposta mecânica das vigas, de modo a permitir a observação da deformação lenta. Cada viga testada foi submetida a uma seqüência de ensaios que se iniciava em temperatura ambiente (25°C) até a temperatura de 90°C, para um determinado nível de carga aplicada, a qual foi controlada pelo valor da tensão normal máxima aplicada na viga (nas mesas da seção).

Na Tabela 4.15 são apresentadas as características dos ensaios de flexão simples a altas temperaturas.

Tabela 4.15 – Características dos ensaios de flexão simples a alta temperatura realizados.

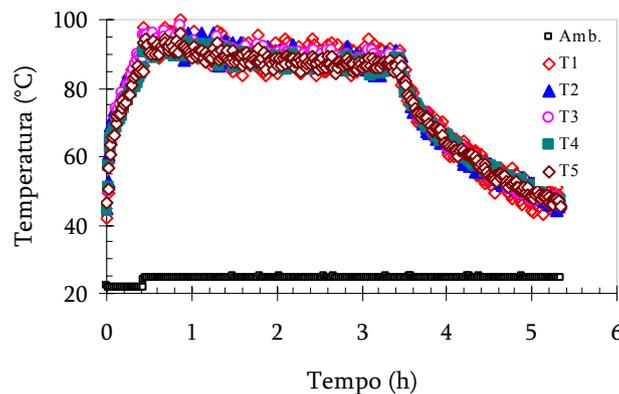
Ensaio	σ_{\max}^* (MPa)	Temperatura (°C)	Tempo (horas)	Obs
V2_Iso	10	25	3.2	-
		60	3.5	-
		80	4.0	-
	30	25	4.2	-
		60	3.0	colapso
		80	3.0	colapso
V3_Iso	10	25	7.0	-
		60	8.0	-
		70	8.0	-
		80	8.0	-
		90	8.0	-
	20	25	7.5	-
		60	8.0	colapso
		80	8.0	colapso
		90	8.0	colapso
		90	8.0	colapso
V3_Ester	40	25	3.6	-
		40	3.8	-
		60	4.0	-
		70	4.8	-
		80	4.4	-
		90	2.0	colapso
V4_Ester	40	25	3.8	-
		40	3.8	-
		60	4.0	-
		70	3.0	colapso
V5_Ester	10	25	4.5	-
		60	8.0	-
		70	7.8	-
		80	8.0	-
		90	8.2	-
	20	25	6.2	-
		60	8.0	-
		70	8.0	-
		80	8.0	-
		90	2.5	colapso

* tensão máxima aplicada

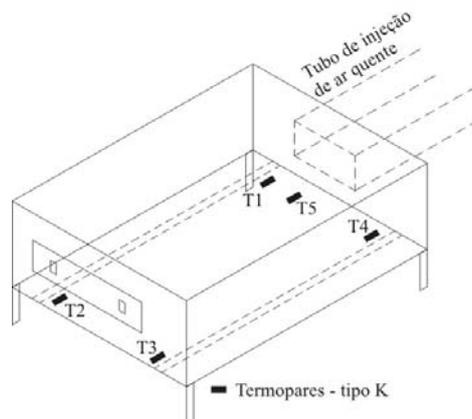
Os ensaios de flexão dos perfis pultrudados foram realizados com o auxílio de uma estufa, conforme apresentado na Figura 3.10. A carga de temperatura é aplicada por transferência de calor por convecção forçada.

O sistema de controle de temperatura da estufa foi calibrado através de vários testes preliminares, com ajuda de termopares do tipo K (denominados de T1 a T5) posicionados no interior da estufa, até a obtenção de distribuição uniforme da temperatura no volume. A flutuação máxima obtida nos testes foi de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ para um

único ponto e a diferença máxima registrada entre pontos de medição distintos foi de 10°C. Esses resultados referem-se à condição estável (pós-transiente) da temperatura no interior da estufa. A Figura 4.19 apresenta esses resultados de calibração do equipamento.



(a)



(b)

Figura 4.19 – (a) Resultado da distribuição da temperatura nos regimes transiente, estabilização e resfriamento para temperatura máxima de 90°C; (b) posicionamento dos termopares T1 a T5 no interior da estufa.

A temperatura exerce uma grande influência no comportamento estrutural do compósito reforçado com fibras de vidro, sendo fundamental a identificação da distribuição da temperatura na seção transversal do perfil pultrudado, bem como a flutuação em torno do valor prescrito para os ensaios. Portanto, após a confirmação da uniformidade da distribuição da temperatura no interior da estufa, foram realizados testes para a identificação da distribuição de temperatura em torno dos perfis, conforme a Figura 4.20, assim como sua flutuação na fase de regime estável em função da

temperatura de ensaio, conforme apresentado na Tabela 4.16. Verifica-se que houve uma flutuação de pequena magnitude.

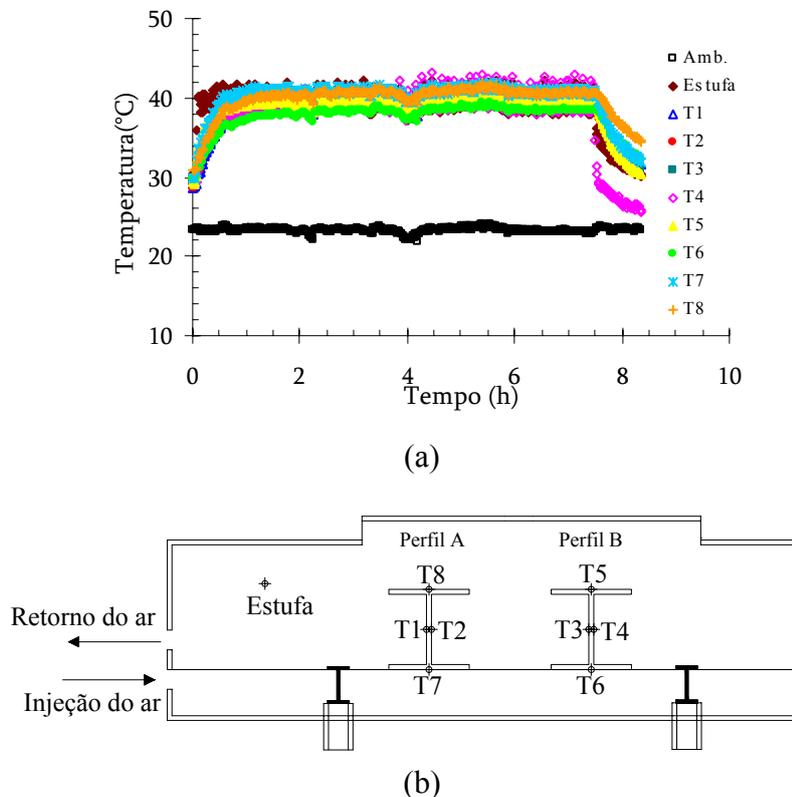


Figura 4.20 – (a) Resultado da distribuição da temperatura em torno dos perfis no interior da estufa para ensaio com temperatura prescrita de 40°C; (b) posição dos termopares.

Tabela 4.16 – Resultados da flutuação da temperatura prescrita durante os ensaios em regime estável: medições dos termopares T1 a T8, conforme a Figura 4.21.

Temperatura (°C)	Flutuação máxima nos termopares (°C)	Diferença máxima entre termopares (°C)
40	± 2	5
60	± 2	5
70	± 3	5
80	± 4	6
90	± 5	8

1. Seqüência de ensaios V2_Iso

Foram realizados conjuntos de ensaios para tensão normal máxima prescrita em 10 e 30 MPa. Na Figura 4.22 e Figura 4.23 são apresentados os resultados dos conjuntos de ensaios de flexão V2_Iso. Os deslocamentos obtidos correspondem aos

quatro transdutores de deslocamento utilizados, conforme é apresentado na Figura 4.21. Nesses gráficos a “carga” se refere ao valor da carga transversal F indicado na Figura 4.21, a qual conduz a tensão normal máxima, σ_{\max} , prescrita para o ensaio. Para todos os ensaios, primeiramente foi aplicada a carga e em seguida o aquecimento da peça até a temperatura prescrita.

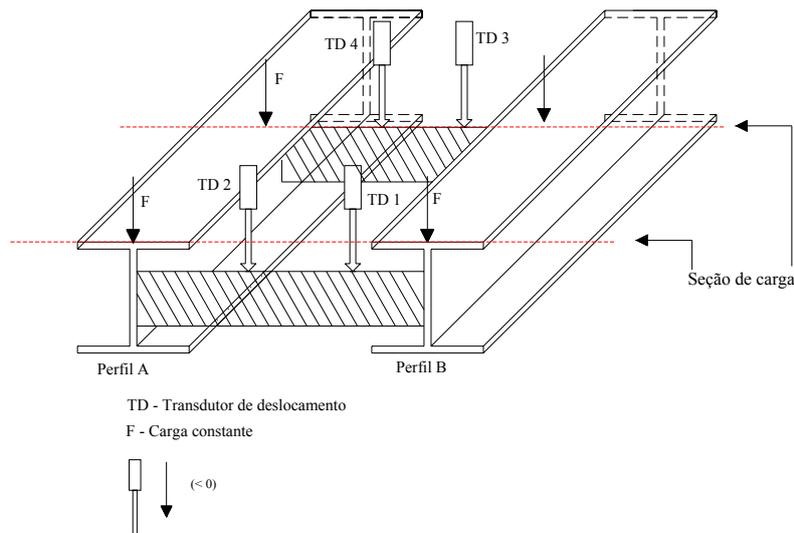
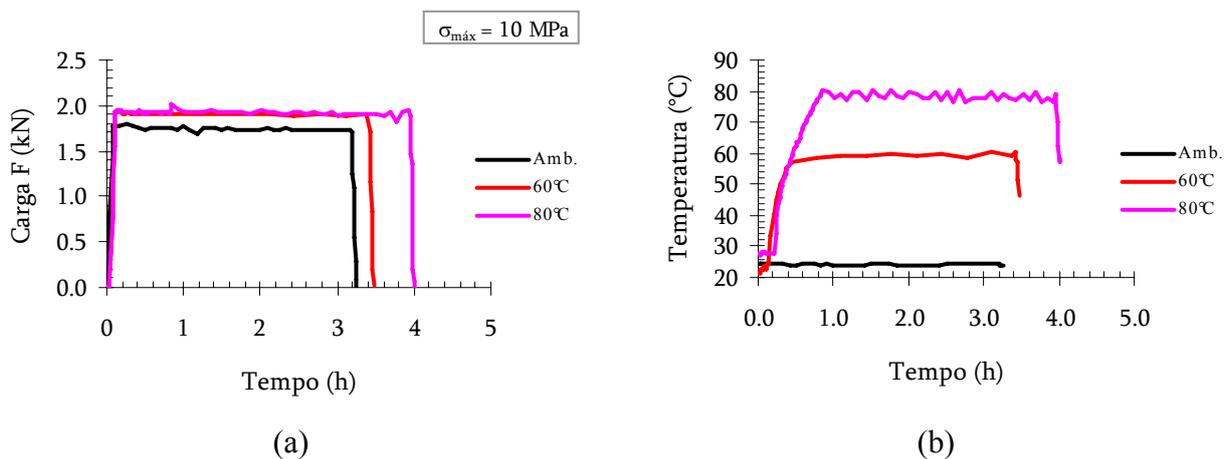


Figura 4.21 – Posicionamento dos transdutores de deslocamento dos ensaios de flexão simples.



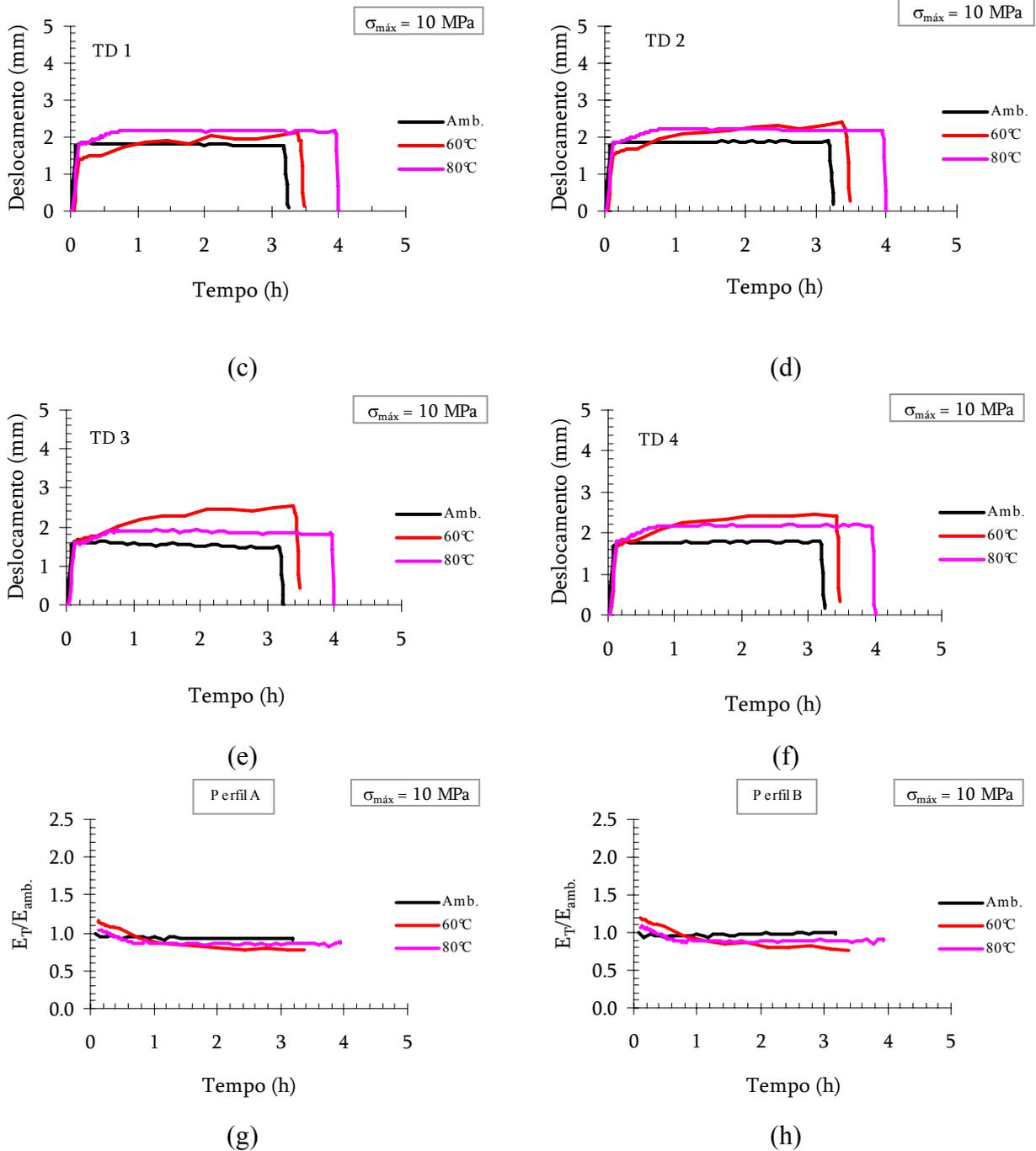
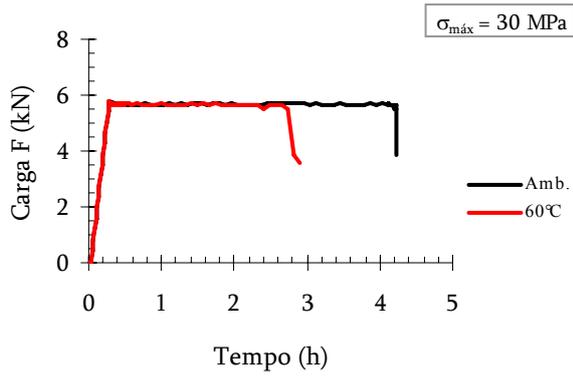
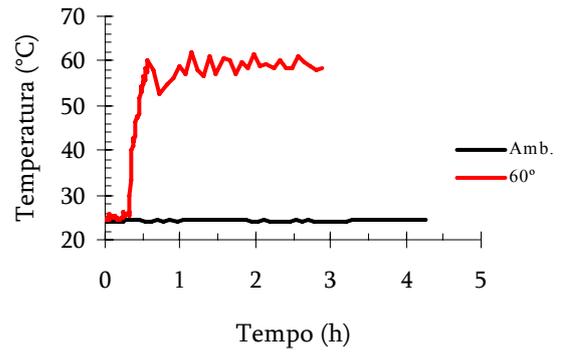


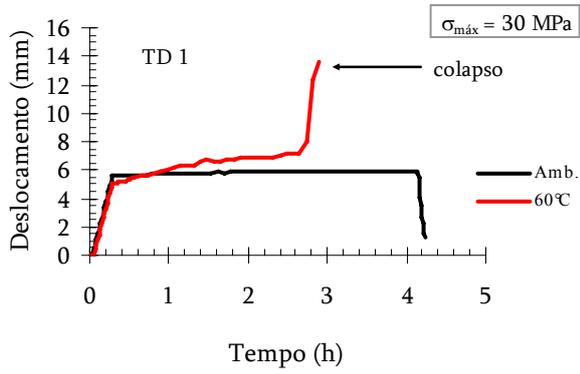
Figura 4.22 – Resultados dos ensaios de flexão V2_Iso para tensão máxima de 10MPa: (a) carga F registrada durante todos os ensaios; (b) gráfico das temperaturas medidas somente pelo termopar da estufa (Figura 4.21b), registradas durante todo o ensaio, (c) a (f) deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento; (g) e (h) redução do módulo de elasticidade da cada viga.



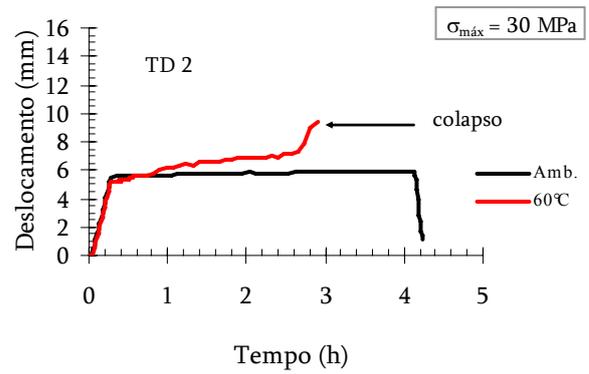
(a)



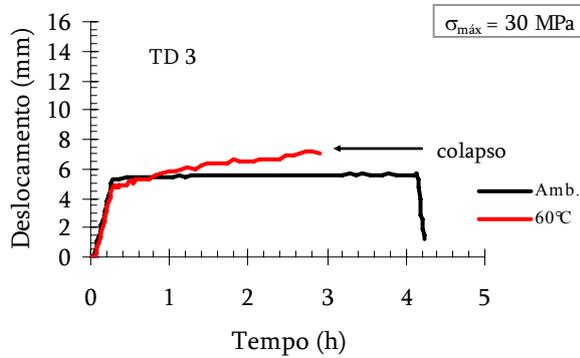
(b)



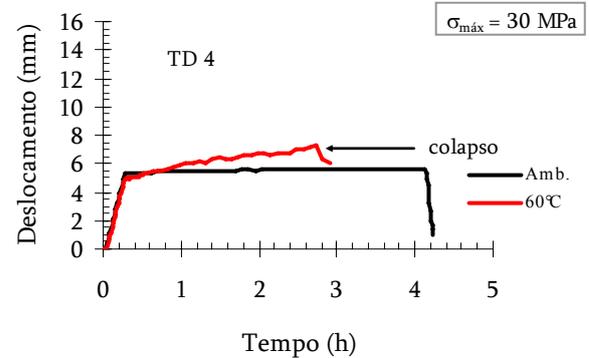
(c)



(d)



(e)



(f)

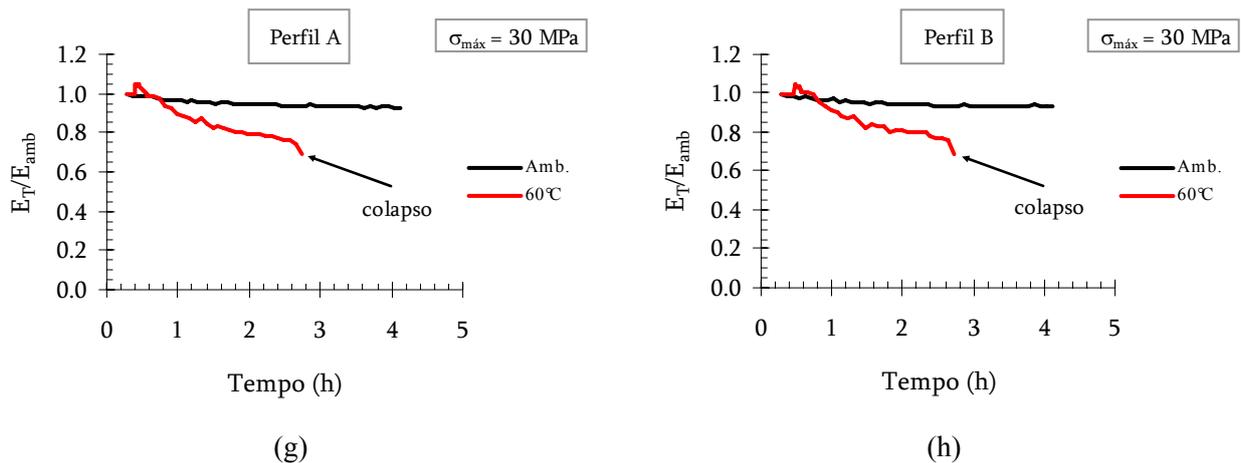
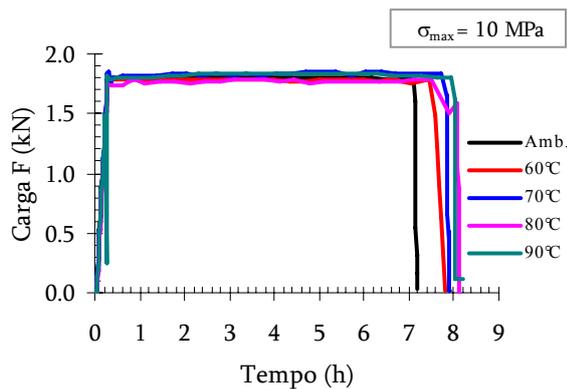


Figura 4.23 - Resultados dos ensaios de flexão V2_Iso para tensão aplicada de 30MPa: (a) carga F registrada durante os ensaios; (b) gráfico das temperaturas registradas somente pelo termopar da estufa (Figura 4.21b), durante os ensaios; (c) a (f) deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento, (g) e (h) redução do módulo de elasticidade da cada viga.

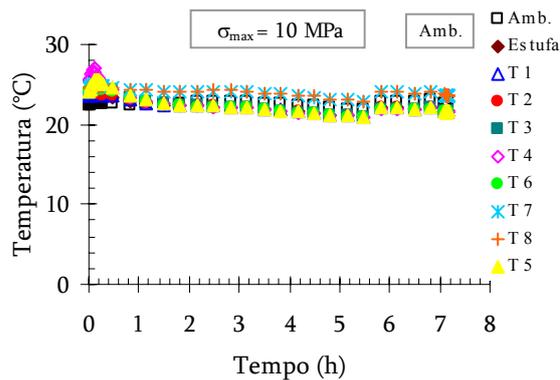
O ensaio V2_Iso foi ao colapso para uma tensão máxima aplicada de 30 MPa e a uma temperatura de 60°C. O colapso ocorreu após aproximadamente três horas de ensaio, com carga e temperatura constantes, constatando-se então a deformação lenta.

2. Seqüência de ensaios V3_Iso

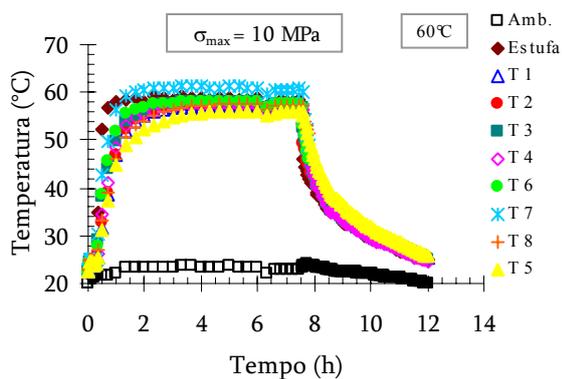
Foram realizados ensaios para tensão normal máxima prescrita em 10 e 20 MPa. Na Figura 4.24 e Figura 4.25 são apresentados os resultados dos conjuntos de ensaios de flexão V3_Iso. Os deslocamentos obtidos correspondem aos quatro transdutores de deslocamento utilizados, conforme é apresentado na Figura 4.21. Nestes ensaios a distribuição da temperatura na seção transversal do perfil foi acompanhada com auxílio dos termopares T1 a T8, posicionados conforme apresentado na Figura 4.20(b).



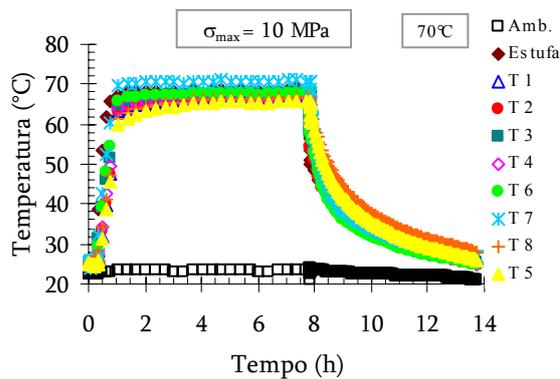
(a)



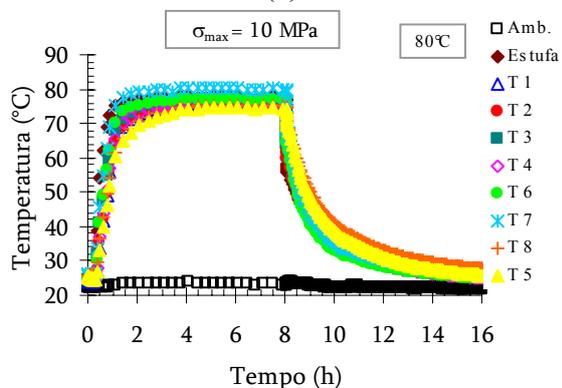
(b)



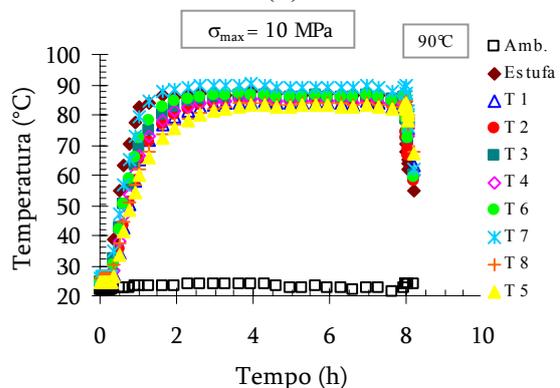
(c)



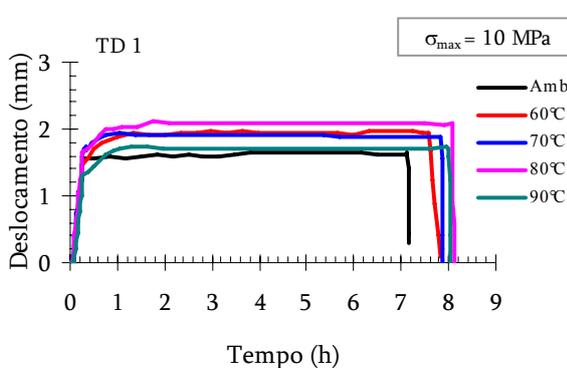
(d)



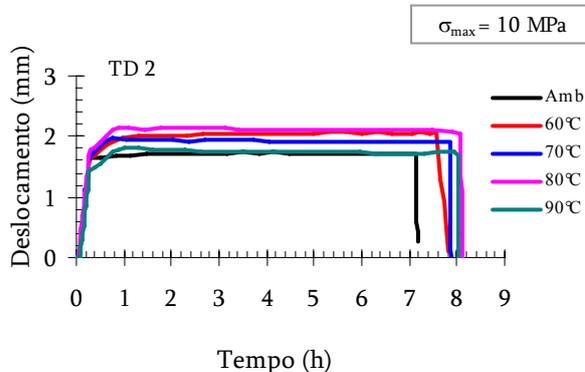
(e)



(f)



(g)



(h)

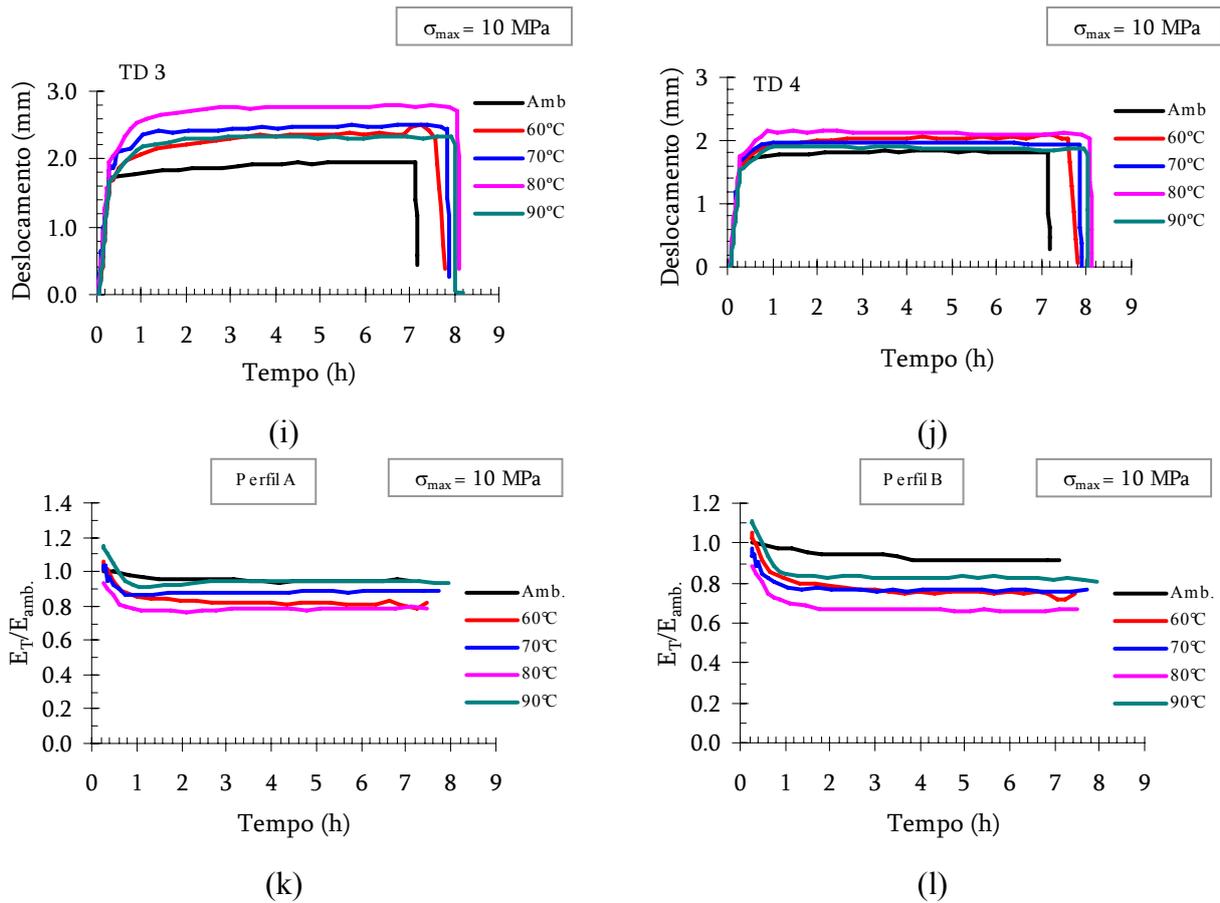
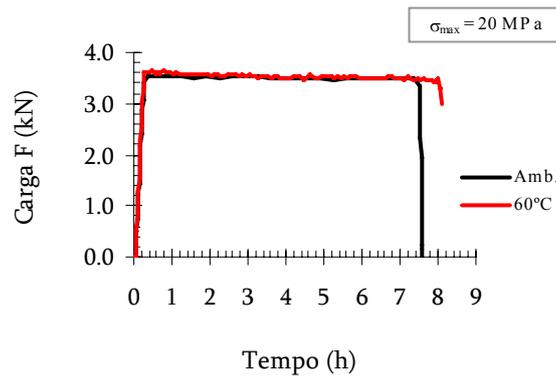
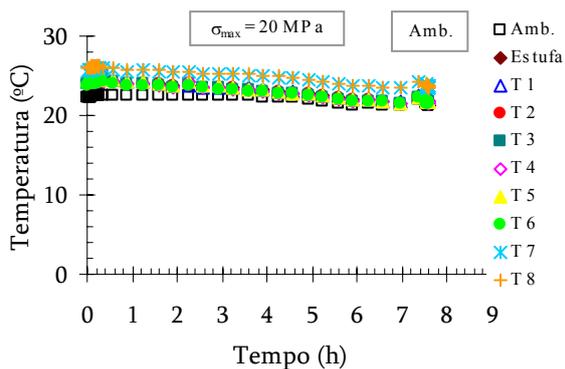


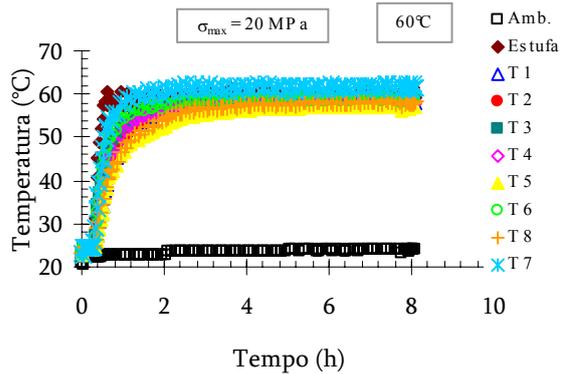
Figura 4.24 – Resultados dos ensaios de flexão V3_Iso para tensão máxima aplicada de 10MPa: (a) registro da carga F; (b) a (f) gráfico das temperaturas registradas durante todos os ensaios; (g) a (j) deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento; (k) e (l) redução do módulo de elasticidade da cada viga.



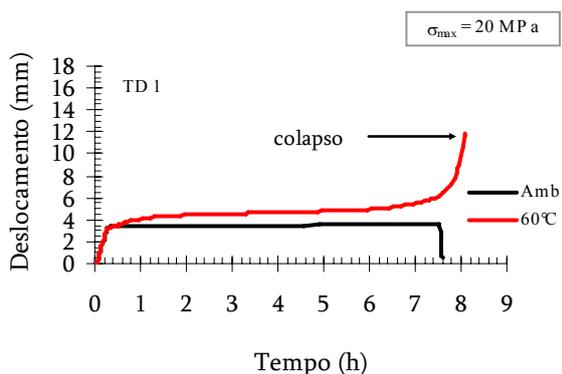
(a)



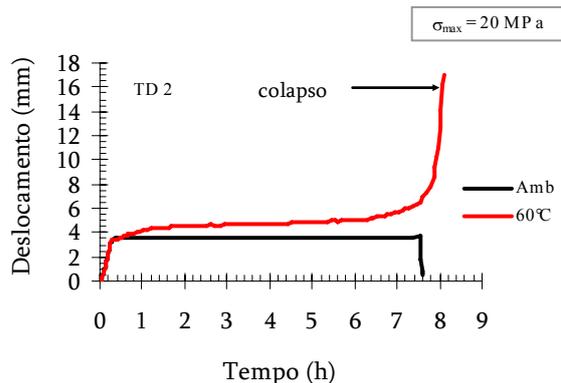
(b)



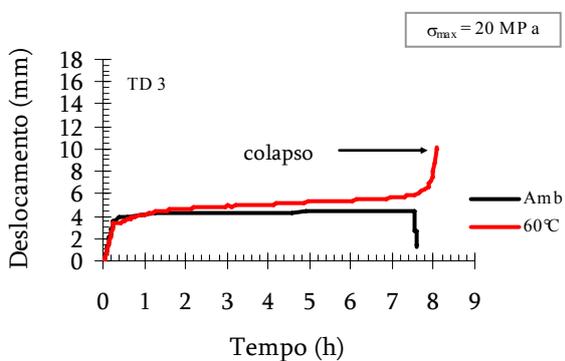
(c)



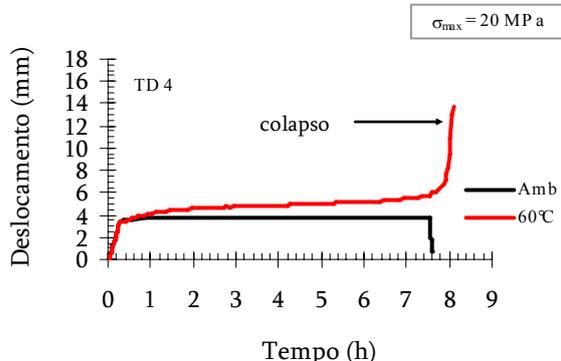
(d)



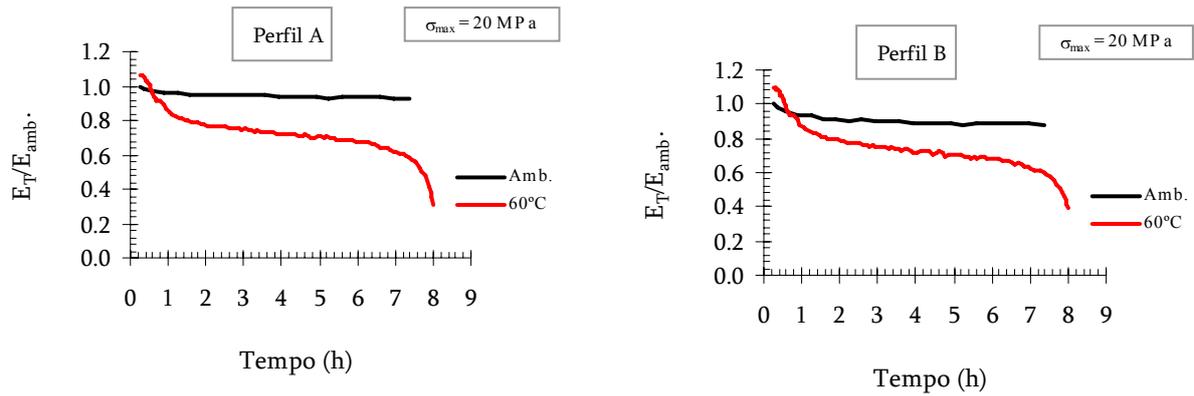
(e)



(f)



(g)



(h)

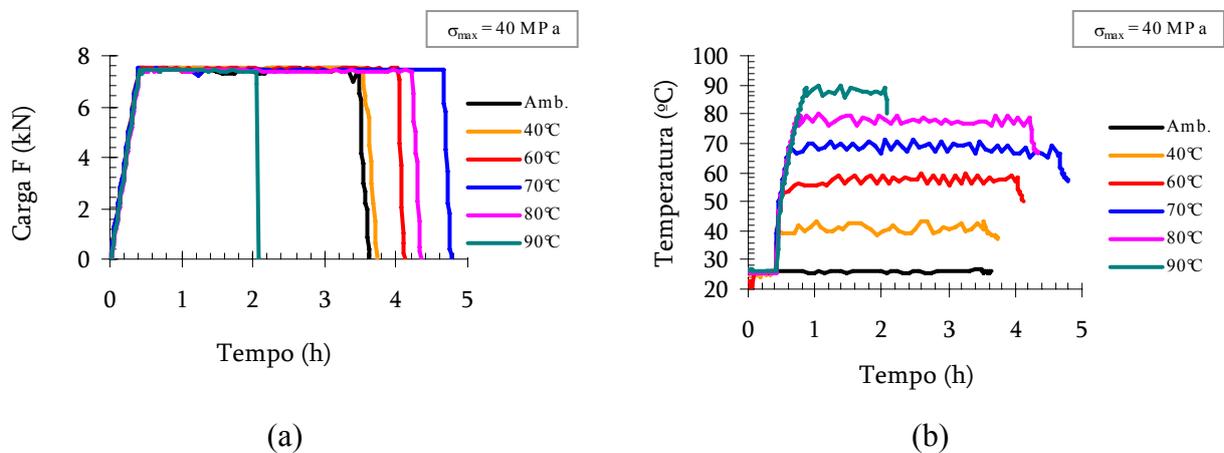
(i)

Figura 4.25 – Resultados dos ensaios de flexão V3_Iso para tensão aplicada de 20MPa: (a) registro da carga F aplicada nos ensaios; (b) e (c) gráfico das temperaturas registradas durante todos os ensaios; (d) a (g) deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento; (h) e (i) redução do módulo de elasticidade da cada viga.

O ensaio V3_Iso foi ao colapso para tensão máxima aplicada de 20 MPa e novamente à temperatura de 60°C. O colapso ocorreu após oito horas também com carga e temperatura constante, constatando-se novamente a deformação lenta.

3. Sequência de ensaios V3_Ester

Foram realizados conjuntos de ensaios para tensão normal máxima prescrita em 40 MPa. Na Figura 4.26 são apresentados os resultados dos conjuntos de ensaios de flexão V3_Ester. Os deslocamentos obtidos correspondem aos quatro transdutores de deslocamento utilizados, conforme é apresentado na Figura 4.21.



(a)

(b)

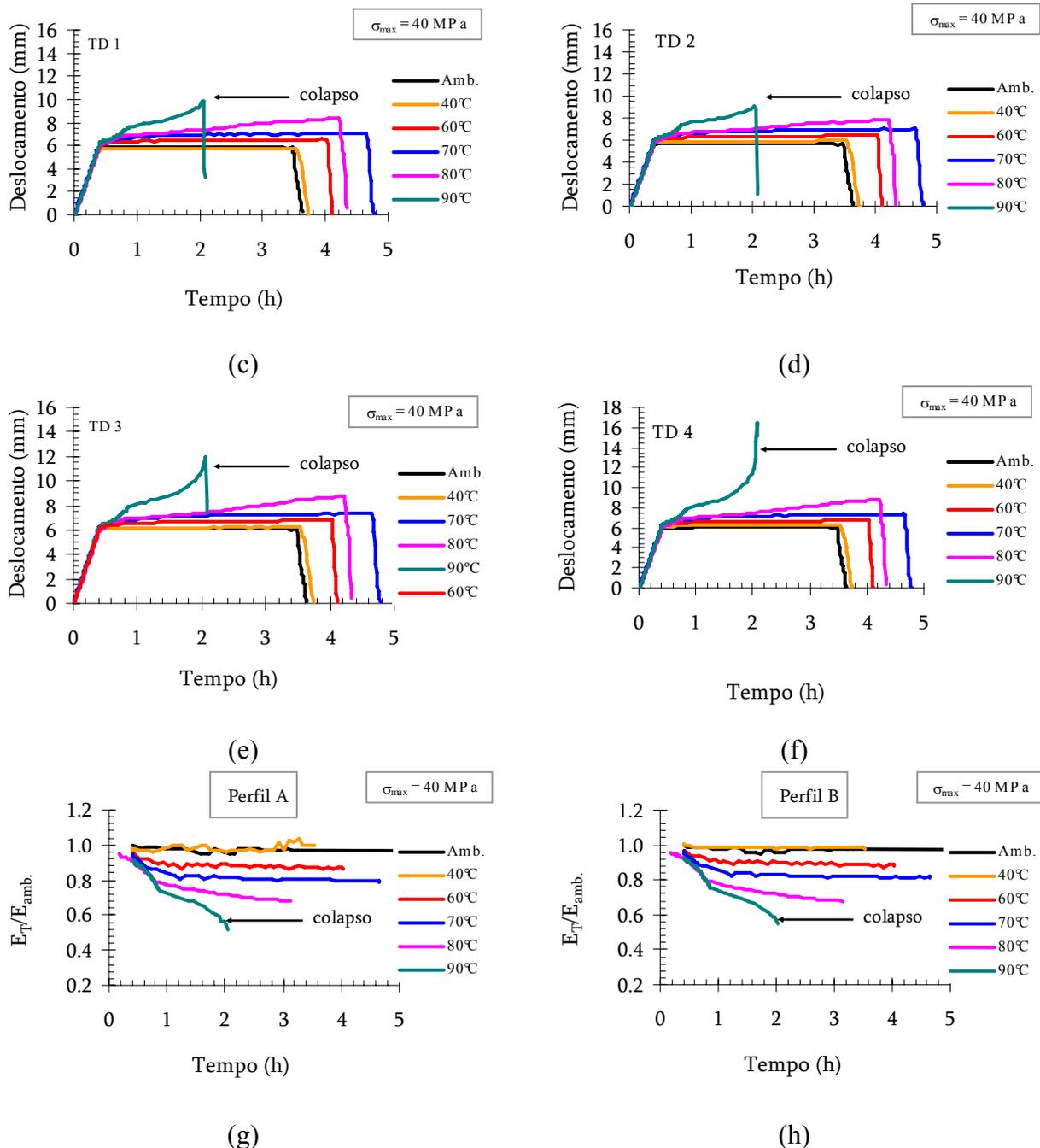


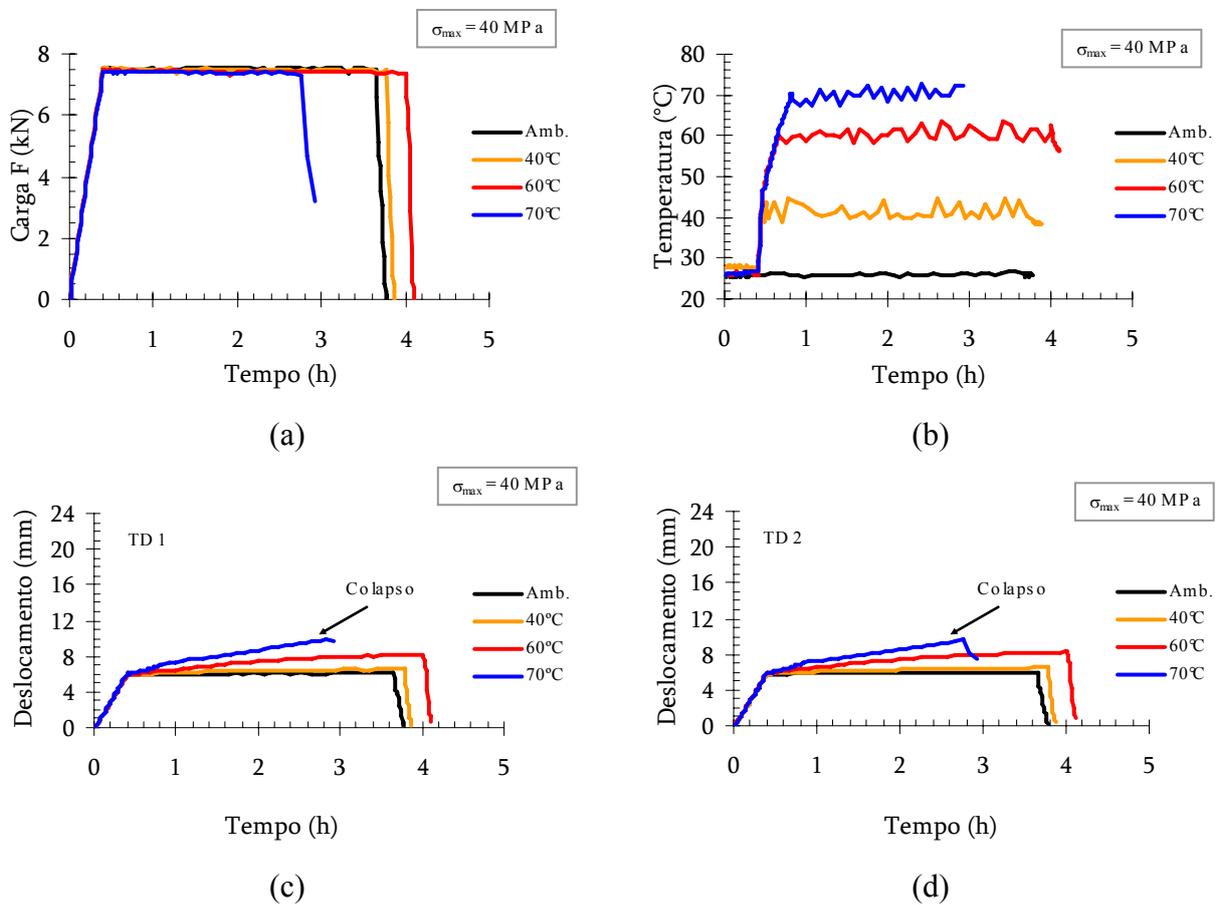
Figura 4.26 – Resultados dos ensaios de flexão V3_Ester para tensão máxima aplicada de 40MPa: (a) registro da carga F aplicada nos ensaios; (b) gráfico das temperaturas registradas somente pelo termopar da estufa; (c) a (f) deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento; (g) e (h) redução do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura para cada perfil.

O ensaio V3_Ester foi ao colapso para tensão máxima aplicada de 40 MPa e à temperatura de 90°C, após duas horas de ensaios. Neste caso, o início da deformação lenta iniciou-se a partir da temperatura de 60°C, com redução do módulo de elasticidade (Figura 4.26(g) e (h)). Talvez se o ensaio a 80°C se prolongasse por mais tempo, a peça

iria ao colapso uma vez que os deslocamentos medidos pelos transdutores não estabilizaram.

4. Seqüência de ensaios V4_Ester

Foram realizados ensaios para tensão normal máxima prescrita em 40 MPa. Na Figura 4.27 são apresentados os resultados dos conjuntos de ensaios de flexão V4_Ester. Os deslocamentos obtidos correspondem aos quatro transdutores de deslocamento utilizados, conforme é apresentado na Figura 4.21.



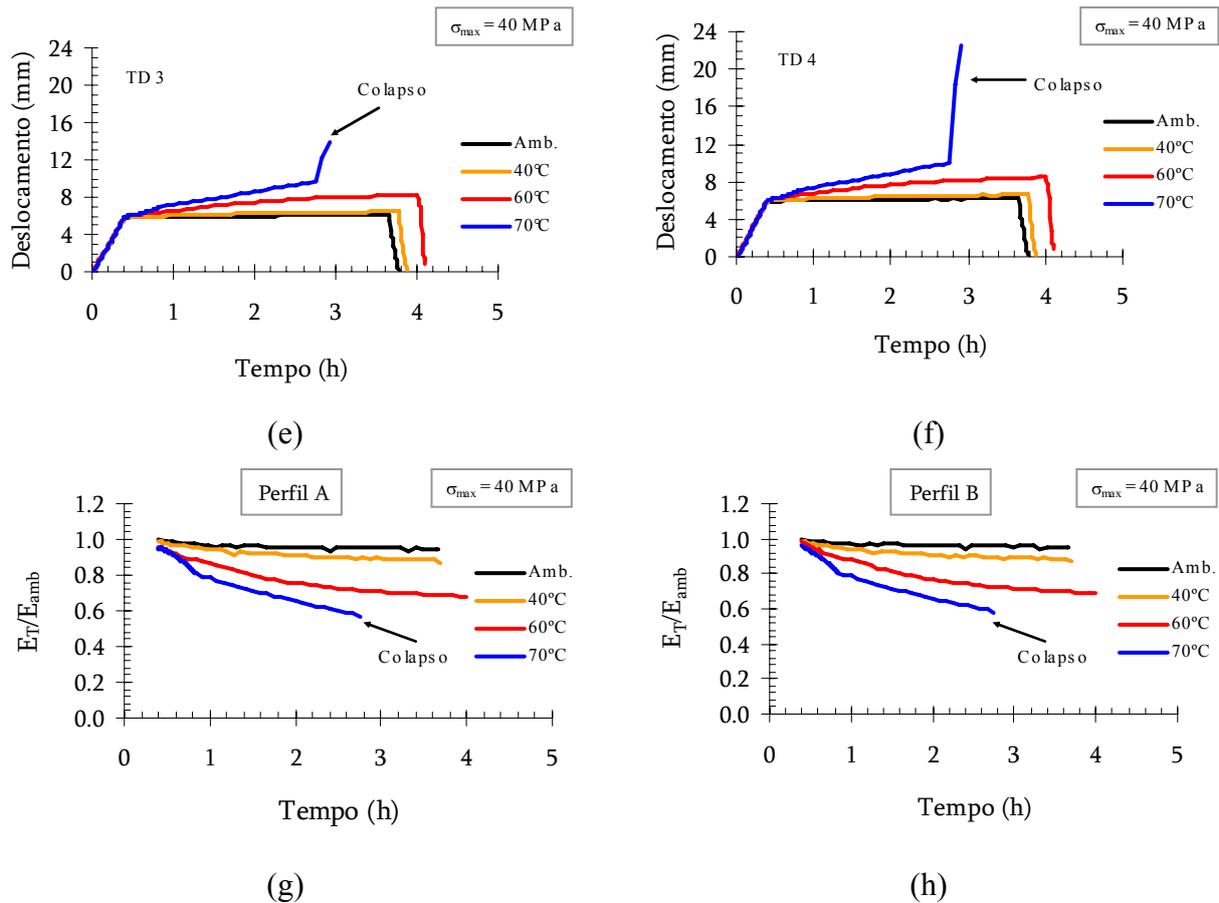
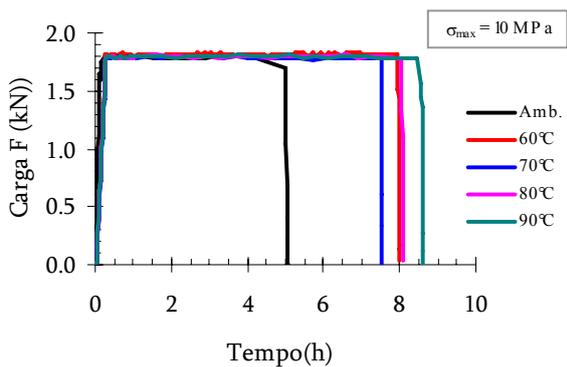


Figura 4.27 – Resultados dos ensaios de flexão V4_Ester para tensão aplicada de 40MPa: (a) registro da carga F aplicada nos ensaios; (b) gráfico das temperaturas registradas; (c) a (f) deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento; (g) e (h) redução do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura para cada perfil.

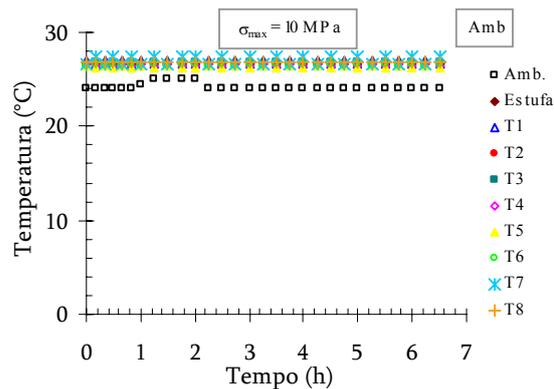
A mesma tensão máxima aplicada em V3_Ester foi aplicada em V4_Ester. No entanto a peça foi ao colapso à temperatura de 70°C, após aproximadamente três horas.

5. Sequência de ensaios V5_Ester

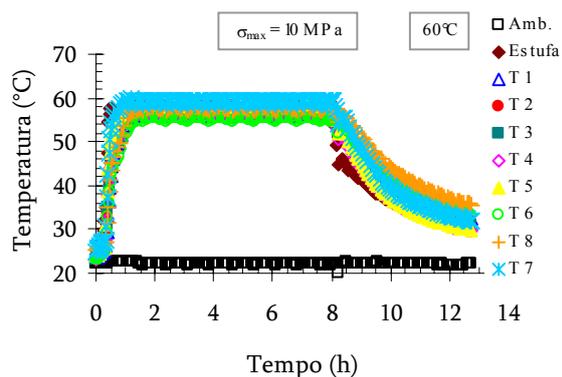
Foram realizados conjunto de ensaios para tensão normal máxima prescrita em 10 e 20 MPa. Na Figura 4.28 e Figura 4.29 são apresentados os resultados dos conjuntos de ensaios de flexão V5_Ester. Os deslocamentos obtidos correspondem aos quatro transdutores de deslocamento utilizados, conforme apresentado na Figura 4.21. Nestes ensaios a distribuição da temperatura na seção transversal do perfil foi acompanhada pelos termopares T1 a T8 conforme a Figura 4.20(b).



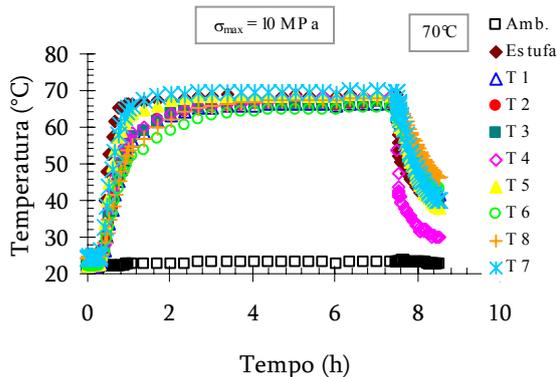
(a)



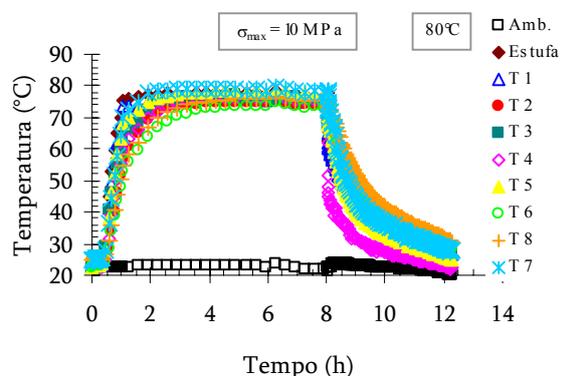
(b)



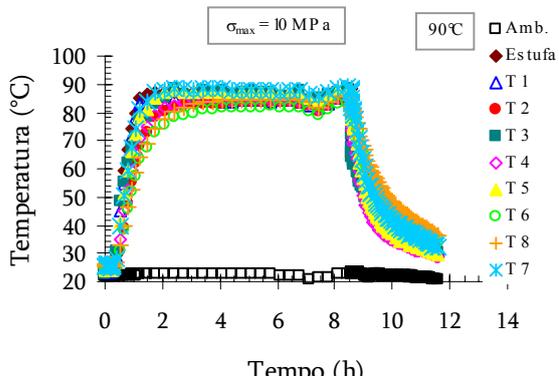
(c)



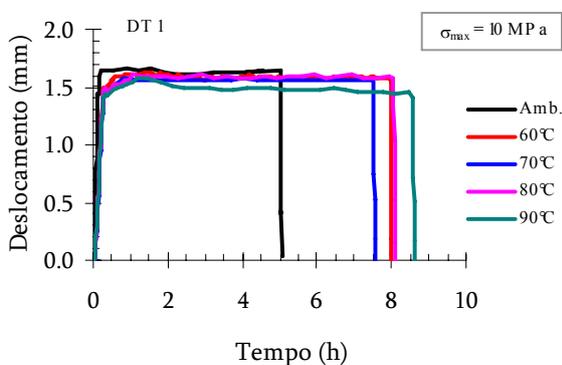
(d)



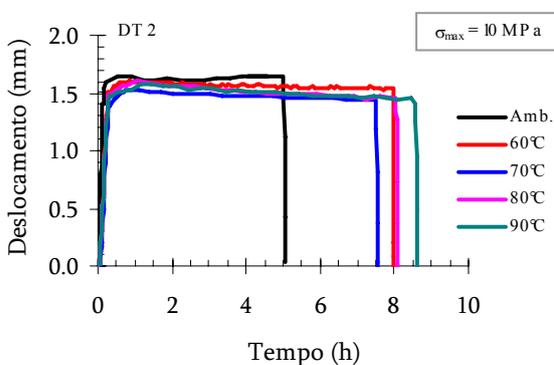
(e)



(f)



(g)



(h)

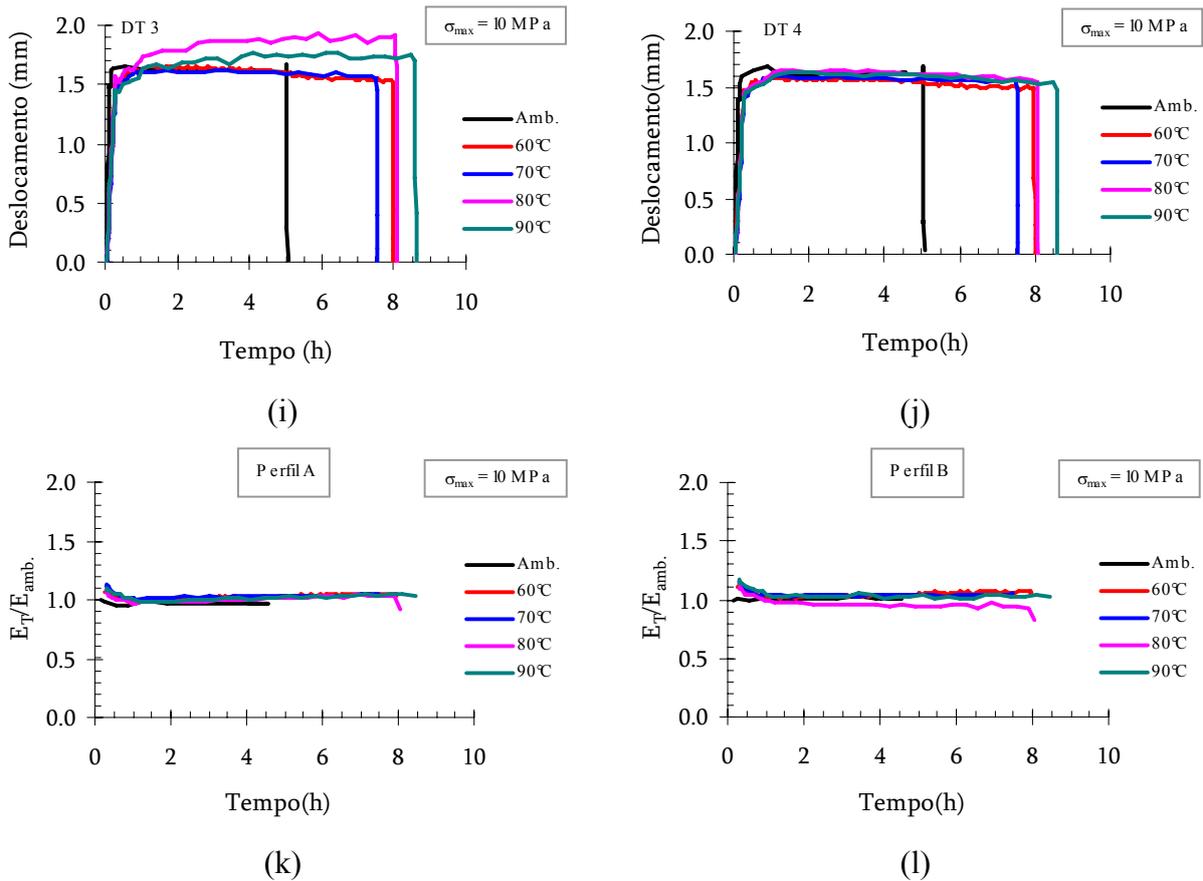
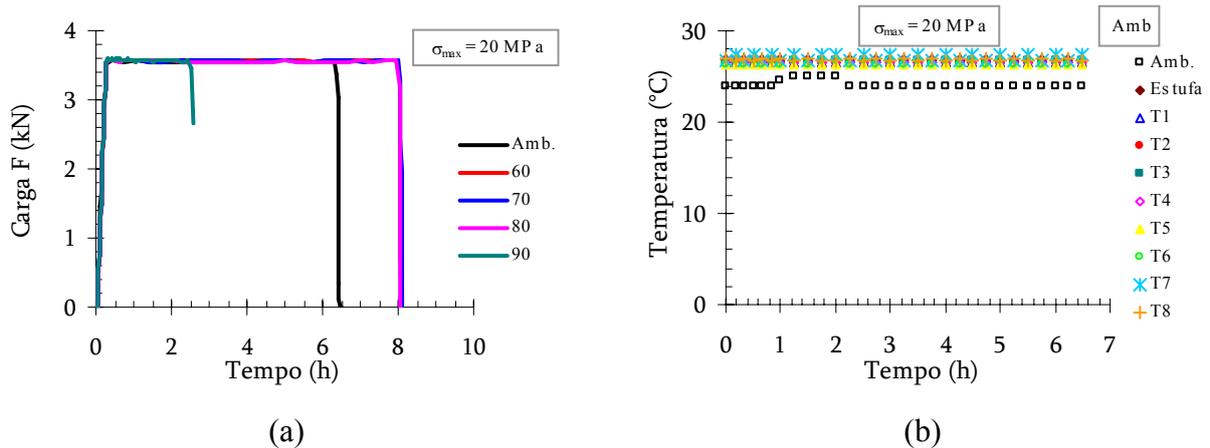
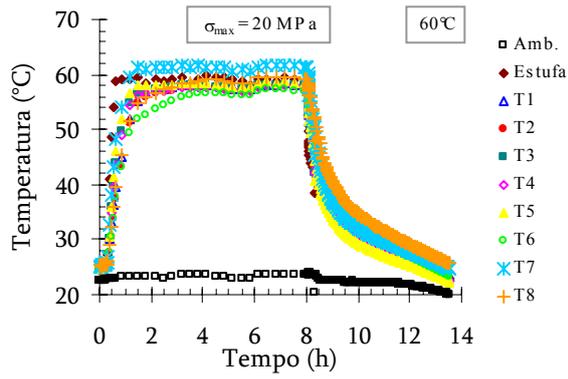
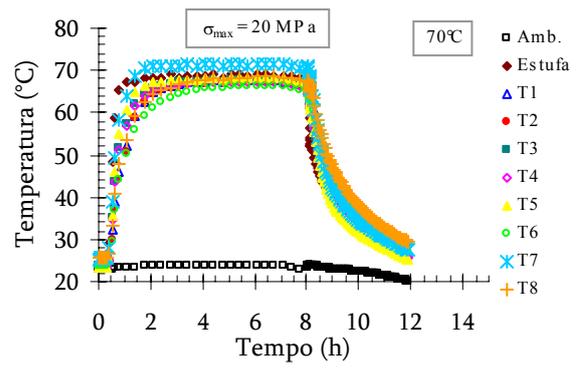


Figura 4.28 – Resultados dos ensaios de flexão V5_Ester para tensão máxima aplicada de 10MPa: (a) registro da carga F; (b) a (f) temperaturas registradas pelos termopares durante os ensaios; (g) a (j) deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento; (k) e (l) redução do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura para cada perfil.

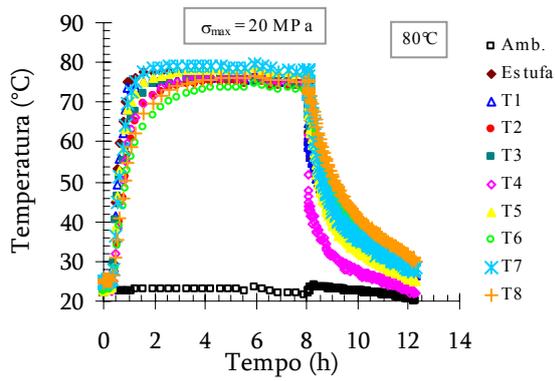




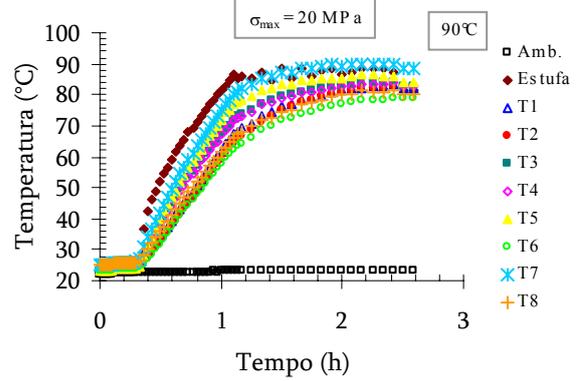
(c)



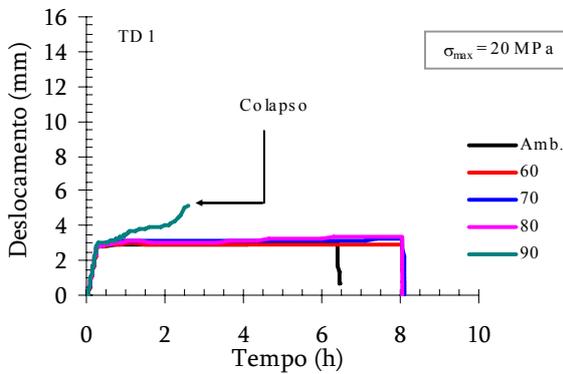
(d)



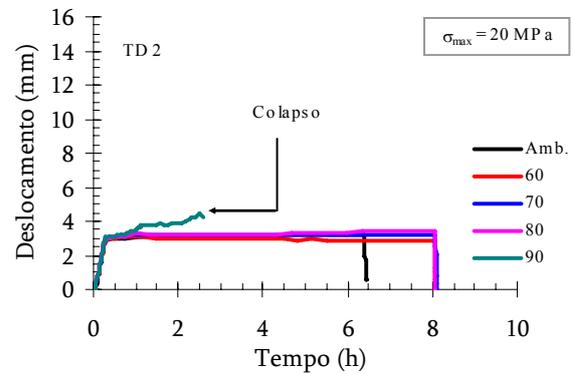
(e)



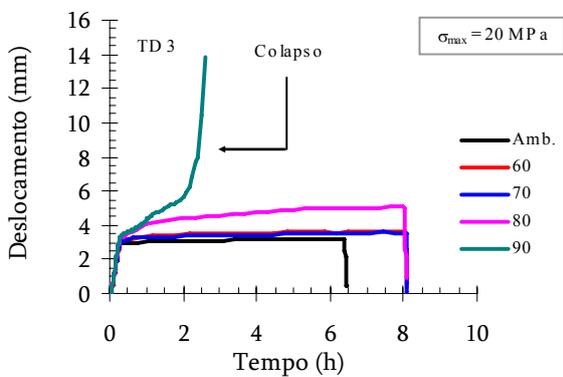
(f)



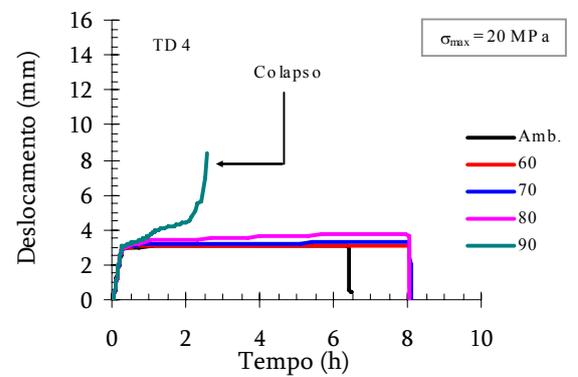
(g)



(h)



(i)



(j)

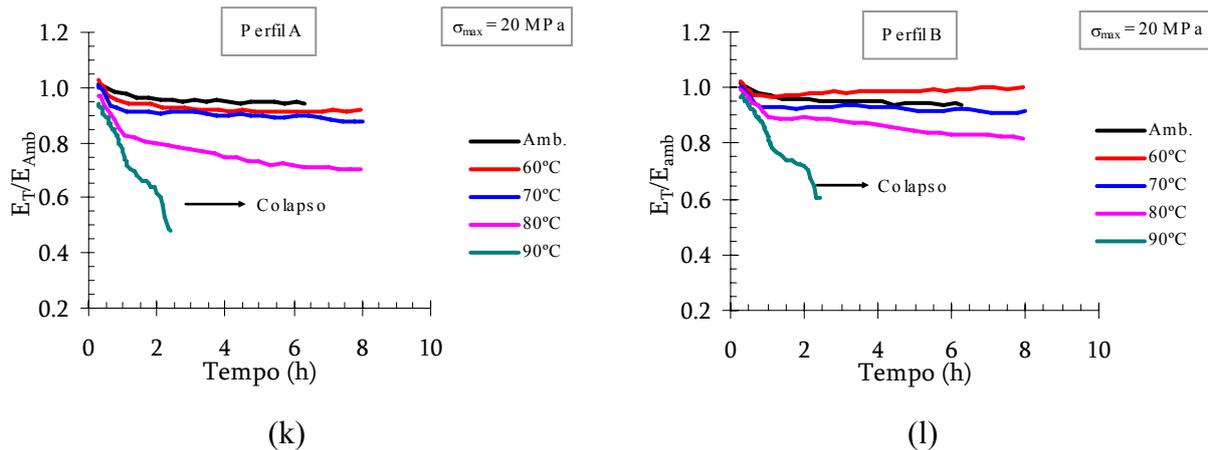
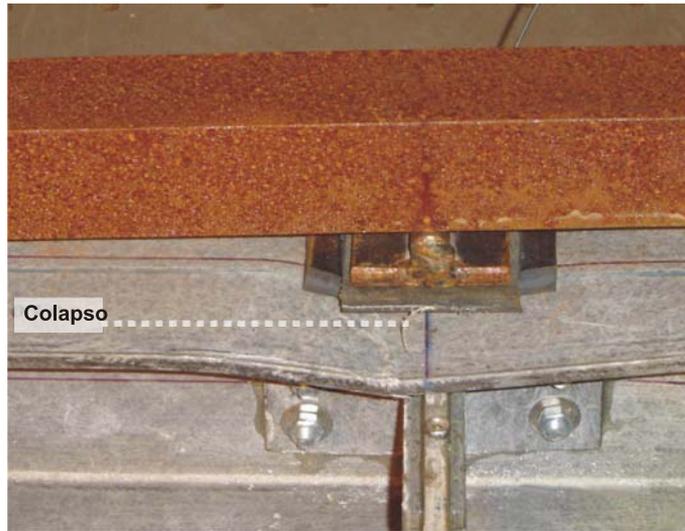


Figura 4.29 – Resultados dos ensaios de flexão V5_Ester para tensão máxima aplicada de 20MPa: (a) carga F aplicada nos ensaios; (b) a (f) temperaturas registradas pelos termopares durante os ensaios; (g) a (j) deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento; (k) e (l) redução do módulo de elasticidade com o aumento da temperatura para cada perfil.

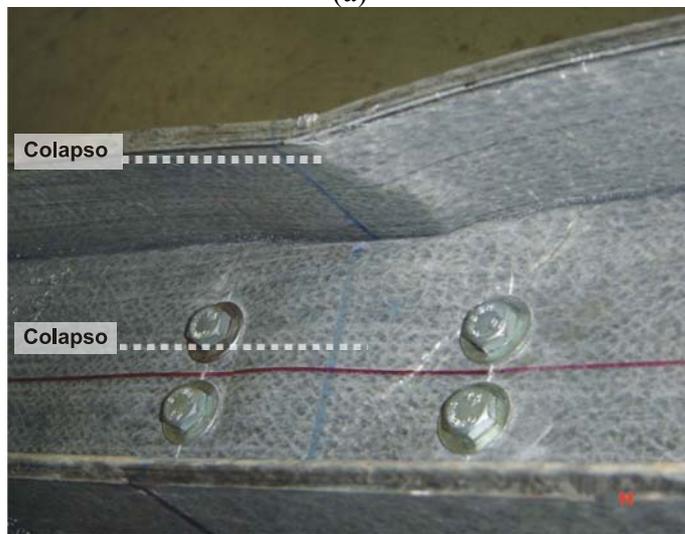
A peça foi ao colapso à temperatura de 90°C, para uma tensão máxima de 20 MPa. E como nos outros ensaios não foi um colapso imediato, constatando novamente a deformação lenta. Vale destacar que V5_Ester possuiu uma fração volumétrica de fibras inferior a V4_Ester e V3_Ester, motivo provável do colapso da peça com menor tensão aplicada.

Foi observado o mesmo tipo de colapso para todas as vigas ensaiadas. O mecanismo de colapso foi identificado na mesa superior (comprimida) das vigas e ocorreu vizinho a uma das seções de aplicação de carga (Carga F na Figura 4.22).

Os mecanismos de colapso localizado podem ser descritos da seguinte forma: (i) transferência gradual de tensões da resina para as fibras, devido à deformação lenta, (ii) fenômeno esse associado com a flambagem das fibras devido à perda de rigidez da matriz, responsável pela contenção lateral das fibras. Após a formação de mecanismos localizados, ocorre o colapso global das vigas (nesse caso, basta a ocorrência de um único mecanismo de colapso localizado, pois se trata de vigas isostáticas). O mecanismo típico de colapso das vigas pode ser visto na Figura 4.30. Vale destacar que o colapso não ocorreu imediatamente após a aplicação da carga e estabilização da temperatura de ensaio, mas apenas após certo tempo em regime estável conforme pode ser observado, por exemplo, nas Figuras 4.24 (c), 4.26 (e), 4.27 (f), 4.28 (f) e 4.30(i).



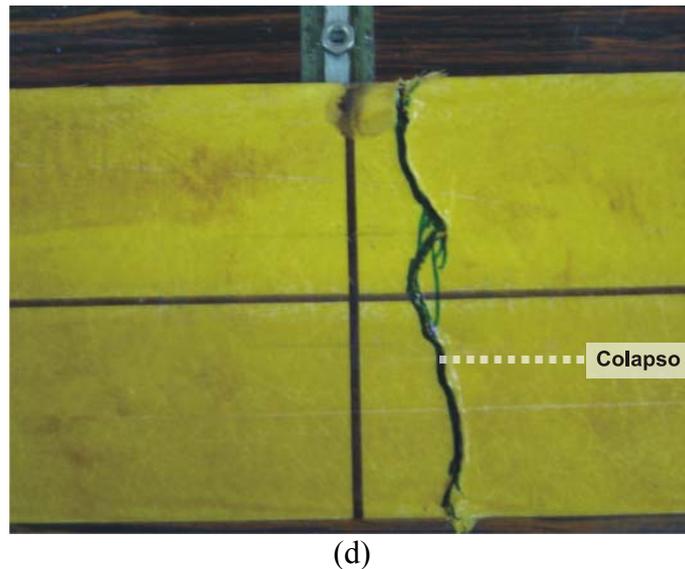
(a)



(b)



(c)

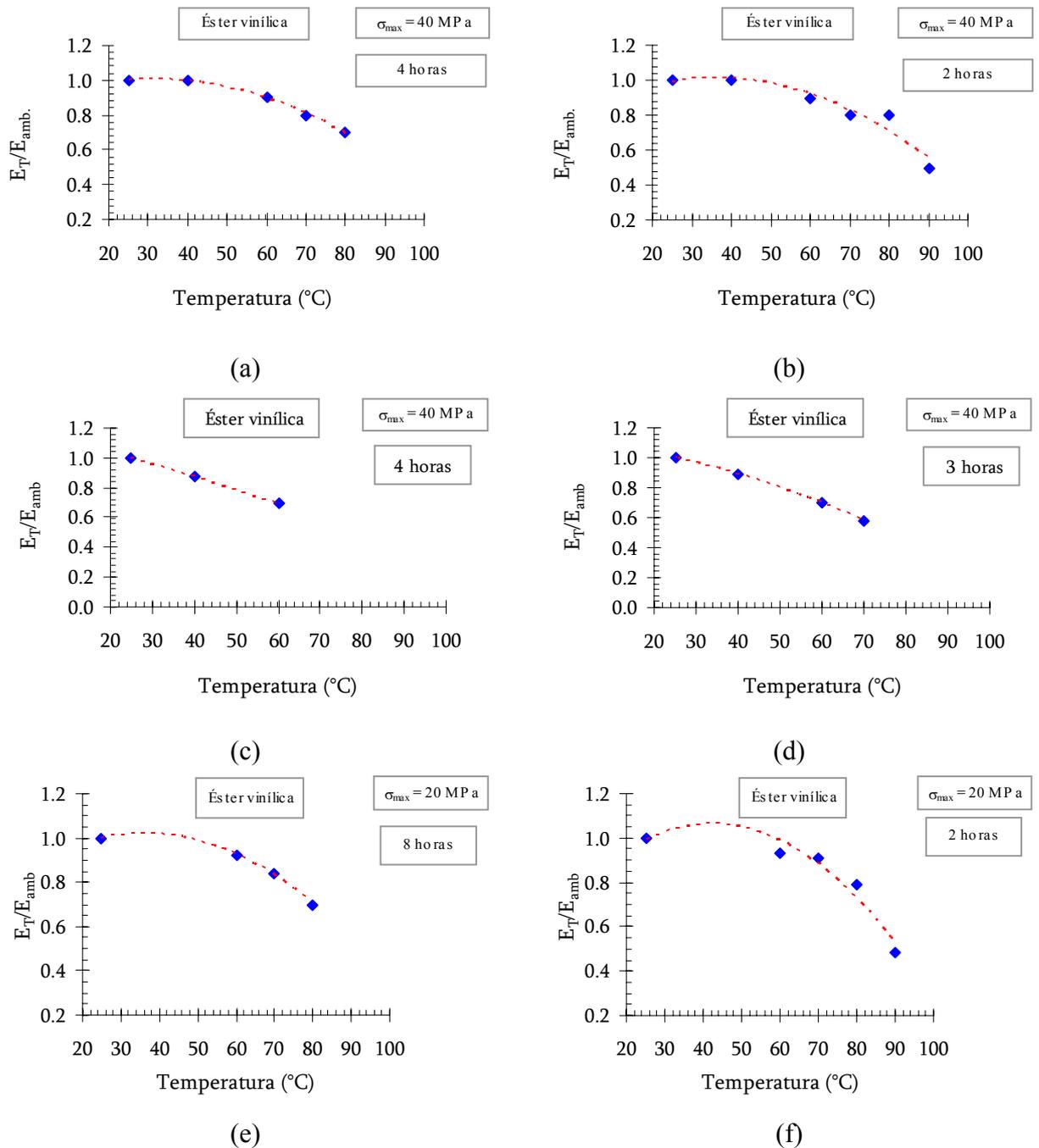


(d)
Figura 4.30 – Mecanismo típico de colapso: (a) e (b) localização do colapso (V5_Ester); (b) detalhe (vista superior) do colapso na mesa superior comprimida do perfil (V2_Iso).

Podemos afirmar que houve importante redução do módulo de elasticidade aparente na flexão, E_{fT} , devido à elevação de temperatura e ao longo de tempo. Isto pode ser observado nas Figuras 4.24(g) e (h), 4.26(h) e (i), 4.27(g) e (h), 4.28(g) e (h) e 4.30(k) e (l). É importante destacar que essa redução pode ser decomposta em duas partes: (i) primeiramente uma redução independente do tempo, devida à alteração da rigidez da resina com o aumento da temperatura e, a seguir, (ii) uma redução da rigidez em função do nível de tensão normal aplicada no material e do tempo em que estas tensões estão instaladas. Parece lícito, portanto, associar esse comportamento ao fenômeno de deformação lenta do material. Nas Figuras 4.23(g) e (h), 4.25(k) e (l) e 4.29(k) e (l), é possível observar que a parcela da redução da rigidez aparente na flexão, associada exclusivamente à alteração da rigidez da resina com a temperatura, pode ser obtida no instante inicial dos ensaios, quando a temperatura estabiliza no valor prescrito para cada ensaio. Nesses casos, verificamos uma redução muito discreta da rigidez E_{fT} , sempre referida ao seu valor à temperatura ambiente, E_{amb} . Por outro lado, em especial para os ensaios com tensões normais maiores, 20, 30 e 40 MPa, a redução da rigidez aparece associada ao tempo, e se apresenta tanto maior quanto maior a temperatura de ensaio e a tensão aplicada. Essa constatação reforça a idéia de se associar a redução da rigidez dos perfis testados ao fenômeno da deformação lenta.

Com esses resultados, foi possível estimar a redução do módulo de elasticidade aparente na flexão, bem como determinar uma linha de tendência para essa redução.

Essa redução foi dividida em duas partes uma vez que os valores da redução dependem do tempo de exposição. Como em alguns ensaios o tempo até o colapso foi diferente do tempo dos ensaios anteriores, foram realizadas reduções com tempos diferentes em função do tempo de colapso. Essas reduções estão apresentadas na Figura 4.31.



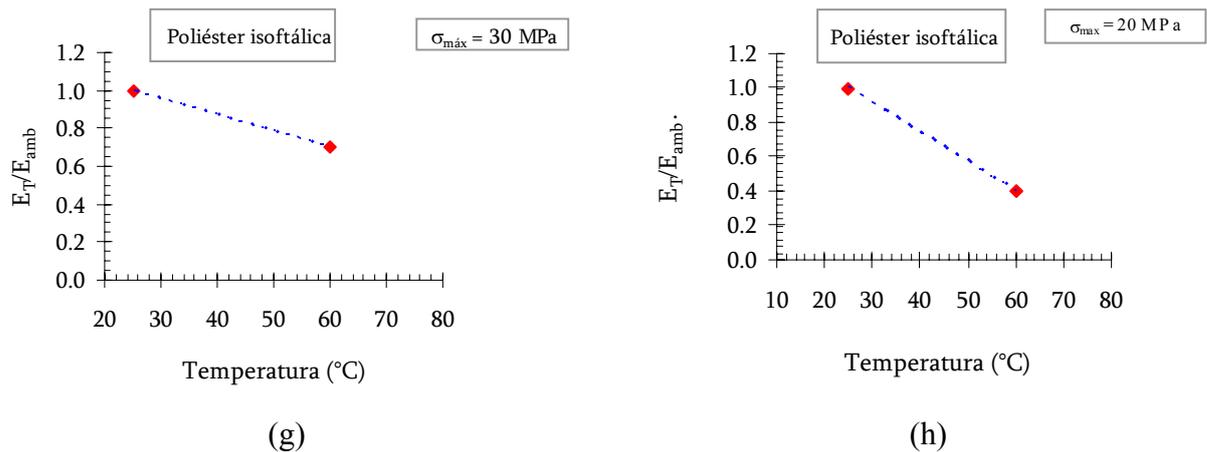


Figura 4.31 – Redução do módulo de elasticidade aparente na flexão simples: (a) e (b) ensaio V3_Ester; (c) e (d) ensaio V4_Ester; (e) e (f) ensaio V5_Ester; (g) ensaio V2_Iso e (h) ensaio V3_Iso.

No caso dos ensaios das vigas compostas de resina éster vinílica, pode-se notar que a tendência de redução do módulo de elasticidade foi similar para todos os ensaios, constatando, por exemplo, uma redução do módulo de elasticidade aparente na flexão de aproximadamente de 10%, para uma temperatura de 60°C e uma redução em torno de 50% para a condição de colapso estrutural da peça, que ocorreu para temperaturas de 90 e 70°C. Já para as vigas compostas de resina poliéster isoftálica, houve uma redução brusca do módulo de elasticidade, de até 60%, para temperatura de 60°C.

4.3. Ensaios de Compressão Centrada

Os resultados experimentais de compressão centrada serviram para identificar a resistência das colunas, incluindo o efeito da temperatura. Adicionalmente, os resultados experimentais identificaram indícios de deformação lenta no material, em função da temperatura aplicada no ensaio. Foram ensaiadas colunas formadas por resinas éster vinílica e isoftálica. A Tabela 4.17 apresenta e identifica os ensaios realizados.

Tabela 4.17 – Características dos ensaios de compressão centrada realizados.

Corpo de prova	Tipo de carga Constante/Incremental	Temperatura (°C)	Carga de colapso (kN)	Local do colapso
C1_Ester	Incremental	ambiente	170	Terço do vão
C2_Ester	Incremental	60°C	118	Próximo da extremidade
C3_Ester	Incremental	70°C	87	Próximo da extremidade
C4_Ester	Incremental	80°C	42	Próximo da extremidade
C5_Ester	Incremental	90°C	37	Terço do vão
CDL6_Ester	Constante	60°C	70	Próximo da extremidade
CDL7_Ester	Constante	80°C	34	Terço do vão
C1_Iso	Incremental	ambiente	127	Terço do vão
C2_Iso	Incremental	60°C	62	Terço do vão
C3_Iso	Incremental	70°C	48	Próximo da extremidade
C4_Iso	Incremental	80°C	44	Próximo da extremidade
C5_Iso	Incremental	90°C	41	Próximo da extremidade
CDL6_Iso	Constante	60°C	50	Próximo ao terço do vão
CDL7_Iso	Constante	80°C	35	Meio do vão

4.3.1. Ensaios para Obtenção da Resistência

Antes da realização dos ensaios de compressão centrada a altas temperaturas, foram realizados ensaios para obtenção da resistência à compressão das colunas, em temperatura ambiente. Foram realizados dois ensaios, um para a resina éster vinílica, denominado C1_Ester, e outro para a resina poliéster isoftálica, denominado C1_Iso. Foram utilizados quatro transdutores de deslocamentos; (a) dois posicionados nos bordos livres da mesa, de modo a percorrer a coluna ao longo de seu comprimento; (b) dois posicionados a meia altura da coluna, orientados no plano de menor inércia (Figura 3.16 e 4.33). Os deslocamentos medidos pelos transdutores podem ser vistos na Figura 4.33 e na Figura 4.34. Os deslocamentos medidos pelos transdutores posicionados nos bordos livres da mesa, apresentados nas Figuras 4.31a e 4.32a correspondem aos deslocamentos medidos nos terços do vão e na meia altura das colunas, onde foi observado o modo de flambagem local.

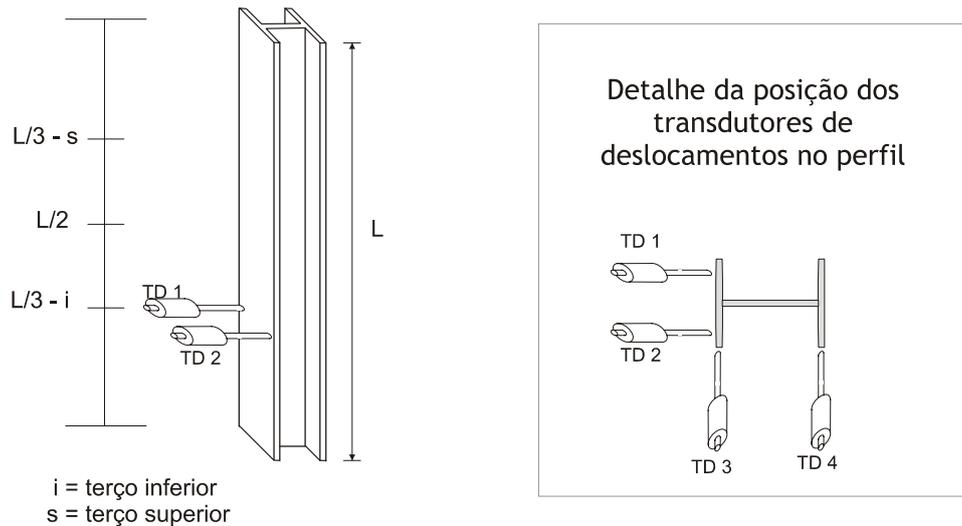


Figura 4.32 – Posicionamento dos transdutores de deslocamentos para o ensaio a temperatura ambiente.

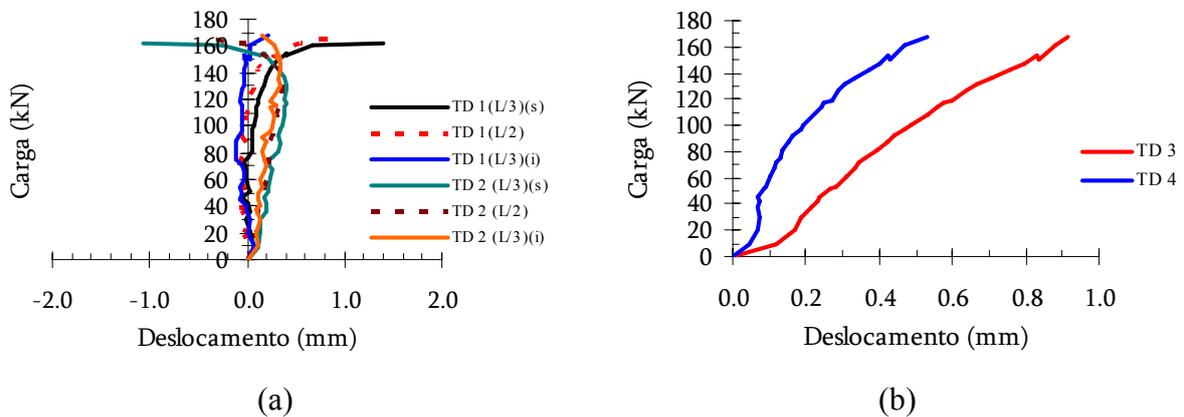


Figura 4.33 – Deslocamentos obtidos pelos transdutores de deslocamentos no ensaio C1_Ester: (a) deslocamentos referidos às alturas $[L/3$ (i) e (s)] e $L/2$ medidos pelos transdutores posicionados nos bordos livres da mesa; (b) deslocamentos medidos pelos transdutores posicionados a meia altura da coluna, no plano de menor inércia.

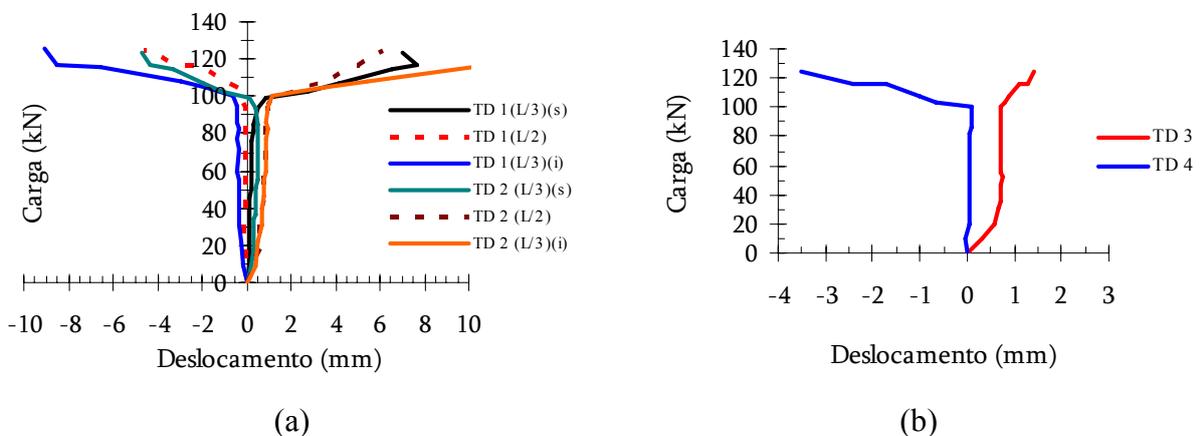


Figura 4.34 – Deslocamentos obtidos pelos transdutores no ensaio C1_Iso: (a) deslocamentos referidos às alturas $[L/3$ (i) e (s)] e $L/2$ medidos pelos transdutores posicionados nos bordos livres da mesa; (b) deslocamentos medidos pelos transdutores posicionados a meia altura da coluna, no plano de menor inércia.

Foi observado o desenvolvimento do modo de flambagem local de placa tanto para o ensaio C1_Ester como para o ensaio C1_Iso. Na Figura 4.35 é apresentada o modo de flambagem desenvolvido pelas colunas.

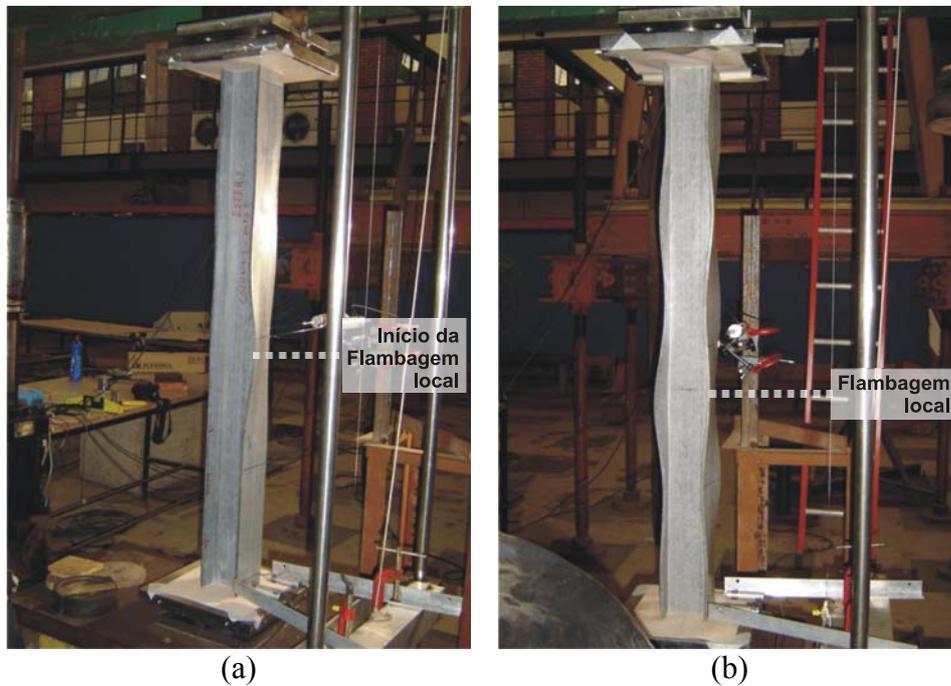


Figura 4.35 – (a) Início do desenvolvimento da flambagem local de placa; (b) estado avançado da flambagem local de placa, Ensaio C1_Iso.

Em ambos os ensaios, foram observados os colapsos por compressão da mesa. Nos ensaios com alta temperatura, o colapso foi semelhante aos de temperatura ambiente só que ocorreram em diferentes posições como é apresentado na Tabela 4.15. Em alguns casos foi observada ruptura na ligação da mesa com a alma, conforme apresentado na Figura 4.36.

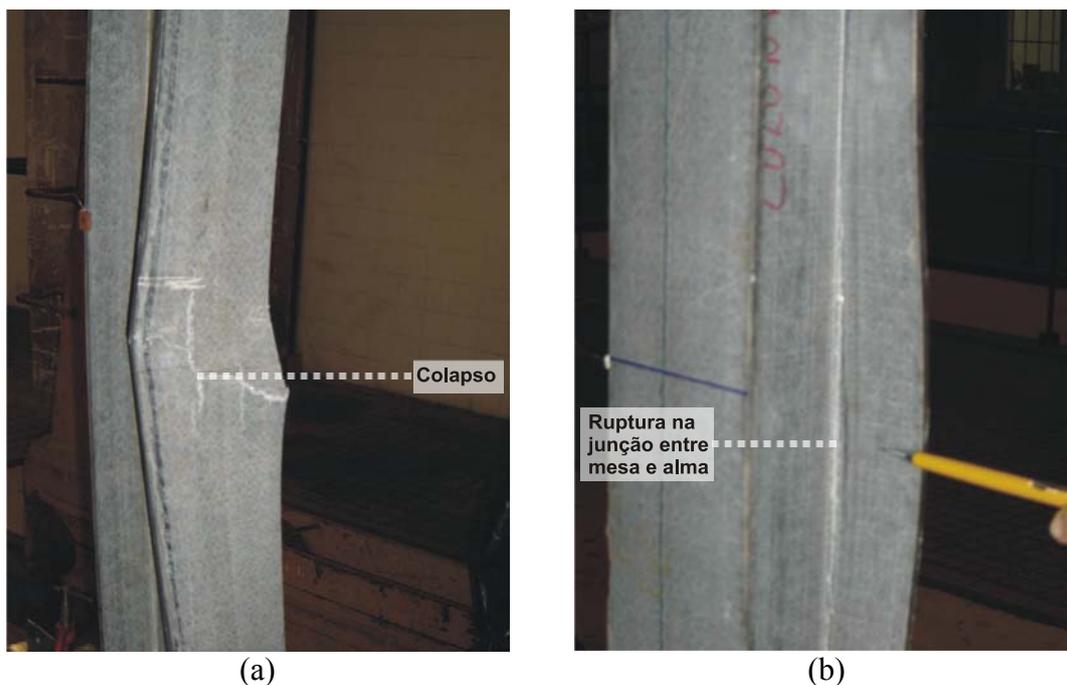
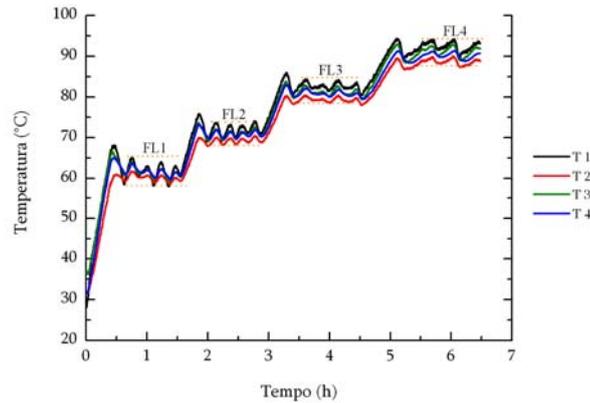


Figura 4.36 – (a) Colapso por compressão da mesa; (b) ruptura na ligação da mesa com a alma.

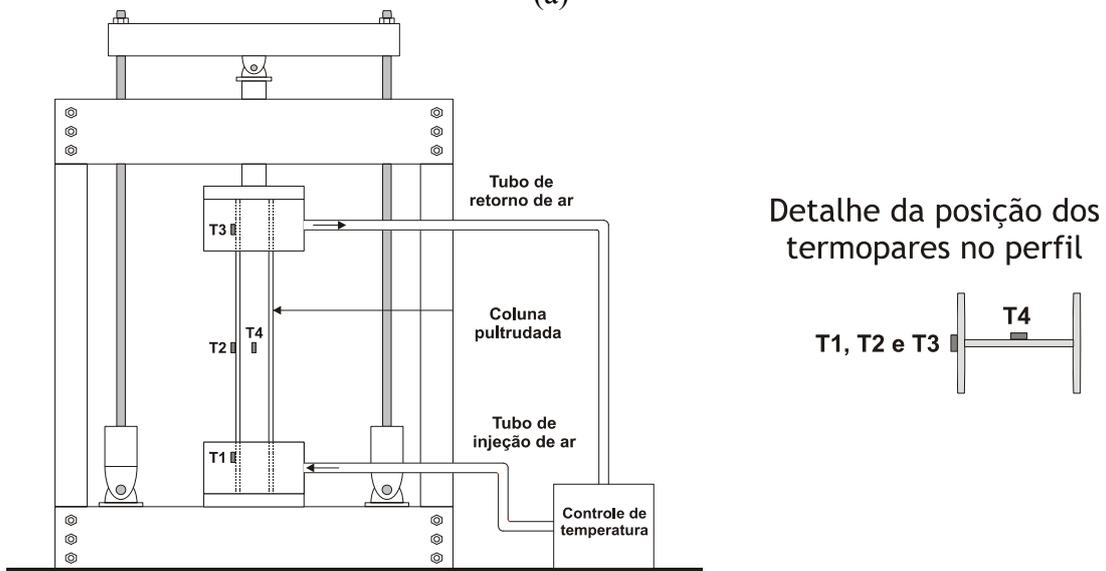
4.3.2. Ensaios de Compressão Centrada a Altas Temperaturas

Após a realização dos ensaios a temperatura ambiente, foi iniciada a campanha de ensaios a altas temperaturas. Foram realizados ensaios para diversas temperaturas, mantidas constantes durante cada ensaio: (a) com carga incremental até o colapso da coluna e (b) ensaios com etapas de carga constante, mantida estável por aproximadamente duas horas, até atingir o colapso.

Os ensaios de compressão centrada das colunas pultrudadas foram realizados com o auxílio de uma estufa projetada, conforme apresentado na Figura 3.17. A carga de temperatura é aplicada por transferência de calor por convecção. O sistema de controle de temperatura da estufa e a distribuição da temperatura em torno da seção transversal do perfil pultrudado foram calibrados através de vários testes preliminares, com ajuda de termopares do tipo K (denominados de T 1 a T4). A Figura 4.37 apresenta os resultados da calibração da estufa e a Tabela 4.18 apresenta a flutuação da temperatura em torno do valor prescrito para os ensaios.



(a)



(b)

Figura 4.37 – Resultados da distribuição da temperatura em torno da coluna no interior da estufa; (a) distribuição das temperaturas medidas; (b) posicionamento dos termopares (T1, T2, T3 e T4).

Tabela 4.18 – Flutuação máxima da temperatura durante os testes realizados, FL.

Temperatura (°C)	Ponto único (°C)	Entre pontos diferentes (°C)
60	± 4	3
70	± 3	2
80	± 3	3
90	± 3	3

Os resultados obtidos permitem concluir que o desempenho da estufa vertical é adequado para os objetivos da presente pesquisa.

Na Figura 4.39 e na Figura 4.40 são apresentados os resultados dos ensaios de compressão centrada. Os deslocamentos obtidos correspondem aos cinco transdutores de deslocamento utilizados, conforme é apresentado na Figura 4.38.

As medidas de deslocamento incluem, para nível de carga nula (zero), valores obtidos na fase de aquecimento (razão porque nos gráficos o deslocamento não é nulo na origem).

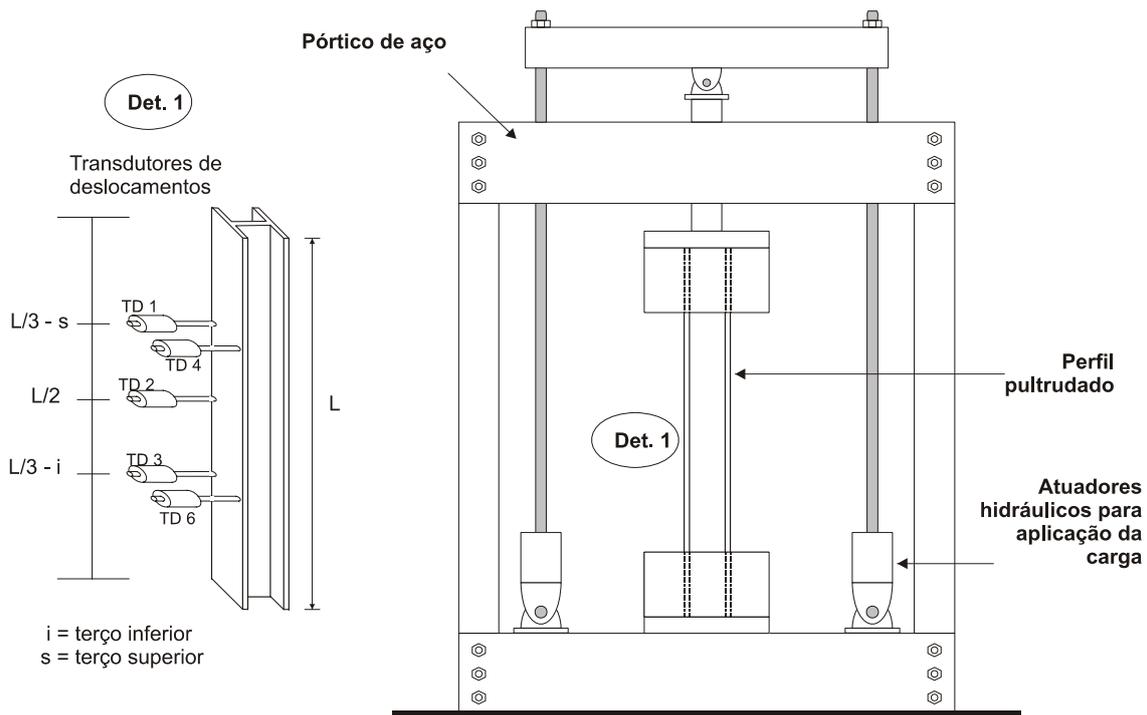
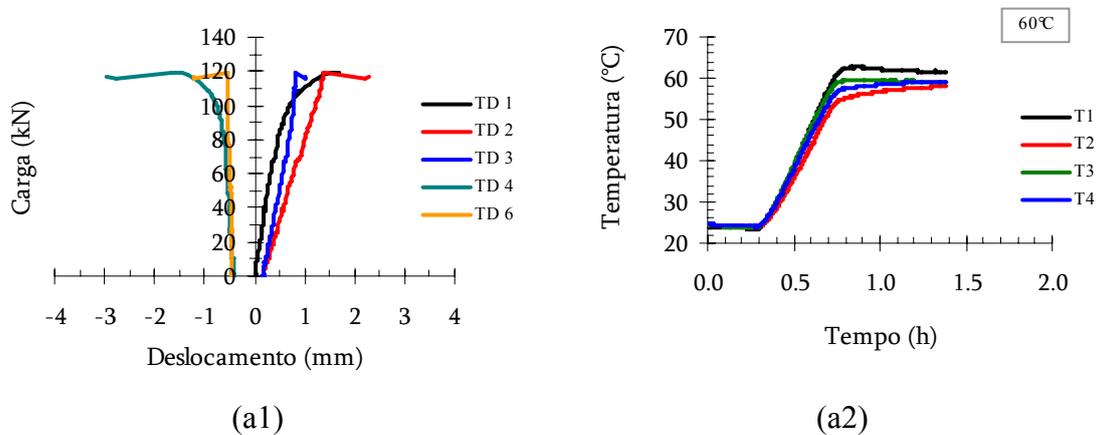


Figura 4.38 – Posicionamento dos transdutores de deslocamentos dos ensaios de compressão centrada.



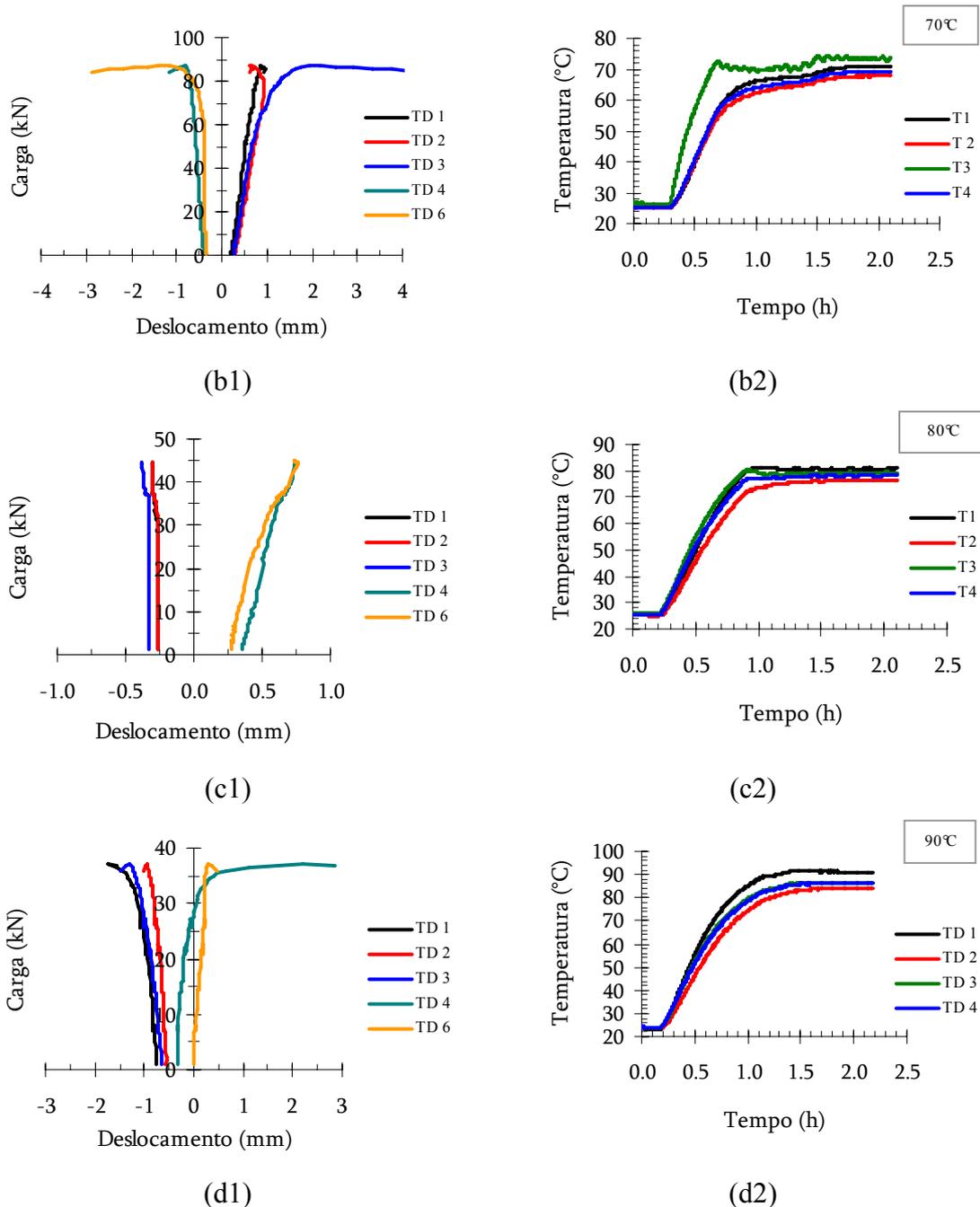
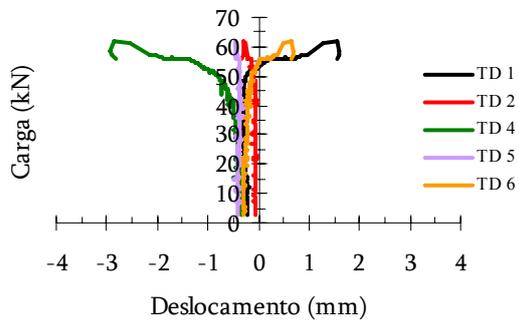
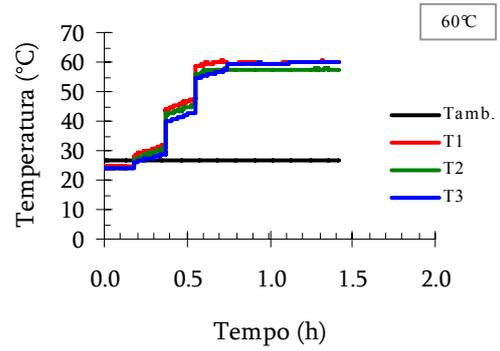


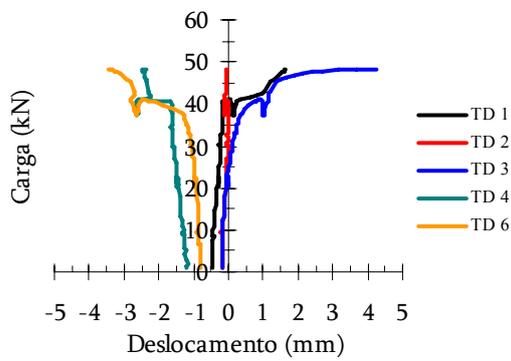
Figura 4.39 – Resultados dos ensaios de compressão para colunas pultrudadas compostas de resina éster vinílica: (a) ensaio para temperatura de 60°C- (a1) deslocamentos medidos e (a2) registro da temperatura; (b) ensaio para temperatura de 70°C- (b1) deslocamentos medidos e (b2) registro da temperatura; (c) ensaio para temperatura de 80°C- (c1) deslocamentos medidos e (c2) registro da temperatura; (d) ensaio para temperatura de 90°C- (d1) deslocamentos medidos e (d2) registro da temperatura.



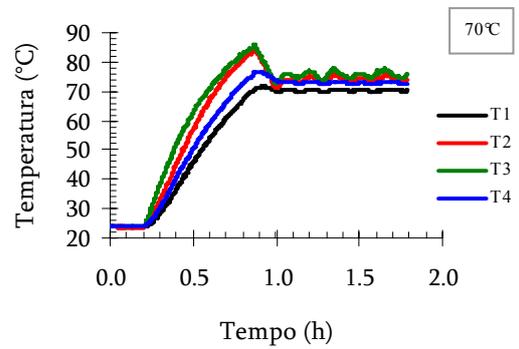
(a1)



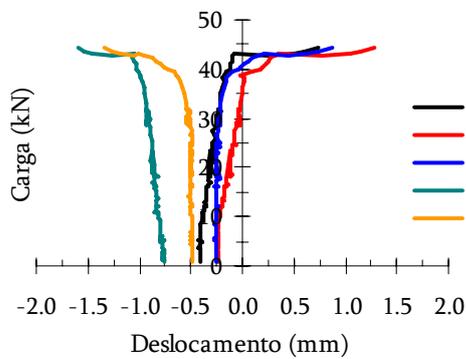
(a2)



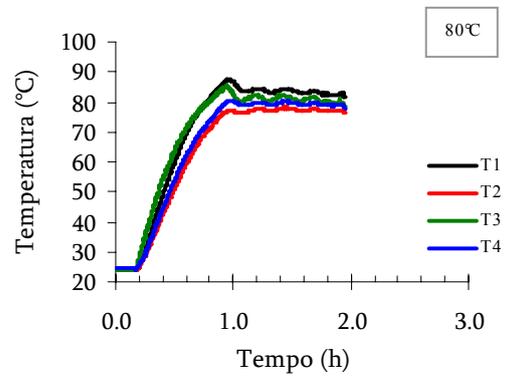
(b1)



(b2)



(c1)



(c2)

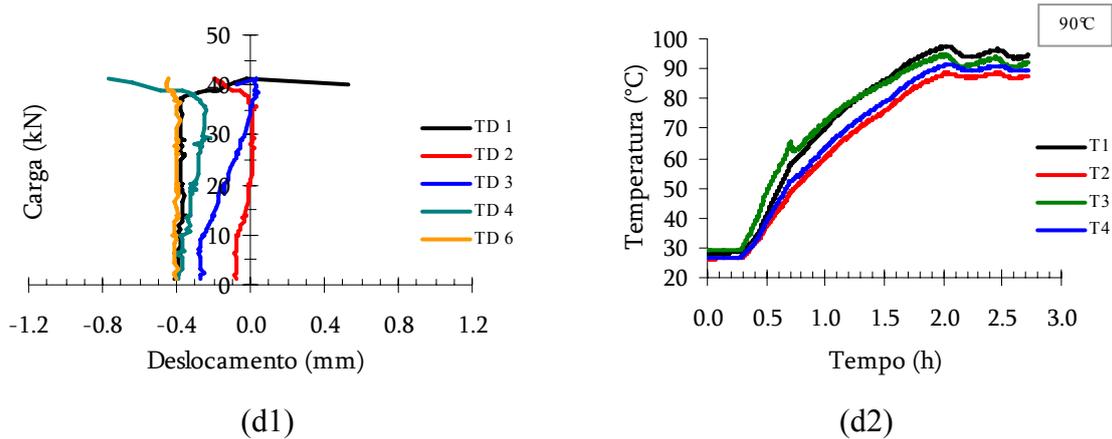


Figura 4.40 – Resultados dos ensaios de compressão para colunas pultrudadas compostas de resina poliéster isoftálica: (a) ensaio para temperatura de 60°C- (a1) deslocamentos medidos e (a2) registro da temperatura; (b) ensaio para temperatura de 70°C- (b1) deslocamentos medidos e (b2) registro da temperatura; (c) ensaio para temperatura de 80°C- (c1) deslocamentos medidos e (c2) registro da temperatura; (d) ensaio para temperatura de 90°C- (d1) deslocamentos medidos e (d2) registro da temperatura.

Pelos resultados apresentados nas Figuras 4.40 e 4.41 é possível observar a grande influência da temperatura na resistência das colunas pultrudadas ensaiadas, com considerável redução com o aumento da temperatura. Na Tabela 4.19 e na Tabela 4.20 estão resumidos os resultados da resistência à compressão para as colunas testadas.

Tabela 4.19 – Resultados experimentais da resistência à compressão de colunas pultrudadas compostas de resina éster vinílica: ensaios C1 a C5 Ester.

Resistência à compressão	
Éster vinílico	
Temperatura (°C)	Carga máxima de compressão (P_u) (kN)
Ambiente	170
60	119
70	87
80	42
90	37

Tabela 4.20 – Resultados experimentais da resistência à compressão de colunas pultrudadas compostas de resina poliéster isoftálica: ensaios C1 a C5 Iso.

Resistência à compressão	
Poliéster isoftálica	
Temperatura (°C)	Carga máxima de compressão (P_u) (kN)
Ambiente	127
60	62
70	48
80	44
90	41

O efeito do aumento da temperatura na resistência a compressão das colunas pultrudadas mostradas nas Tabelas 4.19 e 4.20 é apresentado, de forma paramétrica, na Figura 4.41. Foi possível observar que as colunas pultrudadas compostas de resina poliéster isoftálica sofreram importante redução da resistência para temperaturas de 60 e 70°C (51% e 61%, respectivamente). Para as colunas compostas de resina éster vinílica, os resultados mostraram uma menor redução da resistência para as temperaturas mais baixas (30% para 60°C e 49% para 70°C), invertendo essa tendência para as temperaturas mais altas, registrou-se 75% e 78% de redução da resistência para as temperaturas de 80 e 90°C, respectivamente.

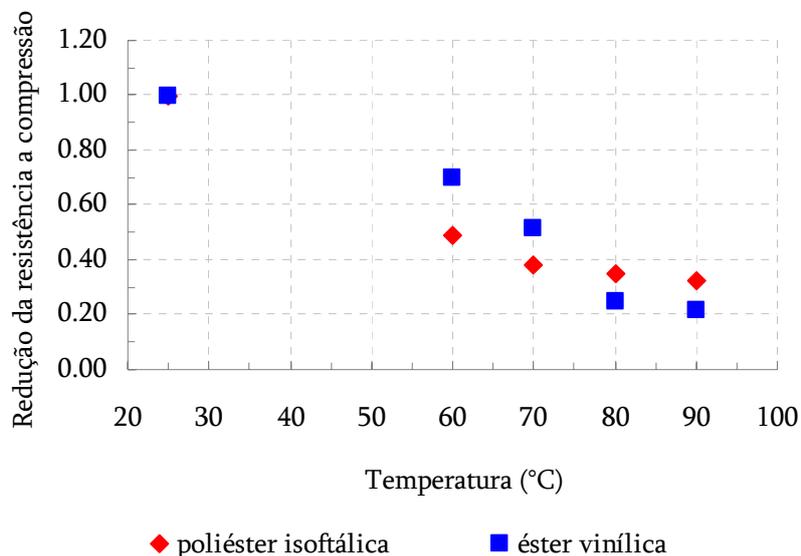


Figura 4.41 – Redução da resistência à compressão das colunas pultrudadas ensaiadas.

Finalmente, foram realizados quatro ensaios para verificação da presença de deformação lenta à compressão e sob alta temperatura. A seguinte metodologia foi adotada: força aplicada em níveis, de 40 a 80%, da força máxima (resistência) registrada nos ensaios anteriores e foi mantida constante durante aproximadamente duas horas. Foram escolhidas duas temperaturas, 60 e 80°C, para a realização destes ensaios.

Na Figura 4.42 e na Figura 4.43 são apresentados os resultados dos ensaios de deformação lenta para temperatura de 60 e 80°C dos perfis compostos de resina éster vinílico e nas Figuras Figura 4.44 e Figura 4.45 são apresentados os resultados para perfis compostos de resina poliéster isoftálica, considerando:

P_u – carga máxima de compressão (Tabela 4.19 e 4.20);

P_a – carga aplicada

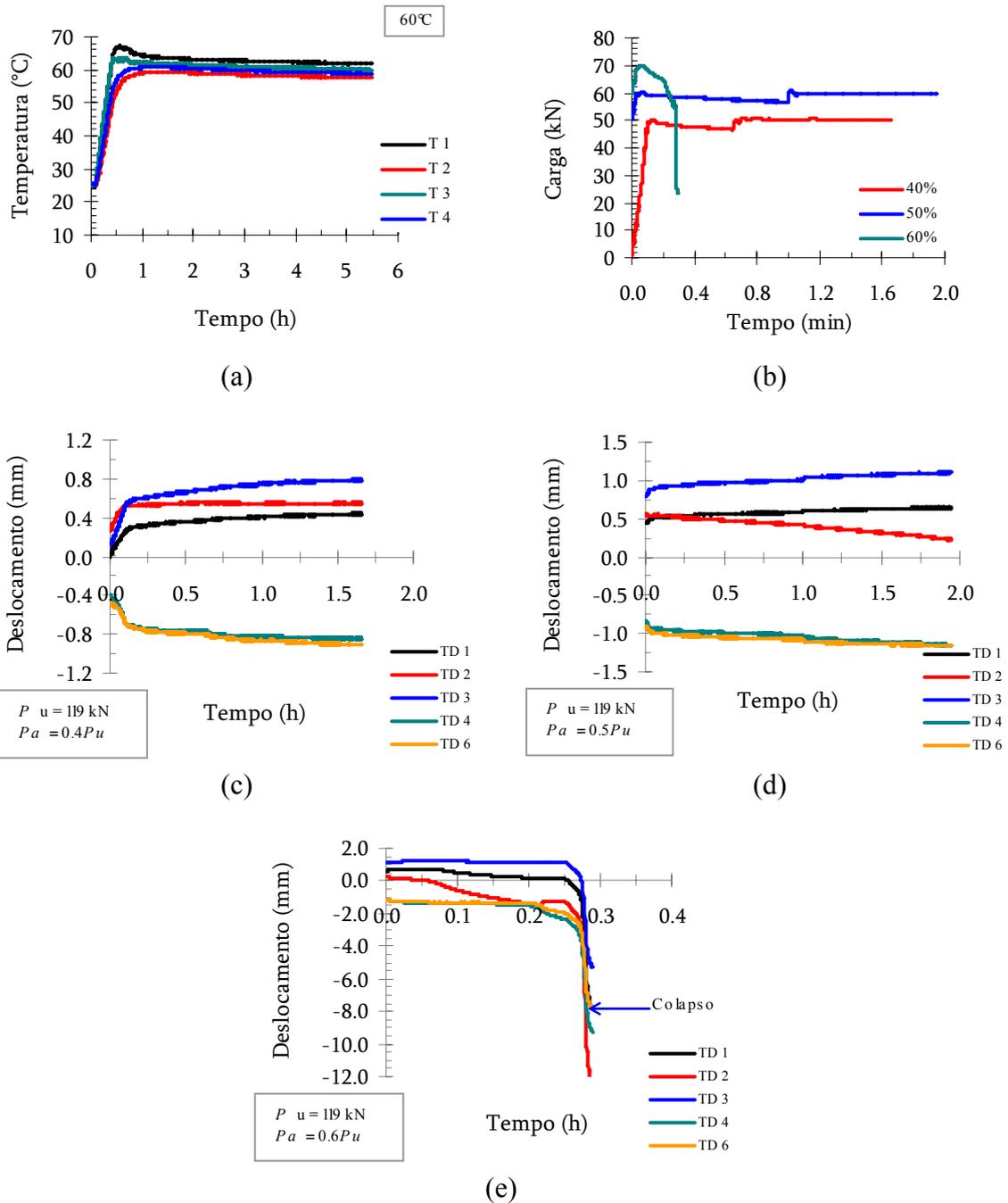


Figura 4.42 - Resultados do ensaio CDL6_Ester de deformação lenta à temperatura de 60°C: (a) registro da temperatura durante ensaio; (b) registro da carga aplicada; (c) a (e) deslocamentos transversal medidos para carga de compressão igual a de 40%, 50% e 60% da carga máxima de colapso (experimental).

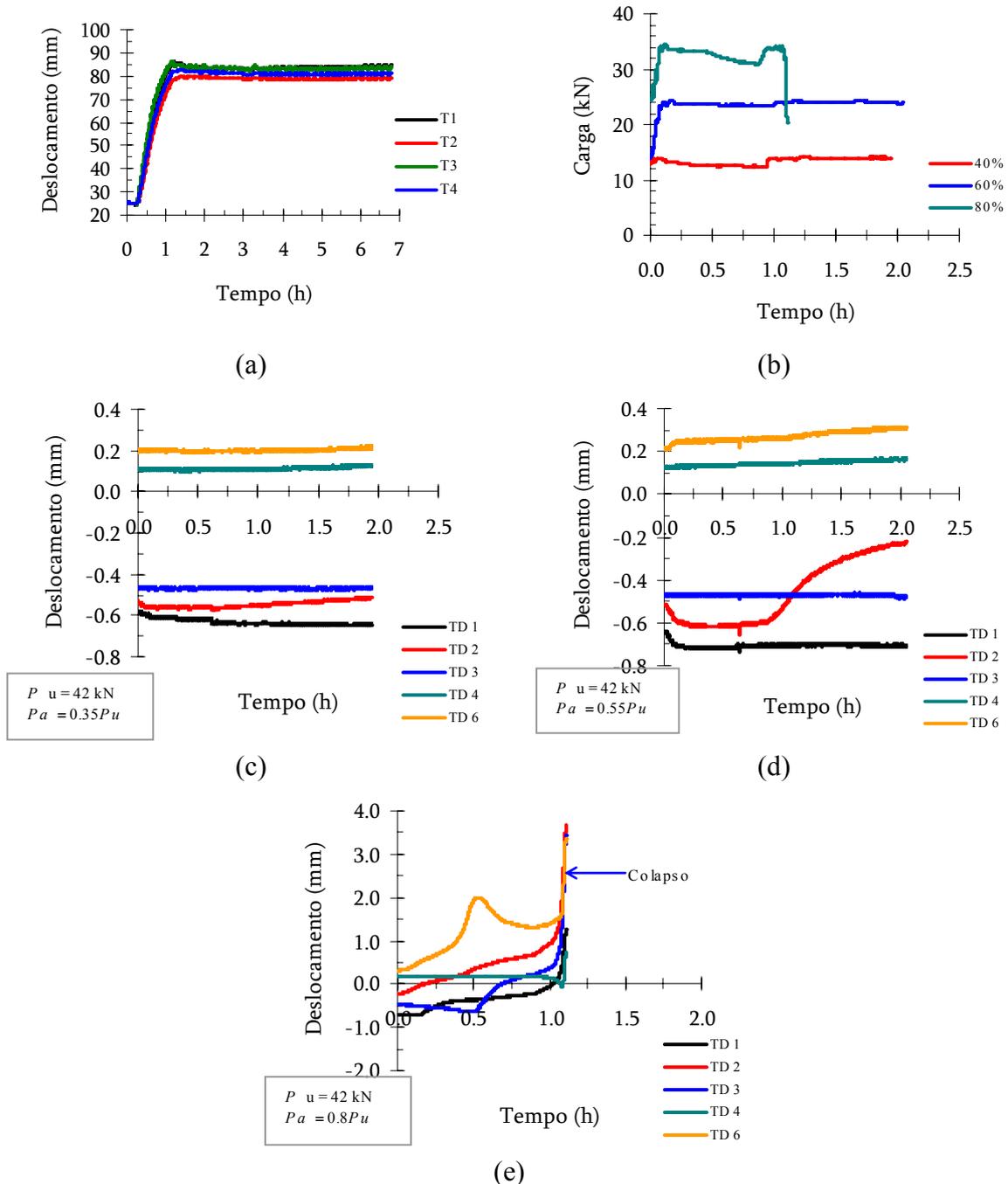


Figura 4.43 – Resultados do ensaio CDL7_Ester de deformação lenta à temperatura de 80°C: (a) registro da temperatura durante ensaio; (b) registro da carga aplicada; (c) a (e) deslocamentos transversais medidos para carga de compressão igual à de 35%, 55% e 80% da carga máxima de colapso (experimental).

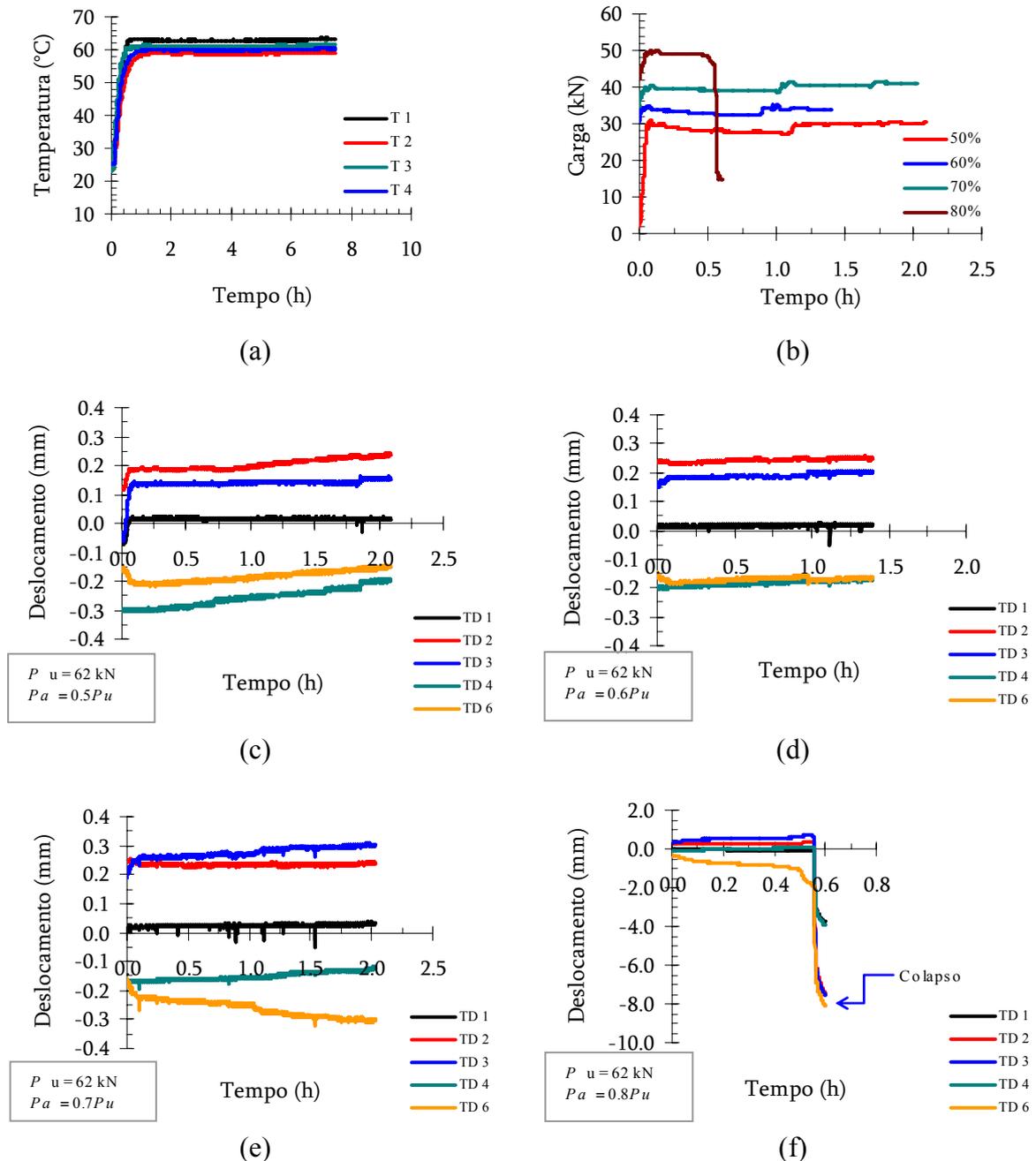


Figura 4.44 – Resultados do ensaio CDL6_Iso de deformação lenta à temperatura de 60°C: (a) registro da temperatura durante ensaio; (b) registro da carga aplicada; (c) a (f) deslocamentos transversais medidos para carga de compressão igual à de 50%, 60% 70% e 80% da carga máxima de colapso (experimental).

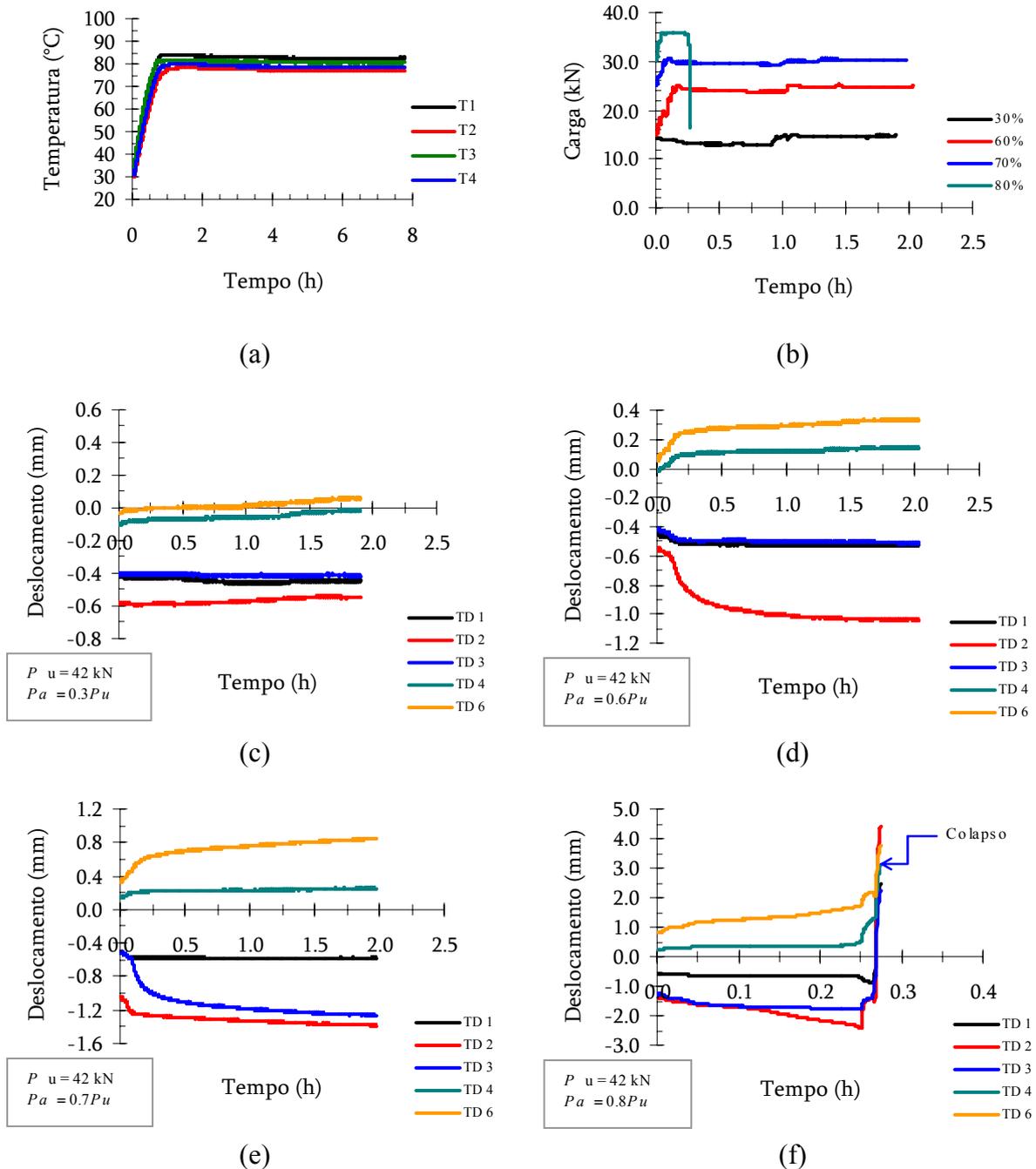


Figura 4.45 – Resultados do ensaio CDL7_Iso de deformação lenta à temperatura de 80°C: (a) registro da temperatura durante ensaio; (b) registro da carga aplicada; (c) a (f) deslocamentos transversais medidos para carga de compressão igual à de 30%, 60% 70% e 80% da carga máxima de colapso (experimental).

Pode se concluir dos resultados apresentados acima que houve a deformação lenta em todos os ensaios realizados e praticamente em todos os níveis de carga. Isso mostra a grande influência da temperatura nesses perfis pultrudados.

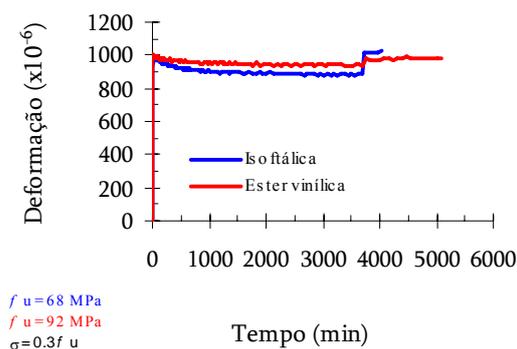
4.4. Ensaios de Deformação Lenta

Neste item serão apresentados os resultados dos ensaios de deformação lenta a tração e a compressão a temperatura ambiente de corpos de prova de perfis pultrudados.

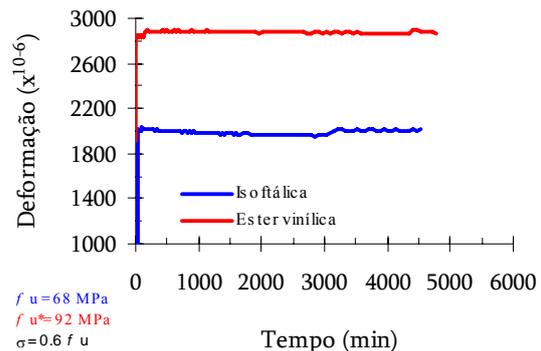
4.4.1. Deformação Lenta na Compressão a Temperatura Ambiente

Foram realizados ensaios para quatro níveis de força aplicada constante: 30, 60, 90 e 100% da força máxima (resistência) registrada nos ensaios anteriores. Ensaios prévios de compressão simples indicaram resistência f_u igual a 68 MPa e 92MPa, para resina poliéster isoftálica e éster vinílica, respectivamente. Os valores de resistência são calculados pela razão entre a força máxima de compressão e a área da seção transversal, valores esses medidos experimentalmente.

As deformações foram obtidas através de dois extensômetros elétricos de resistência posicionados a meia altura do vão ($L = 600$ mm), na linha média de cada uma das mesas, conforme apresentado na Figura 3.25. A Figura 4.46 apresenta os resultados dos ensaios de deformação lenta a temperatura ambiente para os diferentes níveis de força aplicada. As medidas das deformações apresentadas nos gráficos são a média dos dois extensômetros



(a)



(b)

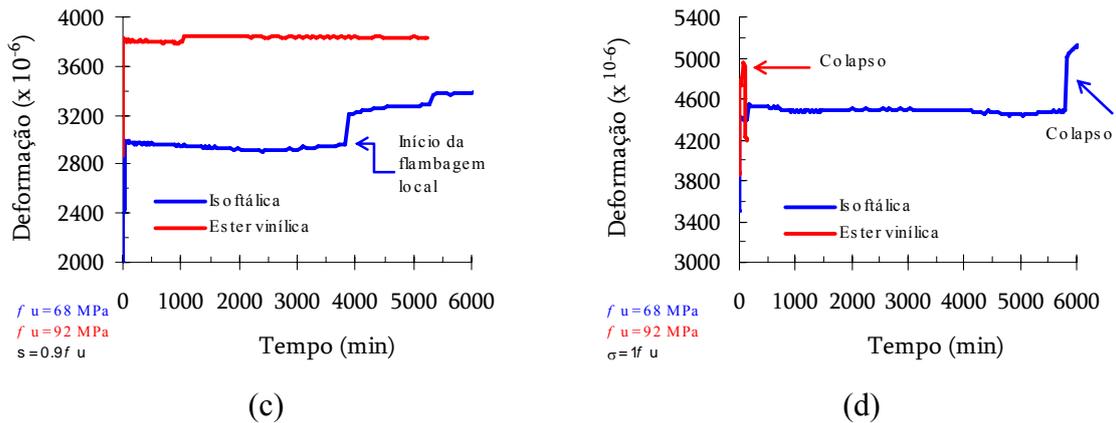


Figura 4.46 – Resultados dos ensaios de deformação lenta a temperatura ambiente: (a) deformações medidas para 30% da carga máxima de colapso; (b) deformações medidas para 60% da carga máxima de colapso; (c) deformações medidas para 90% da carga máxima de colapso; (d) deformações medidas a carga máxima de colapso.

Para o nível de carga aplicada em 30% de P_u as deformações foram similares para os dois tipos de compósitos, conforme é mostrado na Figura 4.47(a). No entanto, para carga aplicada de 60 e 90% houve diferença significativa nos valores de deformação, o que pode ser atribuído à diferença de resistência mecânica das duas matrizes poliméricas (Figuras 4.47 (b) e (c)). Foi observada flambagem local para o perfil pultrudado composto de resina poliéster isoftálica após a aplicação de 90% da carga resistente. Essa flambagem não se iniciou no instante da aplicação da carga e sim após aproximadamente 4000 minutos. Não foi observado o mesmo fenômeno para o perfil pultrudado composto de resina éster vinílica (ver Figura 4.47(c)). Este comportamento pode sugerir a ocorrência de deformação lenta do perfil. Entretanto, como o valor da carga é muito elevado e não há tendência de aumento de deformação antes do colapso, considerou-se a inexistência da deformação lenta para o perfil composto de resina poliéster isoftálica. Após a aplicação de 100% da carga resistente, ocorreu o colapso dos dois perfis. Para o perfil pultrudado composto de resina éster vinílica, o colapso ocorreu imediatamente após a aplicação da carga. Já o perfil composto de resina poliéster isoftálica, que apresentava flambagem local desde o momento da aplicação da carga de 90%, permaneceu neste estado e foi ao colapso após aproximadamente 6000 minutos, como ilustra a Figura 4.47(d). O modo de colapso de ambos os perfis pultrudados pode ser visto na Figura 4.47 e na Figura 4.48. De acordo com os resultados, verifica-se que não foi constatada deformação lenta à compressão para os perfis pultrudados investigados.

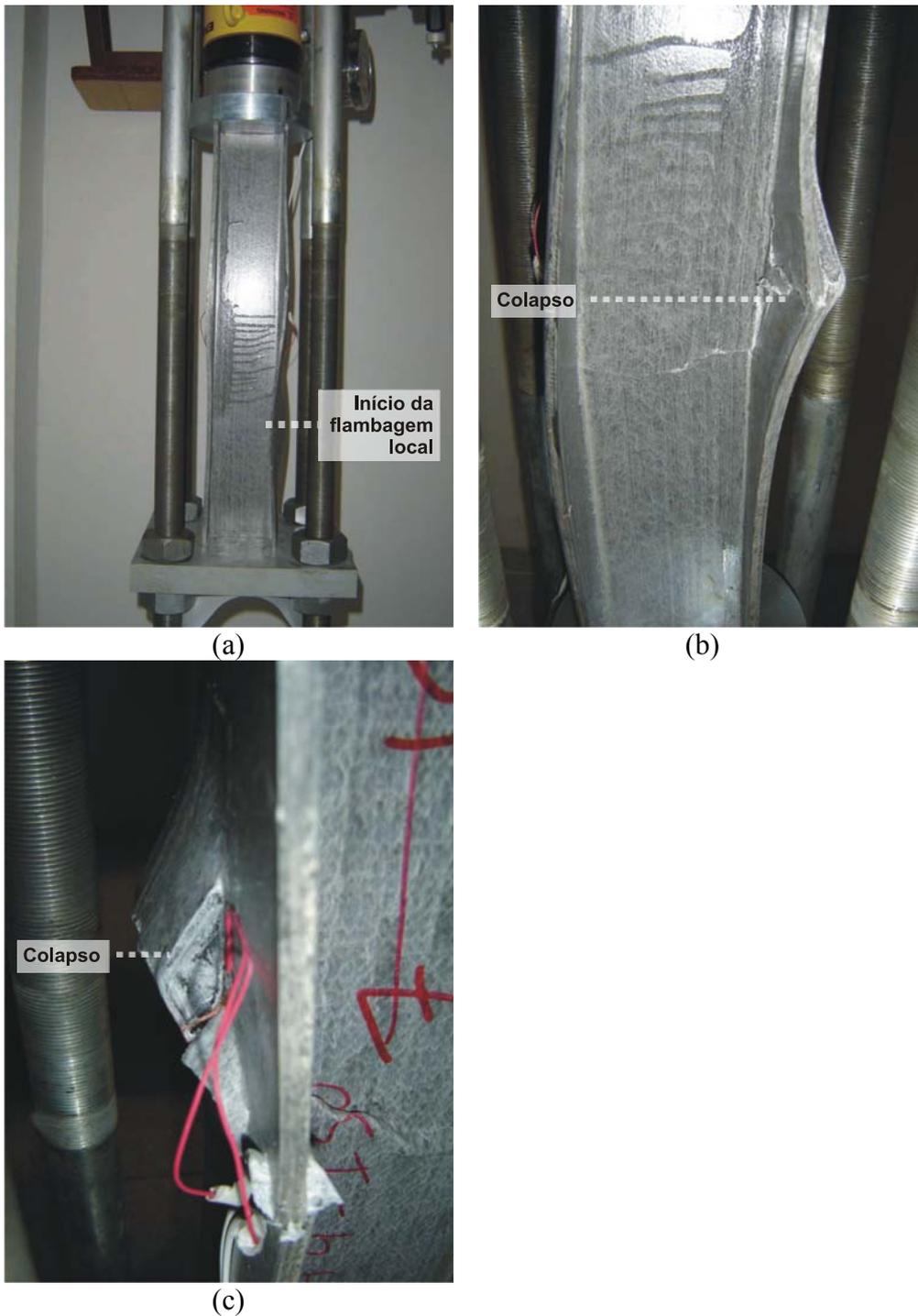


Figura 4.47 – Colapso do perfil pultrudado composto de resina poliéster isoftálica à temperatura ambiente: (a) início da flambagem local; (b) e (c) colapso da peça após aproximadamente 6000 minutos.

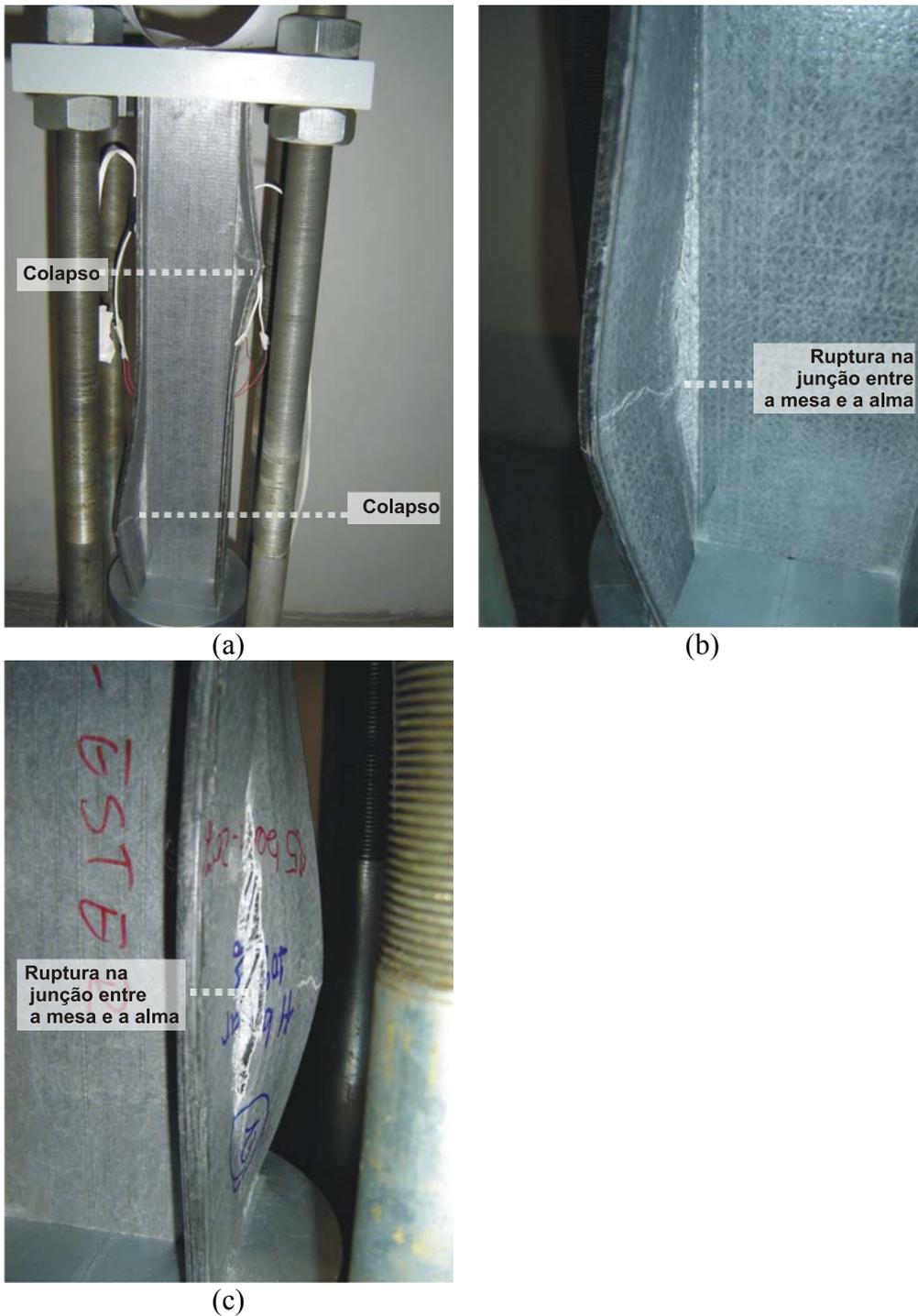


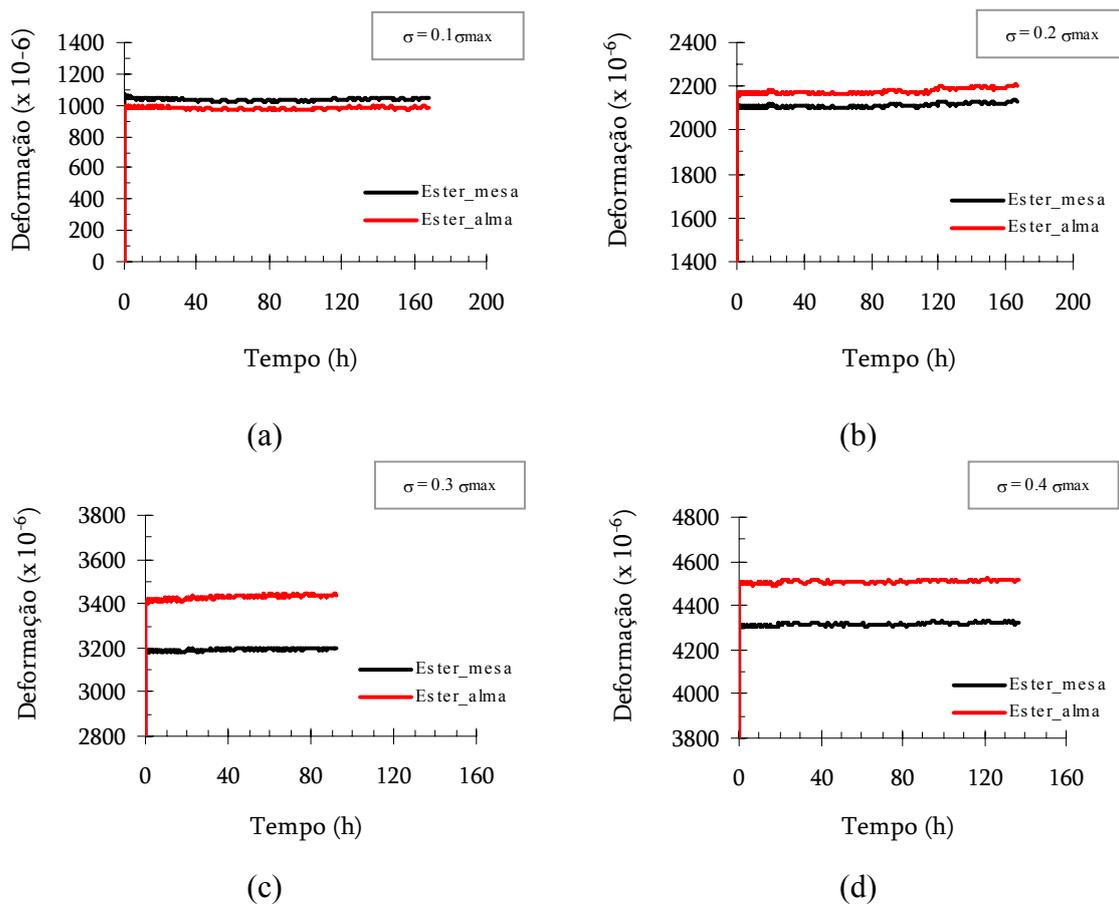
Figura 4.48 – Colapso do perfil pultrudado composto de resina éster vinílica à temperatura ambiente: (a) corpo de prova após colapso; (b) e (c) ruptura do material na junção entre a mesa e a alma.

4.4.2. Deformação Lenta na Tração a Temperatura Ambiente

Para os ensaios de deformação lenta a tração foram utilizados corpos de prova extraídos da mesa e da alma dos perfis pultrudados em estudo, de acordo com a Figura 3.20. Foram realizados ensaios para oito níveis de tensão aplicada σ : 10 a 80% da tensão máxima σ_{\max} obtida nos ensaios de tração simples, diferenciando as tensões máximas da mesa e da alma, de acordo com as Tabelas 4.10 e 4.11.

As deformações foram medidas com dois extensômetro elétricos de resistência posicionados a meia altura do vão ($L = 380$ mm), conforme apresentado na Figura 3.23.

A Figura 4.49 apresenta os resultados dos ensaios de deformação lenta a tração à temperatura ambiente para os diferentes níveis de tensão aplicada. As medidas das deformações apresentadas nos gráficos são a média dos dois extensômetros.



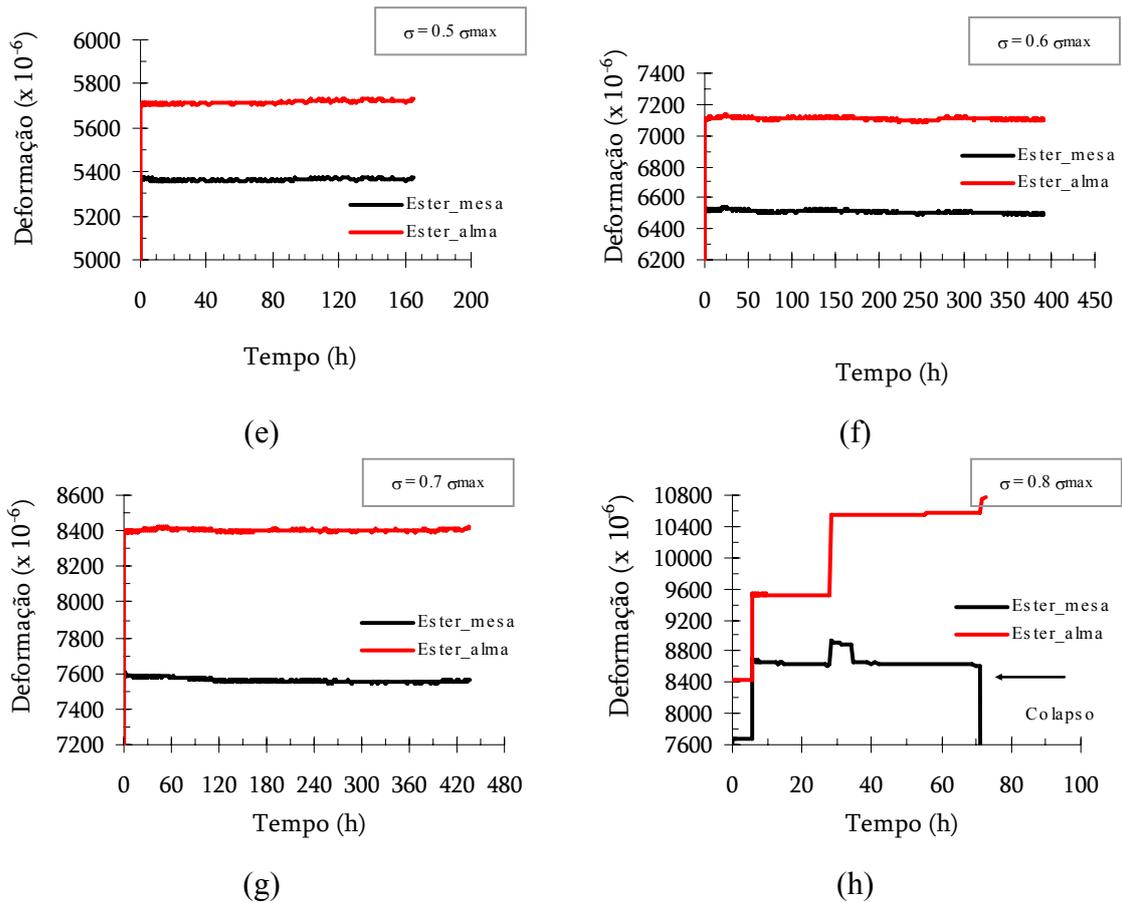
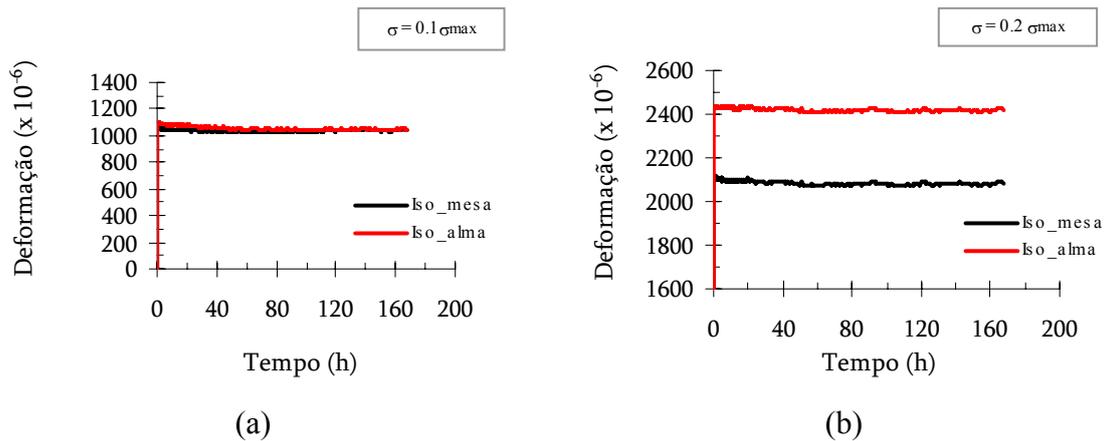


Figura 4.49 – Resultados dos ensaios de deformação lenta a tração de corpos de prova de perfis pultrudados compostos de resina éster vinílica para força de tração equivalente a 10 a 80% da tensão máxima σ_{max} obtida previamente dos ensaios de tração simples. Corpos de prova extraídos da mesa e da alma da seção H.



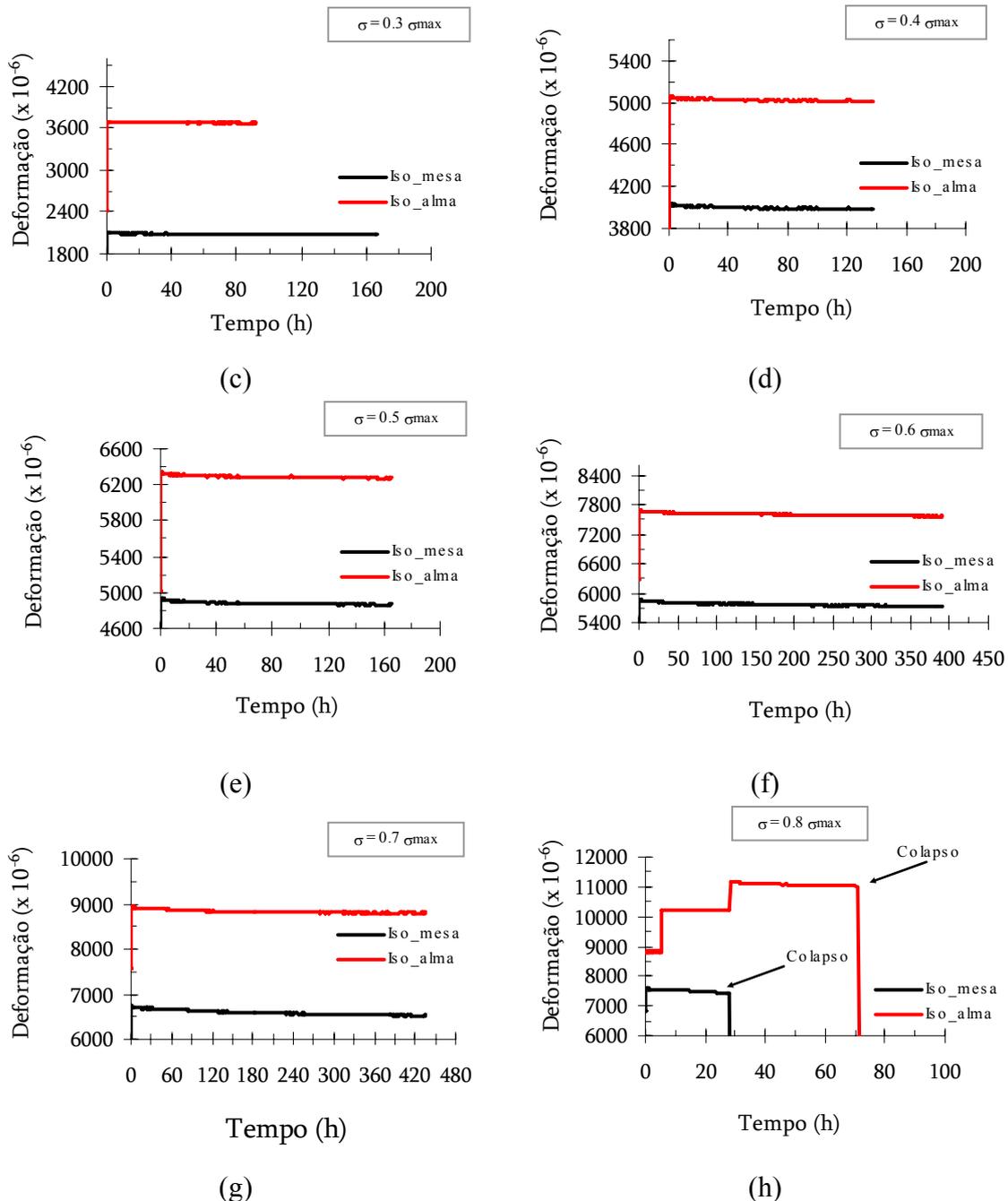


Figura 4.50 – Resultados dos ensaios de deformação lenta a tração de corpos de prova de perfis pultrudados compostos de resina poliéster isoftálica para força de tração equivalente a 10 a 80% da tensão máxima σ_{max} obtida previamente dos ensaios de tração simples. Corpos de prova extraídos da mesa e da alma da seção H.

Para tensão aplicada de 10% da tensão máxima experimental as deformações da mesa e alma foram similares para os dois tipos de compósitos, permanecendo para o compósito de resina éster vinílica deformações similares também para uma tensão de 20%, conforme é mostrado nas Figuras 4.50 (a) e (b) e 4.51 (a). Para tensões aplicada de 20 a 80%, nos corpos de prova dos perfis compostos de resina poliéster isoftálica houve uma diferença significativa nos valores de deformação entre a mesa e a alma. (Figuras

4.51 (b) a (h)), da mesma forma, nos corpos de prova de perfis compostos de resina éster vinílica a diferença dos valores de deformação entre a mesa e alma foi entre as tensões de 30 e 80% (Figuras 4.50 (c) a (h)). Essa diferença nos valores de deformação pode ser atribuída às diferenças entre a fração volumétrica de fibras na mesa e na alma.

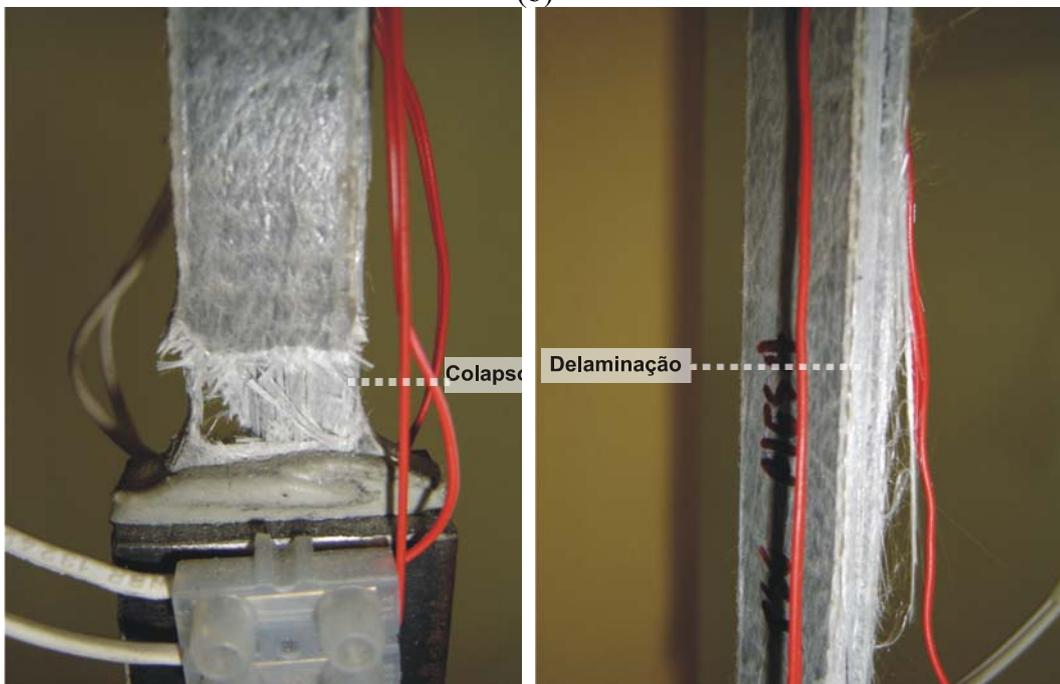
Após a aplicação de 80% da tensão máxima experimental, ocorreu o colapso dos corpos de prova dos dois compósitos, exceto para o corpo de prova retirado da alma do perfil composto de resina éster vinílica, conforme é apresentado nas Figuras 4.50 (h) e 4.51 (h). O colapso dos corpos de prova não ocorreu imediatamente após a aplicação da tensão de 80% e sim após várias horas de ensaio. Apesar disso, não se verificou indícios de que o colapso tenha ocorrido por deformação lenta, uma vez que não houve tendência de aumento progressivo da deformação antes do colapso. O modo de colapso dos corpos de prova pode ser visto na Figura 4.51. De acordo com os resultados obtidos verifica-se que não houve deformação lenta à tração para ambos os compósitos.



(a)



(b)



(c)

(d)

Figura 4.51 - Colapso dos corpos de prova do ensaio de deformação lenta a tração e a temperatura ambiente; (a) vista da ruptura do corpo de prova; (b) detalhe a ruptura; (c) colapso do corpo de prova; (d) ruptura por delaminação.

4.5. Análise Microestrutural da Ruptura

O material tem características mecânicas frágeis, sem ductilidade, conduzindo então a mecanismos de colapso brusco.

Segundo Chawla [4], o colapso dos compósitos está associado com as características das fibras, da matriz e da interface. Especificamente, os deslocamentos relativos fibra-matriz, o arrancamento das fibras, a ruptura das fibras, além das fissuras

e ruptura da matriz, contribuem para o mecanismo de colapso da estrutura do material. Pela Figura 4.52 pode-se acompanhar os mecanismos de colapso associados aos ensaios de flexão simples e de compressão centrada executados, em que se observam rupturas das fibras, bem como deslocamento (fibra-resina) e arrancamentos de tais fibras.

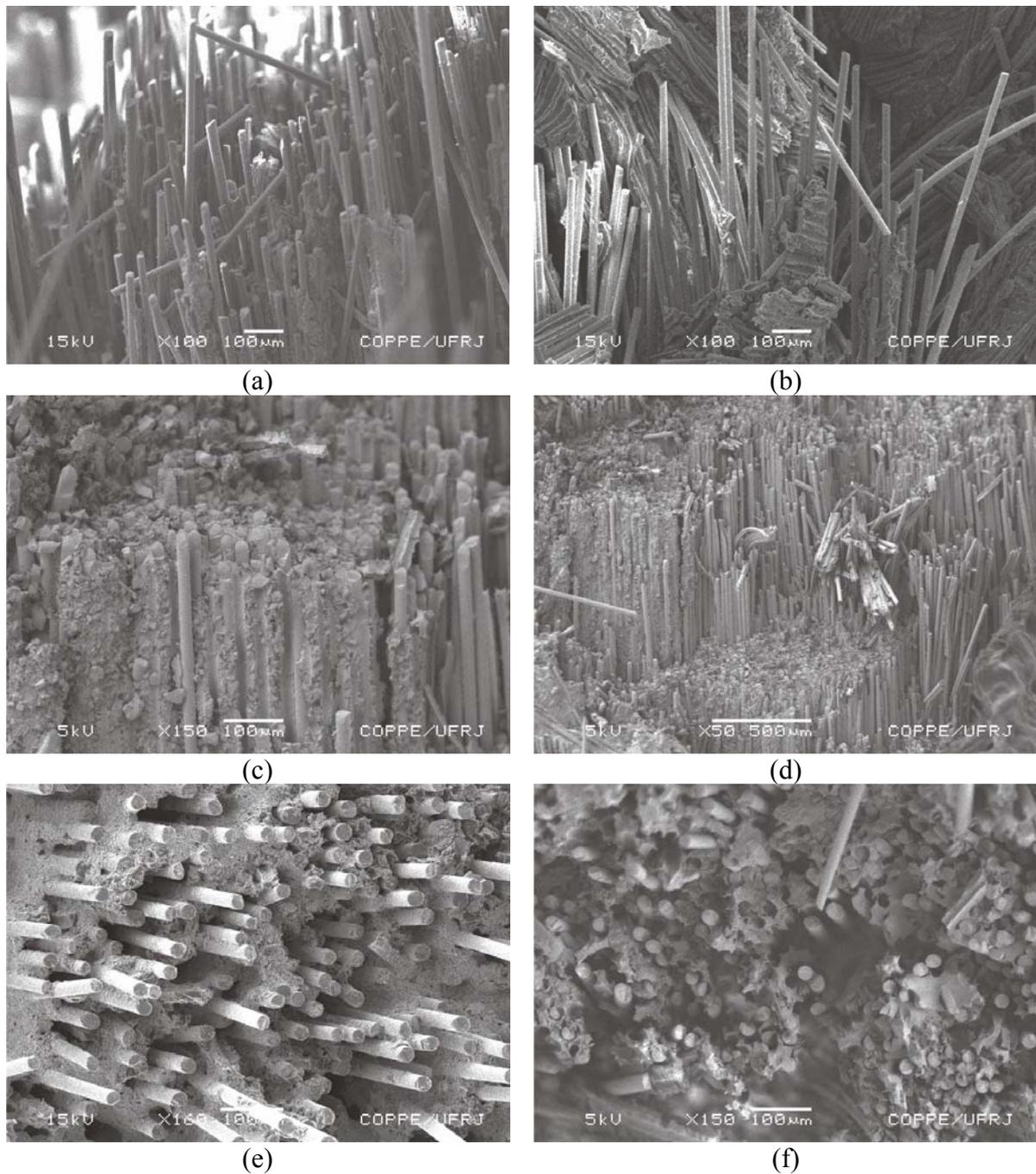
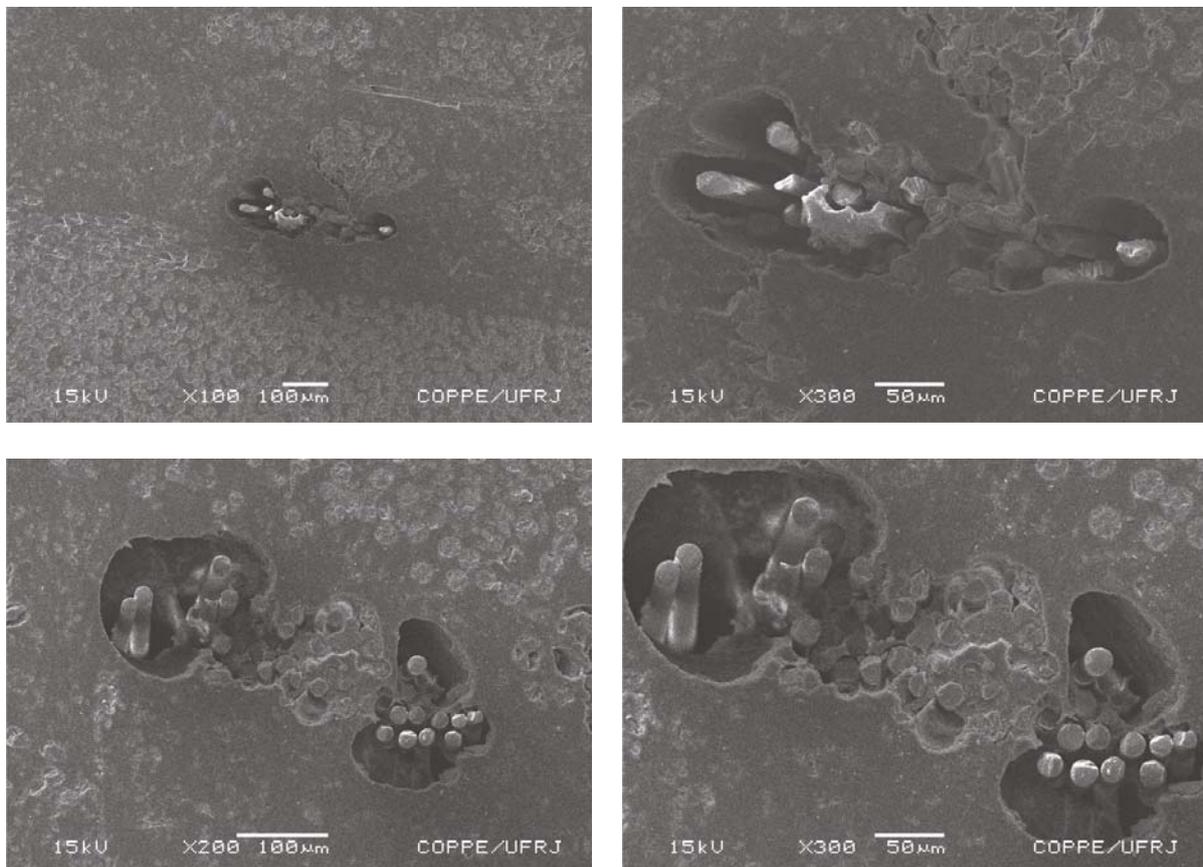


Figura 4.52 – Fotomicrografias das superfícies de ruptura dos perfis pultrudados ensaiados, obtidas por MEV.

O defeito mais comum no processo de fabricação de perfis pultrudados é o volume de vazios, os quais podem influenciar no mecanismo de colapso e no desempenho da estrutura. Na Figura 4.53 são apresentadas as regiões de vazios encontrados nos perfis em estudo. Essas regiões de vazios indicam insuficiência localizada de resina impedindo o desempenho eficiente das fibras. Essas aberturas no volume do material levam adicionalmente, a concentrações de tensões que seguramente colaboram para o desenvolvimento de fissuras durante o processo de carregamento mecânico do elemento estrutural, constituindo regiões frágeis no volume do material, sensíveis à iniciação prematura do processo de colapso localizado.



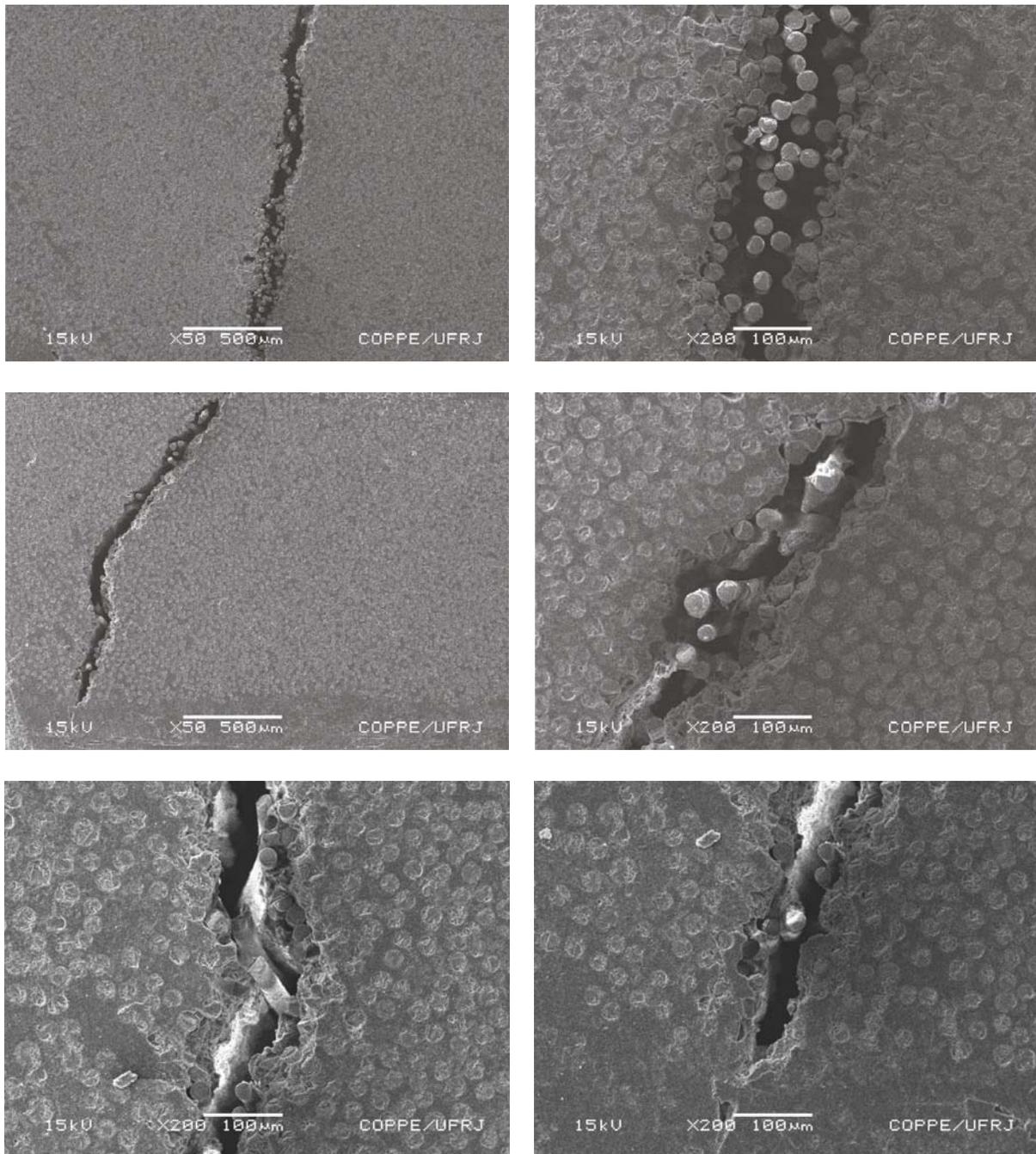


Figura 4.53 – Fotomicrografias da região de vazios dos perfis pultrudados ensaiados (as imagens foram obtidas por MEV).

5. Análise Teórica da Resistência dos Perfis Pultrudados

Neste capítulo são apresentados resultados da previsão teórica da resistência dos perfis pultrudados. Para essas análises foram utilizados programas computacionais com base nos métodos dos elementos finitos e das faixas finitas para a análise da flambagem elástica. Os resultados obtidos são comparados com os resultados experimentais.

5.1. Análise Computacional da Flambagem

A resolução de problemas de flambagem de perfis de seção aberta (perfis pultrudados) pode ser obtida com o auxílio de programas baseados em métodos numéricos, como elementos finitos, MEF, e métodos das faixas finitas, MFF. Esses métodos permitem a obtenção da carga crítica e do modo de flambagem dominante, para materiais isotrópicos ou ortotrópicos.

O método das faixas finitas recorre à solução por discretização do contínuo e à prescrição dos modos de flambagem associados a um determinado comprimento da barra. Os modos de flambagem podem ser identificados com precisão, desde que a seção transversal seja representada por discretização adequada, permitindo, em especial, a identificação dos modos: (a) localizados, típicos de placas e relevantes para barras

curtas, (b) distorcionais da seção, que podem ser dominantes para comprimentos intermediários da barra e, finalmente, (c) globais, incluindo os de flexão (Euler), de torção e de flexo-torção.

Para perfis abertos do tipo estudado, com seção H, o MFF apresenta inúmeras vantagens em relação à MEF, desde que dispensa a discretização de todo o perfil, sendo apenas necessário definir a seção transversal e executar a solução de autovalores para os comprimentos da barra que julgar suficiente para a completa identificação dos fenômenos de flambagem elástica. A solução do problema para inúmeros comprimentos de barra torna-se viável e expedita devido ao fato do MFF gerar um problema com uma dimensão muito pequena (graus de liberdade) se comparado ao MEF.

Através do MEF, podem ser analisados perfis com diversas características geométricas, diversos comprimentos, diferentes condições de extremidade (vínculos) e diversos tipos de solicitações. O programa computacional SAP 2000 [31] foi adotado para análises de flambagem, utilizando-se para isso elementos de casca (shell-thick plate).

Na Figura 5.1 é apresentada a discretização do perfil H adotado na presente pesquisa para os dois métodos e na Tabela 5.1 é apresentada a diferença na dimensão do problema a ser resolvido pelos dois métodos. Em ambos os casos, MEF e MFF, a solução obtida considerou as seguintes condições de extremidade: modo de flexão de barras livre, modo de torção da barra impedido, modo de flexão fora do plano de placa livre.

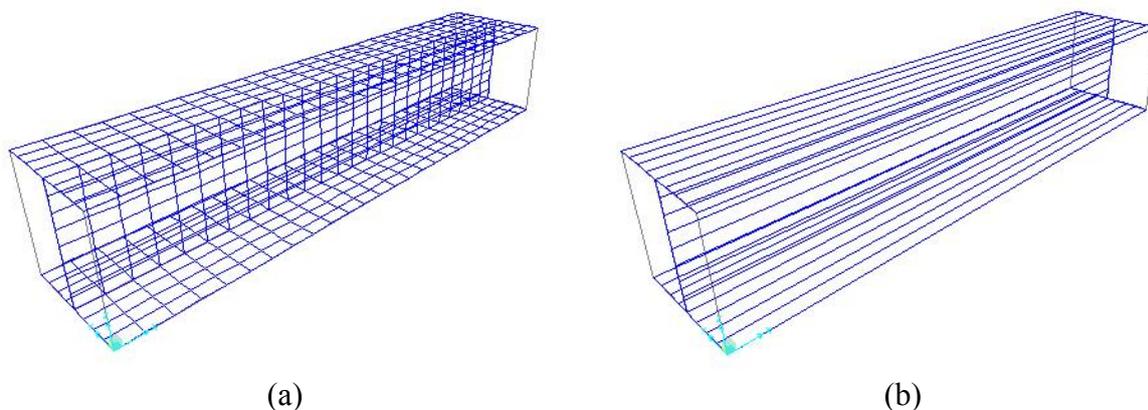


Figura 5.1 – Discretização de perfis de chapa fina: (a) Método dos elementos finitos, MEF; (b) Método das faixas finitas, MFF.

Tabela 5.1 – Comparação do número de graus de liberdade para análises feitas por MFF e MEF.

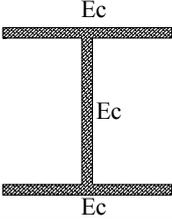
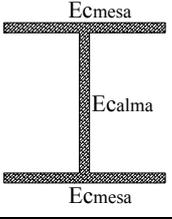
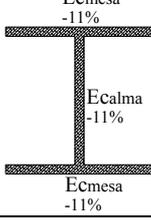
Seção H, L = 1200 mm		
	Nº de elementos	Nº de graus de liberdade
MFF	12	192
MEF	1800	10975

Obs: quanto maior o comprimento (L) maior será a diferença no número de graus de liberdade entre MFF e MEF.

O MFF se presta essencialmente para a análise de flambagem com condições de extremidade livres na flexão global (barra) e local (placa) e com empenamento livre. O programa computacional CUFSM [32] permite obter a carga crítica de flambagem e respectivos modos de flambagem (local de placa, distorcional, global) para seções abertas em geral, podendo-se considerar, ainda, material ortotrópico.

As análises numéricas utilizando o MEF (SAP 2000 –v8.2.5) e MFF (CUSFM – v2.6), foram realizadas para os três casos apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Descrição dos casos analisados pelo método MEF e MFF.

Caso	Módulo de elasticidade de compressão (longitudinal)	
Caso 1	Igual ao de tração ¹ , único módulo aplicado em toda seção transversal.	
Caso 2	Igual ao de tração ¹ , módulos distintos para mesa e alma.	
Caso 3	Inferior ao de tração ² , módulos distintos para mesa e alma.	

¹ Valor do módulo de elasticidade a tração obtido por ensaio de tração direta, Tabelas 4.11 e 4.12.

² O EUROCOMP sugere que o módulo de elasticidade a compressão seja considerado inferior ao valor do módulo de elasticidade a tração.

Essas análises foram feitas para os dois tipos de resinas utilizadas nos ensaios experimentais (éster vinílico e poliéster isoftálica). Os resultados computacionais foram comparados com os resultados experimentais obtidos

As análises foram realizadas para as temperaturas: ambiente, 60°C, 70°C, 80°C e 90°C, para compressão centrada e para flexão simples.

Dos ensaios de compressão centrada realizados foi possível estimar a redução da resistência desses perfis pultrudados com o aumento da temperatura, conforme é apresentado na Figura 4.41. A partir desses resultados, foram feitas estimativas da redução do módulo de elasticidade de compressão (longitudinal) para cada temperatura, possibilitando assim incluir esse efeito nas análises computacionais.

Considerando os perfis pultrudados como materiais ortotrópicos, as propriedades do material listadas abaixo foram utilizadas para alimentar os programas SAP 200 e CUFSM:

E_l – módulo de elasticidade na direção longitudinal do perfil;

E_t – módulo de elasticidade na direção transversal do perfil;

G – módulo de elasticidade ao cisalhamento;

ν_l – coeficiente de Poisson longitudinal;

ν_t – coeficiente de Poisson transversal;

E_{l25} – obtidos através dos ensaios de tração direta a temperatura ambiente;

E_{t25} – valores estimados a partir de dados do EUROCOMP [9] (Tabela 4.11);

G_{25} – valores estimados a partir de dados do EUROCOMP [9] (Tabela 4.11);

ν_l e ν_t – valores retirados de dados do EUROCOMP [9] (Tabela 4.11);

E_{l60} , E_{t60} , G_{60} – redução de 30 % e 51% do E_{l25} , E_{t25} , G_{25} para as resinas ester vinílico e isoftálica, respectivamente (conforme a Figura 4.41).

E_{l70} , E_{t70} , G_{70} – redução de 49 % e 61% do E_{l25} , E_{t25} , G_{25} para as resinas ester vinílico e isoftálica, respectivamente (conforme a Figura 4.41).

E_{l80} , E_{t80} , G_{80} – redução de 75 % e 65% do E_{l25} , E_{t25} , G_{25} para as resinas ester vinílico e isoftálica, respectivamente (conforme a Figura 4.41).

$E_{l 90}, E_{t 90}, G_{90}$ – redução de 78 % e 67% do $E_{l 25}, E_{t 25}, G_{25}$ para as resinas éster vinílica e isoftálica, respectivamente (conforme a Figura 4.41).

No caso da flexão simples, não foi obtida a redução da resistência dos perfis com o aumento da temperatura. No entanto, com os ensaios realizados foi possível estimar o valor da redução do módulo de elasticidade aparente na flexão, possibilitando assim incluir esse efeito nas análises computacionais. As análises foram realizadas somente para o Caso 3 apresentado na Tabela 5.2.

Da mesma forma que para a compressão centrada os perfis pultrudados foram analisados como materiais ortotrópicos na flexão. As mesmas propriedades do material utilizadas nas análises numéricas para a compressão centrada foram utilizadas nas análises a flexão com exceção dos valores dos módulos de elasticidade a altas temperaturas (longitudinal, transversal e de cisalhamento) em que foram atribuídas as reduções:

$E_{l 60}, E_{t 60}, G_{60}$ – redução de 10 % e 60% do $E_{l 25}, E_{t 25}, G_{25}$ para as resinas éster vinílica e isoftálica, respectivamente.

$E_{l 70}, E_{t 70}, G_{70}$ – redução de 20 % do $E_{l 25}, E_{t 25}, G_{25}$ para a resina éster vinílica.

$E_{l 80}, E_{t 80}, G_{80}$ – redução de 30 % do $E_{l 25}, E_{t 25}, G_{25}$ para a resina éster vinílica.

$E_{l 90}, E_{t 90}, G_{90}$ – redução de 50 % do $E_{l 25}, E_{t 25}, G_{25}$ para a resina éster vinílica.

As análises com temperaturas de 70, 80 e 90°C para perfis compostos de resina poliéster isoftálica não foram realizadas, pois não foi possível, pelos resultados experimentais, estimar a redução do módulo de elasticidade aparente na flexão.

5.2. Resultados para a Compressão Centrada

Caso 1:

Módulo elasticidade de compressão (longitudinal) igual ao módulo de elasticidade à tração (longitudinal), obtido através dos ensaios de tração direta. Um único módulo aplicado em toda a seção transversal do perfil. Na Tabela 5.3 e na Tabela 5.4 são apresentados os parâmetros de entrada dos programas SAP 2000 e CUSFM.

Tabela 5.3 – Propriedades do material adotadas nas análises pelo MEF e MFF, para os perfis pultrudados compostos de resina éster vinílica – Caso 1.

Propriedades	Temperatura (°C)				
	25	60	70	80	90
E_l (GPa)	22	15,4	11,22	5,5	4,84
E_t (GPa)	4,4	3,08	2,24	1,1	0,97
G (GPa)	4,4	3,08	2,24	1,1	0,97
ν_l	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
ν_t	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabela 5.4 – Propriedades do material adotadas nas análises pelo MEF e MFF, para os perfis pultrudados compostos de resina poliéster isoftálica – Caso 1.

Propriedades	Temperatura (°C)				
	25	60	70	80	90
E_l (GPa)	22	10,78	8,58	7,7	7,26
E_t (GPa)	4,4	2,15	1,71	1,54	1,45
G (GPa)	4,4	2,15	1,71	1,54	1,45
ν_l	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
ν_t	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Na Figura 5.2 e na Figura 5.3 são apresentados os resultados das análises computacionais e experimentais realizadas.

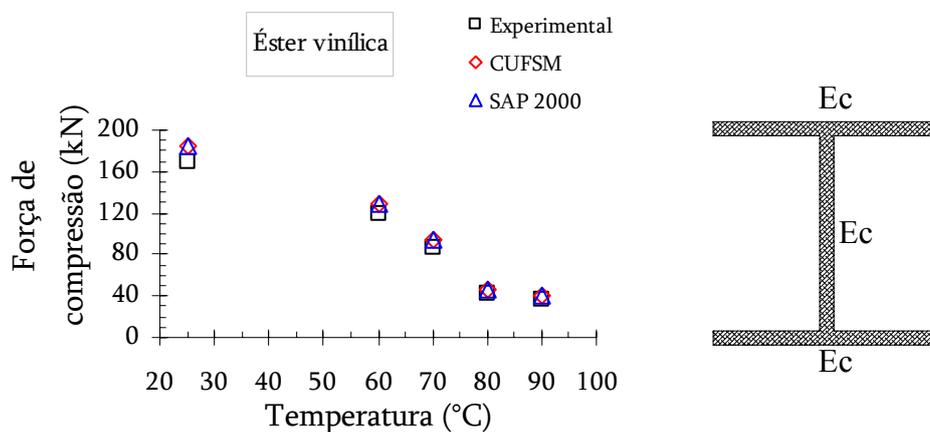


Figura 5.2 – Resultados das análises computacionais da flambagem e resultados experimentais da resistência para perfis pultrudados comprimidos, compostos de resina éster vinílica.

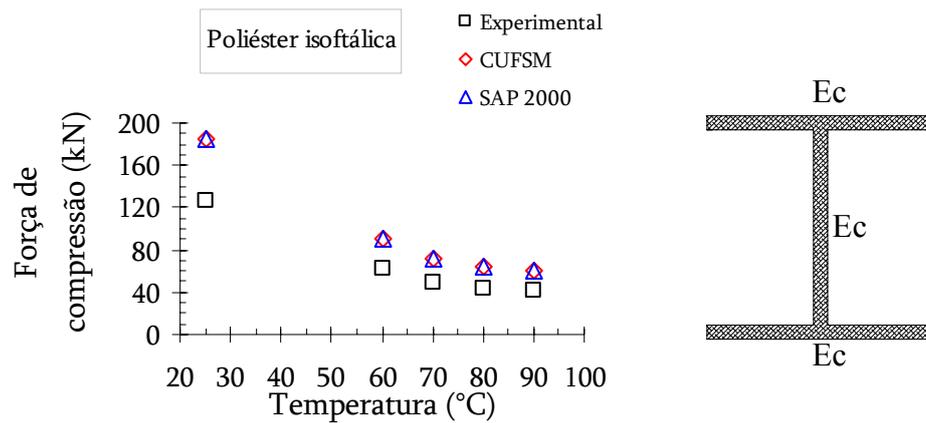


Figura 5.3 – Resultados das análises computacionais da flambagem e resultados experimentais da resistência para perfis pultrudados comprimidos, compostos de resina poliéster isoftálica.

Tabela 5.5 – Comparação entre os resultados das análises computacionais e experimentais, Caso 1.

Temperatura (°C)	Éster vinílica				Poliéster isoftálica			
	Força de compressão			Dif. Exp x MFF (%)	Força de compressão			Dif. Exp x MFF (%)
	MFF (kN)	MEF (kN)	Exp (kN)		MFF (kN)	MEF (kN)	Exp (kN)	
25	185	185	170	-8,1	185	182	127	-31,4
60	129	130	118	-8,5	91	91	62	-31,9
70	94	94	87	-7,4	72	72	48	-33,3
80	46	46	42	-8,7	65	65	44	-32,3
90	41	41	37	-9,8	61	61	41	-32,8

Pelas Figuras 5.2 e 5.3 e pela Tabela 5.5, pode ser observado que os resultados das análises computacionais, MEF (SAP 2000) e MFF (CUSFM), indicam praticamente os mesmos valores de cargas críticas. Já os resultados experimentais da carga máxima registrada (resistência) dos perfis pultrudados compostos de resina éster vinílica apresentam-se muito próximos das cargas críticas calculadas. Para perfis pultrudados compostos de resina poliéster isoftálica, por outro lado, a resistência experimental apresenta-se inferior às cargas críticas teóricas, cerca de 30%.

Caso 2:

Módulo de elasticidade de compressão (longitudinal) igual ao de tração (longitudinal), obtidos pelos ensaios de tração direta. Módulos distintos para mesa e

alma. Na Tabela 5.6 e na Tabela 5.7 são apresentadas as propriedades do material de entrada dos programas SAP 2000 e CUSFM.

Tabela 5.6 – Propriedades do material adotados nas análises pelo MEF e MFF, para os perfis pultrudados compostos de resina éster vinílica – Caso 2.

Propriedades	Temperatura (°C)				
	25	60	70	80	90
E_l (GPa) mesa	22	15,4	11,22	5,5	4,84
E_t (GPa) mesa	4,4	3,08	2,24	1,1	0,97
G (GPa) mesa	4,4	3,08	2,24	1,1	0,97
E_l (GPa) alma	15,0	10,5	7,65	3,75	3,3
E_t (GPa) alma	3,0	2,1	1,53	0,75	0,66
G (GPa) alma	3,0	2,1	1,53	0,75	0,66
ν_l	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
ν_t	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabela 5.7 – Propriedades do material adotados nas análises pelo MEF e MFF, para os perfis pultrudados compostos de resina poliéster isoftálica – Caso 2.

Propriedades	Temperatura (°C)				
	25	60	70	80	90
E_l (GPa) mesa	22	10,78	8,58	7,7	7,26
E_t (GPa) mesa	4,4	2,15	1,71	1,54	1,45
G (GPa) mesa	4,4	2,15	1,71	1,54	1,45
E_l (GPa) alma	15,0	7,35	5,85	5,25	4,95
E_t (GPa) alma	3,0	1,47	1,17	10,5	0,99
G (GPa) alma	3,0	1,47	1,17	10,5	0,99
ν_l	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
ν_t	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Na Figura 5.4 e na Figura 5.5 são apresentados os resultados das análises computacionais e experimentais realizadas.

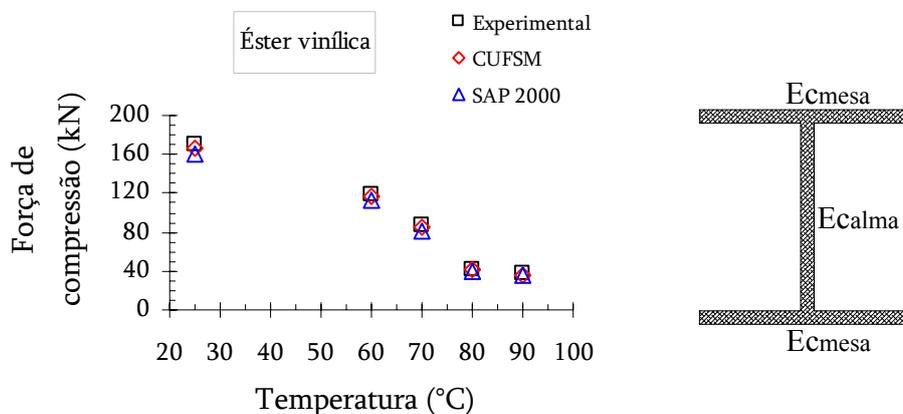


Figura 5.4 – Resultados das análises numéricas da flambagem e resultados experimentais da resistência para perfis pultrudados comprimidos, compostos de resina éster vinílica – Caso 2.

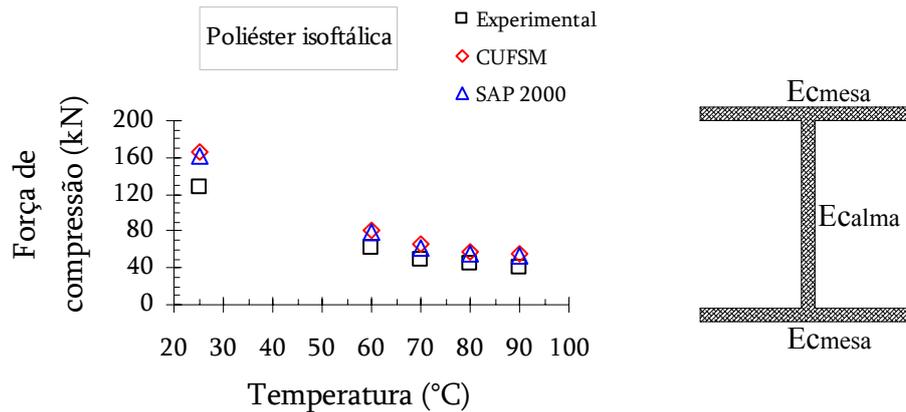


Figura 5.5 – Resultados das análises numéricas da flambagem e resultados experimentais da resistência para perfis pultrudados comprimidos, compostos de resina poliéster isoftálica – Caso 2.

Tabela 5.8 – Comparação entre os resultados das análises computacionais e experimentais, Caso 2.

Temperatura (°C)	Éster vinílica				Poliéster isoftálica			
	Força de compressão			Dif. Exp x MFF (%)	Força de compressão			Dif. Exp x MFF (%)
	MFF (kN)	MEF (kN)	Exp (kN)		MFF (kN)	MEF (kN)	Exp (kN)	
25	166	160	170	2,4	166	160	127	-23,5
60	116	112	118	1,7	81	79	62	-23,5
70	85	82	87	2,4	65	63	48	-26,2
80	41	40	42	2,4	58	56	44	-24,1
90	63	35	37	2,8	55	53	41	-25,5

Como esperado, houve uma redução das cargas críticas obtidas computacionalmente, aproximando ainda mais as cargas críticas calculadas dos resultados experimentais de resistência, Figuras 5.4 e 5.5 e Tabela 5.8. Mesmo com a redução das cargas críticas a resistência dos perfis compostos de resina poliéster isoftálica ainda se apresentam inferiores em cerca de 25%, enquanto que para perfis compostos de resina éster vinílica apresentaram resistência de aproximadamente 2.5% superior aos valores calculados computacionalmente.

Caso 3:

Considerando módulos de elasticidade a compressão (longitudinal) com uma redução de 11% dos módulos de tração (longitudinal), obtidos nos ensaios de tração

direta, de acordo com o EUROCOMP [9], e ainda módulos distintos para mesa e alma. Na Tabela 5.9 e na Tabela 5.10 são apresentadas as propriedades do material que serão utilizados nas análises pelos programas SAP 2000 e CUSFM.

Tabela 5.9 – Propriedades do material adotados nas análises pelo MEF e MFF, para perfis pultrudados compostos de resina éster vinílica – Caso 3.

Propriedades	Temperatura (°C)				
	25	60	70	80	90
E_l (GPa) mesa	19,5	13,65	9,95	4,87	4,29
E_t (GPa) mesa	3,9	2,73	1,98	0,975	0,858
G (GPa) mesa	3,9	2,73	1,98	0,975	0,858
E_l (GPa) alma	13,3	9,31	6,78	3,32	2,92
E_t (GPa) alma	2,66	1,86	1,35	0,665	0,585
G (GPa) alma	2,66	1,86	1,35	0,665	0,585
ν_l	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
ν_t	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabela 5.10 – Propriedades do material adotados nas análises pelo MEF e MFF, para perfis pultrudados compostos de resina poliéster isoftálica – Caso 3.

Propriedades	Temperatura (°C)				
	25	60	70	80	90
E_l (GPa) mesa	19,5	9,55	7,60	6,82	6,43
E_t (GPa) mesa	3,9	1,91	1,52	1,36	1,28
G (GPa) mesa	3,9	1,91	1,52	1,36	1,28
E_l (GPa) alma	13,3	6,51	5,18	4,65	4,38
E_t (GPa) alma	2,66	1,30	1,03	0,931	0,877
G (GPa) alma	2,66	1,30	1,03	0,931	0,877
ν_l	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
ν_t	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Na Figura 5.6 e na Figura 5.7 são apresentados os resultados das análises realizadas.

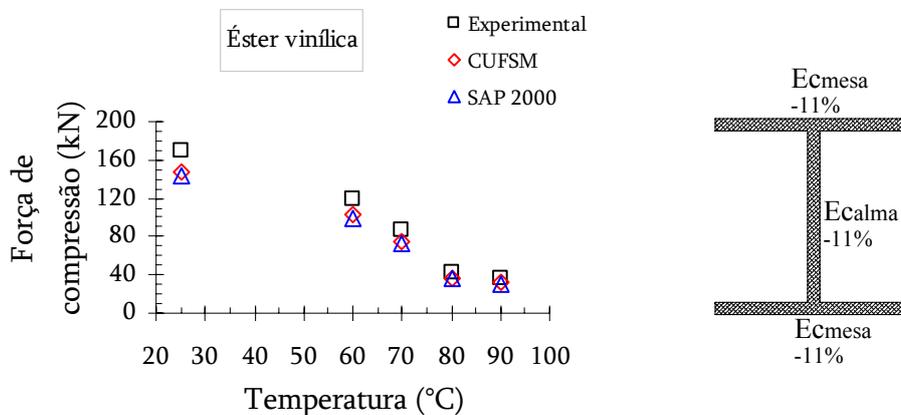


Figura 5.6 – Resultados das análises numéricas da flambagem e resultados experimentais da resistência para perfis pultrudados comprimidos, compostos de resina éster vinílica – Caso 3.

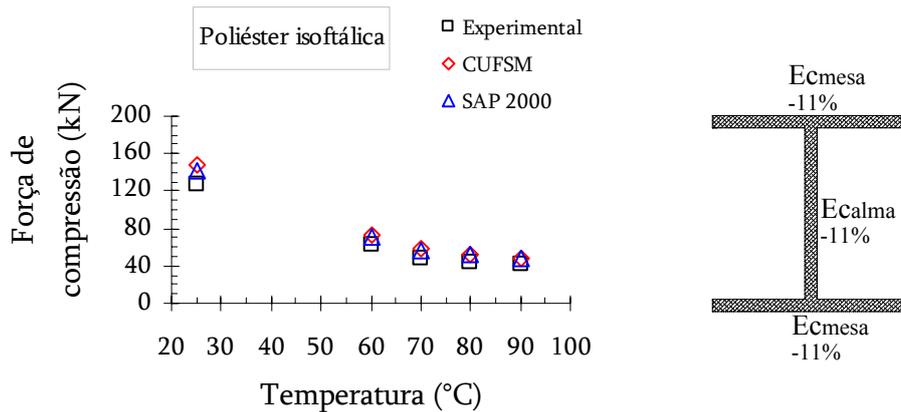


Figura 5.7 – Resultados das análises numéricas da flambagem e resultados experimentais da resistência para perfis pultrudados comprimidos, compostos de resina poliéster isoftálica – Caso 3.

Tabela 5.11 – Comparação entre os resultados das análises computacionais e experimentais, Caso 2.

Temperatura (°C)	Éster vinílica				Políéster isoftálica			
	Força de compressão			Dif. Exp x MFF (%)	Força de compressão			Dif. Exp x MFF (%)
	MFF (kN)	MEF (kN)	Exp (kN)		MFF (kN)	MEF (kN)	Exp (kN)	
25	147	142	170	15,6	147	142	127	-13,6
60	103	100	118	14,6	72	70	62	-13,9
70	75	72	87	16	65	57	55	26,2
80	37	35	42	13,5	58	52	50	-24,1
90	32	31	37	15,6	55	49	47	-25,5

Os resultados apresentados em cada caso levou em consideração o módulo de elasticidade a compressão igual ao de tração, obtido experimentalmente, e com certa redução, como para o Caso 3. Essas considerações foram feitas de acordo com o EUROCOMP [9]. Através do ensaio de fluência à compressão e a temperatura ambiente, foi possível obter o módulo de elasticidade a compressão do perfil, sem distinção entre mesa e alma, ($E_c = 21$ GPa para éster vinílica e $E_c = 19,5$ GPa para poliéster isoftálica), valores estes compatíveis com os valores utilizados nas análises computacionais.

Os resultados experimentais da resistência dos perfis compostos da resina éster vinílica apresentam-se superiores em cerca de 15% em relação às cargas críticas calculadas. No caso dos perfis compostos de resina poliéster isoftálica, o valor da

resistência experimental indica praticamente os mesmos valores de cargas críticas calculadas, Figuras 5.6 e 5.7 e Tabela 5.11.

Como foi descrito no capítulo 4 (item 4.3), em todos os ensaios de compressão centrada realizados o colapso ocorreu da mesma forma, por flambagem local de placa.

Nos resultados acima apresentados, os valores da resistência dos perfis pultrudados comprimidos aproximou-se dos valores de carga críticas de flambagem local calculadas. Esses resultados confirmaram a estreita relação entre a flambagem local elástica e o colapso dos perfis testados.

O EUROCOMP [9] sugere o cálculo da resistência à compressão de perfis através do método das larguras efetivas. No entanto, este método não é viável para esse tipo de perfil pultrudado que tem características de material frágil. O método das larguras efetivas está calibrado para material dúctil, como o aço, uma vez que leva em consideração o regime inelástico do material, com importante redistribuição interna do campo de tensões.

Assim, a resistência de perfis pultrudados a compressão centrada, tendo a flambagem local de placa como fator dominante, pode ser estimada a partir dos valores teóricos da carga crítica de flambagem.

O modo de flambagem local de placa obtido nas análises feitas pelos programas SAP 2000 e CUSFM pode ser visto na Figura 5.8.

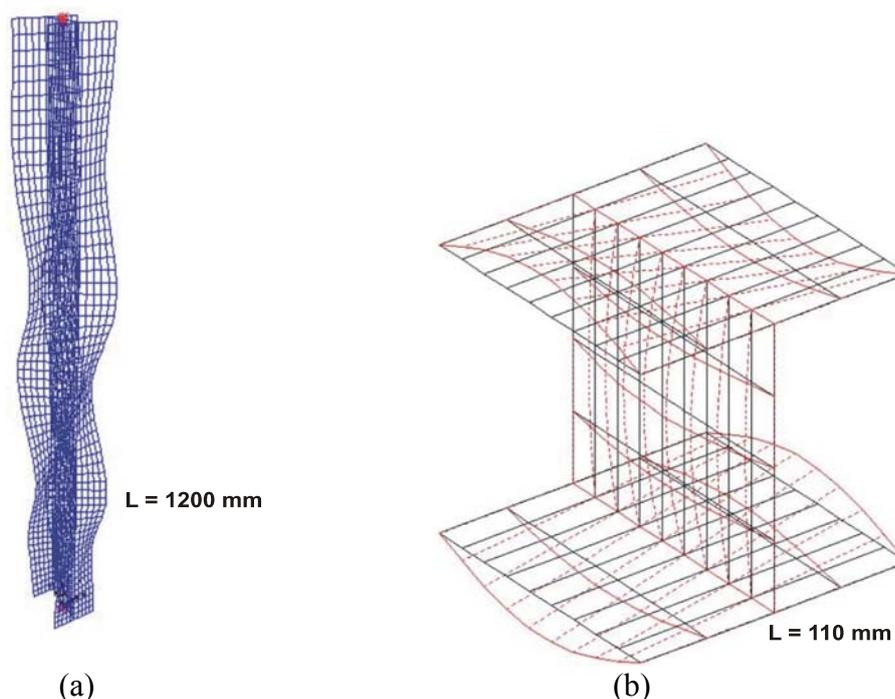


Figura 5.8 – Modo de flambagem local de placa obtidos pelas análises numéricas: (a) SAP 2000; (b) CUSFM.

5.3. Resultados para a Flexão Simples

No caso da flexão simples, não foi possível obter a redução da resistência dos perfis com o aumento da temperatura. No entanto, com os ensaios realizados às altas temperaturas foi possível estimar a redução do módulo de elasticidade aparente na flexão. Foram realizadas análises somente para o Caso 3.

Caso 3:

Considerando módulos de elasticidade (longitudinal) com uma redução de 11% dos módulos de tração (longitudinal), obtidos nos ensaios de tração direta, de acordo com o EUROCOMP [9]. Módulos distintos para mesa e alma. Na Tabela 5.12 e na Tabela 5.13 são apresentadas as propriedades do material de entrada dos programas SAP 2000 e CUSFM.

Tabela 5.12 – Propriedades do material adotados nas análises pelo MEF e MFF, para os perfis pultrudados compostos de resina éster vinílica – Caso 3.

Propriedades	Temperatura (°C)				
	25	60	70	80	90
E_l (GPa) mesa	19.5	17.55	15.8	13.65	11.5
E_t (GPa) mesa	3.9	3.51	3.1	2.73	2.3
G (GPa) mesa	3.9	3.51	3.1	2.73	2.3
E_l (GPa) alma	13.3	11.97	10.7	9.31	7.85
E_t (GPa) alma	2.66	2.4	2.15	1.86	1.56
G (GPa) alma	2.66	2.4	2.15	1.86	1.56
ν_l	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
ν_t	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

Tabela 5.13 – Propriedades do material adotados nas análises pelo MEF e MFF, para os perfis pultrudados compostos de resina poliéster isoftálica – Caso 3.

Propriedades	Temperatura (°C)	
	25	60
E_l (GPa) mesa	19.5	7.8
E_t (GPa) mesa	3.9	1.56
G (GPa) mesa	3.9	1.56
E_l (GPa) alma	13.3	5.32
E_t (GPa) alma	2.66	1.06
G (GPa) alma	2.66	1.06
ν_l	0.2	0.2
ν_t	0.1	0.1

Na Figura 5.9 e na Figura 5.10 são apresentados os resultados das análises realizadas.

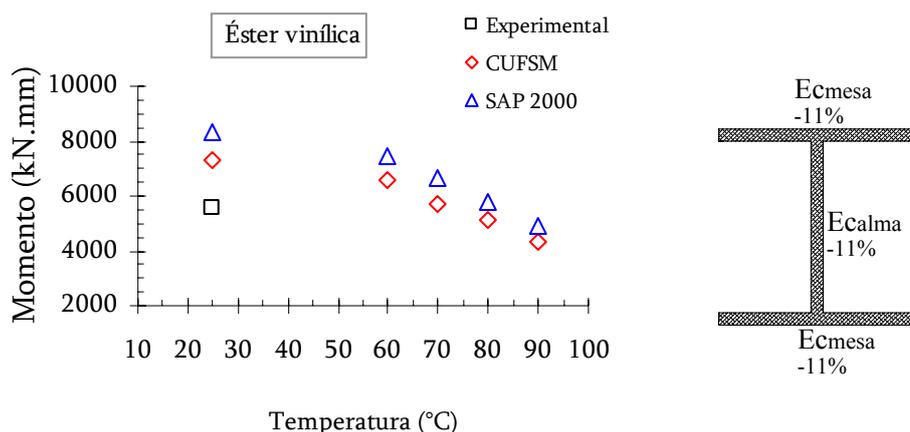


Figura 5.9 – Resultados das análises numéricas da flambagem local e resultado experimental da resistência, a temperatura ambiente, para perfis pultrudados a flexão, compostos de resina éster vinílica – Caso 3.

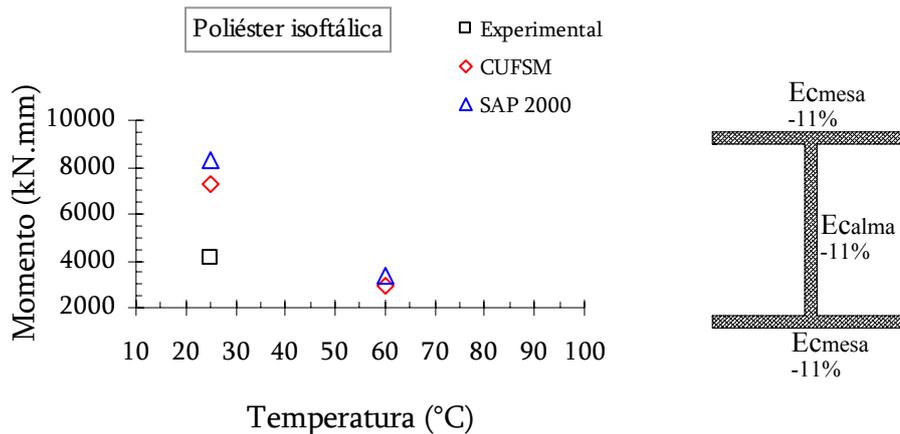


Figura 5.10 – Resultados das análises numéricas da flambagem local e resultado experimental da resistência, a temperatura ambiente, para perfis pultrudados a flexão, compostos de resina poliéster isoftálica – Caso 3.

Tabela 5.14 – Comparação entre os resultados das análises computacionais e experimentais.

Temperatura (°C)	Éster vinílica				Poliéster isoftálica			
	Momento (kN.mm)			Dif. (%) Exp x MFF	Momento (kN.mm)			Dif. (%) Exp x MFF
	MFF	MEF	Exp		MFF	MEF	Exp	
25	7311	8140	5550	-24	7311	8140	4162	-43

Nos ensaios à flexão simples à temperatura ambiente o colapso ocorreu por flambagem local de placa. O momento resistente da viga à temperatura ambiente foi muito inferior ao momento crítico de flambagem calculados pelo MEF e MFF, Figuras 5.9 e 5.10 e Tabela 5.14, cerca de 24% para perfis de resina éster vinílica e 43% para perfis compostos de resina poliéster isoftálica.

Essa diferença pode ser explicada pela condição de restrição impostas nas vigas. Foram ensaiadas vigas gêmeas travadas entre si por meio de chapas para impedir a flambagem lateral com torção. Os travamentos adotados nos apoios e nos pontos de aplicação de carga (terços do vão) permitiram o desenvolvimento da flambagem local da mesa superior, no vão entre os pontos de aplicação de carga conforme pode ser visto nas Figuras 4.11, 4.12, 4.15 e 4.16 e, de forma esquemática, na Figura 5.11(a). No vão entre os pontos de aplicação de carga a flambagem local na mesa superior pode se desenvolver livremente, provocando tensões normais devidas à flexão da mesa praticamente nulas na junção da mesa com a alma, Figura 5.11(b). Já no ponto de aplicação de carga, a flambagem local na mesa superior foi de certa forma impedida

pela contenção lateral impostas nas vigas, provocando tensões normais na mesa, na junção da mesa com a alma. O estado de tensões nessa seção, com restrições na alma da seção, levou ao colapso prematuro da viga, com ruptura por tração (trinca) que desenvolveu longitudinalmente na mesa superior, trinca essa posicionada sobre a alma da seção H.

No caso da compressão centrada, os perfis não possuíam restrição alguma ao modo de flambagem local, o que conduziu ao mecanismo de colapso associado à flambagem local teórica.

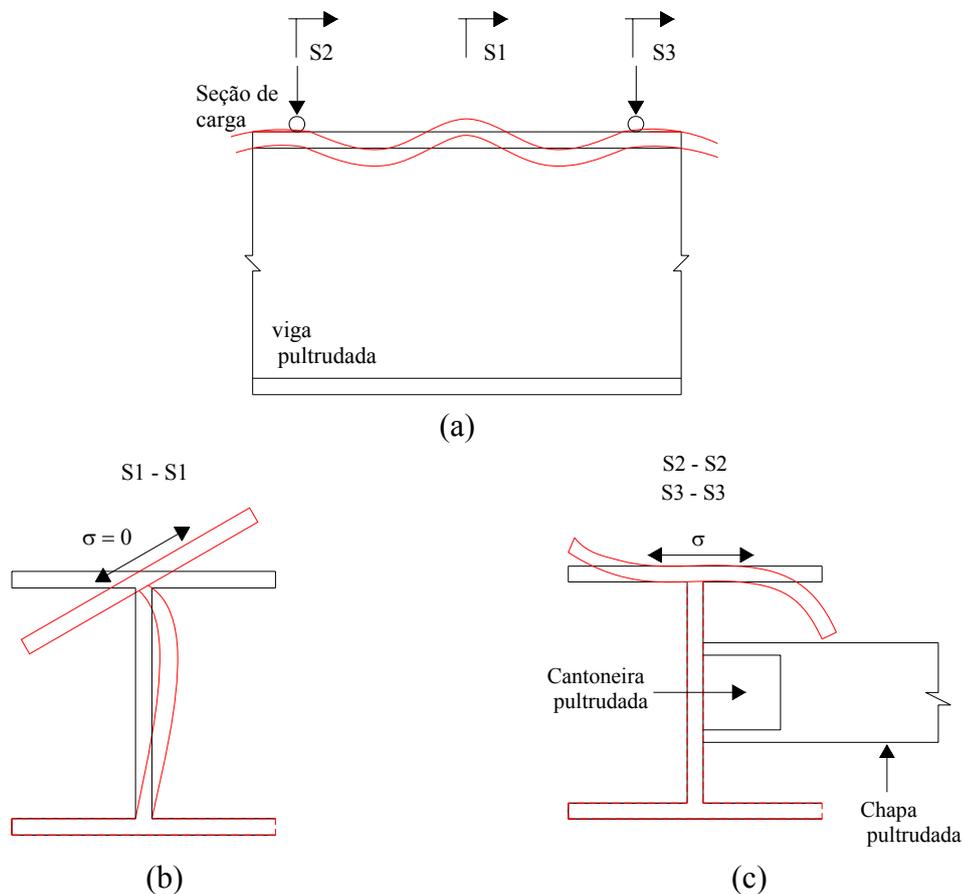


Figura 5.11 – Configurações da flambagem local da mesa superior nos ensaios de flexão: (a) vista lateral; (b) seção transversal S1, com modo de flambagem livre; (c) seções transversais S2 e S3 com o modo de flambagem local com restrição provocada na alma.

Na Figura 5.12 são apresentados os modos de flambagem local de placa obtidos nas análises realizadas, SAP 2000 e CUFSM.

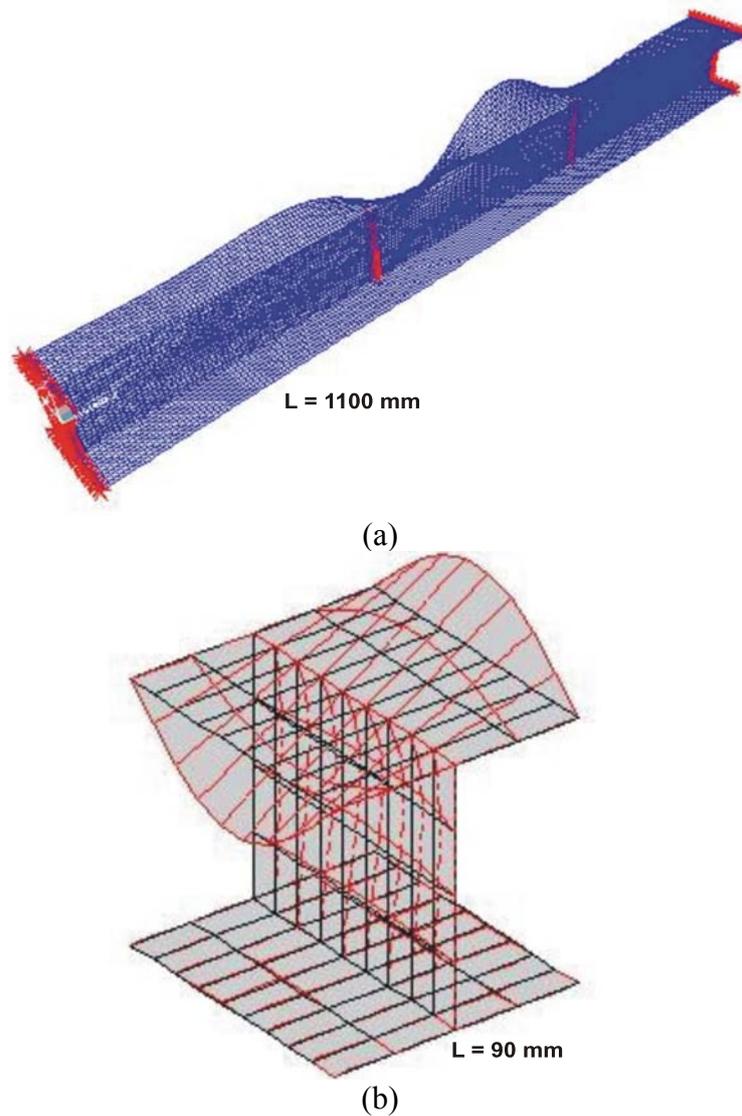


Figura 5.12 – Modo de flambagem local de placa à flexão, obtido nas análises numéricas: (a) SAP 2000; (b) CUSFM.

Desses resultados depreendemos que não apenas a análise da flambagem elástica permite calcular a resistência da peça estrutural, mas, igualmente, é necessário avaliar as reais condições de contorno para a flambagem e as propriedades de resistência do material compósito para tensões nas direções longitudinal e transversal às fibras.

O Método das Faixas Finitas se aplica muito bem a perfis pultrudados, material ortotrópico e pode ser adotado corretamente para análise de flambagem e projeto estrutural. O CUSFM é uma ferramenta disponível para engenharia de projeto em pultrudados

6. Considerações Finais

6.1. Conclusões

Dos resultados obtidos na presente pesquisa, mesmo considerando a grande importância que deve ser atribuída a defeitos e micro-defeitos na composição do material (vazios de resina), podemos concluir que os perfis pultrudados para uso estrutural não podem ser dispensados de avaliação de sua resistência sem que o efeito da temperatura esteja considerado, levando em conta, nesse caso, a considerável degradação do seu desempenho estrutural.

Os resultados experimentais indicaram claramente o desenvolvimento de deformação lenta nos perfis pultrudados na flexão e na compressão, acompanhada de redução da resistência com o aumento da temperatura, o que de certa forma era esperado uma vez que a matéria prima da matriz é resina polimérica. Os ensaios com efeito da temperatura possibilitaram verificar diferenças substanciais no comportamento dos perfis pultrudados compostos de resina éster vinílica e perfis pultrudados compostos de resina poliéster isoftálica. A temperatura de transição vítrea de perfis pultrudados de matriz polimérica deve ser investigada uma vez que os resultados experimentais não foram condizentes com os valores apresentados na literatura.

Nos ensaios de flexão simples a temperatura ambiente foi observado que as vigas compostas por resina poliéster isoftálica apresentaram uma menor resistência que as vigas compostas de resina éster vinílica. Este comportamento ficou mais evidente com o aumento da temperatura. Além disso, ficou evidenciada a deformação lenta, com

importante redução do módulo de elasticidade aparente na flexão. Esta redução pode ser decomposta em duas partes: (i) primeiramente uma redução independente do tempo, devida à alteração da rigidez da resina com o aumento da temperatura e, a seguir (ii) uma redução da rigidez em função do nível de tensão normal aplicada no material e do tempo de residência (aplicação) dessas tensões. Para baixas tensões houve uma redução discreta da rigidez, enquanto para tensões maiores a redução da rigidez parece associada ao tempo e se apresenta tanto maior quanto maiores as temperaturas de ensaio e a tensão aplicada.

Ainda em relação aos ensaios de flexão, as vigas compostas de resina éster vinílica apresentaram redução do módulo de elasticidade aparente na flexão de aproximadamente 10% para temperatura de 60°C e redução em torno de 50% para a condição de colapso estrutural da peça, que ocorreu para temperaturas de 70°C e 90°C. Já para as vigas compostas de resina poliéster isoftálica, houve redução brusca do módulo de elasticidade aparente na flexão de até 60%, para temperatura de 60°C. Com a resina poliéster isoftálica não foi possível realizar ensaios com temperaturas superiores a 60°C.

Com relação aos ensaios de compressão centrada, os resultados permitiram constatar grandes reduções de resistência dos perfis pultrudados e evidência de deformação lenta com o aumento da temperatura. Novamente, a resistência dos perfis pultrudados compostos de resina poliéster isoftálica foi inferior àquelas obtidas para perfis compostos de resina éster vinílica, situação essa que se apresentou agravada com o aumento da temperatura. Foi possível observar um comportamento inverso para as colunas compostas de resina poliéster isoftálica em relação as colunas compostas de resina éster vinílica. As colunas compostas de resina poliéster isoftálica sofreram importante redução da resistência para as primeiras temperaturas de 60°C e 70°C, diferentemente das colunas compostas de resina éster vinílica que apresentaram baixas redução da resistência para essas temperaturas. Ao contrário, as colunas compostas de resina éster vinílica apresentaram expressiva redução da resistência para as temperaturas mais altas, 80°C e 90°C, quando comparadas com os resultados das colunas compostas de resina poliéster isoftálica.

Ainda em relação aos ensaios de compressão centrada, os métodos numéricos apresentados para a obtenção da carga crítica e do modo crítico de flambagem dominante de perfis pultrudados, MFF e MEF, mostraram-se apropriados para estimar a

resistência desses perfis. Vale destacar que, nos ensaios de compressão, a estimativa da resistência dos perfis pultrudados foi baseada nos valores teóricos de carga crítica de flambagem local de placa, sendo esse o modo crítico.

A grande influência da temperatura nos perfis pultrudados, tanto para obtenção da resistência como para identificação da deformação lenta, é confirmada a partir dos resultados obtidos nos ensaios de deformação lenta a temperatura ambiente, na tração e na compressão. Os resultados apontaram a inexistência da deformação lenta do material à temperatura ambiente, com a temperatura controlada e mantida a $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

A fim de prevenir o colapso dos perfis pultrudados devido à deformação lenta, alguns aspectos devem ser controlados: (i) comportamento da matriz sob alta temperatura; (ii) controle da fração volumétrica de fibras e da flambagem das fibras devido à redução da eficiência do confinamento promovido pela resina; (iii) investigação da deformação lenta do compósito sob alta temperatura.

Considerando que amplas investigações experimentais deveriam ser realizadas levando em consideração os múltiplos aspectos envolvidos, de modo a conduzir à definição de métodos de dimensionamento seguros para projetos estruturais, os procedimentos seguintes devem ser indicados, quando a ocorrência de alta temperatura for levada em consideração nas combinações das ações sobre a estrutura: (i) definição prévia das temperaturas prescritas para ensaio a partir de incêndio e/ ou acidentes que envolvam aumento da temperatura ambiente; (ii) definição de procedimentos técnicos para a realização de ensaios com alta temperatura, para aplicação em peças estruturais como, por exemplo, vigas e colunas; (iii) definição do comportamento aceitável dos perfis pultrudados em condições de solicitações combinadas de alta temperatura com flexão, compressão e tração ou ainda, de ações combinadas.

Um exemplo de normalização nacional para aceitação de produtos pultrudados é a norma Petrobrás N-2617 [5], que trata de grades de piso para uso em instalações industriais de exploração de petróleo e gás. Nesse caso, os efeitos de degradação estrutural em presença de alta temperatura, inclusive deformação lenta, são avaliados por meio de ensaios padronizados.

Diante das dificuldades de se estabelecer parâmetros suficientemente gerais para incluir nos procedimentos de cálculo teórico da resistência estrutural dos perfis pultrudados submetidos a altas temperaturas, nos parece que a exigência de ensaios

experimentais com o objetivo de comprovar o desempenho seria mandatória, devendo fazer parte de prescrições de norma técnica específica.

Finalmente, com base nos resultados obtidos na presente pesquisa, fica claro que o emprego de perfis pultrudados requer tratamento específico, especialmente na eventualidade do aumento da temperatura ambiente. Adicionalmente, a qualidade microestrutural do material deve ser garantida pelos fabricantes, dadas as evidências de defeitos e imperfeições observadas na presente pesquisa.

O controle tecnológico na fabricação dos perfis pultrudados é da maior relevância, sendo o controle da variação da fração volumétrica de fibras uma das características mais importantes na determinação das propriedades mecânicas do material compósito. Na presente pesquisa verificou-se grandes variações da fração volumétrica de fibras entre os perfis estudados, mostrando a não confiabilidade do lote de trabalho. Foi igualmente constatada a substituição de grande quantidade de fibras longas por mantas, aumentando assim a diferença da fração volumétrica de fibras. Finalmente, foram observadas grandes áreas de vazios na seção transversal dos perfis, muitas vezes perceptíveis a olho nu, defeitos esse originados de falhas no processo de fabricação, implicando em regiões frágeis no perfil.

São necessários algumas providências para aumentar a qualidade estrutural dos perfis pultrudados. Como sugestão, seria relevante levar em conta: (i) a presença de fibras longas no sentido transversal dos perfis, principalmente na ligação da mesa com a alma - praticamente em todos os ensaios houve ruptura entre mesa e alma; (ii) controle explícito do tipo de resina que será utilizada, bem como identificação através de ensaios específicos (Calorimetria Exploratória Diferencial - DSC, Análise Dinâmico-Mecânica - DMA ou Análise Termomecânica - TMA) a temperatura de transição vítrea, de modo a estabelecer o cenário de trabalho desses perfis pultrudados em presença de alta temperatura.

Para concluir, consideramos que os perfis pultrudados compostos de resina polimérica reforçados com fibras de vidro têm grande potencial de aplicações estruturais em substituição aos materiais convencionais como o aço e o concreto, principalmente por apresentarem baixo peso específico e alta resistência à corrosão. Para a correta aplicação desses materiais é necessária a garantia de controle de qualidade estrutural do material, e por consequência, dos produtos estruturais fabricados por pultrusão.

Referências Bibliográficas

- [1] BANK, L.C. *Composite for Construction – Structural design with FRP Materials*, 2006
- [2] ZUREICK, A.H. *Polymeric Composite Materials for New Construction*. Composite in Construction – Third International Conference, Lyon, França, 2005.
- [3] THORNBURROW, P.R. *Current Applications and Future Trends for Reinforced Composites in Construction*. Composite in Construction – Third International Conference, Lyon, França, 2005.
- [4] ASHBY, M.F., JONES, D.R.H., *Engenharia dos Materiais, v. 2*. Rio de Janeiro, Elsevier, 2007.
- [5] PETROBRÁS, *Piso – Grade de Material Compósito*. Norma Técnica Petrobrás N-2614, 2001.
- [6] BROUTMAN, L.J., *Modern Composite Materials*. Addison-Wesley Publishing Company, 1987.
- [7] DANIEL, I.M.; ISHA, O., *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford University Press Company, 1994.
- [8] CHAWLA, K.K., *Composite Materials Science and Engineering*. Springer-Verlag New York Inc, 1987.

- [9] EUROCOMP DESIGN CODE AND HANDBOOK. *Structural Design of Polymer Composites*, Edited by John L. Clarke, 1987.
- [10] MORLEY, J.G., *High-Performance Fibre Composites*. Wolfson Institute of Interfacial Technology, University of Nottingham, UK, 1987.
- [11] BATISTA, E.M. *Estudo do Comportamento de Grelha de Piso em Material Compósito*, Relatório Técnico ET – 150788, Fundação Coppetec. (1998).
- [12] NAGAHAMA, K.J., *Análise de Estabilidade Local em Perfis de Seção Aberta em Aço e em Resina Reforçada com Fibra de Vidro*. Tese de Doutorado., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [13] ALMEIDA, S.P.S., *Avaliação das Propriedades Mecânicas de Compósitos Pultrudados de Matriz Polimérica com Reforço de Fibra de Vidro*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004.
- [14] NETO, A.B da S.; LA ROVERE, H.,L.; PIERIN, I., *Avaliação da Rigidez de Perfis Pultrudados de PRV Submetidos À Flexão*. Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Mendonza, Argentina, 2004.
- [15] TEIXEIRA, A.M.A.J.; PFEIL, M.,S, *Ligações Parafusadas em Chapas de Compósitos Pultrudados*. Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Mendonza, Argentina, 2004.
- [16] OLIVEIRA, B.F.; CREUS, G.J., *Um Modelo Analítico-Numérico para o Estudo dos Efeitos do Envelhecimento e, Materiais Compósitos*. Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Mendonza, Argentina, 2004.
- [17] CORREIA, J.R., BRANCO, F. A., FERREIRA, J. G. et al. *Lifetime Performance of GFRP Pultruded Profiles for Structural Applications*. IABSE Symposium Weimar, Alemanha, 2007.
- [18] SVENSON, A.L., YE, B.S., BANK, L.C., *Mass and Volume Fraction Properties of Pultruded Glass Fibre-Reinforced Composites*. Journal of Composites 26, 725 – 731, 1995.
- [19] ZUREICK, A.H.; SCOTT, D.W., *Compression Creep of a Pultruded E-Glass / Vinylester Composite*. Journal of Composites Science and Technology 58, 1361 – 1369, 1998.

- [20] FINDLEY, W.N., *Creep Characteristics of Plastic*. In 1944 Symposium on Plastics, 1944.
- [21] MAGID, B.A., ANIDO, R.L., SMITH, G. et al., *Flexure creep properties of E-glass reinforced polymers*. Composite Structures 62, 247 – 253, 2003.
- [22] DUTTA, P.K., HUI, D., *Creep rupture of GFRP composite at elevated temperatures*. Computers & Structures 76, 153 – 161, 2003.
- [23] TOMMASO, A.Di., MEROI, E.A., PAVAN, P.G., *Numerical Simulation of Buckling Phenomena in FRP Structures*. Composite in Construction – Third International Conference, Lyon, França, 2005.
- [24] PIERIN, I., LA ROVERE, H.L., *Análise Linear de Estabilidade de Perfis de Materiais PRFV*. Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, Campinas, Brasil, 2006.
- [25] PIERIN, I., LA ROVERE, H.L., *Effect of Material Inhomogeneity on Buckling Stress of Pultruded FRP Profiles*. Fourth International Conference on Science and Technology of Composite Materials – COMAT 2007, Rio de Janeiro, Brasil, 2007.
- [26] NETO, A.B da S., *Desenvolvimento de um Sistema de Laje Mista de Concreto com Peris Pultrudados de Materiais Compostos*. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- [27] TEIXEIRA, A.M.A.J, *Ponte Desmontável em Material Compósito de Fibra de Vidro*. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- [28] AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Test Methods for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials – ASTM – D 3039, 1995.
- [29] AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Methods for Rubber Products – Chemical Analysis – ASTM – D 297 – 93, 2002.
- [30] BENTUR, A. MINDESS, S., *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. Elsevier Applied Science, 1990.

- [31] SAP 2000, v.8.2.5 – Programa Computacional baseado nos Métodos dos Elementos Finitos.

- [32] CUFSM, v.2.6 – Programa Computacional baseado nos Métodos das Faixas Finitas desenvolvido por Bem Schafer.

Anexo A – Determinação da Fração Volumétrica de Fibras

Apresenta-se no presente Anexo A o processo detalhado dos ensaios de perda ao fogo para a obtenção da fração volumétrica de fibras dos corpos de prova utilizados nos ensaios. São também apresentadas as tabelas completas da fração volumétrica de fibras de cada corpo de prova.

Após a definição das posições de retiradas das amostras conforme a Figura A.1, estas foram cortadas e preparadas para a pesagem, Figura A.2.

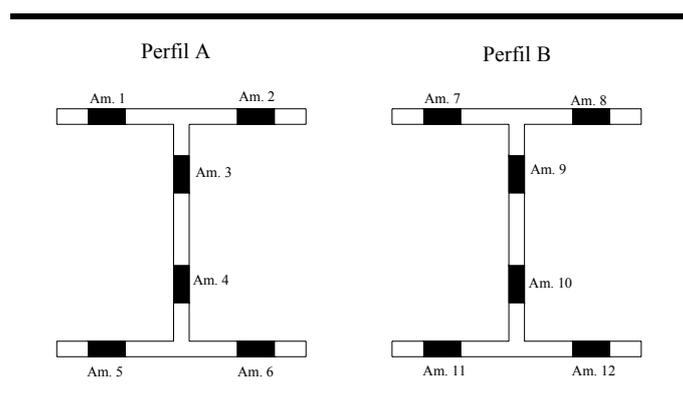


Figura A.1 – Posições da retirada das amostras para os ensaios de perda ao fogo.

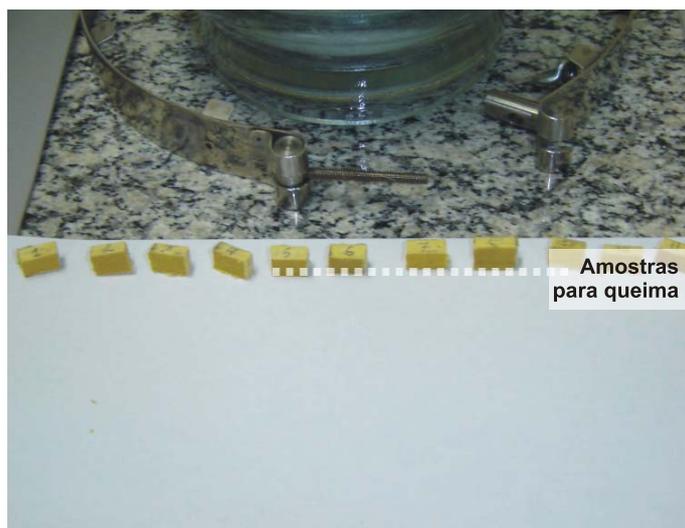


Figura A.2 – Amostras preparadas para ensaio de perda ao fogo

As queimas foram conduzidas em cadinhos de porcelana específicos para temperaturas de até 1000°C, conforme ilustra a Figura A.3.



Figura A.3 – Cadinhos de porcelana utilizados nos ensaios de queima.

Após a limpeza dos cadinhos e das amostras, estas foram pesadas separadamente em uma balança²³, Figura A 4.

²³ Balança analítica com quatro casas decimais de precisão, marca Bel Engineering, modelo UMark.

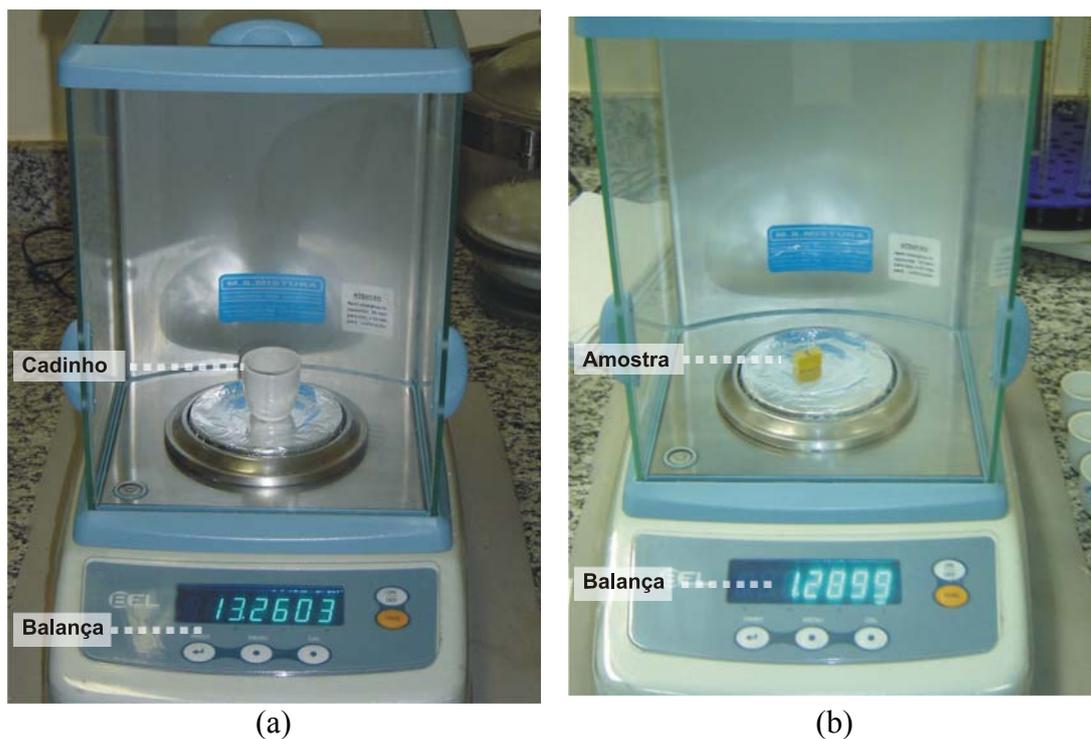
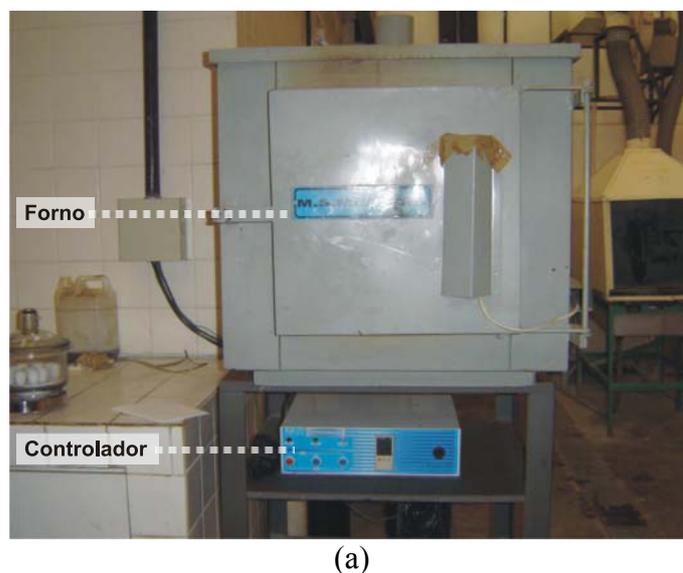
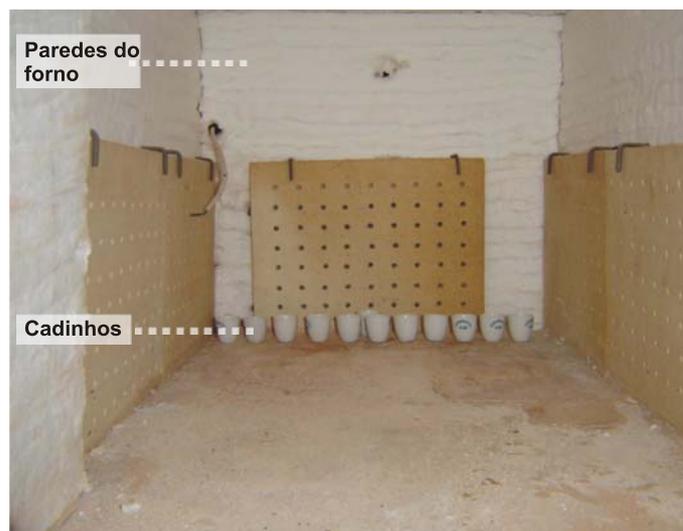


Figura A 4 – Pesagem: (a) pesagem do cadinho; (b) pesagem da amostra.

Após a pesagem dos cadinhos e das amostras, estas foram colocadas no forno²⁴, para a realização da queima, Figura A 5.



²⁴ Forno tipo mufla (M.S. Mistura) do Labest/COPPE com controle das condições de queima.



(b)

Figura A 5 – Forno tipo mufla utilizado nos ensaios de queima.

O teor de fibras foi calculado através da razão entre a massa de fibras de vidro, remanescentes da queima (Figura A 6), e a massa inicial do compósito. Após a queima, as fibras foram separadas das mantas para a obtenção da fração volumétrica de fibras com a manta e somente com as fibras longas. Os resultados completos da fração volumétrica de fibras de cada corpo de prova ensaiado podem ser vistos nas Tabelas A1 a A22.

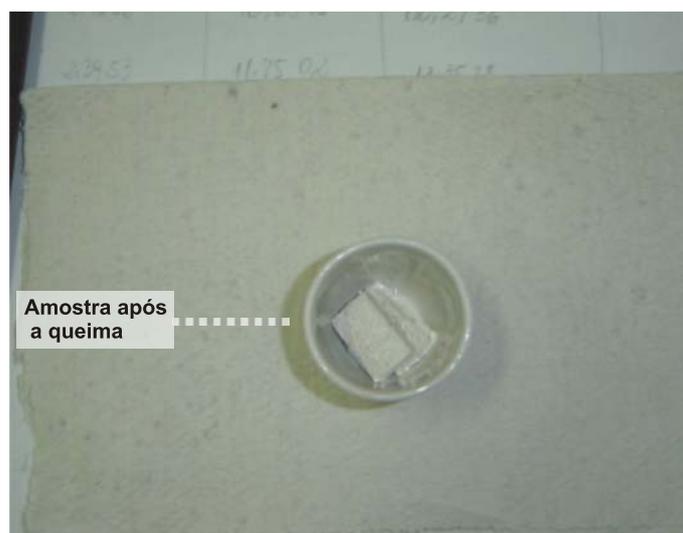


Figura A 6 – Massa de fibras de vidro remanescente da queima.

1. Ensaio de Flexão Simples

Resina poliéster isoftálica

Tabela A.1 – Fração volumétrica de fibras dos perfis dos ensaios de flexão simples V1 Iso.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,16	1,32	12,06	67,4
2 (mesa)	12,68	1,25	13,45	61,1
3 (alma)	11,17	0,92	11,73	59,9
4 (alma)	11,86	0,72	12,29	58,9
5 (mesa)	11,59	1,00	12,26	66,1
6 (mesa)	11,48	0,83	11,96	58,0
Média (mesa) (%)				63,2
Desvio Padrão (mesa) (%)				4,4
Média (alma) (%)				59,4
Desvio Padrão (alma) (%)				0,7
Fração volumétrica somente das fibras				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,16	1,32	11,91	56,2
2 (mesa)	12,68	1,25	13,18	39,8
3 (alma)	11,17	0,92	11,45	30,0
4 (alma)	11,86	0,72	12,09	30,7
5 (mesa)	11,59	1,00	12,10	50,2
6 (mesa)	11,48	0,83	11,93	54,4
Média (mesa) (%)				51,1
Desvio Padrão (mesa) (%)				8,2
Média (alma) (%)				30,4
Desvio Padrão (alma) (%)				0,5

Tabela A.2 – Fração volumétrica de fibras dos perfis dos ensaios de flexão simples V2 Iso.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)					
	Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
Perfil A	1 (mesa)	11,17	1,29	11,99	63,4
	2 (mesa)	12,67	1,20	13,39	59,3
	3 (alma)	11,17	1,07	11,80	58,1
	4 (alma)	11,88	1,12	12,51	56,4
	5 (mesa)	11,59	1,35	12,43	61,9
	6 (mesa)	11,48	1,25	12,21	57,9
Fração volumétrica de fibras total (fibras e manta)					
	Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
Perfil B	1 (mesa)	11,33	1,48	12,28	63,7
	2 (mesa)	10,73	1,65	11,73	60,6
	3 (alma)	11,90	0,92	12,45	59,2

	4 (alma)	11,20	0,99	11,78	58,0
	5 (mesa)	11,53	1,13	12,21	60,1
	6 (mesa)	10,64	1,18	11,37	61,3
	Média (mesa) (%)				61,1
	Desvio Padrão (mesa) (%)				2,0
	Média (alma) (%)				58,0
	Desvio Padrão (alma) (%)				1,1
Fração volumétrica somente de fibras					
	Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
Perfil A	1 (mesa)	11,17	1,29	11,76	46,0
	2 (mesa)	12,67	1,20	13,20	43,3
	3 (alma)	11,17	1,07	11,57	37,3
	4 (alma)	11,88	1,12	12,27	35,0
	5 (mesa)	11,59	1,35	12,18	43,5
	6 (mesa)	11,48	1,25	12,0	41,4
Fração volumétrica de fibras total (fibras e manta)					
	Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
Perfil B	1 (mesa)	11,33	1,48	12,02	46,7
	2 (mesa)	10,73	1,65	11,44	43,1
	3 (alma)	11,90	0,92	12,23	35,9
	4 (alma)	11,20	0,99	11,58	37,9
	5 (mesa)	11,53	1,13	12,04	45,5
	6 (mesa)	10,64	1,18	11,16	43,9
	Média (mesa) (%)				44,2
	Desvio Padrão (mesa) (%)				1,8
	Média (alma) (%)				36,6
	Desvio Padrão (alma) (%)				1,3

Tabela A.3 – Fração volumétrica de fibras dos perfis dos ensaios de flexão simples V3 Iso.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,19	1,45	12,08	61,1
2 (mesa)	12,69	1,21	13,45	62,5
3 (alma)	11,21	1,36	11,99	57,2
4 (alma)	11,88	1,28	12,61	56,6
5 (mesa)	11,61	1,67	12,64	61,6
6 (mesa)	11,50	1,55	12,52	65,7
	Média (mesa) (%)			62,8
	Desvio Padrão (mesa) (%)			2,1
	Média (alma) (%)			57,0
	Desvio Padrão (alma) (%)			0,4
Fração volumétrica somente das fibras				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,19	1,45	11,82	43,1
2 (mesa)	12,69	1,21	13,29	49,2
3 (alma)	11,21	1,36	11,69	35,1

4 (alma)	11,88	1,28	12,31	33,5
5 (mesa)	11,61	1,67	12,32	42,1
6 (mesa)	11,50	1,55	12,24	47,7
Média (mesa) (%)				45,6
Desvio Padrão (mesa) (%)				3,5
Média (alma) (%)				34,3
Desvio Padrão (alma) (%)				1,1

Resina éster vinílica

Tabela A.4 – Fração volumétrica de fibras dos perfis dos ensaios de flexão simples V1 Ester.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,06	1,22	11,79	59,7
2 (mesa)	10,26	1,27	11,09	64,7
3 (alma)	11,82	0,92	12,38	60,4
4 (alma)	11,53	1,23	12,23	56,8
5 (mesa)	10,65	1,75	11,82	66,2
6 (mesa)	11,75	1,28	12,54	61,4
Média (mesa) (%)				63,11
Desvio Padrão (mesa) (%)				3,0
Média (alma) (%)				58,7
Desvio Padrão (alma) (%)				2,5
Fração volumétrica somente das fibras				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,06	1,22	11,53	38,5
2 (mesa)	10,26	1,27	10,86	47,4
3 (alma)	11,82	0,92	12,08	28,5
4 (alma)	11,53	1,23	11,82	23,59
5 (mesa)	10,65	1,75	11,46	45,7
6 (mesa)	11,75	1,28	12,30	42,7
Média (mesa) (%)				43,6
Desvio Padrão (mesa) (%)				3,9
Média (alma) (%)				26,1
Desvio Padrão (alma) (%)				3,5

Tabela A.5 – Fração volumétrica de fibras dos perfis dos ensaios de flexão simples V2 Ester.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,20	1,29	12,02	62,7
2 (mesa)	10,64	1,20	11,39	62,4
3 (alma)	11,33	0,58	11,67	56,7
4 (alma)	10,73	0,71	11,14	58,1
5 (mesa)	11,52	0,91	12,12	64,7
6 (mesa)	11,90	0,99	12,55	65,8

Média (mesa) (%)	63,9
Desvio Padrão (mesa) (%)	1,6
Média (alma) (%)	57,4
Desvio Padrão (alma) (%)	0,9
Fração volumétrica somente das fibras	
Amostra	Fração volumétrica de fibras (%)
	Massa do cadinho (g)
	Massa da amostra seca (g)
	Massa do cadinho e cinza (g)
1 (mesa)	42,6
2 (mesa)	48,3
3 (alma)	28,1
4 (alma)	30,7
5 (mesa)	45,9
6 (mesa)	47,5
Média (mesa) (%)	46,1
Desvio Padrão (mesa) (%)	2,5
Média (alma) (%)	29,4
Desvio Padrão (alma) (%)	1,9

Tabela A.6 – Fração volumétrica de fibras dos perfis dos ensaios de flexão simples V3_Ester.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)					
	Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
Perfil A	1 (mesa)	11,16	1,41	12,11	67,1
	2 (mesa)	10,26	1,35	11,12	63,5
	3 (alma)	11,82	1,51	12,77	62,6
	4 (alma)	11,17	1,73	12,27	63,6
	5 (mesa)	11,65	1,52	12,70	68,6
	6 (mesa)	11,48	1,47	12,47	66,9
Fração volumétrica de fibras total (fibras e manta)					
	Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
Perfil B	1 (mesa)	11,33	1,43	12,22	62,1
	2 (mesa)	10,73	1,53	11,68	61,6
	3 (alma)	66,01	1,18	66,65	53,9
	4 (alma)	66,91	1,26	67,60	55,0
	5 (mesa)	99,56	1,44	100,46	61,8
	6 (mesa)	80,71	1,35	81,57	63,0
Média (mesa) (%)					64,4
Desvio Padrão (mesa) (%)					2,8
Média (alma) (%)					58,8
Desvio Padrão (alma) (%)					5,0
Fração volumétrica somente de fibras					
	Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
Perfil A	1 (mesa)	11,16	1,41	11,92	53,4
	2 (mesa)	10,26	1,35	10,93	49,5
	3 (alma)	11,82	1,51	12,48	43,9
	4 (alma)	11,17	1,73	11,89	41,5
	5 (mesa)	11,65	1,52	12,54	58,0
	6 (mesa)	11,48	1,47	12,29	55,0

Fração volumétrica somente de fibras					
	Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
Perfil B	1 (mesa)	11,33	1,43	12,12	55,3
	2 (mesa)	10,73	1,53	11,56	53,8
	3 (alma)	66,01	1,18	66,52	42,7
	4 (alma)	66,91	1,26	67,45	43,1
	5 (mesa)	99,56	1,44	100,36	55,5
	6 (mesa)	80,71	1,35	81,44	53,4
Média (mesa) (%)					53,2
Desvio Padrão (mesa) (%)					5,3
Média (alma) (%)					44,2
Desvio Padrão (alma) (%)					1,1

Tabela A.7 – Fração volumétrica de fibras dos perfis dos ensaios de flexão simples V4 Ester.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)					
	Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
Perfil A	1 (mesa)	11,17	1,29	12,03	66,3
	2 (mesa)	12,67	1,28	13,54	66,9
	3 (alma)	11,17	0,98	11,79	62,8
	4 (alma)	11,86	1,07	12,53	62,1
	5 (mesa)	11,59	1,12	12,35	67,0
	6 (mesa)	11,48	1,12	12,22	65,3
Fração volumétrica de fibras total (fibras e manta)					
	Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
Perfil B	1 (mesa)	11,33	1,20	12,13	65,9
	2 (mesa)	10,73	1,31	11,60	65,6
	3 (alma)	11,90	1,24	12,68	62,8
	4 (alma)	11,20	1,22	11,97	62,8
	5 (mesa)	11,53	1,13	12,25	63,8
	6 (mesa)	10,64	1,14	11,40	66,5
Média (mesa) (%)					66,0
Desvio Padrão (mesa) (%)					1,0
Média (alma) (%)					62,7
Desvio Padrão (alma) (%)					0,4
Fração volumétrica somente de fibras					
	Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
Perfil A	1 (mesa)	11,17	1,29	11,86	53,6
	2 (mesa)	12,67	1,28	13,39	55,1
	3 (alma)	11,17	0,98	11,61	44,2
	4 (alma)	11,86	1,07	12,34	44,5
	5 (mesa)	11,59	1,12	12,18	52,5
	6 (mesa)	11,48	1,12	12,11	55,5
Fração volumétrica de fibras total (fibras e manta)					
	Amostra	Massa do	Massa da	Massa do	Fração

		cadinho	amostra seca	cadinho e cinza	volumétrica de fibras
		(g)	(g)	(g)	(%)
Perfil B	1 (mesa)	11,33	1,20	11,99	54,4
	2 (mesa)	10,73	1,31	11,48	56,6
	3 (alma)	11,90	1,24	12,46	45,3
	4 (alma)	11,20	1,22	11,73	42,7
	5 (mesa)	11,53	1,13	11,99	40,6
	6 (mesa)	10,64	1,14	11,29	57,0
Média (mesa) (%)					53,2
Desvio Padrão (mesa) (%)					5,3
Média (alma) (%)					44,2
Desvio Padrão (alma) (%)					1,1

Tabela A.8 – Fração volumétrica de fibras dos perfis dos ensaios de flexão simples V5 Ester.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)				
Amostra	Massa do cadinho	Massa da amostra seca	Massa do cadinho e cinza	Fração volumétrica de fibras
	(g)	(g)	(g)	(%)
1 (mesa)	11,08	1,04	11,73	62,2
2 (mesa)	11,83	1,23	12,63	64,1
3 (alma)	11,22	1,08	11,82	54,8
4 (alma)	10,75	1,33	11,49	55,2
5 (mesa)	10,27	1,20	10,99	59,9
6 (mesa)	11,35	1,27	12,15	62,3
Média (mesa) (%)				62,1
Desvio Padrão (mesa) (%)				1,7
Média (alma) (%)				55,0
Desvio Padrão (alma) (%)				0,3
Fração volumétrica somente das fibras				
Amostra	Massa do cadinho	Massa da amostra seca	Massa do cadinho e cinza	Fração volumétrica de fibras
	(g)	(g)	(g)	(%)
1 (mesa)	11,08	1,04	11,55	44,5
2 (mesa)	11,83	1,23	12,38	44,1
3 (alma)	11,02	1,08	11,44	37,8
4 (alma)	10,55	1,33	11,06	38,0
5 (mesa)	10,27	1,20	10,81	44,5
6 (mesa)	11,35	1,27	11,94	46,2
Média (mesa) (%)				44,8
Desvio Padrão (mesa) (%)				0,9
Média (alma) (%)				37,9
Desvio Padrão (alma) (%)				0,2

2. Ensaio de Compressão Centrada

Resina éster vinílica

Tabela A.9 – Fração volumétrica de fibras dos perfis dos ensaios de compressão centrada C1_Ester.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,53	1,67	12,61	64,2
2 (mesa)	10,26	1,85	11,46	64,7
3 (alma)	11,87	1,67	12,82	56,6
4 (alma)	11,49	1,57	12,40	57,6
5 (mesa)	11,17	1,35	12,00	61,4
6 (mesa)	11,06	1,87	12,27	64,1
Média (mesa) (%)				63,6
Desvio Padrão (mesa) (%)				1,5
Média (alma) (%)				57,1
Desvio Padrão (alma) (%)				0,6
Fração volumétrica somente das fibras				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,53	1,67	12,32	47,2
2 (mesa)	10,26	1,85	11,20	51,1
3 (alma)	11,87	1,67	12,42	32,9
4 (alma)	11,49	1,57	12,01	32,9
5 (mesa)	11,17	1,35	11,78	45,0
6 (mesa)	11,06	1,87	12,01	50,2
Média (mesa) (%)				48,4
Desvio Padrão (mesa) (%)				2,8
Média (alma) (%)				33,0
Desvio Padrão (alma) (%)				0,01

Tabela A.10 – Fração volumétrica de fibras dos perfis dos ensaios de compressão centrada C2_Ester.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,08	1,03	11,75	65,0
2 (mesa)	10,66	0,98	11,32	66,6
3 (alma)	11,78	0,82	12,26	58,1
4 (alma)	10,27	0,76	10,71	57,6
5 (mesa)	11,88	0,44	12,15	61,2
6 (mesa)	11,22	0,80	11,75	65,9
Média (mesa) (%)				65,5
Desvio Padrão (mesa) (%)				2,4
Média (alma) (%)				57,9
Desvio Padrão (alma) (%)				0,4
Fração volumétrica somente das fibras				
Amostra	Massa do cadinho	Massa da amostra seca	Massa do cadinho e cinza	Fração volumétrica

	(g)	(g)	(g)	de fibras (%)
1 (mesa)	11,08	1,03	11,57	47,65
2 (mesa)	10,66	0,98	11,13	47,72
3 (alma)	11,78	0,82	11,95	20,83
4 (alma)	10,27	0,76	10,42	19,07
5 (mesa)	11,88	0,44	12,08	45,42
6 (mesa)	11,22	0,80	11,60	47,84
Média (mesa) (%)				47,7
Desvio Padrão (mesa) (%)				1,2
Média (alma) (%)				20,0
Desvio Padrão (alma) (%)				1,2

Tabela A.11 – Fração volumétrica de fibras dos perfis dos ensaios de compressão centrada C3_Ester.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,08	0,90	11,68	66,3
2 (mesa)	11,20	0,90	11,80	66,9
3 (alma)	10,66	0,88	11,20	60,8
4 (alma)	10,75	0,84	11,25	59,3
5 (mesa)	11,88	0,98	12,52	64,7
6 (mesa)	10,64	0,99	11,31	67,1
Média (mesa) (%)				66,3
Desvio Padrão (mesa) (%)				1,1
Média (alma) (%)				60,1
Desvio Padrão (alma) (%)				1,0
Fração volumétrica somente das fibras				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,08	0,90	11,48	44,2
2 (mesa)	11,20	0,90	11,67	51,6
3 (alma)	10,66	0,88	10,87	23,3
4 (alma)	10,75	0,84	10,93	22,0
5 (mesa)	11,88	0,98	12,34	47,1
6 (mesa)	10,64	0,99	11,12	48,1
Média (mesa) (%)				47,8
Desvio Padrão (mesa) (%)				3,1
Média (alma) (%)				22,7
Desvio Padrão (alma) (%)				0,9

Tabela A.12 – Fração volumétrica de fibras dos perfis dos ensaios de compressão centrada C4_Ester, TDL1_Ester e TDL2_Ester.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,91	1,01	12,57	64,7
2 (mesa)	11,88	0,97	12,50	63,7
3 (alma)	11,61	1,02	12,19	56,0
4 (alma)	10,74	1,23	11,46	57,8

5 (mesa)	10,66	1,31	11,52	65,2
6 (mesa)	11,19	1,17	11,94	63,7
Média (mesa) (%)				64,4
Desvio Padrão (mesa) (%)				0,8
Média (alma) (%)				56,9
Desvio Padrão (alma) (%)				1,2
Fração volumétrica somente das fibras				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,91	1,01	12,38	46,0
2 (mesa)	11,88	0,97	12,32	44,9
3 (alma)	11,61	1,02	11,86	23,7
4 (alma)	10,74	1,23	11,05	25,0
5 (mesa)	10,66	1,31	11,26	45,4
6 (mesa)	11,19	1,17	11,77	49,1
Média (mesa) (%)				46,4
Desvio Padrão (mesa) (%)				1,9
Média (alma) (%)				24,4
Desvio Padrão (alma) (%)				0,9

Tabela A.13 – Fração volumétrica de fibras dos perfis dos ensaios de compressão centrada C5 Ester.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	10,64	0,60	11,06	70,1
2 (mesa)	10,74	0,51	11,09	66,8
3 (alma)	11,88	0,62	12,25	59,5
4 (alma)	11,22	0,70	11,64	59,5
5 (mesa)	10,66	0,83	11,25	70,9
6 (mesa)	11,78	0,74	12,28	67,0
Média (mesa) (%)				68,7
Desvio Padrão (mesa) (%)				2,1
Média (alma) (%)				59,5
Desvio Padrão (alma) (%)				0,04
Fração volumétrica somente das fibras				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	10,64	0,60	10,93	48,8
2 (mesa)	10,74	0,51	11,01	51,5
3 (alma)	11,88	0,62	12,04	24,9
4 (alma)	11,22	0,70	11,42	27,9
5 (mesa)	10,66	0,83	11,10	52,5
6 (mesa)	11,78	0,74	12,14	48,5
Média (mesa) (%)				50,4
Desvio Padrão (mesa) (%)				2,0
Média (alma) (%)				26,4
Desvio Padrão (alma) (%)				2,2

Tabela A.14 – Fração volumétrica de fibras dos perfis do ensaio de compressão centrada CDL6 Ester.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,78	0,75	12,26	63,4
2 (mesa)	12,69	0,68	13,12	62,6
3 (alma)	11,84	0,67	12,21	55,1
4 (alma)	11,19	0,66	11,57	57,5
5 (mesa)	11,22	0,86	11,79	66,2
6 (mesa)	11,35	0,74	11,82	63,6
Média (mesa) (%)				64,0
Desvio Padrão (mesa) (%)				1,6
Média (alma) (%)				56,3
Desvio Padrão (alma) (%)				1,7
Fração volumétrica somente das fibras				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,78	0,75	12,12	45,5
2 (mesa)	12,69	0,68	13,00	45,1
3 (alma)	11,84	0,67	11,98	21,9
4 (alma)	11,19	0,66	11,36	25,7
5 (mesa)	11,22	0,86	11,63	47,0
6 (mesa)	11,35	0,74	11,70	46,7
Média (mesa) (%)				46,1
Desvio Padrão (mesa) (%)				0,9
Média (alma) (%)				23,8
Desvio Padrão (alma) (%)				2,6

Tabela A.15 – Fração volumétrica de fibras dos perfis do ensaio de compressão centrada CDL7_Ester e CDL Ester.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,92	0,59	12,28	61,2
2 (mesa)	11,77	0,67	12,21	64,6
3 (alma)	11,61	0,59	11,95	56,4
4 (alma)	11,50	0,58	11,83	56,3
5 (mesa)	10,27	0,72	10,73	63,0
6 (mesa)	11,54	0,77	12,03	64,1
Média (mesa) (%)				63,4
Desvio Padrão (mesa) (%)				1,5
Média (alma) (%)				56,4
Desvio Padrão (alma) (%)				0,04
Fração volumétrica somente das fibras				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,92	0,59	12,17	43,6
2 (mesa)	11,77	0,67	12,10	47,9
3 (alma)	11,61	0,59	11,74	22,1
4 (alma)	11,50	0,58	11,67	29,1

5 (mesa)	10,27	0,72	10,59	44,3
6 (mesa)	11,54	0,77	11,90	47,3
Média (mesa) (%)				45,8
Desvio Padrão (mesa) (%)				2,2
Média (alma) (%)				25,6
Desvio Padrão (alma) (%)				5,0

Resina poliéster isoftálica

Tabela A.16 – Fração volumétrica de fibras dos perfis do ensaio de compressão centrada C1 Iso.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,82	1,35	12,70	64,9
2 (mesa)	11,20	1,02	11,85	63,0
3 (alma)	11,16	1,03	11,74	54,9
4 (alma)	11,33	1,07	11,98	60,4
5 (mesa)	12,67	1,46	13,61	64,0
6 (mesa)	11,52	1,13	12,27	65,3
Média (mesa) (%)				64,4
Desvio Padrão (mesa) (%)				1,0
Média (alma) (%)				57,7
Desvio Padrão (alma) (%)				3,9
Fração volumétrica somente das fibras				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,82	1,35	12,50	50,2
2 (mesa)	11,20	1,02	11,65	42,9
3 (alma)	11,16	1,03	11,45	27,6
4 (alma)	11,33	1,07	11,66	30,9
5 (mesa)	12,67	1,46	13,35	45,8
6 (mesa)	11,52	1,13	12,05	46,4
Média (mesa) (%)				46,4
Desvio Padrão (mesa) (%)				3,0
Média (alma) (%)				29,4
Desvio Padrão (alma) (%)				2,3

Tabela A.17 – Fração volumétrica de fibras dos perfis do ensaio de compressão centrada C2 Iso.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,76	2,30	13,21	62,7
2 (mesa)	11,17	3,32	13,12	58,5
3 (alma)	10,73	1,71	11,69	56,1
4 (alma)	11,06	2,01	12,23	58,2

5 (mesa)	11,76	1,94	13,01	64,4
6 (mesa)	11,20	2,48	12,80	64,1
Média (mesa) (%)				62,5
Desvio Padrão (mesa) (%)				2,7
Média (alma) (%)				57,2
Desvio Padrão (alma) (%)				1,5
Fração volumétrica somente das fibras				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,76	2,30	12,92	50,1
2 (mesa)	11,17	3,32	12,40	36,9
3 (alma)	10,73	1,71	11,32	34,2
4 (alma)	11,06	2,01	11,78	36,1
5 (mesa)	11,76	1,94	12,80	53,5
6 (mesa)	11,20	2,48	12,32	45,0
Média (mesa) (%)				46,4
Desvio Padrão (mesa) (%)				7,2
Média (alma) (%)				35,2
Desvio Padrão (alma) (%)				1,3

Tabela A.18 – Fração volumétrica de fibras dos perfis do ensaio de compressão centrada C3 Iso.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	10,64	0,60	11,05	67,9
2 (mesa)	11,92	0,67	12,36	66,2
3 (alma)	11,19	0,76	11,63	57,5
4 (alma)	11,89	0,75	12,31	56,7
5 (mesa)	12,69	0,76	13,19	64,8
6 (mesa)	11,61	0,77	12,10	63,4
Média (mesa) (%)				65,6
Desvio Padrão (mesa) (%)				1,9
Média (alma) (%)				57,1
Desvio Padrão (alma) (%)				0,6
Fração volumétrica somente das fibras				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	10,64	0,60	10,93	48,4
2 (mesa)	11,92	0,67	12,22	45,5
3 (alma)	11,19	0,76	11,35	20,8
4 (alma)	11,89	0,75	12,06	23,3
5 (mesa)	12,69	0,76	13,04	46,4
6 (mesa)	11,61	0,77	11,95	43,8
Média (mesa) (%)				46,1
Desvio Padrão (mesa) (%)				1,9
Média (alma) (%)				22,1
Desvio Padrão (alma) (%)				1,8

Tabela A.19 – Fração volumétrica de fibras dos perfis do ensaio de compressão centrada C4_Iso.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,08	0,67	11,48	58,6
2 (mesa)	11,78	0,72	12,23	62,0
3 (alma)	11,51	0,82	11,98	56,6
4 (alma)	11,83	0,83	12,29	55,0
5 (mesa)	11,77	0,84	12,29	60,7
6 (mesa)	11,22	0,92	11,82	64,6
Média (mesa) (%)				61,5
Desvio Padrão (mesa) (%)				2,5
Média (alma) (%)				55,9
Desvio Padrão (alma) (%)				1,1
Fração volumétrica somente das fibras				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	11,08	0,67	11,38	44,2
2 (mesa)	11,78	0,72	12,10	44,9
3 (alma)	11,51	0,82	11,72	25,7
4 (alma)	11,83	0,83	12,0	19,2
5 (mesa)	11,77	0,84	12,12	41,2
6 (mesa)	11,22	0,92	11,63	43,8
Média (mesa) (%)				43,6
Desvio Padrão (mesa) (%)				1,6
Média (alma) (%)				22,5
Desvio Padrão (alma) (%)				4,6

Tabela A.20 – Fração volumétrica de fibras dos perfis do ensaio de compressão centrada C5_Iso, TDL1_Iso e TDL2_Iso.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	12,69	0,91	13,28	65,0
2 (mesa)	11,21	0,94	11,77	59,4
3 (alma)	11,35	0,92	11,88	56,9
4 (alma)	10,27	0,99	10,84	57,1
5 (mesa)	11,54	1,21	12,33	64,8
6 (mesa)	11,61	1,18	12,37	64,1
Média (mesa) (%)				63,4
Desvio Padrão (mesa) (%)				2,6
Média (alma) (%)				57,0
Desvio Padrão (alma) (%)				0,2
Fração volumétrica somente das fibras				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	12,69	0,91	13,08	42,7
2 (mesa)	11,21	0,94	11,58	39,2

3 (alma)	11,35	0,92	11,54	20,8
4 (alma)	10,27	0,99	10,55	28,3
5 (mesa)	11,54	1,21	12,10	45,9
6 (mesa)	11,61	1,18	12,15	46,0
Média (mesa) (%)				43,5
Desvio Padrão (mesa) (%)				3,2
Média (alma) (%)				24,6
Desvio Padrão (alma) (%)				5,4

Tabela A.21 – Fração volumétrica de fibras dos perfis do ensaio de compressão centrada CDL6_Iso e CDL_Iso.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	12,69	0,91	13,28	58,8
2 (mesa)	11,21	0,94	11,77	63,9
3 (alma)	11,35	0,92	11,88	51,6
4 (alma)	10,27	0,99	10,84	57,4
5 (mesa)	11,54	1,21	12,33	66,4
6 (mesa)	11,61	1,18	12,37	63,1
Média (mesa) (%)				63,1
Desvio Padrão (mesa) (%)				3,2
Média (alma) (%)				54,5
Desvio Padrão (alma) (%)				4,1
Fração volumétrica somente das fibras				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	12,69	0,91	13,08	40,8
2 (mesa)	11,21	0,94	11,58	44,7
3 (alma)	11,35	0,92	11,54	18,0
4 (alma)	10,27	0,99	10,55	26,1
5 (mesa)	11,54	1,21	12,10	48,1
6 (mesa)	11,61	1,18	12,15	45,4
Média (mesa) (%)				44,8
Desvio Padrão (mesa) (%)				3,0
Média (alma) (%)				22,1
Desvio Padrão (alma) (%)				5,7

Tabela A.22 – Fração volumétrica de fibras dos perfis do ensaio de compressão centrada CDL7 Iso.

Fração volumétrica de fibras total (fibras e mantas)				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	12,69	0,91	13,28	64,6
2 (mesa)	11,21	0,94	11,77	60,7
3 (alma)	11,35	0,92	11,88	57,8
4 (alma)	10,27	0,99	10,84	59,7
5 (mesa)	11,54	1,21	12,33	64,5
6 (mesa)	11,61	1,18	12,37	62,1
Média (mesa) (%)				63,0
Desvio Padrão (mesa) (%)				1,9
Média (alma) (%)				58,8
Desvio Padrão (alma) (%)				1,3
Fração volumétrica somente das fibras				
Amostra	Massa do cadinho (g)	Massa da amostra seca (g)	Massa do cadinho e cinza (g)	Fração volumétrica de fibras (%)
1 (mesa)	12,69	0,91	13,08	53,1
2 (mesa)	11,21	0,94	11,58	39,3
3 (alma)	11,35	0,92	11,54	30,5
4 (alma)	10,27	0,99	10,55	33,5
5 (mesa)	11,54	1,21	12,10	51,3
6 (mesa)	11,61	1,18	12,15	44,4
Média (mesa) (%)				47,1
Desvio Padrão (mesa) (%)				6,4
Média (alma) (%)				32,1
Desvio Padrão (alma) (%)				2,2

Anexo B – Ensaio de Tração Direta

Foram realizados ensaios de tração simples para a obtenção das tensões máximas de tração no material e o módulo de elasticidade.

Foram ensaiados 24 corpos de prova retirados dos perfis em estudo, sendo estes da mesa superior, mesa inferior e da alma. Dos 24 corpos de prova, doze são da resina poliéster isoftálica e doze são da resina éster vinílica. Como houve diferença na fração volumétrica de fibras dos perfis utilizados nos ensaios de flexão simples dos perfis utilizados nos ensaios de compressão centrada, por não pertencerem ao mesmo lote de fabricação, foram confeccionados corpos de prova para os ensaios de tração direta com as duas frações volumétricas.

A tensão de tração foi calculada pela equação:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad [\text{Eq. B 1}]$$

em que:

P = força axial aplicada;

A = área da seção transversal.

A deformação foi calculada pela equação:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad [\text{Eq.B 2}]$$

em que:

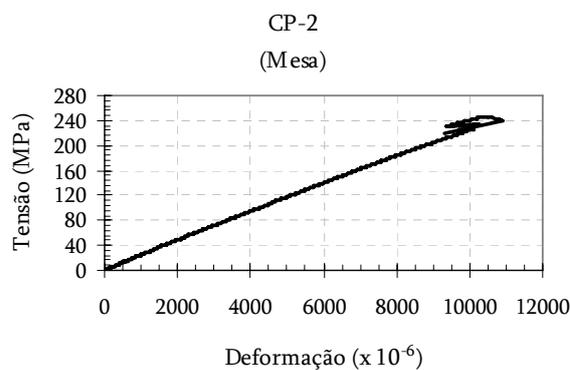
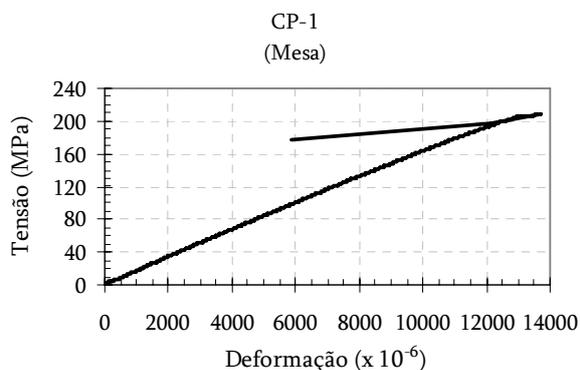
ΔL = alongamento específico;

L = comprimento total da barra, sendo adotado o curso do extensômetro mecânico (clip gage).

O módulo de elasticidade foi obtido através do coeficiente angular da parte linear do diagrama de tensão-deformação. Neste anexo serão apresentadas as curvas de tensão-deformação de todos os corpos de prova ensaiados.

1. Curvas de tensão-deformação para corpos de prova de perfis utilizados nos ensaios de flexão simples

Resina éster vinílica



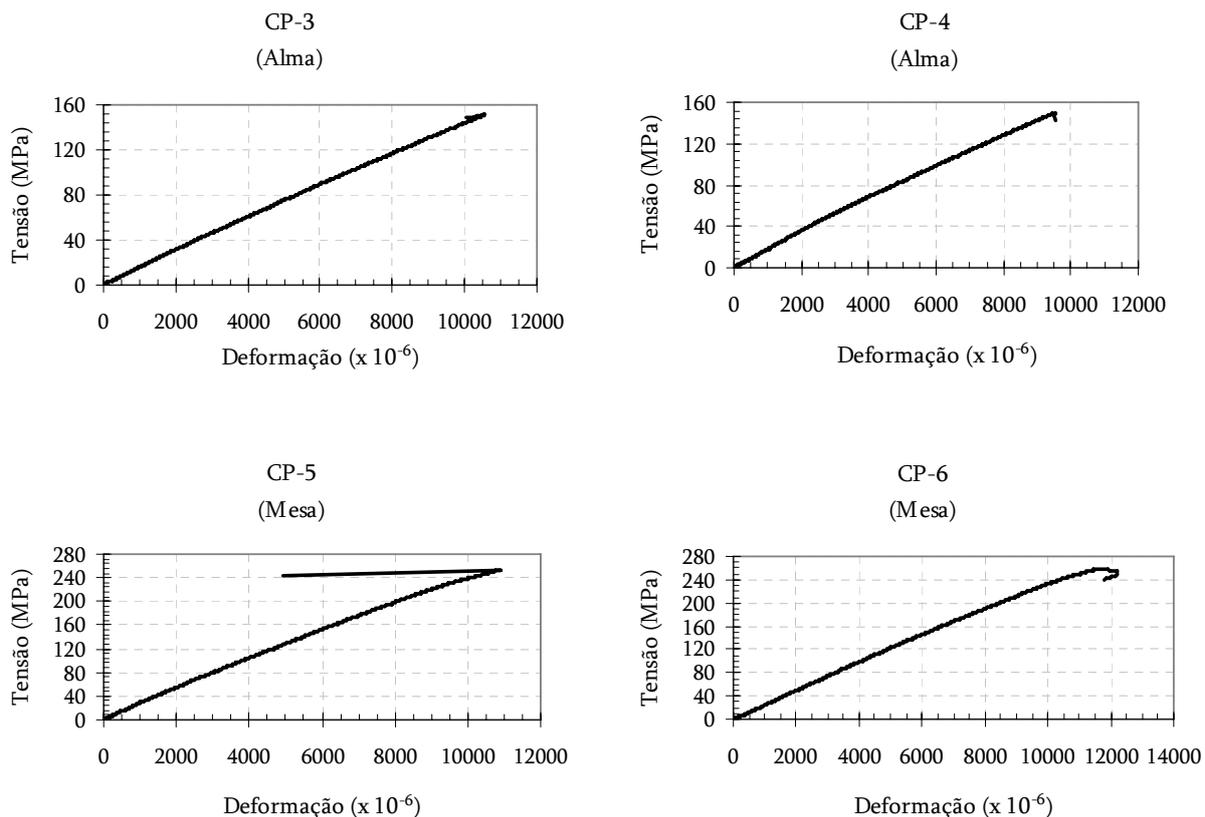
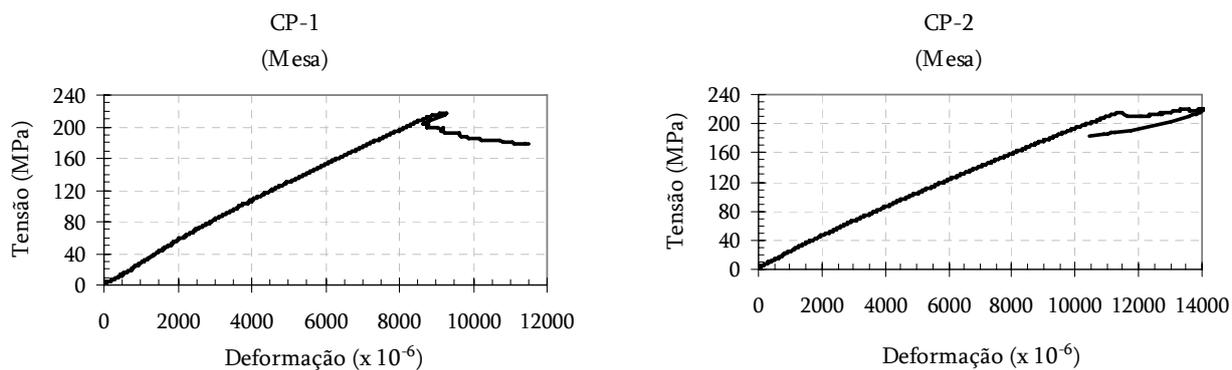


Figura B 1 – Curvas de tensão-deformação dos corpos de prova dos perfis compostos de resina éster vinílica dos ensaios de flexão simples.

Resina poliéster isoftálica



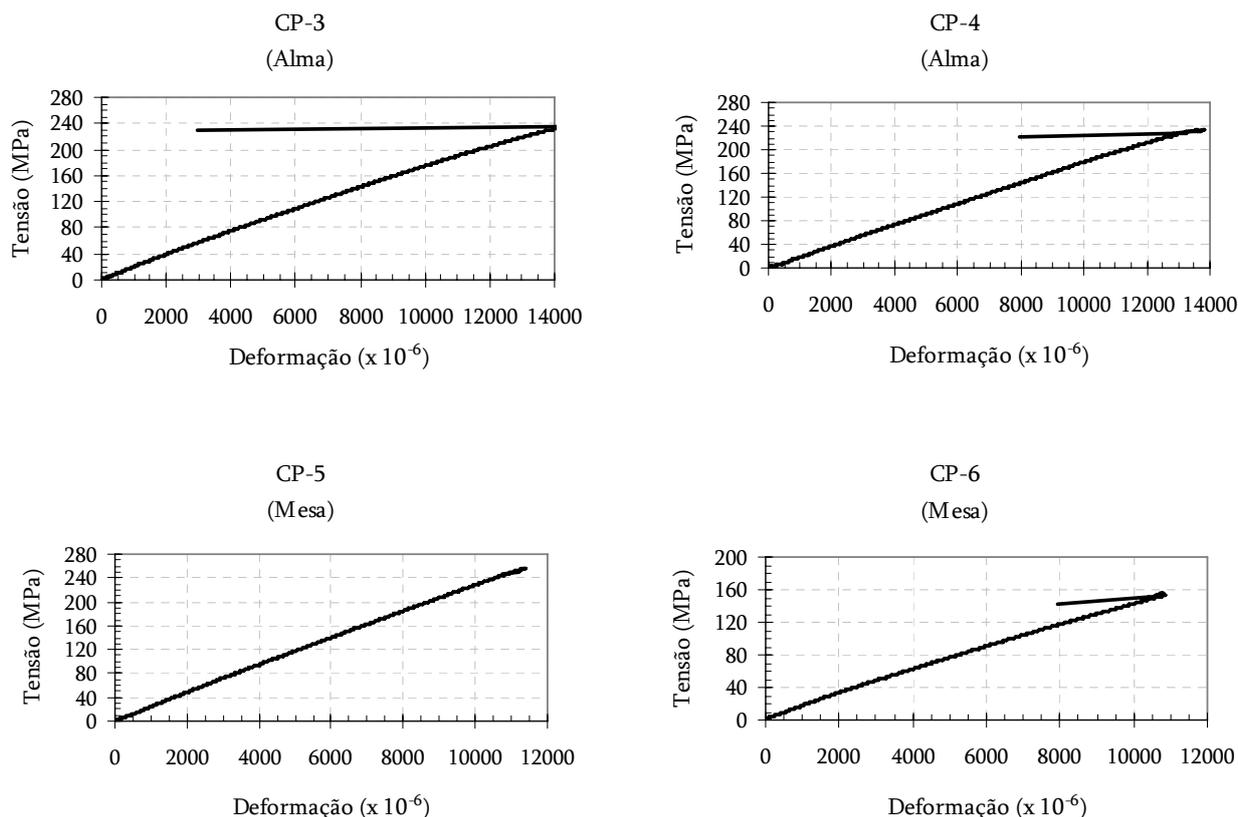
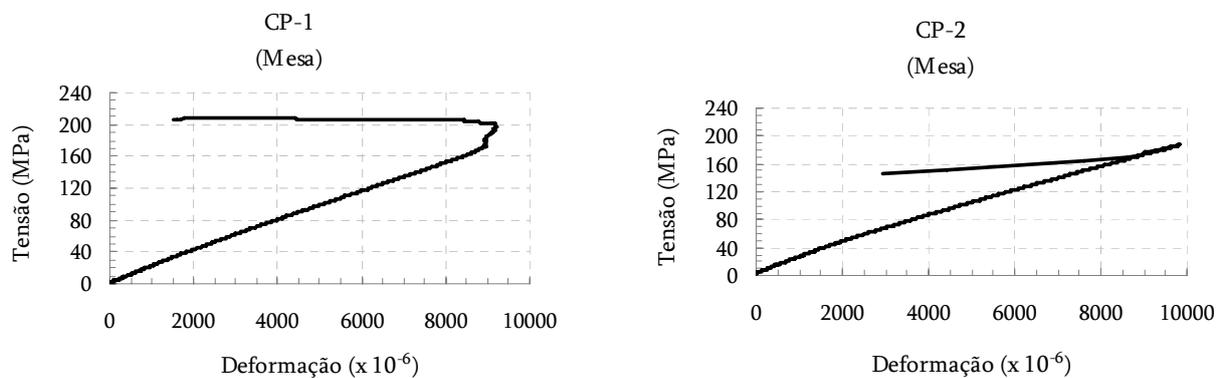


Figura B 2 – Curvas de tensão-deformação dos corpos de prova dos perfis compostos de resina poliéster isoftálica utilizados nos ensaios de flexão simples

2. Curvas de tensão-deformação para corpos de prova de perfis utilizados nos ensaios de compressão centrada e deformação lenta.

Resina éster vinílica



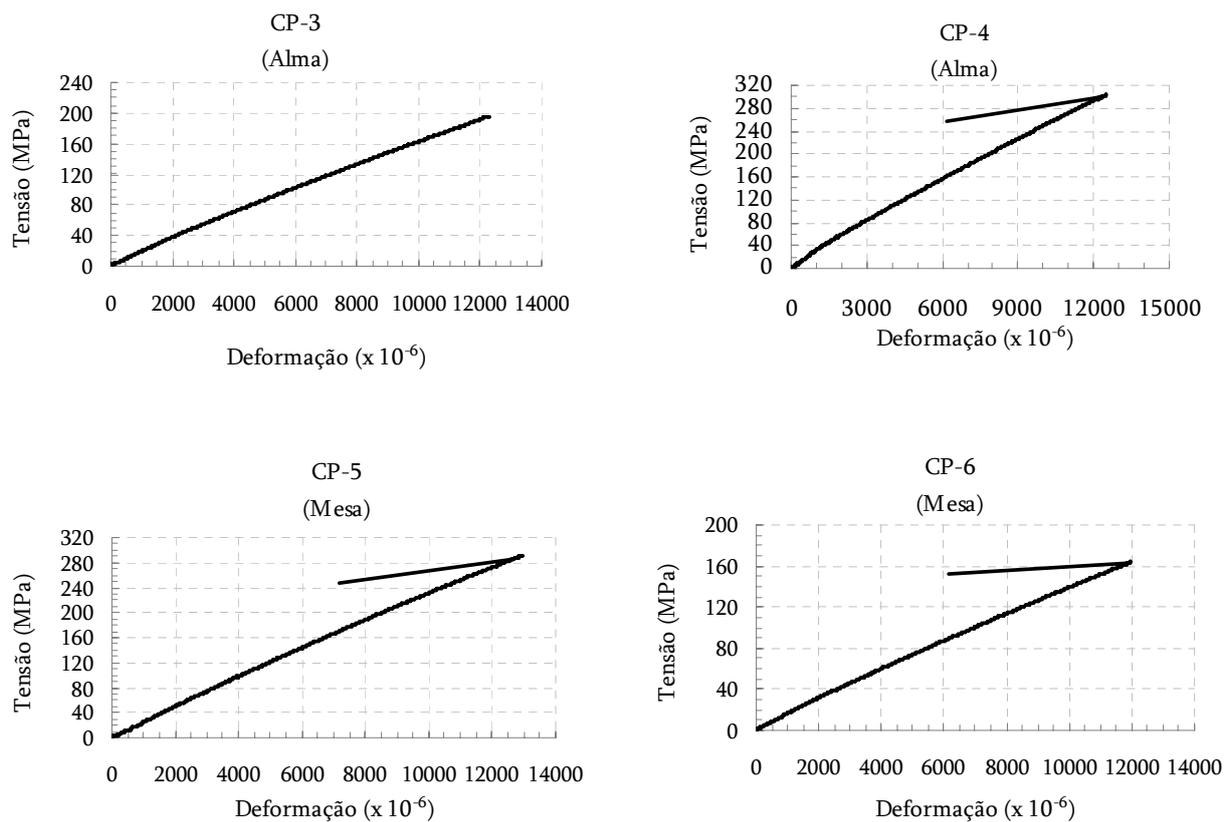
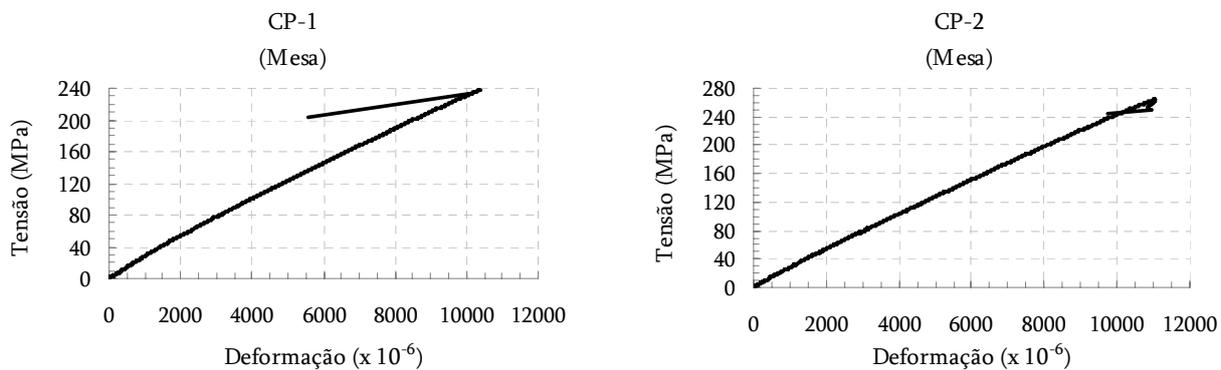


Figura B 3 – Curvas de tensão-deformação dos corpos de prova dos perfis utilizados nos ensaios de compressão centrada e deformação lenta formados de resina éster vinílica.

Resina poliéster isoftálica



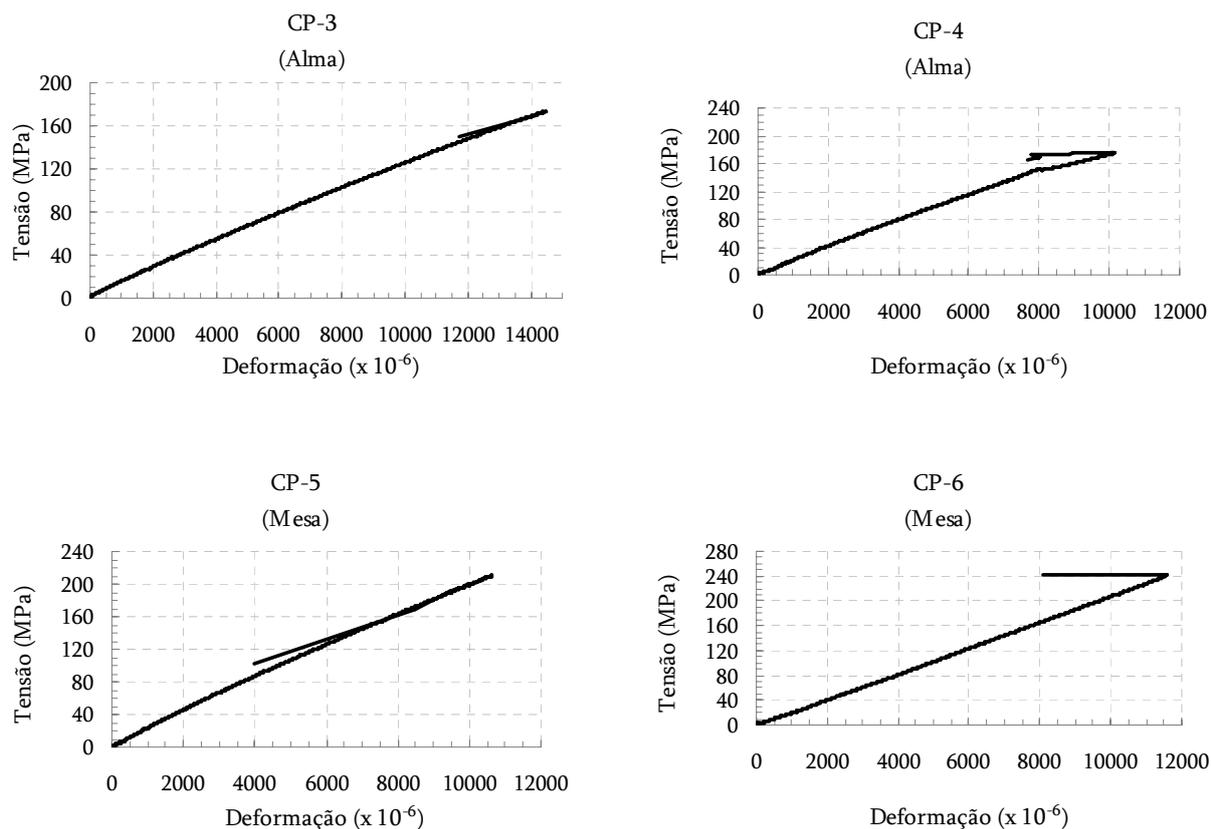


Figura B 4 – Curvas de tensão-deformação dos corpos de prova dos perfis utilizados nos ensaios de compressão centrada e deformação lenta formados de resina poliéster isoftálica.

De acordo com Daniel [6] a ruptura do material compósito submetido à tração depende das propriedades dos componentes. As fissuras iniciais da fibra produzem diferentes tipos de ruptura em sua vizinhança. O mecanismo de colapso pode ser:

- Fissuras transversais da matriz em compósitos com matriz frágil e interface relativamente forte;
- Delaminação de uma interface relativamente fraca e/ou deformação última relativamente alta
- Fraturas cônicas de cisalhamento na matriz no caso de matriz relativamente dúctil e uma interface forte.

Na maioria dos casos o colapso é localizado sendo transferido para as fibras adjacentes até o colapso global da estrutura. Na Figura B5 é apresentado o colapso dos corpos de prova dos ensaios de tração direta a temperatura ambiente.

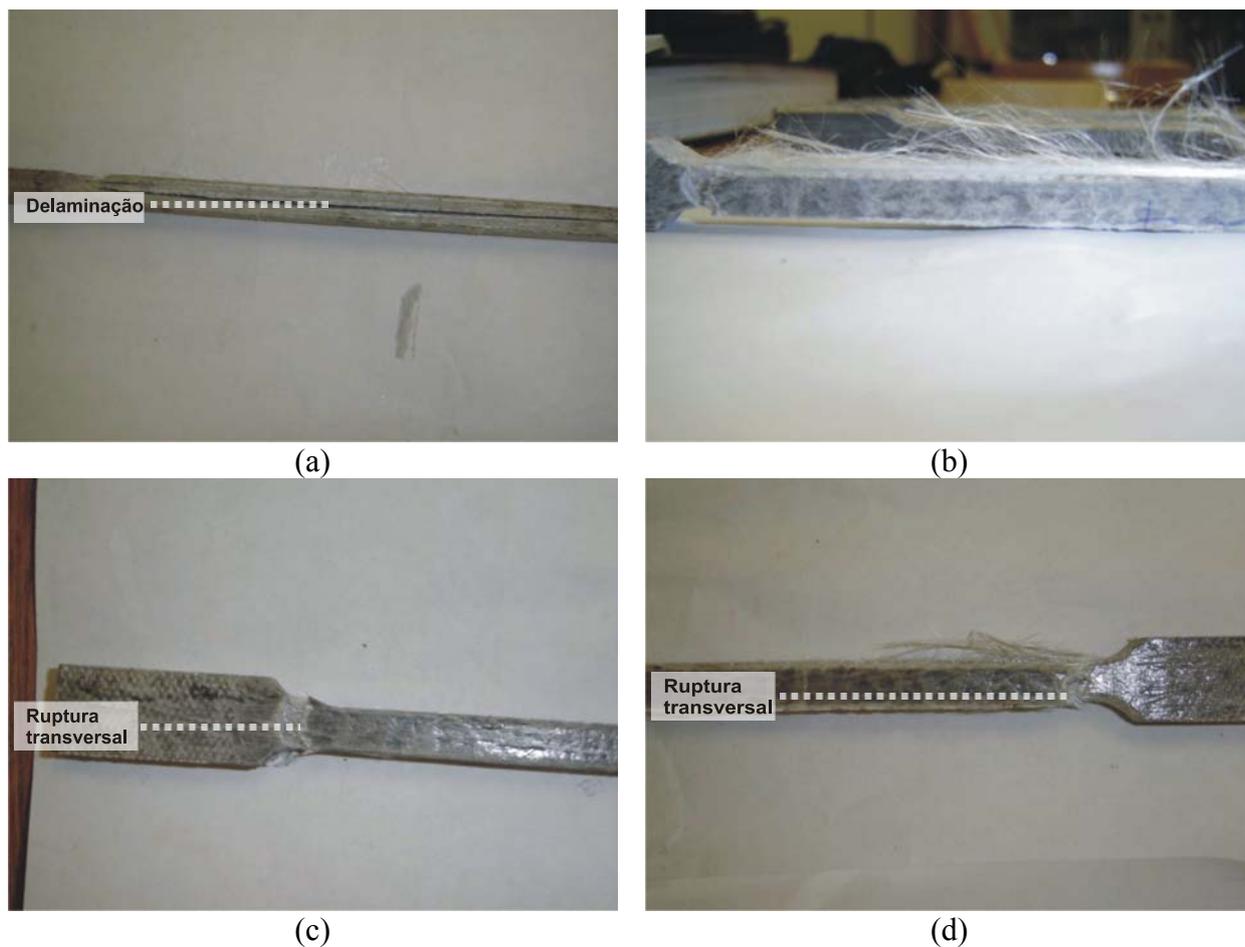


Figura B 5 – Tipos de colapso ocorridos nos corpos de prova dos ensaios de tração direta: (a) e (b) colapso por delaminação; (c) e (d) colapso por ruptura transversal.