



Flavio Soutilha de Souza

**Influência de Temperaturas Elevadas no
Comportamento à Flexão de Compósitos
Poliméricos Pultrudados Reforçados
com Fibra de Vidro (PRFV)**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Flávio de Andrade Silva
Co-orientador: Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso

Rio de Janeiro
Abril de 2017



Flavio Soutilha de Souza

**Influência de Temperaturas Elevadas no
Comportamento à Flexão de Compósitos
Poliméricos Pultrudados Reforçados
com Fibra de Vidro (PRFV)**

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

Prof. Flávio de Andrade Silva

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso

Co-orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Júlio Jerônimo Holtz Silva Filho

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. José Roberto Moraes d’Almeida

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC-Rio

Profª. Janine Domingos Vieira

Universidade Federal Fluminense

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do
Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de abril de 2017

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

Flavio Soutilha de Souza

Graduou-se em Engenharia Civil pela UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2009. Em 2014 iniciou o curso de mestrado, onde junto com o Professor Flávio de Andrade Silva vem estudando o comportamento de materiais compósitos. É integrante do quadro de engenheiros civis da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro.

Ficha Catalográfica

Souza, Flavio Soutilha de

Influência de temperaturas elevadas no comportamento à flexão de compósitos poliméricos pultrudados reforçados com fibra de vidro (PRFV) / Flavio Soutilha de Souza ; orientador: Flávio de Andrade Silva ; co-orientador: Daniel Carlos Taissum Cardoso. – 2017.

130 f. : il. color. ; 30 cm

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Perfil pultrudado. 3. PRFV. 4. Flexão. 5. Temperatura elevada. I. Silva, Flávio de Andrade. II. Cardoso, Daniel Carlos Taissum. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Em primeiro lugar a Deus, por ter me abençoado com essa oportunidade de cursar o mestrado e todas as outras durante minha vida.

Aos meus pais, em especial minha mãe Maria Lúcia, minha eterna gratidão pelo amor incondicional, pelos valores passados e pelos esforços para que eu sempre tivesse a melhor educação.

À minha irmã Daniele, por todo carinho e amor de sempre.

À minha noiva Rachel, pela paciência e companheirismo durante as horas que tive que me dedicar ao estudo.

Ao meu professor orientador Flávio, pelo incentivo, pelos ensinamentos passados, pela confiança para realização deste trabalho, pela compressão diante as dificuldades e pela amizade.

Ao meu professor co-orientador e ex-colega de graduação e estágio Daniel, pelo incentivo, pelos ensinamentos passados e pela amizade. Deixo aqui também minha admiração pelo seu nível profissional e sua competência.

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

Ao Professor José Roberto, pelas orientações iniciais para a realização de ensaios no MEV.

Às amigas construídas ao longo do mestrado, pelas trocas de informações e conhecimentos.

Aos colegas de trabalho da Coordenadoria de Projetos da Prefeitura do Rio de Janeiro, pelo incentivo.

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

Resumo

de Souza, Flavio Soutilha; Silva, Flávio de Andrade (Orientador); Cardoso, Daniel Carlos Taissum (Co-orientador). **Influência de Temperaturas Elevadas no Comportamento à Flexão de Compósitos Poliméricos Pultrudados Reforçados com Fibra de Vidro (PRFV)**. Rio de Janeiro, 2017. 130 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho tem como objetivo investigar a influência de temperaturas elevadas no comportamento à flexão de compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro fabricados pelo processo de pultrusão. São analisados quatro diferentes compósitos constituídos por matrizes de resinas poliéster isoftálica, éster vinílico ou fenólica, reforçados por fibras de vidro tipo E dispostas na forma de *rovings*, manta de filamentos contínuos e véus. Fundamentos teóricos associados aos comportamentos mecânico e físico de materiais compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro são apresentados e os resultados de um programa experimental que envolveu ensaios à flexão, antes e após exposição às temperaturas de até 320 °C, análises da degradação dos materiais através de ensaios de termogravimetria e ensaios à tração, são reportados e analisados. As análises das propriedades mecânicas envolveram: estudo do módulo de elasticidade, tensão de ruptura e deformação. Os resultados mostraram que, apesar da degradação aparente, as propriedades mecânicas apresentaram melhoras em temperaturas próximas de 200 °C e não apresentaram significativas alterações após exposições até 320 °C. Os compósitos de matriz éster vinílico apresentaram as maiores resistências e o compósito de matriz fenólica se mostrou menos resistente e com comportamento mais frágil. Por fim, amostras dos materiais foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV), antes e após a exposição à temperatura elevada, com o objetivo de se verificar danos microestruturais em sua estrutura.

Palavras-chave

Perfil pultrudado; PRFV; flexão; temperatura elevada.

Abstract

de Souza, Flavio Soutilha; Silva, Flávio de Andrade (Advisor); Cardoso, Daniel Carlos Taissum (Co-advisor). **Influence of High Temperatures on the Flexural Behavior of Pultruded Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)**. Rio de Janeiro, 2017. 130 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work aims to investigate the influence of high temperatures on the flexural behavior of pultruded glass fiber reinforced polymeric profiles made by the pultrusion process. Four different composites constituted by isophthalic polyester, ester vinilic or phenolic resins reinforced with E-glass fibers arranged in form of rovings, continuous filaments and veils are analyzed. Theories associated with the mechanical and physical behavior of glass fiber reinforced polymer composites are presented and the results of an experimental program involving bending tests, before and after exposure to temperatures up to 320 °C, thermogravimetric material degradation analyzes and tensile tests, are reported and analyzed. The analysis of the mechanical properties involved: study of modulus of elasticity, tensile strength and strain. The results showed that, despite the apparent degradation, the mechanical properties showed improvements at temperatures close to 200 °C and did not show significant changes after exposures up to 320 °C. The composites of the vinyl ester matrix showed the highest strengths and the phenolic matrix composite showed lower resistant and fragile behavior. Finally, samples of the materials were analyzed in the scanning electron microscopy (SEM), before and after exposure to high temperatures, in order to verify microstructural damages in its structure.

Keywords

Pultruded profile; GFRP; high temperature; flexural.

Sumário

| | |
|--|----|
| 1 Introdução | 21 |
| 1.1. Materiais Compósitos | 21 |
| 1.2. Motivação | 22 |
| 1.3. Objetivos | 23 |
| 1.4. Organização da Dissertação | 24 |
| 2 Revisão da Literatura | 25 |
| 2.1. Histórico | 25 |
| 2.2. Aplicações | 28 |
| 2.3. Fibras de Reforço | 31 |
| 2.3.1. Fibra de Vidro | 32 |
| 2.4. Matrizes | 33 |
| 2.4.1. Polímeros Termofixos | 35 |
| 2.5. Interface Fibra-Matriz | 36 |
| 2.6. Processos de Fabricação | 36 |
| 2.6.1. Pultrusão | 37 |
| 2.7. Propriedades dos Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Vidro | 40 |
| 2.7.1. Propriedades Mecânicas | 41 |
| 2.7.2. Propriedades Físicas | 44 |
| 2.7.3. Influência da Temperatura | 45 |
| 2.8. Normas e Códigos | 50 |
| 3 Programa Experimental | 51 |
| 3.1. Introdução | 51 |
| 3.2. Material | 51 |
| 3.3. Corpos de Prova | 53 |
| 3.4. Determinação da Fração Volumétrica das Fibras de Vidro | 54 |
| 3.5. Análise Termogravimétrica | 59 |
| 3.6. Análise Microestrutural | 61 |
| 3.7. Ensaios Mecânicos | 64 |

| | |
|--|-----|
| 3.7.1. Tração Axial | 64 |
| 3.7.2. Flexão Longitudinal | 67 |
| 3.7.3. Resistência Residual – Flexão | 72 |
| 4 Apresentação e Análise dos Resultados | 73 |
| 4.1. Resultados da Determinação da Fração Volumétrica das Fibras de Vidro | 73 |
| 4.2. Análise Termogravimétrica | 74 |
| 4.3. Análise Microestrutural | 79 |
| 4.4. Resultados dos Ensaio Mecânicos | 86 |
| 4.4.1. Tração Axial | 86 |
| 4.4.2. Flexão..... | 90 |
| 4.4.3. Flexão Residual..... | 96 |
| 5 Conclusão | 119 |
| 5.1. Considerações Finais | 119 |
| 5.2. Propostas para Trabalhos Futuros | 121 |
| 6 Referências bibliográficas | 122 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Comparação entre as características de perfis pultrudados e de materiais estruturais convencionais. (fonte: SERUTI, 2013)..... | 22 |
| Figura 2 - Sala de aula da escola primária Kennington, construída com material compósito polimérico reforçado com fibra de vidro, Preston, Reino Unido (fonte: http://www.mainstreammodern.co.uk). | 27 |
| Figura 3 – Primeira ponte para pedestre construída em material compósito no mundo, construída em 1992 em Aberfeldy, na Escócia. (fonte: SKINNER, 2009)..... | 27 |
| Figura 4 – Ponte sobre linha férrea construída em 1997 em Kolding, na Dinamarca. (fonte: www.fiberline.com). | 28 |
| Figura 5 - Reforço de vigas de concreto armado com mantas de fibra de carbono e resina polimérica (fonte: http://www.structuremag.org). | 29 |
| Figura 6 – Aplicação de barras pultrudadas de material compósito polimérico reforçado com fibra de vidro como armadura passiva de concreto armado (fonte: http://www.armastek.ir). | 30 |
| Figura 7 – Guarda corpo de perfis pultrudados de material compósito polimérico reforçado com fibra de vidro (fonte: http://www.pultrusao.com.br). | 30 |
| Figura 8 – Estrutura de cobertura com vão livre de 21m em galpão industrial construída com perfis pultrudados reforçados com fibra de vidro (fonte: http://www.pultrusao.com.br). | 31 |
| Figura 9 – Exemplos de diferentes perfis produzidos por pultrusão (fonte: http://www.cogumelo.com.br). | 37 |

| | |
|---|----|
| Figura 10 – Processo de fabricação por pultrusão (fonte: SERUTI, 2013)..... | 38 |
| Figura 11 – a) Filamentos contínuos de fibra de vidro (roving); b) Vêu de superfície; c) Manta com disposição aleatória..... | 38 |
| Figura 12 – Arranjo típico dos reforços de fibra de vidro no interior de perfis compósitos pultrudados reforçados com fibra de vidro..... | 39 |
| Figura 13 – Variação da resistência mecânica com a temperatura para diferentes materiais (adaptado de KODUR e BAINGO, 1998) | 49 |
| Figura 14 – Perfis analisados: a) Perfil I com matriz poliéster isoftálica; b) Perfil U com matriz éster vinílica; c) Perfil placa com matriz éster vinílica; d) Perfil U com matriz fenólica | 52 |
| Figura 15 – Máquina de serra de fita horizontal utilizada para confecção dos corpos de prova..... | 53 |
| Figura 16 – Corpo de prova identificado. | 54 |
| Figura 17 – Equipamentos usados nos ensaios de determinação das frações volumétricas: a)Forno Mufla; b)Balança analítica | 55 |
| Figura 18 – Cadinhos posicionados no interior do forno Mufla para início do ensaio | 56 |
| Figura 19 – Dimensões da amostra retiradas de cada perfil. | 57 |
| Figura 20 – Picnômetro de gás hélio utilizado para determinar a densidade dos compósitos..... | 58 |
| Figura 21 - Curva típica da degradação de um compósito polimérico em análises termogravimétricas..... | 60 |
| Figura 22 – Analisador térmico utilizado no ensaio de termogravimetria | 61 |
| Figura 23 – Amostras embutidas para serem analisadas no MEV. | 63 |
| Figura 24 – Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado nas análises. Laboratório de Microscopia Eletrônica da PUC –Rio..... | 63 |

| | |
|--|----|
| Figura 25 – Máquina servo-hidráulica utilizada no ensaio de tração axial. | 64 |
| Figura 26 – Geometria do corpo de prova para o ensaio de tração axial. | 65 |
| Figura 27 – Corpos de prova do ensaio à tração. | 65 |
| Figura 28 – Ensaio de tração axial. | 66 |
| Figura 29 – Exemplo de cálculo do módulo de elasticidade um gráfico tensão x deformação. | 67 |
| Figura 30 – Equipamento utilizado no ensaio de flexão. | 69 |
| Figura 31 – Corpos de prova do ensaio à flexão. | 69 |
| Figura 32 – Ensaio de flexão. | 70 |
| Figura 33 - Esquema do ensaio de flexão. | 70 |
| Figura 34 – Curvas TG e DTG da amostra do perfil I de matriz poliéster isoftálica. | 74 |
| Figura 35 - Curvas TG e DTG da amostra do perfil Placa de matriz éster vinílica. | 74 |
| Figura 36 - Curvas TG e DTG da amostra do perfil U de matriz éster vinílica. | 75 |
| Figura 37 - Curvas TG e DTG da amostra do perfil U de matriz fenólica. | 76 |
| Figura 38 – Micrografias da amostra do perfil I de matriz poliéster isoftálica. | 79 |
| Figura 39 - Micrografias da amostra do perfil U de matriz éster vinílica. | 80 |
| Figura 40 - Micrografias da amostra do perfil Placa de matriz éster vinílica. | 80 |
| Figura 41 - Micrografias da amostra do perfil U de matriz fenólica. | 81 |
| Figura 42 – Imagem da análise de microscopia eletrônica de varredura da amostra do perfil U de matriz éster vinílica. | 82 |
| Figura 43 – Elementos identificados no ponto 1 (carga) da Figura 42. | 83 |
| Figura 44 - Elementos identificados no ponto 2 (carga) da Figura 42. | 83 |

| | |
|---|----|
| Figura 45 - Elementos identificados no ponto 3 (fibra) da Figura 42. | 83 |
| Figura 46 – Elementos identificados no ponto 4 (resina) da Figura 42. | 84 |
| Figura 47 - Imagem da análise de microscopia eletrônica de varredura da amostra do perfil U de matriz fenólica. | 84 |
| Figura 48 – Elementos identificados no ponto 1 (fibra) da Figura 47. | 85 |
| Figura 49 – Elementos identificados no ponto 2 (resina) da Figura 47. | 85 |
| Figura 50 – Elementos identificados no ponto 3 (fibra) da Figura 47. | 85 |
| Figura 51 - Elementos identificados no ponto 4 (resina) da Figura 47. | 86 |
| Figura 52 – Gráfico tensão-deformação - perfil I de matriz poliéster isoftálica. | 87 |
| Figura 53 - Gráfico tensão-deformação - perfil placa de matriz éster vinílica. | 87 |
| Figura 54 - Gráfico tensão-deformação - perfil U de matriz éster vinílica. | 88 |
| Figura 55 – Modos de ruptura dos corpos de prova do ensaio a tração axial: a) próximo a garra; b) delaminação da camada externa. | 89 |
| Figura 56 – Falha por cisalhamento interlaminar. | 90 |
| Figura 57 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica. | 91 |
| Figura 58 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica. | 92 |
| Figura 59 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica. | 93 |
| Figura 60 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica. | 94 |
| Figura 61 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 120 °C. | 96 |

| | |
|--|-----|
| Figura 62 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 120 °C..... | 97 |
| Figura 63 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 120 °C. | 97 |
| Figura 64 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 120 °C..... | 98 |
| Figura 65 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 170 °C. | 99 |
| Figura 66 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 170 °C..... | 100 |
| Figura 67 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 170 °C. | 100 |
| Figura 68 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 170 °C..... | 101 |
| Figura 69 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 220 °C. | 102 |
| Figura 70 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 220 °C..... | 103 |
| Figura 71 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 220 °C. | 103 |
| Figura 72 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 220 °C..... | 104 |
| Figura 73 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 270 °C. | 105 |
| Figura 74 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 270 °C..... | 106 |
| Figura 75 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 270 °C. | 106 |
| Figura 76 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 270 °C..... | 107 |
| Figura 77 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 320 °C. | 108 |
| Figura 78 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 320 °C..... | 109 |

| | |
|--|-----|
| Figura 79 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 320 °C. | 109 |
| Figura 80 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 320 °C..... | 110 |
| Figura 81 – Médias das tensões de ruptura dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica..... | 112 |
| Figura 82 - Médias das tensões de ruptura dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica. | 112 |
| Figura 83 - Médias das tensões de ruptura dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica. | 113 |
| Figura 84 - Médias das tensões de ruptura dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica. | 113 |
| Figura 85 - Médias dos módulos de elasticidade dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica..... | 114 |
| Figura 86 - Médias dos módulos de elasticidade dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica. | 114 |
| Figura 87 - Médias dos módulos de elasticidade dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica..... | 115 |
| Figura 88 - Médias dos módulos de elasticidade dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica. | 115 |
| Figura 89 – Corpos de prova dos perfis I de matriz poliéster isoftálica (esquerda) e perfil Placa de matriz éster vinílica (direita). | 116 |
| Figura 90 – Corpos de prova do perfil U de matriz fenólica. | 117 |
| Figura 91 - Micrografias da amostra do perfil I de matriz poliéster isoftálica após aquecimento a 220 °C..... | 117 |
| Figura 92 - Micrografias da amostra do perfil U de matriz éster vinílica após aquecimento a 220 °C. | 117 |
| Figura 93 - Micrografias da amostra do perfil Placa de matriz éster vinílica após aquecimento a 220 °C. | 118 |
| Figura 94 - Micrografias da amostra do perfil U de matriz fenólica após aquecimento a 220 °C..... | 118 |

Lista de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Propriedades de referência de fibras de vidro tipo E (adaptado de GIBSON, 1994)..... | 33 |
| Tabela 2 – Propriedades de referência de diferentes resinas termofixas (fonte: BANK, 2006)..... | 36 |
| Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro fornecidas pelo fabricante:..... | 44 |
| Tabela 4 – Valores típicos de propriedades físicas de polímeros reforçados com fibra de vidro unidirecionais (adaptado de ALMEIDA, 2004, e CORREIA, 2013) | 45 |
| Tabela 5 – Dimensões das seções transversais dos perfis pultrudados utilizados:..... | 52 |
| Tabela 6 – Dimensões e massas, inicial e final, das amostras:..... | 56 |
| Tabela 7 – Valores de densidades fornecidos pelo picnômetro de gás hélio: | 59 |
| Tabela 8 – Valores de densidade da fibra de vidro tipo E encontrados na bibliografia: | 59 |
| Tabela 9 – Percentual de fibras por peso:..... | 73 |
| Tabela 10 – Resultados das análises termogravimétricas: | 78 |
| Tabela 11 – Percentual de fibras por peso:..... | 78 |
| Tabela 12 - Composição química de fibra de vidro tipo E (adaptado de HOLLAWAY e HEAD, 2001): | 82 |
| Tabela 13 – Tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação na ruptura obtidos nos ensaios de tração..... | 88 |
| Tabela 14 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica. | 91 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 15 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica. | 92 |
| Tabela 16 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica. | 93 |
| Tabela 17 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica. | 94 |
| Tabela 18 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 120 °C. | 96 |
| Tabela 19 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 120 °C. | 97 |
| Tabela 20 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 120 °C. | 98 |
| Tabela 21 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 120 °C. | 98 |
| Tabela 22 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 170 °C. | 99 |
| Tabela 23 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 170 °C. | 100 |
| Tabela 24 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 170 °C. | 101 |
| Tabela 25 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 170 °C. | 101 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 26 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 220 °C. | 102 |
| Tabela 27 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 220 °C. | 103 |
| Tabela 28 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 220 °C. | 104 |
| Tabela 29 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 220 °C. | 104 |
| Tabela 30 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 270 °C. | 105 |
| Tabela 31 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 270 °C. | 106 |
| Tabela 32 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 270 °C. | 107 |
| Tabela 33 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 270 °C. | 107 |
| Tabela 34 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 320 °C. | 108 |
| Tabela 35 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 320 °C. | 109 |
| Tabela 36 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 320 °C. | 110 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 37 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 320 °C..... | 110 |
| Tabela 38 – Quadro resumo dos valores de tensões de ruptura:..... | 111 |
| Tabela 39 – Quadro resumo dos valores de módulo de elasticidade: | 111 |
| Tabela 40 – Quadro resumo dos valores de deformação na ruptura:..... | 111 |

Lista de Símbolos

Letras romanas minúsculas

| | |
|-------|---------------------|
| h | Altura |
| m_f | Percentual em massa |
| t | Espessura |
| v | Vão de ensaio |
| w | Largura |
| m_f | Massa final |
| m_i | Massa inicial |

Letras romanas maiúsculas

| | |
|-------|-----------------------------------|
| A | Área da seção transversal |
| CV | Coeficiente de variação |
| DP | Desvio Padrão |
| E_f | Módulo de elasticidade à flexão |
| E_t | Módulo de elasticidade à tração |
| L_0 | Distância entre abas do clip gage |
| P | Carga aplicada |
| T_d | Temperatura de decomposição |
| T_g | Temperatura de transição vítrea |
| V_f | Fração volumétrica de fibra |
| W_f | Percentual de fibra |

Letras gregas minúsculas

| | |
|-----------------|------------------------|
| δ | Deflexão |
| δ | Deflexão |
| ε_f | Deformação à flexão |
| ε_t | Deformação axial |
| ρ_c | Densidade do compósito |
| ρ_f | Densidade da fibra |
| σ_1 | Tensão inicial |
| σ_2 | Tensão final |
| σ_f | Tensão de flexão |
| σ_t | Tensão de tração |

Letras gregas maiúsculas

| | |
|----------------------|-------------------------|
| ΔL | Alongamento específico |
| $\Delta \varepsilon$ | Diferença de deformação |
| $\Delta \sigma$ | Diferença de tensão |

1 Introdução

1.1. Materiais Compósitos

A busca pela eficiência na engenharia estrutural é sempre uma das principais fontes de motivação para novas pesquisas. Neste contexto, os materiais compósitos foram desenvolvidos, tendo como finalidade reunir em um único material propriedades específicas não encontradas em seus constituintes separadamente e também em materiais convencionais como ligas metálicas, cerâmicas, e materiais poliméricos.

Materiais estruturais podem ser divididos em quatro categorias básicas: metais, polímeros, cerâmicos e compósitos. Para GIBSON (1994) um material compósito é um material multifásico que consiste em dois ou mais componentes (constituintes) combinados a um nível macroscópico, não solúveis entre si, onde cada material mantém as suas próprias estruturas químicas e físicas. Um dos constituintes apresenta-se na forma de fibras, partículas ou flocos e é chamado de reforço ou fase discreta, enquanto o outro é um sólido moldável, chamado de matriz ou fase contínua. A matriz envolve o reforço para fornecer a forma desejada enquanto o reforço melhora as propriedades mecânicas globais do compósito. A região de contato entre o reforço e a matriz é chamada interface.

As principais vantagens dos materiais compósitos para aplicações estruturais são a excelente resistência mecânica em relação ao baixo peso específico, estabilidade dimensional e resistência à corrosão, quando comparado com materiais convencionais.

1.2.Motivação

A construção civil, no seu constante desenvolvimento, necessita absorver novas tecnologias construtivas e materiais para concepção de estruturas mais leves e arrojadas, sem abrir mão da qualidade e economia. Uma das alternativas que tem ganhado aceitação por parte dos engenheiros civis consiste nos perfis em materiais compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro (PRFV) obtidos pelo processo de pultrusão. Esses materiais, além de possuírem propriedades físicas e mecânicas favoráveis para o uso na engenharia civil necessitam de manutenção reduzida em comparação com o aço e o concreto. Por serem leves, também resultam em menores custos associados a transporte e montagem. Na Figura 1 é apresentado um gráfico comparativo entre algumas propriedades de compósitos poliméricos e materiais convencionais. Entretanto, o fato de se tratar de um material ainda não muito utilizado, onde pouco se conhece a respeito de suas propriedades e comportamento é razoável que engenheiros e projetistas encontrem dificuldades em projetar, dimensionar e especificar o uso desses materiais em suas obras (SANTOS *et al.*, 2009).

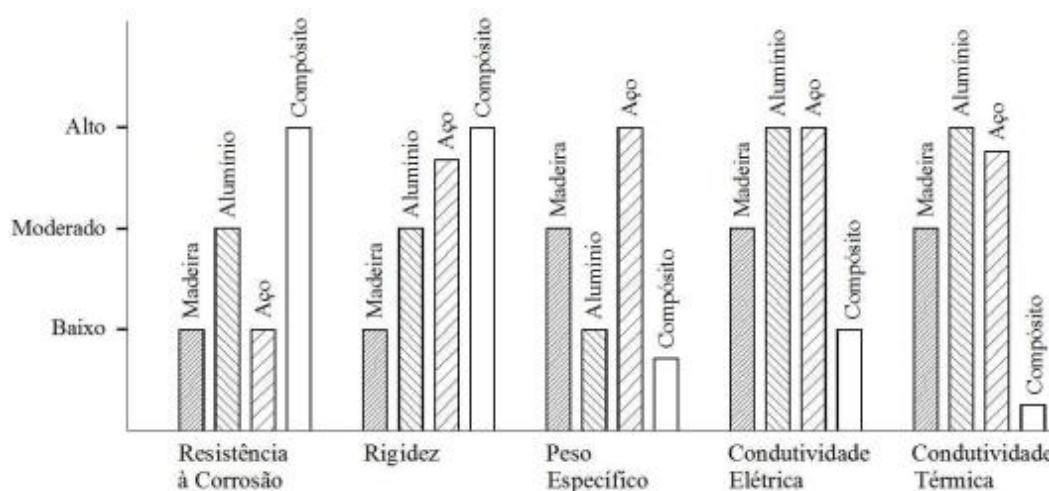


Figura 1 - Comparação entre as características de perfis pultrudados e de materiais estruturais convencionais. (fonte: SERUTI, 2013).

Apesar da crescente substituição dos materiais convencionais de construção por materiais compósitos, a aplicação destes perfis ainda está majoritariamente destinada a estruturas secundárias e de acesso. A ausência de técnicas, procedimentos normativos e estudos para o melhor conhecimento das

propriedades, comportamento e durabilidade frente a ambientes agressivos e mudanças de temperatura vem sendo a grande barreira para difundir o uso do material e permitir sua utilização como elementos principais em sistemas estruturais.

O comportamento a temperaturas elevadas é uma das principais preocupações na utilização deste material como elemento estrutural. Uma vez que os materiais na construção civil são obrigados a demonstrar um desempenho adequado à utilização prescrita, constata-se que os perfis compósitos PRFV apresentam grande degradação quando sujeitos a elevação de temperaturas. Trata-se de um material inflamável que quando exposto a temperaturas elevadas sofre alterações nas propriedades mecânicas, comprometendo a segurança a nível estrutural.

1.3.Objetivo

Este trabalho tem como objetivo fazer uma análise da influência de temperaturas elevadas (até 320 °C) no comportamento mecânico à flexão de quatro diferentes tipos de perfis estruturais PRFV, fabricados pelo processo de pultrusão. Para tal, são realizados ensaios experimentais em corpos de prova para a determinação de valores numéricos de propriedades físicas e mecânicas. Os perfis analisados apresentam diferenças em suas composições e geometrias.

Inicialmente foi feito um estudo bibliográfico sobre propriedades dos materiais compósitos poliméricos reforçados por fibras de vidro e seu comportamento sob efeito de temperaturas elevadas, seja “in situ” ou residual, após o seu resfriamento.

Para a obtenção dos dados experimentais foram realizados ensaios de flexão em corpos de prova em estado natural, como recebidos, e após submetê-los a temperaturas de até 320° C. Também foi escopo do programa a análise física do efeito da temperatura nos materiais constituintes do compósito, em especial as resinas, através de técnicas como análise termogravimétrica e microscopia eletrônica de varredura.

Ao final, os dados coletados são comparados e relacionados de forma a se melhor compreender o comportamento do material.

1.4.Organização da Dissertação

A seguinte organização é adotada nesta dissertação:

- No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre materiais compósitos, seus constituintes, métodos de fabricação, com ênfase em pultrusão, propriedades do material e a influência de temperaturas elevadas (acima da temperatura ambiente) no seu comportamento mecânico.
- No Capítulo 3 é descrito o programa experimental adotado neste trabalho para a caracterização do comportamento à flexão dos perfis pultrudados em compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro.
- No Capítulo 4 os resultados dos ensaios realizados no programa experimental são analisados e discutidos.
- No Capítulo 5 é apresentada a conclusão de todo o trabalho realizado e são feitas sugestões para trabalhos futuros.

2 Revisão da Literatura

2.1. Histórico

A ideia de materiais compósitos não é recente, já que na própria natureza encontramos diversos exemplos da utilização desse conceito de material (CHAWLA, 2012). Por exemplo, a madeira é um material fibroso composto por fibras de celulose em uma matriz de lignina. As fibras de celulose têm elevada resistência à tração, mas são muito flexíveis. Assim, cabe à matriz de lignina manter as fibras unidas e prover a rigidez. O osso é outro exemplo de um compósito natural, constituído por fibras curtas e macias de colágeno embebidas numa matriz mineral formada essencialmente por cálcio.

Desde o início da humanidade, a raça humana tem tentado criar materiais com propriedades melhoradas de acordo com suas necessidades. No caso de construções, exemplos históricos do uso de combinações de materiais para proporcionar facilidade de execução e melhor desempenho são abundantes na literatura, tal como a utilização de reforço de palha em lama para formar tijolos de barro pelos antigos israelitas (800 a.C.) (KARBHARI e ZHAO, 1999). Os constituintes individuais, barro e palha, não poderiam desempenhar a função individualmente, o que só era possível quando colocados juntos. Outro exemplo clássico na construção civil é o próprio concreto armado, resultado da combinação de aço e concreto com o objetivo de superar a deficiência à tração do concreto.

Pode-se dizer que o início do desenvolvimento dos compósitos poliméricos, utilizados nos dias de hoje, ocorreu no final do século 19 com o surgimento do processo de polimerização, o qual permitiu que novas resinas sintéticas fossem obtidas.

De acordo com DAVALOS *et. al.* (2002), no final da década de 30 e início da Segunda Guerra Mundial, a fibra de vidro começa a ser utilizada como material de reforço e surgem os primeiros compósitos de fibra de vidro. Novas resinas, como epóxis, também são disponíveis. Neste período, devido às imposições de restrições sobre várias nações para importação e exportação de materiais, houve

uma escassez de materiais, especialmente nas aplicações militares. Os aviões de combate foram os instrumentos mais avançados de guerra, fazendo com que materiais com baixa densidade e alta resistência tivessem alta demanda. Além disso, radares e outros equipamentos eletrônicos exigiam materiais não metálicos que não interferissem na transmissão dos sinais eletromagnéticos. Assim, os polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP, em inglês) foram utilizados pela primeira vez nestas aplicações.

Segundo BANNISTER (2001), na década 1950, os métodos de fabricação incluindo a pultrusão foram desenvolvidos, possibilitando uma produção em larga escala com pouco desperdício de material e baixa necessidade de mão de obra. Com isso, a redução do custo de fabricação começou a fazer o uso do material ficar mais atrativo.

Nos anos 60, os materiais compósitos passaram a ser usados nas indústrias aeroespacial, marinha e automobilística (DAS e NIZAM, 2014). De acordo com CORREIA (2008), foi no final desta década de 60 e início dos anos 70 que os compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro começaram realmente a ganhar interesses da indústria da construção, surgindo como materiais construtivos. Novas técnicas de construção foram concebidas utilizando painéis de materiais compósitos, fabricados por laminação manual, como elementos de divisória e utilizados em fachadas integrados numa estrutura primária em materiais tradicionais.

Segundo HOLLAWAY (2003), em 1974, a primeira estrutura feita totalmente em material compósito polimérico (resina poliéster reforçada com fibra de vidro) foi erguida. O sistema é constituído por uma série de blocos, fabricados por laminação manual e unidos na forma de um icosaedro. A construção é uma sala de aula da escola primária Kennington, no Reino Unido, e se encontra em uso até hoje (Figura 2).



Figura 2 - Sala de aula da escola primária Kennington, construída com material compósito polimérico reforçado com fibra de vidro, Preston, Reino Unido (fonte: <http://www.mainstreammodern.co.uk>).

Nos anos 70 e início dos anos 80, os avanços na tecnologia de pultrusão levaram à capacidade de produzir peças pultrudadas maiores, sendo desenvolvidas em forma de perfil e usadas pela primeira vez em sistemas estruturais (BAKIS *et. al*, 2002).

Em 1992, foi construída a primeira ponte para pedestre feita em material compósito, localizada na cidade de Aberfeldy, na Escócia (Figura 3). É uma estrutura estaiada com comprimento total de 113 m, 2,23 m de largura e vão de 63 m sobre o Rio Tay. Em 1997, em Kolding na Dinamarca, outra ponte estaiada em material compósito foi construída. A estrutura de 40 m de comprimento permite a transposição de uma movimentada linha férrea (Figura 4).



Figura 3 – Primeira ponte para pedestre construída em material compósito no mundo, construída em 1992 em Aberfeldy, na Escócia. (fonte: SKINNER, 2009)



Figura 4 – Ponte sobre linha férrea construída em 1997 em Kolding, na Dinamarca. (fonte: www.fiberline.com).

Em 1997, a *American Society of Civil Engineers* (ASCE) fundou o *Journal of Composites for Construction*, que hoje é um dos principais arquivos internacionais de informações sobre materiais compósitos.

Em 2003, foi criado em Hong Kong o *International Institute for FRP in Construction* (IIFC), uma instituição sem fins lucrativos cujo objetivo é reunir informações e promover o desenvolvimento do uso dos materiais compósitos reforçados por fibra na engenharia.

2.2. Aplicações

Inicialmente, o campo de aplicação dos materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras esteve limitado a estruturas com elevados requisitos de desempenho, como as das indústrias aeroespacial e naval. Mas, de acordo com CORREIA *et al.* (2004), os problemas de durabilidade dos materiais tradicionais e as exigências de ritmos mais acelerados de construção têm tido um efeito impulsionador no desenvolvimento e na utilização de materiais estruturais mais leves, com menores exigências de manutenção e menos sujeitos à degradação causada por agentes ambientais. Essas exigências, aliadas ao próprio desenvolvimento tecnológico, permitiram a expansão destes novos materiais ao setor da construção. Para KARBHARI (2004), atualmente, pode-se afirmar que as necessidades de reabilitação de estruturas danificadas e a renovação da

infraestrutura de instalações já existentes de edifícios e pontes são as principais áreas de emprego dos materiais compósitos poliméricos na engenharia civil.

Segundo HOLLAWAY (2009), a aplicação de materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras durante os últimos 20 anos na indústria da engenharia civil pode ser convenientemente dividida em estruturas fabricadas inteiramente com esses materiais e combinações com materiais de construção convencionais.

VAN DEN EINDE *et al.* (2003) dividem a renovação do inventário estrutural existente em reabilitação, que inclui as aplicações para a reparação e adaptação, reforço de estruturas e novas construções, sistemas desenvolvidos inteiramente de materiais compósitos reforçados com fibras ou sistemas híbridos, combinando materiais compósitos com outros materiais convencionais como concreto, aço e madeira. A Figura 5 apresenta um exemplo da utilização de materiais compósitos no reforço de estruturas.



Figura 5 - Reforço de vigas de concreto armado com mantas de fibra de carbono e resina polimérica (fonte: <http://www.structuremag.org>).

Como reforço, os materiais compósitos poliméricos têm sido utilizados na forma de barras para armaduras passivas no concreto (Figura 6), armaduras de protensão interna e externa, estais, tirantes e na forma de tiras e chapas para o reforço de lajes, vigas e pilares. No caso de novas construções, há projetos em que os materiais convencionais são substituídos pelos materiais compósitos poliméricos e projetos onde a proposta é o desenvolvimento de novas concepções estruturais, visando o melhor aproveitamento das propriedades do material.



Figura 6 – Aplicação de barras pultrudadas de material compósito polimérico reforçado com fibra de vidro como armadura passiva de concreto armado (fonte: <http://www.armastek.ir>).

No caso dos perfis pultrudados PRFV, o campo de aplicação tem sido muito diversificado. Segundo BAI *et. al.* (2015), hoje em dia, esses perfis são a forma mais utilizada de compósitos poliméricos na construção civil. Inicialmente foram utilizados quase exclusivamente em elementos não estruturais ou em estruturas secundárias, como escadas de acesso, guarda-corpos (Figura 7), painéis de fachada e plataformas de trabalho de indústrias com requisitos específicos de durabilidade, como a indústria petroquímica ou de saneamento básico. No entanto, nos últimos anos começou a surgir um número crescente de aplicações em elementos estruturais de coberturas, edifícios e principalmente em pontes e passarelas. Exemplos de aplicações são ilustrados nas figuras 7 e 8.



Figura 7 – Guarda corpo de perfis pultrudados de material compósito polimérico reforçado com fibra de vidro (fonte: <http://www.pultrusao.com.br>).



Figura 8 – Estrutura de cobertura com vão livre de 21m em galpão industrial construída com perfis pultrudados reforçados com fibra de vidro (fonte: <http://www.pultrusao.com.br>).

HOLLAWAY (2010), afirma que o custo inicial de projeto e de material para uma construção com material compósito polimérico é superior ao de uma estrutura equivalente em aço ou concreto, porém economiza-se em mão de obra, equipamentos, tempo de montagem e manutenção durante a vida útil da estrutura.

2.3.Fibras de Reforço

De acordo com CHAWLA (2012), a fase de reforço é a principal responsável pela resistência e rigidez do material, tornando o compósito mais resistente e rígido na direção das fibras. Dependendo das direções como elas são orientadas, o material irá apresentar um comportamento anisotrópico, ortotrópico ou mesmo isotrópico.

O reforço pode ser disposto na forma de fibras ou partículas. Segundo CAMPBELL (2010), as partículas possuem dimensões aproximadamente iguais em todas as direções, podendo ser esféricas ou ter qualquer geometria regular ou irregular. Quando o material é submetido a um carregamento, este é partilhado entre as partículas e a matriz. No entanto, a carga resistida pelas partículas é muito maior do que a carga do material da matriz. Esta forma de disposição do reforço permite que o material tenha praticamente as mesmas propriedades em todas as

direções. Já as fibras consistem em filamentos de material com comprimentos muito superiores aos diâmetros, sendo a proporção entre o comprimento e diâmetro conhecida como razão de aspecto (CAMPBELL, 2010). Elas são classificadas em fibras contínuas e descontínuas e, segundo BAGHERPOUR (2012), ocupam 30% a 70% do volume nos materiais compósitos. As fibras contínuas são filamentos ininterruptos, usualmente armazenados em rolos, que são puxados à medida que o elemento vai sendo confeccionado. As fibras descontínuas são filamentos curtos, com razão de aspecto muito inferior às fibras contínuas, sendo colocadas no momento de moldagem do elemento e dispostas em direções aleatórias ou em forma de mantas (coladas entre si).

Segundo GIBSON (1994), o reforço na forma de fibras apresenta maior resistência devido ao seu processo de fabricação, que evita as falhas internas ou superficiais que normalmente enfraquecem o material, proporcionando menos defeitos quando comparados com o material produzido em massa.

Na indústria da construção, as fibras de vidro são as mais utilizadas, mas também podem ser encontradas fibras de carbono, aramida (Kevlar), boro ou mesmo fibras naturais (NETO e PARDINI, 2006). Alguns autores como GIBSON (1994) e KAW (2006) classificam como materiais compósitos avançados aqueles reforçados por fibras de mais alto módulo, como carbono, aramida e boro, mas suas aplicações na construção são normalmente restritas por conta do custo relativamente elevado.

2.3.1.Fibra de Vidro

A fibra de vidro é um composto inorgânico formado a partir do aquecimento e extrusão de uma mistura baseada em sílica com óxidos de cálcio, boro, sódio, ferro e alumínio (KAW, 2006). Conforme BANK (2006), neste processo são formados filamentos de 3 a 24 μm de diâmetro que posteriormente são agrupados formando fios ou *rovings*. Os filamentos de vidro são altamente abrasivos entre si, sendo assim, uma solução orgânica é aplicada de modo a minimizar a degradação relacionada à abrasão e promover um melhor acoplamento dos filamentos.

Em função da aplicação a que se destinam, diferentes tipos de fibras de vidro são encontradas comercialmente. Segundo WALLENBERGER (2001), as

mais comuns no mercado são as do tipo E, recomendadas em aplicações que necessitam de menor condutividade elétrica, mas que são largamente utilizadas em compósitos por conta do menor custo. Existem ainda as fibras do tipo S, cuja composição possui maior fração de sílica, conduzindo a maior resistência e rigidez, utilizada principalmente na indústria aeroespacial; do tipo C, usadas em ambientes químicos agressivos e corrosivos; do tipo R, aplicadas em alguns elementos estruturais da indústria da construção; do tipo D, utilizadas onde se requer baixa constante dielétrica; e do tipo A, para melhoria da aparência superficial. Combinações de diferentes tipos de fibras de vidro também são possíveis.

As fibras de vidro, em geral, possuem boa capacidade de deformação, boa resistência e baixo custo. Entretanto, de acordo com DANIEL e ISHAI (1994), é um material com rigidez relativamente baixa, baixa resistência à fadiga e rápida degradação quando exposto a condições ambientais severas ou na presença de água, ácidos e solução alcalina, fato que pode ser contornado com o uso de uma adequada matriz. Algumas propriedades das fibras de vidro do tipo E são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades de referência de fibras de vidro tipo E (adaptado de GIBSON, 1994)

| | Propriedades | | | |
|-----------------------|----------------------------|--|--------------------------------|------------------------|
| | Resistência à Tração (MPa) | Módulo de Elasticidade na Tração (GPa) | Densidade (g/cm ³) | Alongamento Máximo (%) |
| Fibra de Vidro tipo E | 3448 | 72,0 | 2,54 | 2,5 |

2.4. Matrízes

Segundo CALLISTER (1999), no caso dos compósitos reforçados com fibras, a matriz é a fase contínua do material que promove a união das fibras e atua como o meio através do qual uma tensão aplicada externamente é transmitida e distribuída para as fibras. Na direção do reforço, apenas uma fração muito pequena das forças aplicadas é suportada pela fase matriz. BANK (2006), afirma que outra função da matriz é a de proteger as fibras individuais contra danos

superficiais, como resultado da abrasão mecânica ou de reações químicas com o ambiente.

Assim como as fibras, os materiais compósitos também são classificados em função da natureza da matriz que o compõem, podendo ser polimérica, metálica ou cerâmica. A sua escolha depende, principalmente, do tipo de ambiente ao qual o compósito será inserido (GIBSON, 1994). De acordo com HOLLAWAY e HEAD (2001), as mais comuns são as poliméricas, mas apesar da grande variedade deste tipo de resina, apenas um número relativamente pequeno é realmente usado na construção civil. A seleção do tipo de polímero ocorre em função de alguns itens, incluindo aplicação, custo, método de fabricação e fornecimento.

Polímeros são macromoléculas orgânicas formadas a partir da combinação de unidades menores chamadas monômeros (CALLISTER, 1999). Estes materiais encontram-se divididos em dois grupos: os termoplásticos, que quando reaquecidos, tornam-se moldáveis e podem adquirir uma nova forma; e os termofixos, que, uma vez moldados, adquirem uma forma definitiva que não mais pode ser alterada.

Sob o ponto de vista mecânico, CARNEIRO e TEIXEIRA (2008) destacam que a matriz promove a redistribuição das tensões, evita a microflambagem das fibras nos compósitos submetidos à compressão e confere resistência ao cisalhamento em compósitos unidirecionais. Entretanto, tem pouca influência na resistência à tração do compósito. Para SANTOS *et. al.* (2012), a matriz separa as fibras e, em virtude de sua relativa plasticidade, previne a propagação de fraturas frágeis de fibra para fibra.

Materiais aditivos e cargas (*fillers*) são usualmente adicionados à matriz durante o processo de fabricação com o objetivo de melhorar alguma propriedade específica ou mesmo diminuir custos de produção. As cargas são materiais inertes e podem, por exemplo, melhorar o comportamento em situação de incêndio do compósito pela diminuição do conteúdo orgânico ou contribuir para a resistência à fadiga e melhorar o comportamento à fluência. Mas, segundo BANK (2006), é importante ter em consideração que a sua incorporação normalmente provoca uma redução das principais propriedades mecânicas, principalmente na direção longitudinal dos elementos, além de diminuir também a sua durabilidade. De acordo com CORREIA (2008), entre os aditivos existe uma grande variedade que

podem ser incorporados na matriz de modo a facilitar o processamento do material, melhorar o desempenho do produto final ou apenas modificar algumas propriedades. Essas substâncias são adicionadas geralmente em pequenas quantidades, menores que a quantidade de *fillers*, mas influenciam consideravelmente nas propriedades físicas e mecânicas do material.

2.4.1. Polímeros Termofixos

Os polímeros termofixos possuem estruturas formadas por cadeias poliméricas tridimensionais originadas de reações químicas de polimerização de seus precursores (JONES, 1999). Depois de conformados não podem ser remodelados pelo calor, sofrendo danos irreversíveis se submetidos a temperaturas acima da sua temperatura de vitrificação, ou transição vítrea (*glass transition temperature*), designada por T_g . A alteração da fase sólida para o estado viscoso (ou vice-versa) ocorre gradualmente ao longo de um intervalo finito de temperatura e a temperatura de vitrificação é o ponto médio deste intervalo. Sendo assim, corresponde à temperatura abaixo da qual o polímero se comporta como um sólido e acima do qual se comporta na forma de um líquido viscoso. De acordo com KARBHARI (2007), esta temperatura depende da composição química e do grau de cura do polímero, embora seja normalmente um valor entre 90 e 180 °C para as resinas utilizadas na construção civil.

Segundo FONSECA (2005), os polímeros termofixos apresentam baixa viscosidade, o que permite maior velocidade de processamento e boa adesão às fibras, além de terem menor custo, em comparação com os termoplásticos. De acordo com BAGHERPOUR (2012), os mais utilizados na engenharia civil são os epóxis, os ésteres vinílicos e os poliésteres insaturados isoftálicos. Os compostos fenólicos, em virtude do custo superior, são escolhidos apenas quando se é necessário lidar com temperaturas mais elevadas. Na são apresentadas algumas propriedades de resinas de polímeros termofixos mais comuns:

Tabela 2 – Propriedades de referência de diferentes resinas termofixas (fonte: BANK, 2006)

| Resina | Propriedades | | | | |
|----------------------|----------------------------|--|--------------------------------|------------------------|------------|
| | Resistência à Tração (MPa) | Módulo de Elasticidade na Tração (GPa) | Densidade (g/cm ³) | Alongamento Máximo (%) | T_g (°C) |
| Poliéster Isoftálica | 65 | 4,0 | 1,2 | 2,5 | 40 a 110 |
| Éster Vinílica | 82 | 3,5 | 1,1 | 6,0 | 40 a 120 |
| Fenólica | 40 | 2,5 | 1,2 | 1,8 | 220 a 250 |

2.5.Interface Fibra-Matriz

De acordo com CHAWLA (2012), a região da interface fibra-matriz caracteriza-se como uma zona de descontinuidade física, mecânica e química do compósito. DANIEL e ISHAI (1994) consideram essa região como uma terceira fase componente do material compósito. Para KARBHARI *et. al* (2003) e HOLLAWAY (2010), o desempenho mecânico de um material compósito é altamente dependente da qualidade da interface fibra-matriz, já que a matriz promove a transferência do carregamento externo para as fibras. Quanto maior a área da superfície de interface, maior a aderência e consequentemente maior a área de transferência. Para FONSECA (2005), embora ambos os componentes retenham a suas identidades, o conjunto destes constituintes confere propriedades não alcançadas separadamente, sendo necessário assegurar uma boa interação entre ambos. Aditivos são muitas vezes utilizados para melhorar esta interação.

2.6.Processos de Fabricação

Existem vários processos distintos utilizados na fabricação dos materiais compósitos e, segundo GIBSON (1994), a escolha da técnica a ser utilizada depende principalmente do material da matriz e o tipo de elemento a ser fabricado. Os processos podem ser manuais, semiautomáticos ou automáticos e cada técnica terá influência sobre as propriedades mecânicas do componente final uma vez que a qualidade da integração das fibras de reforço com a matriz é dependente do método (FONSECA, 2005). Como exemplos podem ser citados a

moldagem por transferência de resina, o enrolamento de filamentos, a laminação manual, a moldagem por compressão e a pultrusão. No caso dos perfis estruturais de compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro o processo mais utilizado é a pultrusão.

2.6.1. Pultrusão

Conforme FAIRUZ *et. al.* (2014), a pultrusão é um processo altamente automatizado no qual fibras unidirecionais contínuas (*rovings*) são banhadas e impregnadas com resinas termofixas aquecidas e puxadas através de um molde de aço pré-aquecido, usando para isso um dispositivo de tracionamento contínuo. A Figura 10 apresenta um esquema ilustrativo do processo. O termo pultrusão é a tradução da palavra inglesa *pultrusion* que tem origem nos vocábulos *pull*, que significa “puxar”, e *thru*, que significa “através”. O processo é simples e possibilita a fabricação de perfis contínuos de seção transversal qualquer e constante e com geometrias diversas (Figura 9).



Figura 9 – Exemplos de diferentes perfis produzidos por pultrusão (fonte: <http://www.cogumelo.com.br>).

O reforço consiste em feixes de multifilamentos de fibras, que se encontram inicialmente enrolados em forma de bobinas e são puxados à medida que o perfil vai sendo moldado (figura 11.a). Além dos feixes, o perfil pultrudado também é

reforçado por uma ou mais camadas de tecido ou manta de fibra, formado por pequenos filamentos contínuos ou fibras curtas dispostos em direções aleatórias ou bidirecional (figura 11.c), e por um véu de superfície que fornece acabamento final e concentra uma quantidade maior de matriz protegendo as fibras do ambiente, principalmente da radiação ultravioleta (figura 11.b). A Figura 12 apresenta um arranjo típico do reforço no interior do perfil.

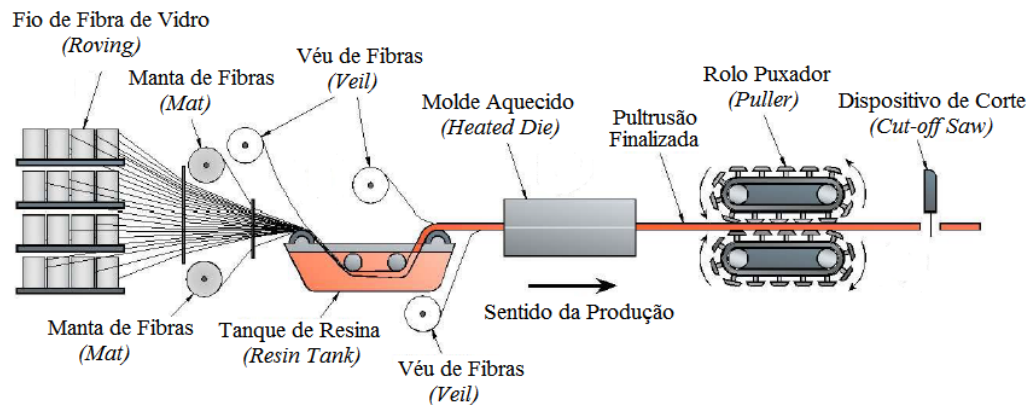


Figura 10 – Processo de fabricação por pultrusão (fonte: SERUTI, 2013).

a)



b)



c)



Figura 11 – a) Filamentos contínuos de fibra de vidro (roving); b) Véu de superfície; c) Manta com disposição aleatória.

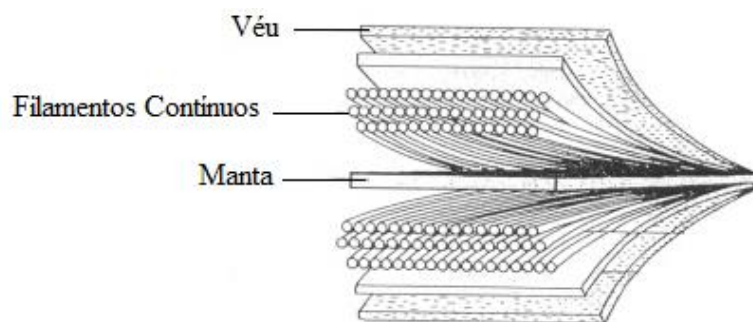


Figura 12 – Arranjo típico dos reforços de fibra de vidro no interior de perfis compósitos pultrudados reforçados com fibra de vidro.

Apesar de simples, LAM *et. al.* (2003) destaca que o processo de pultrusão possui alguns detalhes complexos que necessitam de monitoramento especial como viscosidade da resina, fração volumétrica de fibra, temperatura da matriz, polimerização da resina e velocidade de moldagem. De acordo com d'ALMEIDA *et. al.* (2003), devido à baixa condutividade térmica das resinas e ao elevado caráter exotérmico das reações de cura da matriz, é necessário um monitoramento total do processo de fabricação. Para SANTOS *et. al.* (2012), a falta de controle destes parâmetros pode gerar defeitos que afetarão as propriedades mecânicas finais do elemento.

Ainda de acordo com SANTOS *et. al.* (2012), alguns defeitos que podem surgir nos perfis pultrudados oriundos do processo são bolhas, trincas, fissuras e delaminação. A bolha é caracterizada por uma elevação arredondada que pode ser superficial ou interna. Essas bolhas podem existir dentro do pultrudado, como uma área de delaminação oca, normalmente cheia de gás, ou debaixo de uma camada superficial. Se essas bolhas forem de pequeno diâmetro são chamadas de poros, se forem de diâmetro maior são chamados de vazios. A trinca é uma separação que acontece internamente ou penetra abaixo da superfície dos pultrudados, podendo provocar ruptura. As fissuras são múltiplas trincas que podem ser finas como fios de cabelo e com formato de estrelas. Essas fissuras formam uma região de concentração de tensões e podem ser superficiais ou penetrarem no reforço. Este defeito é bastante nocivo porque impedirá a matriz de transmitir normalmente os esforços à fibra. A delaminação é a separação de duas ou mais camadas ou planos de reforço, dentro do pultrudado.

Segundo COELHO e CALADO (2002), a cura é uma das etapas cruciais no processo de produção, pois é nela que a maioria dos defeitos são formados. Além

dos já citados, a cura insuficiente pode gerar uma anormalidade em seções do perfil. Esta condição normalmente provoca redução na dureza e nas propriedades físicas. Seções espessas, curadas de fora para dentro, podem apresentar cura insuficiente no centro da seção embora completamente curada na superfície. Esta condição pode ser causada por temperatura de cura insuficiente, catalisador impróprio ou deslizamento muito rápido para a temperatura de cura.

2.7. Propriedades dos Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Vidro

Para o uso estrutural os materiais devem possuir não apenas propriedades de resistência e rigidez suficientes para resistir às cargas solicitantes às quais a estrutura está exposta, mas também propriedades físicas e químicas que forneçam resistência a ambientes agressivos e hostis nos quais o material pode ser inserido. A grande diversidade de tipos, formas, disposições e métodos de fabricação dos materiais compósitos reforçados com fibras permite a obtenção de uma ampla gama de materiais com propriedades variadas, dificultando uma definição única do material.

Para KAW (2006), CORREIA (2008) e OPRISAN (2016) as propriedades dos compósitos poliméricos reforçados com fibras dependem essencialmente das propriedades dos seus constituintes, da proporção e interação entre eles, da direção do reforço e do método de fabricação do compósito.

No caso dos perfis compósitos pultrudados, a disposição das fibras em uma direção preferencial confere propriedades diferentes em direções ortogonais, caracterizando um comportamento heterogêneo e anisotrópico (JONES, 1999; CALLISTER, 1999; BANK, 2006; SIMS *et. al.*, 1987; BAI *et. al.*, 2015).

Para CAMPBELL (2010), os materiais compósitos reforçados com fibras predominantemente unidirecionais são uma subclasse de materiais anisotrópicos, classificados como ortotrópicos, pois possuem propriedades diferentes em três direções mutuamente perpendiculares, possuindo três eixos de simetria. Já JONES (1999), considera o caso como ortotropia especial, onde duas direções têm propriedades iguais, enquanto uma terceira tem propriedades diferentes.

Segundo NAGARAJ e GANGARAO (1997), os materiais compósitos possuem comportamento anisotrópico, porém os compósitos reforçados por fibras fabricados pelo processo da pultrusão são materiais ortotrópicos com as direções principais coincidindo com os eixos longitudinal e transversal do elemento.

A caracterização de um material anisotrópico implica na determinação das suas constantes físicas e mecânicas quando submetido a diferentes solicitações e em diferentes direções. Essa caracterização pode ser efetuada com base em diferentes abordagens, incluindo a investigação experimental, simulações numéricas e modelagem teórica, em escalas micro e macromecânicas (DAVALOS, 1996).

2.7.1. Propriedades Mecânicas

Sob o ponto de vista mecânico, a fibra de reforço possui propriedades superiores as da matriz. Segundo GIBSON (1994), muitos materiais em forma de fibra são mais rígidos e resistentes, pois quanto menor o diâmetro, menor a probabilidade de que fissuras induzidas por falhas sejam geradas durante a fabricação e manuseio. Há de se concluir, portanto, que a incorporação de fibras numa dada direção resulte num material mais rígido e resistente neste sentido. Para compensar tal situação, na fabricação dos perfis pultrudados, além dos fios unidirecionais, são incorporadas camadas de véus e mantas de fibras dispostas aleatoriamente, formando camadas sobrepostas, chamadas lâminas, embebidas em matriz e unidas também por ela, formando um laminado. Uma vez que são utilizadas lâminas com fibras em orientação diferentes, os perfis apresentam comportamento diferente dos materiais convencionais usuais utilizados na engenharia civil (JONES, 1999).

De acordo com HEYER (1998), quando o compósito é solicitado na direção paralela à fibra, a matriz transmite a carga para a fibra através de um esforço de cisalhamento na superfície externa da fibra. Esta tensão, por sua vez, provoca um esforço de tração ou compressão ao longo da fibra. Na direção transversal, apesar da contribuição da manta, os esforços são principalmente absorvidos pela resina, fato que explica a menor resistência e comportamento frágil nesta direção.

O coeficiente de Poisson de um material compósito também pode variar consideravelmente dependendo da orientação das fibras. Segundo POTYRALA (2011), quando o carregamento é aplicado na direção paralela à fibra o coeficiente tem valores semelhantes aos metais, variando de 0,25 a 0,35. Em direções diferentes, pode variar consideravelmente, atingindo entre 0,02 e 0,05 com o carregamento na direção perpendicular.

É cada vez mais reconhecido que, devido à natureza heterogênea e comportamento anisotrópico inerente dos materiais compósitos, a região de interface entre fibra e matriz também desempenha um papel importante. Para THOMASON (1995) a resistência da interface determina quanto da tensão aplicada pode ser transferida para as fibras, já que esta resistência interfacial é largamente determinada pelo nível de adesão nos pontos de contato. Em muitos casos, é a resistência da interface que determina a tensão de ruptura e o modo de falha do compósito, que ocorre pela separação de laminas adjacentes (delaminação) (BRANCO *et. al.*, 2011). SANTOS, GOMES e ARAKAKI (2009), ao analisarem o comportamento de corpos de prova de dois diferentes tipos de perfis pultrudados de polímeros reforçados com fibra de vidro, um reforçado com manta e fios unidirecionais e o outro somente com fios, submetidos à tração simples, constataram que nos corpos de prova dos perfis com manta as falhas ocorriam por delaminação entre as camadas, diferente dos corpos de prova dos perfis sem manta que também apresentaram maiores tensões de ruptura.

Os materiais compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro apresentam um comportamento linear-elástico até a sua ruptura frágil quando solicitados na direção paralela às fibras, principalmente por esforços de flexão e tração, fato observado por NETO e LA ROVERE (2007), SANTOS, GOMES e ARAKAKI (2009) e OPRISAN *et. al.* (2016). Entretanto, em alguns casos, uma não linearidade pode ser observada, como na existência de pequenas fissuras na resina, microflambagem de fibras em compressão, delaminação de fibras e deformações visco-elásticas. Um comportamento elástico-plástico não-linear também foi observado por KIM, SMITH e KEMP (2014) durante ensaios de compressão transversal, mostrando que nesta direção o comportamento é dependente das características da resina.

Quando submetidos à tração ou compressão, esses materiais apresentam pequenas deformações elásticas antes de atingirem sua tensão máxima de ruptura.

Na flexão, o comportamento se caracteriza pela grande deformabilidade, não só devido ao reduzido módulo de elasticidade longitudinal, mas também pela importante contribuição das deformações por cisalhamento (DAVALOS, 1996).

WANG *et. al* (2014), em estudos sobre o efeito da orientação no módulo de elasticidade utilizando métodos experimentais, numéricos e teóricos, concluíram que o módulo de elasticidade depende da orientação das fibras no interior do compósito e quanto maior o percentual de fibra, maior o módulo. Entretanto, THOMASON e VLUG (1996), concluíram que o módulo aumenta linearmente até um percentual de fibra de 40%. Acima deste percentual a melhora não é tão significativa, possivelmente devido a problemas de empacotamento das fibras resultando em aumento de vazios. Em compósitos onde a orientação das fibras é irregular, a estimativa do módulo de elasticidade é mais complicada e depende não apenas dos ângulos entre as fibras, mas também dos seus diâmetros e comprimentos.

d'ALMEIDA *et. al.* (2003), analisaram o comportamento mecânico de perfis pultrudados e concluíram, pelos resultados dos ensaios de flexão, que a presença de *filler* de um composto de alumínio na matriz dos perfis contribui eficazmente para o aumento da resistência, mas favorece o desenvolvimento de fissuras. Esta característica é prejudicial em ciclos de carregamento e descarregamento.

MANGIRE e SRINIVASAN (2013) estudaram o comportamento mecânico de grades de piso de compósitos poliméricos reforçados por fibras através de ensaio a flexão por três pontos com diferentes condições de carregamentos. Através dos resultados, foi constatado que o modo de fratura predominantemente foi a fratura nos arredores da fibra, indicando que a provável razão foi o alto volume percentual de fibra (em torno de 60%).

Uma vez que a normalização existente ainda carece de informações para perfis comerciais e dada a possibilidade de inúmeras combinações dos fatores citados, não é possível definir um valor exato para as propriedades mecânicas dos perfis pultrudados, mas sim intervalos de variação típicos. Segundo CORREIA (2008), essas propriedades podem variar significativamente entre fornecedores. A tabela 3 apresenta alguns valores de propriedades mecânicas dos materiais utilizados neste trabalho de acordo com o fabricante.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro utilizados nesta pesquisa fornecidas fabricante:

| Propriedades Mecânicas | | | | |
|----------------------------|--|----------------------------|--|------------------------|
| Resistência à Tração (MPa) | Módulo de Elasticidade na Tração (GPa) | Resistência à Flexão (MPa) | Módulo de Elasticidade na Flexão (GPa) | Alongamento Máximo (%) |
| 210 - 260 | 17,5 - 21 | 210 - 260 | 11,2 - 14 | 2,0 |

2.7.2. Propriedades Físicas

Os materiais compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro apresentam baixo peso específico e alta durabilidade quando comparados aos materiais convencionais de uso estrutural, proporcionando facilidades de manuseio, montagem, transporte, redução das cargas atuantes e redução da necessidade de manutenção.

O peso específico dos compósitos está associado a essa mesma propriedade do materiais constituintes, principalmente da resina utilizada, sendo influenciado também pela quantidade de vazios presentes. A relação entre peso específico e resistência mecânica é um dos grandes atrativos dos materiais compósitos reforçados com fibra de vidro para o uso estrutural e é função da proporção entre as quantidades de reforço e matriz utilizadas na composição. A otimização desta proporção permite maximizar as propriedades e consequentemente o desempenho do material. A determinação e o estabelecimento de uma correlação entre as frações volumétricas e as propriedades de resistência são essenciais para uma boa compreensão do material.

Durabilidade corresponde à capacidade do material de resistir, sob carga, à agressividade do ambiente em que ele está instalado. A resistência não é apenas alcançada pela seleção de uma resina ideal, mas é fruto de todo o processo de fabricação. Segundo KARBHARI *et. al.* (2003) a durabilidade de um material ou estrutura é definida como a sua capacidade de resistir à fissuração, oxidação, degradação química, delaminação, desgaste e efeitos ou danos de objetos estranhos durante um período de tempo especificado, em determinadas condições de carregamento e ambientais. Para HOLLAWAY (2010), a redução das propriedades do material compósito são alterações químicas que levam ao seu

envelhecimento. Uma das principais preocupações é a penetração de umidade ou o contato com um ambiente alcalino.

Os coeficientes de dilatação térmica dos compósitos poliméricos diferem em função do tipo de resina, do tipo de fibras, da percentagem volumétrica de fibras e de sua orientação no compósito. Nota-se que, na direção paralela às fibras o coeficiente de dilatação térmica é semelhante ao do concreto. A tabela 4 apresenta os valores de algumas propriedades físicas de materiais compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro.

Tabela 4 – Valores típicos de propriedades físicas de polímeros reforçados com fibra de vidro unidirecionais (adaptado de ALMEIDA, 2004, e CORREIA, 2013)

| Propriedades Físicas | Unidade | Paralela à Fibra | Transversal à Fibra |
|--|-----------------------------------|------------------|---------------------|
| Coeficiente de Dilatação Térmica | $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ | 6 - 10 | 21 - 23 |
| Teor de Fibras | % | | 50 - 70 |
| Densidade | g/cm^3 | | 1,5 - 2,0 |
| Coeficiente de Condutibilidade Térmica | $\text{W}/\text{K.m}$ | | 0,20 - 0,58 |

2.7.3. Influência da Temperatura

Como já mencionado, os materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras apresentam diversas vantagens face aos materiais tradicionais utilizados na engenharia civil. Contudo, conforme KARBHARI (2007), a constituição polimérica de origem orgânica da sua matriz torna esses materiais sensíveis à temperatura, colocando uma barreira na aplicação em estruturas de edifícios, visto a necessidade de se atender a rigorosas normas existentes relativas ao comportamento dessas estruturas em incêndios (BAI, KELLER e CORREIA, 2015). A existência de ambientes confinados torna as condições de um incêndio ainda mais severas quando comparado com estruturas ao ar livre, onde o calor e os gases tóxicos podem ser dissipados mais facilmente. Já as fibras de vidro são compostos inorgânicos, o que significa que são quimicamente inertes ao fogo e conservam a estabilidade química e física até temperaturas mais elevadas, comparativamente.

Para BAI, KELLER E VALLÉ (2008), o polímero é o componente principal da degradação do compósito polimérico reforçado com fibra quando este é

submetido a altas temperaturas. No caso das fibras de vidro tipo E, a perda de resistência ocorre em temperaturas próximas a 850 °C, já nos polímeros, segundo REIS *et. al.* (2012), KARBHARI (2007) e WIJAYAWARDANE *et. al.* (2016), a perda ocorre quando a temperatura se aproxima das suas temperaturas de transição vítrea. Neste momento, o polímero começa a perder rigidez e as ligações com as fibras se deterioram, impedindo a interação mecânica e a transferência de tensões. Com isso, as propriedades mecânicas do composto provenientes da ação composta entre fibras e resina diminuem rapidamente. Em temperaturas da ordem de 300 a 500 °C a matriz polimérica se decompõe, gerando fumaça e gases tóxicos (HOLLAWAY, 2010). VAN ERP (2008) relatou que a T_g de resinas utilizadas como matrizes em compósitos poliméricos reforçados com fibras variam na ordem de 60 a 110 °C para resinas epóxi; 60 a 120 °C para resinas de éster vinílicas e 40 a 120 °C para resinas de poliéster. Para as resinas fenólicas, a transição vítrea ocorre em temperaturas próximas de 220 a 250 °C, de acordo com FERNANDES (2009).

A degradação térmica do compósito, quando exposto a altas temperaturas, e consequentemente das suas propriedades mecânicas, ocorre basicamente ao longo de três fases distintas. Na fase inicial de exposição, o fluxo de calor incidente é transferido por condução através do material e não há reação química. Ocorre uma perda de massa de cerca de 3% em peso, que corresponde à evaporação da umidade e alguns monômeros de solventes (GIBSON *et. al.*, 2004). Suas propriedades mecânicas são praticamente inalteradas. A distribuição da temperatura dependerá das propriedades térmicas dos materiais constituintes e das condições de contorno. À medida que a temperatura aumenta e se aproxima da temperatura de transição vítrea do polímero inicia-se a segunda fase. O compósito começa a perder rigidez e suas propriedades mecânicas, tais como o módulo de elasticidade e resistência, diminuem rapidamente devido a alterações em sua estrutura molecular, de acordo com ROBERT e BENMOKRANE (2010). Posteriormente inicia-se a pirólise, processo onde a matéria orgânica é decomposta ao ser submetida a condições de altas temperaturas. Nesta nova fase, a matriz polimérica se decompõe à medida que as ligações primárias dentro da estrutura molecular da matriz são quebradas, liberando calor, substâncias voláteis tóxicas e gerando uma grande perda de massa.

Para combater a elevada inflamabilidade dos compósitos poliméricos algumas ações podem ser tomadas, dentre as quais se destaca o uso de retardadores de chama do tipo aditivo. Segundo GALLO e AGNELLI (1998), o uso dos chamados aditivos retardadores de chama consiste na incorporação física de determinadas substâncias durante a etapa de processamento dos polímeros. As partículas de carga são misturadas na resina líquida durante as fases finais de processamento e devem ser uniformemente dispersas para assegurar propriedades de retardamento de chamas consistentes em todo o polímero (KARBHARI, 2007). Segundo RICCIARDI *et. al.* (2012), alguns fatores devem ser levados em conta na hora da escolha do aditivo, tais como a temperatura de auto-ignição do polímero, a decomposição do retardador, a influência nas propriedades físicas do polímero e os efeitos sobre a saúde humana. Alguns exemplos de aditivos retardadores de chama são Hidróxido de Alumínio, Boratos, Fosfatos, Halogenados, Trióxido de Antimônio, Hidróxido de Magnésio.

Devido a essa limitação, pesquisas têm sido feitas para uma melhor compreensão do comportamento dos compósitos poliméricos reforçados com fibras sob o efeito de temperaturas elevadas, seja “*in situ*” ou residual. No primeiro modo, no qual o compósito é carregado em um ambiente com a temperatura elevada, o material apresenta uma severa degradação de suas propriedades à medida que a temperatura se aproxima da sua temperatura de transição vítrea (CORREIA *et. al.*, 2013; ALSAYED *et. al.*, 2012; REIS *et. al.*, 2012). Durante esta aproximação, a resina sofre amolecimento visco-elástico e perde a capacidade de transferir cargas e suportar lateralmente as fibras (KARBHARI, 2007; BAI, KELLER e CORREIA, 2015), afetando principalmente as resistências aos esforços de compressão e cisalhamento. Entretanto, a queda na resistência não é imediata, a baixa condutividade térmica dos compósitos faz com que a taxa transferência de calor através do material seja lenta, levando algum tempo para aquecer igualmente toda a espessura.

Nos estudos residuais, onde são verificadas as propriedades do material após exposição a temperaturas elevadas, as propriedades mecânicas dos compósitos também apresentam valores inferiores aos originais (MOURITZ e MATHYS, 1999; KARBHARI, 2007). Isto ocorre devido à degradação térmica e à combustão da matriz. Porém, segundo BAI, KELLER e CORREIA (2015), se um o compósito PRFV é aquecido até uma temperatura próxima de T_g , antes de sua

decomposição, e depois resfriado o seu módulo de elasticidade pode apresentar alta recuperação percentual em relação ao valor inicial.

Comparando compósitos PRFV de matrizes éster vinílica, poliéster e fenólica, MOURITZ e MATHYS (1999) concluíram que todos os três tinham propriedades mecânicas pós-fogo semelhantes. O mesmo foi observado por GIBSON *et. al.* (2003), que em ensaios à tração realizados com os mesmos três tipos de compósitos reforçados com fibra de vidro, encontraram perdas nas resistências e módulos de elasticidade semelhantes. Apesar de a resina fenólica possuir propriedades resistentes superiores isso não resulta em melhores propriedades mecânicas residuais.

REIS *et. al.* (2012) tiveram como objetivo principal analisar o efeito acoplado da temperatura e da taxa de deformação sobre o comportamento à tração do compósito reforçado por fibra e concluíram que a resistência final à tração é apenas dependente da taxa de deformação, mas que o módulo de elasticidade é fortemente afetado pela temperatura, especialmente em temperaturas acima da transição vítrea (T_g). Aumentando a temperatura, o módulo de elasticidade diminui tornando o PRFV menos rígido. Já CORREIA *et. al.* (2013) realizaram ensaios de tração em corpos de prova de compósitos reforçados com fibras de vidro em temperatura ambiente e elevadas (entre 20 e 220 ° C) e relataram que a resistência à tração decresce antes e após a temperatura de transição vítrea, mas sem grande influência no módulo de elasticidade.

WIJAYAWARDANE *et. al.* (2016) investigaram o comportamento mecânico de vigas de Perfis I pultrudados reforçados com fibras de vidro e lajes de concreto de alto desempenho reforçadas com fibras submetidas a temperaturas de até 90 °C, através de modelo em escala real e em corpos de prova. Dos ensaios à tração concluíram que a resistência dos materiais compósitos é maior quando eles têm um grande número de camadas de fibras de vidro na direção longitudinal, mas existe uma contribuição de fibras orientadas em direções diferentes também. Quando o compósito é aquecido, esta contribuição é reduzida devido ao enfraquecimento da ligação entre as fibras e a matriz e o módulo de elasticidade diminui à medida que a temperatura aumenta. Nos ensaios de compressão além da diminuição da resistência com o aumento da temperatura, verificaram falhas iniciais por delaminação e, com a temperatura próxima de 90°C, a falha ocorreu por torção e esmagamento das fibras, um sinal de perda de rigidez da resina éster

vinílica. Na flexão, a resistência e a rigidez também foram degradadas com o aumento da temperatura e as falhas ocorreram por delaminações.

MARANAN *et. al.*(2014) estudaram o comportamento à flexão de cinco barras de PRFV, compostas por resina éster vinílica e reforçadas por fibras de vidro do tipo E, submetidas a temperaturas elevadas (até 150 ° C). Os resultados mostraram que à medida que a temperatura aumenta, a resistência à flexão e a rigidez das barras PRFV diminuem. À medida que a temperatura se aproxima da temperatura de transição vítrea (T_g) das barras, ocorre uma drástica redução da resistência e da rigidez. As barras com um diâmetro nominal maior apresentaram uma menor degradação da resistência à flexão do que aquelas com um diâmetro nominal menor. No entanto, a deterioração da rigidez à flexão ocorreu de forma semelhante. A Figura 13 apresenta uma comparação entre as variações da resistência mecânica em função da temperatura dos principais materiais utilizados na construção civil.

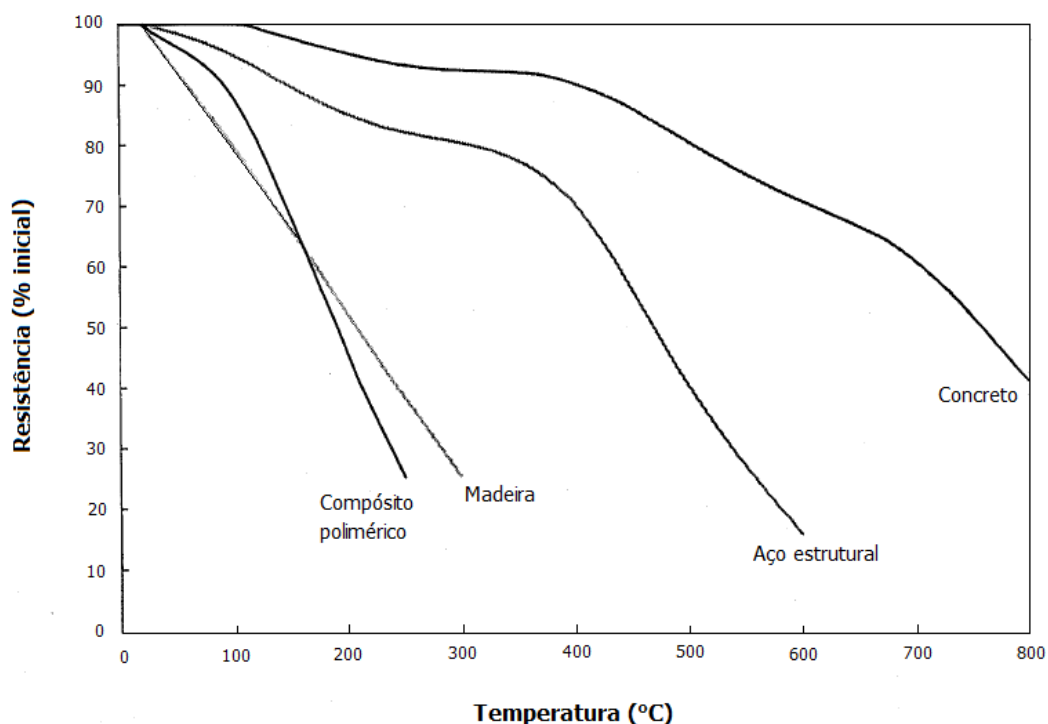


Figura 13 – Variação da resistência mecânica com a temperatura para diferentes materiais (adaptado de KODUR e BAINGO, 1998)

2.8. Normas e Códigos

Grandes esforços têm sido feitos em todo o mundo para o desenvolvimento de normas e códigos com especificações e diretrizes sobre testes, classificações e projetos de membros estruturais de compósitos poliméricos pultrudados reforçados por fibras. Para testes e classificações podemos destacar a Norma EN 13706 do European Committee for Standardization, dividida em três partes, e as normas da American Society for Testing and Materials (ASTM). No Brasil, a Norma ABNT NBR 15708, de 2011, estabelece ao longo de suas seis partes, diretrizes sobre propriedades, métodos de ensaios, tolerâncias dimensionais e materiais a serem adotados em projetos com perfis pultrudados. Entretanto, pouco pode ser encontrado na literatura sobre métodos de cálculo e dimensionamento, fazendo com que os projetos ainda dependam muito de manuais e dados fornecidos pelos próprios fabricantes. Esta lacuna está para ser preenchida pela futura norma da American Society of Civil Engineers (ASCE), para projetos de compósitos pultrudados, ainda em fase de desenvolvimento.

3 Programa Experimental

3.1.Introdução

Como forma de melhor compreender o comportamento estrutural e ampliar os dados disponíveis, foi realizada uma campanha experimental com o objetivo de estudar o comportamento mecânico à flexão sob influência de temperaturas elevadas de compósitos poliméricos pultrudados reforçados com fibra de vidro (PRFV). A caracterização consiste na determinação de propriedades mecânicas e físicas do material para estimativa do seu comportamento e desempenho durante o período de sua vida útil, elucidando os fenômenos físicos inerentes em função das solicitações e condições as quais este material será submetido. A determinação é feita por meio de ensaios normalizados cujos resultados também podem ser usados como dados qualitativos e comparativos entre a experiência e cálculos teóricos que têm sido desenvolvidos e utilizados ao longo do tempo, essenciais para fins de projeto, controle de qualidade e otimização da produção. A campanha englobou ensaios mecânicos de tração e flexão, análises termogravimétricas, análises de frações volumétricas e análises por microscopia eletrônica de varredura.

3.2.Material

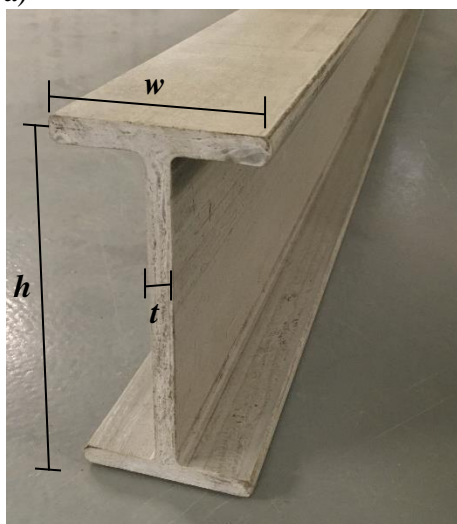
O material utilizado para a realização do estudo consiste em perfis pultrudados em compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro tipo E, constituídos por matrizes de resinas poliéster isoftálica, éster vinílica e fenólica. O perfil I com matriz de resina poliéster isoftálica e o perfil U com matriz de resina fenólica são reforçados por três camadas de feixes unidirecionais de fibras, duas camadas de manta, cada uma entre duas camadas de feixes e duas camadas de véu, sendo uma em cada superfície. Os perfis U e Placa, de menor espessura, têm matriz éster vinílica e são reforçados por duas camadas de feixes, uma camada de manta e duas de véu, também nas superfícies. Em termos dimensionais e

geométricos, os perfis foram fornecidos em comprimentos de aproximadamente 6 metros e seções transversais constantes. A Tabela 5, abaixo, apresenta as informações dos perfis selecionados para a pesquisa ilustrados na Figura 14.

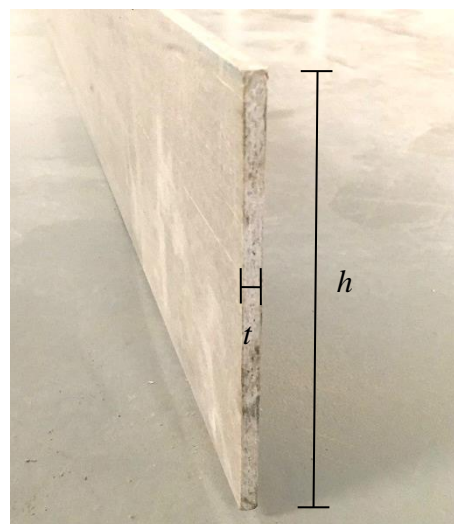
Tabela 5 – Dimensões das seções transversais dos perfis pultrudados utilizados:

| Perfil | Dimensões da seção transversal em mm (pol.) | | |
|--------------------|---|-------------------|-----------------|
| | Altura (h) | Espessura (t) | Largura (w) |
| I - Poliéster | 152,4 (6'') | 9,5 (3/8'') | 76,2 (3'') |
| Placa | 152,4 (6'') | 6,3 (1/4'') | - |
| U - Fenólica | 152,4 (6'') | 9,5 (3/8'') | 76,2 (3'') |
| U – Éster vinílica | 152,4 (6'') | 6,3 (1/4'') | 41,3 (1.5/8'') |

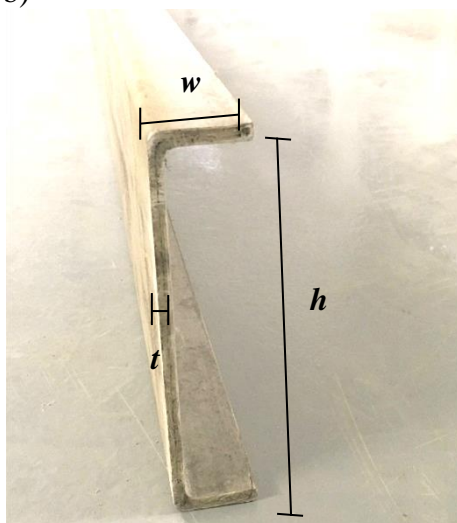
a)



c)



b)



d)

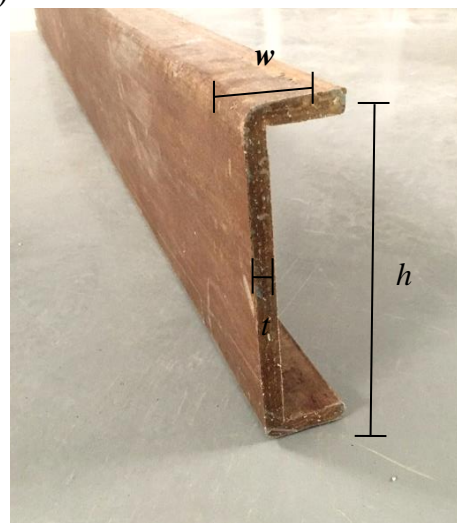


Figura 14 – Perfis analisados: a) Perfil I com matriz poliéster isoftálica; b) Perfil U com matriz éster vinílica; c) Perfil placa com matriz éster vinílica; d) Perfil U com matriz fenólica

3.3. Corpos de Prova

Um corpo de prova representa uma amostra do componente estrutural, portanto uma simplificação. Os dados obtidos nos ensaios podem não apresentar propriedades idênticas às obtidas em testes em escala real, mas uma correlação pode ser feita entre os resultados dos ensaios e o desempenho das peças reais.

Os corpos de prova foram confeccionados com o auxílio de uma máquina de serra de fita horizontal (Figura 15) pertencente ao Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC – Rio. As dimensões e formas de cada corpo foram adotadas seguindo as orientações das normas referentes a cada ensaio realizado.

A primeira tarefa realizada foi a separação das mesas da alma dos perfis, fazendo-se cortes a uma distância de 1 cm da região de encontro para evitar possíveis defeitos existentes nessa ligação. Devido à pequena largura das mesas, os corpos de prova confeccionados para a realização dos ensaios mecânicos foram retirados apenas das almas dos perfis, tendo seus comprimentos longitudinais alinhados à direção dos fios de fibras (*rovings*). Em seguida, os corpos de prova foram cortados nas dimensões desejadas e lixados para um melhor acabamento. Finalmente, as dimensões de cada amostra foram verificadas com paquímetro e registradas (Figura 16).



Figura 15 – Máquina de serra de fita horizontal utilizada para confecção dos corpos de prova.

Cada uma recebeu uma identificação alfanumérica, na qual é possível saber o perfil de origem, a espessura, a resina matriz e para qual ensaio se destina. A primeira letra da identificação refere-se ao perfil de origem: “P” para placa, “I” para o perfil I e “U” para o perfil U. O número seguinte corresponde a espessura da peça, em milímetros. As próximas duas letras referem-se à resina matriz, sendo “ES” para resina éster vinílica, “PO” para a resina poliéster isoftálica e “FE” para a fenólica. As duas letras posteriores correspondem ao ensaio a que o corpo de prova será submetido, “FL” para ensaio de flexão e “TR” no caso do ensaio de tração. Finalizando, os dois números finais servem para individualizar os corpos de prova. No caso dos ensaios de flexão após aquecimento, ao final da identificação, foi adicionado o valor da temperatura à qual o corpo de prova foi aquecido.

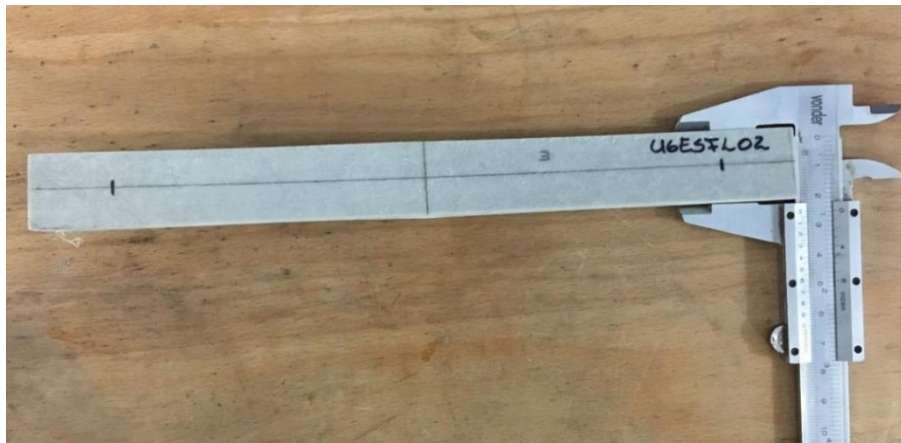


Figura 16 – Corpo de prova identificado.

3.4.Determinação da Fração Volumétrica das Fibras de Vidro

Existem vários métodos para a determinação dos percentuais dos componentes constituintes de um material compósito, sejam através de métodos experimentais ou através de técnicas óticas baseadas em análise de imagem de fotomicrografia. A determinação desses valores é fundamental, já que são utilizados como parâmetros em equações teóricas para o cálculo de outras propriedades dos compósitos.

No presente trabalho, optou-se por realizar esta determinação através do procedimento experimental G, do método I da norma ASTM 3171 – 11 e pelo resultado das análises de termogravimetria apresentados na sequência do trabalho. O primeiro consiste basicamente na remoção física da matriz por ignição, deixando apenas o reforço e, conseqüentemente, possibilitando o cálculo da quantidade de reforço em peso. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC – Rio, em um Forno Mufla da marca SP Labor, modelo SP-1200 e na balança analítica modelo AL 500C, da marca Marte, com capacidade máxima de medida de 500 g e sensibilidade de 0,001 g, apresentados na Figura 17.

a)



b)



Figura 17 – Equipamentos usados nos ensaios de determinação das frações volumétricas: a)Forno Mufla; b)Balança analítica

Procedimento experimental

Os percentuais de fibras por massa foram obtidos através da queima por ignição de três pequenas amostras de cada perfil. Depois de medidas, as amostras foram colocadas dentro de cadinhos cerâmicos, previamente pesados, e o conjunto colocado na balança novamente para pesagem. Em seguida, o conjunto foi levado ao Forno Mufla para aquecimento até a temperatura de 600°C, na qual ficou durante hora (Figura 18). Nesta faixa de temperatura ocorre a queima completa da matriz polimérica, restando apenas as fibras e um pó residual da matriz. Após o resfriamento, os cadinhos foram retirados do forno e o pó residual removido para a pesagem final.



Figura 18 – Cadinhos posicionados no interior do forno Mufla para início do ensaio

Cálculos dos percentuais

Os percentuais de fibra por massa foram determinados de acordo com a formulação proposta pela norma ASTM 3171 – 11. Na Tabela 6 são apresentadas as dimensões das amostras utilizadas e suas respectivas massas, antes e após a queima, e na Figura 19 é ilustrada a geometria utilizada.

Tabela 6 – Dimensões e massas, inicial e final, das amostras:

| | Amostra | h (mm) | w (mm) | t (mm) | m_i (g) | m_f (g) |
|-------------------------------------|---------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| Perfil I - Matriz Poliéster | 1 | 32,40 | 12,20 | 9,40 | 5,21 | 3,03 |
| | 2 | 31,84 | 12,10 | 9,41 | 5,17 | 3,06 |
| | 3 | 32,15 | 12,08 | 9,40 | 5,19 | 2,84 |
| Placa - Matriz Éster Vinílica | 1 | 31,70 | 12,05 | 6,10 | 3,20 | 1,99 |
| | 2 | 32,04 | 11,97 | 6,07 | 3,16 | 1,90 |
| | 3 | 31,85 | 12,14 | 6,09 | 3,24 | 2,09 |
| Perfil I - Matriz Fenólica | 1 | 36,10 | 8,70 | 9,90 | 4,54 | 3,08 |
| | 2 | 35,21 | 8,99 | 9,89 | 4,36 | 2,81 |
| | 3 | 35,95 | 8,71 | 9,94 | 4,42 | 2,96 |
| Perfil U - Matriz Éster Vinílica | 1 | 32,45 | 12,40 | 5,70 | 3,71 | 2,33 |
| | 2 | 32,29 | 12,06 | 5,70 | 3,62 | 2,15 |
| | 3 | 32,21 | 12,48 | 5,71 | 3,78 | 2,41 |

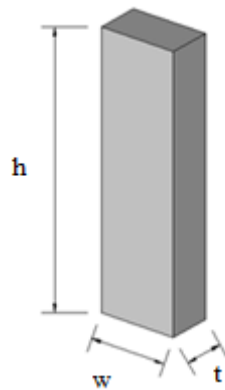


Figura 19 – Dimensões das amostras retiradas de cada perfil.

O percentual de fibras por massa é calculado segundo a seguinte equação:

$$W_f(\%) = \left(\frac{m_f}{m_i} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

Onde;

W_f é a porcentual de fibra resultante,

m_f é a massa final da amostra em g,

m_i é a massa inicial da amostra em g.

A fração volumétrica, V_f , determinada a partir dos resultados da análise termogravimétrica é calculada em função do percentual de massa, W_f , obtido ao final da análise e das densidades do compósito e da fibra de reforço.

$$V_f(\%) = \left(\frac{\rho_c}{\rho_f} \right) \times W_f \quad (3.2)$$

Para efetuar o cálculo acima ainda é necessário o valor da densidade do compósito polimérico como um todo, ρ_c . O fabricante não fornece um valor exato desta propriedade, mas sim uma faixa de valores. Sendo assim, para determinar com precisão este valor foram realizados ensaios de picnometria de gás hélio.

A picnometria de gás hélio é utilizada para determinar a densidade e o volume real de materiais. A densidade real de uma amostra define-se pela relação

existente entre a massa do material e o respectivo volume real, excetuando todos os espaços vazios e considerando que não existem poros fechados no interior das partículas. O hélio é normalmente utilizado, porque, além de inerte, penetra facilmente nos poros das amostras devido ao pequeno tamanho dos seus átomos, permitindo assim determinar o volume do sólido com mais rigor (WEBB e ORR, 1997).

As medidas são realizadas por um equipamento chamado picnômetro (Figura 20) que determina o volume verdadeiro de um sólido, mesmo que poroso, por variação da pressão de gás numa câmara de volume conhecido. O picnômetro de hélio é constituído por duas câmaras de volumes conhecidos (por calibração prévia), a câmara onde se coloca a amostra e a câmara de expansão, ligadas por uma válvula (válvula de expansão).

O procedimento se inicia com a verificação da massa da amostra em uma balança de precisão. O valor medido é utilizado como um dado de *input* para o equipamento. Em seguida, a amostra é colocada em uma das câmaras do equipamento que é então acionado. Após determinar o volume real, o equipamento calcula automaticamente a densidade do material através da relação entre a massa do sólido (introduzida como dado de entrada) e o volume por ele determinado. Os resultados são apresentados na Tabela 7. Todo o procedimento foi realizado no Centro de Tecnologia Mineiral – CETEM.



Figura 20 – Picnômetro de gás hélio utilizado para determinar a densidade dos compósitos.

Tabela 7 – Valores de densidades fornecidos pelo picnômetro de gás hélio:

| | Densidade (g/cm ³) |
|--|--------------------------------|
| Perfil I - Matriz Poliéster Isoftálica | 2,04 |
| Perfil Placa - Matriz Éster Vinílica | 1,97 |
| Perfil U - Matriz Éster Vinílica | 1,97 |
| Perfil U - Matriz Fenólica | 2,16 |

O valor da densidade da fibra de reforço, ρ_f , foi determinado através de valores encontrados na bibliografia consultada (Tabela 8), não sendo fornecido ou realizado ensaio para determinação do mesmo. Com isso, o valor da densidade do material de reforço, fibra de vidro tipo E, é de 2,54 g/cm³.

Tabela 8 – Valores de densidade da fibra de vidro tipo E encontrados na bibliografia:

| Referência | Densidade da Fibra de Vidro Tipo E (g/cm ³) |
|---------------------|---|
| HYER (1998) | 2,54 |
| KAW (2006) | 2,54 |
| HULL e CLYNE (1996) | 2,56 |
| GIBSON (1994) | 2,54 |
| CHAWLA (2012) | 2,55 |
| CORREIA (2013) | 2,60 |

3.5. Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica, ou TGA, é uma técnica analítica na qual é possível medir a variação de massa de uma amostra em resposta às mudanças de temperaturas programadas em um ambiente de atmosfera controlada. A análise é feita através de um analisador térmico, equipamento basicamente constituído por uma microbalança, um forno, termopares (sensor de temperatura) e um sistema de fluxo de gás, conectado a um microcomputador para a aquisição e registro dos dados. À medida que o ensaio ocorre as alterações são registradas em um gráfico, curva TG, na tela do microcomputador. Neste gráfico as ordenadas representam o percentual em massa e as abscissas os valores de temperatura. A partir da primeira derivada da curva registrada é possível obter a variação da porcentagem de massa

em relação ao tempo ou em relação à temperatura da reação. Para cada reação, ao longo do aumento da temperatura, temos um pico na derivada, indicando a perda de massa ocorrida.

A Figura 21 mostra uma curva típica da degradação de um compósito polimérico obtida de uma análise termogravimétrica. Embora as temperaturas inicial e final do processo de decomposição não sejam claramente definidas, consideram-se essas temperaturas como as dos pontos de *onset* e *endset*, localizados pelos cruzamentos de retas tangentes à curva, traçadas antes e depois do processo de degradação térmica, como indicado.

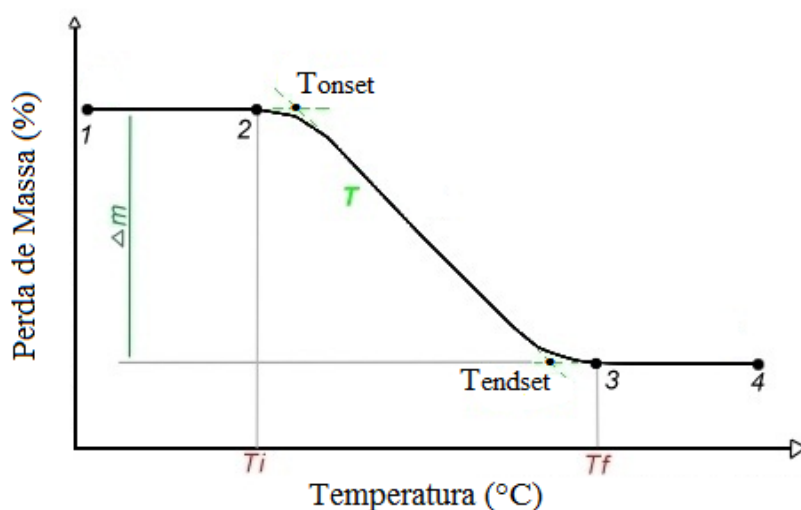


Figura 21 - Curva típica da degradação de um compósito polimérico em análises termogravimétricas.

As análises foram realizadas no analisador térmico modelo Pyris 1 TGA, da fabricante PerkinElmer, pertencente ao Laboratório de Ensaios de Compósitos, localizado no complexo de laboratórios do departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, apresentado na Figura 22.

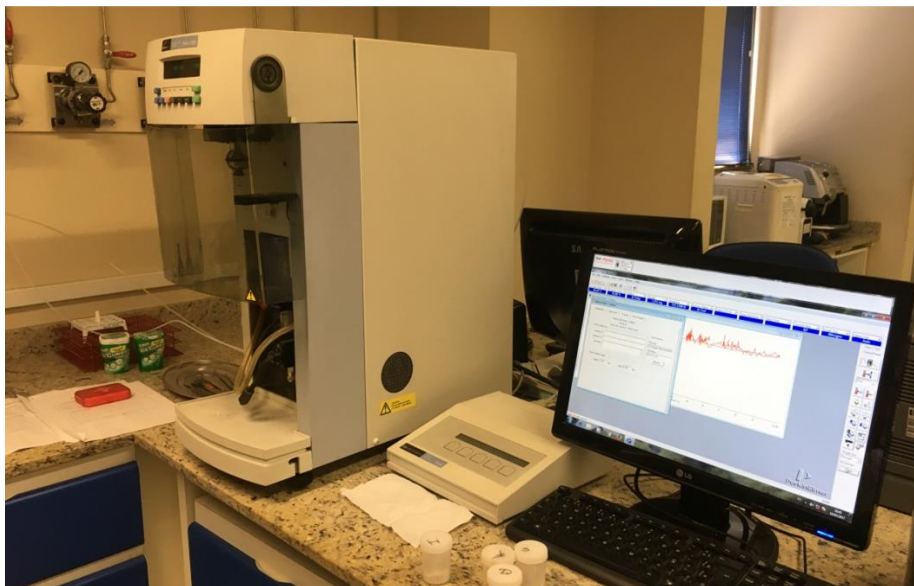


Figura 22 – Analisador térmico utilizado no ensaio de termogravimetria

Procedimento experimental

Para a realização do ensaio, uma amostra de cerca de 5 mg do material é colocada sobre uma pequena bandeja e posicionada em um suporte ligado à balança do equipamento. Em seguida, o próprio equipamento acopla o forno ao conjunto suporte da amostra e inicia-se o aquecimento a uma taxa de 10 °C/min, até 700 °C, sob atmosfera inerte de nitrogênio. No decorrer do ensaio, o aumento da temperatura e a redução da massa da amostra vão sendo registrados e o gráfico vai sendo desenhado na tela do microcomputador.

3.6. Análise Microestrutural

A microscopia eletrônica de varredura é uma técnica de caracterização microestrutural capaz de revelar informações acerca da morfologia, composição química, estrutura cristalina e orientação dos materiais que compõem a amostra analisada. A possibilidade de caracterização da microestrutura pode ser realizada em uma escala variando de alguns milímetros a frações nanométricas.

De forma simplificada, o princípio de funcionamento de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) consiste na irradiação de um feixe de elétrons

mediante a aplicação de uma diferença de potencial, através de um filamento capilar, sobre a superfície da amostra, ponto a ponto. A interação do feixe incidente com a superfície da amostra resulta em sinais utilizados para modular o brilho do monitor, permitindo a formação de imagens para observação. Na maioria das aplicações, os dados são recolhidos sobre uma área selecionada da superfície da amostra e é gerada uma imagem bidimensional que apresenta variações espaciais.

Procedimento experimental

O procedimento experimental pode ser dividido em duas partes, primeiro a preparação das amostras e, em seguida, a análise no microscópio propriamente dita. O preparo das amostras foi iniciado com a retirada de pequenas amostras (maior dimensão em torno de 2 cm) dos perfis. Posteriormente, as amostras foram embutidas em moldes contendo resina epóxi e colocadas em repouso até a cura da resina. A etapa seguinte foi a de lixamento, na qual as amostras foram submetidas a processos de lixamentos sucessivos, iniciados com uma lixa de granulação mais grossa e terminando com uma mais fina. Estes procedimentos foram efetuados utilizando lixas d'água com lubrificação de água corrente, que age também no sentido de remover detritos e abrasivos, minimizando a tendência de introduzir partículas na matriz da amostra. Após a planificação da superfície com o lixamento, as amostras foram polidas em uma poliatriz automática para obtenção de uma superfície lisa e com baixa rugosidade. Finalizando a fase de preparo, foram feitos os revestimentos. Este passo visa aumentar a condutividade da superfície da amostra através de um processo de metalização, com o depósito de uma camada de 10 a 20 nm de espessura de ouro sobre a superfície da amostra (EGERTON, 2005). A Figura 23 apresenta as amostras já prontas para serem analisadas no MEV.

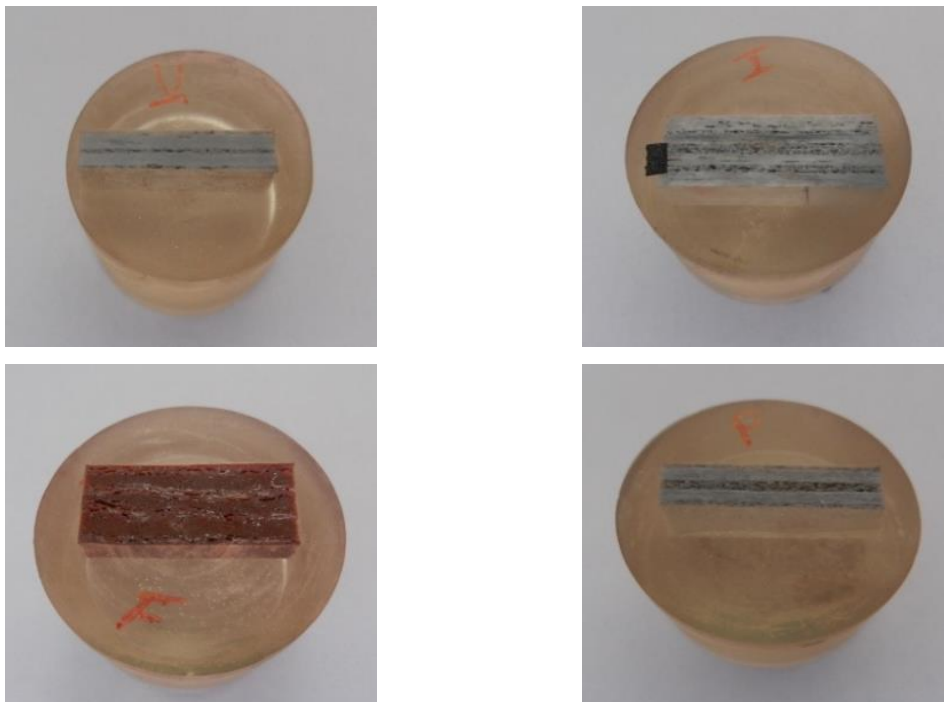


Figura 23 – Amostras embutidas para serem analisadas no MEV.

Foram feitas duas análises de microscopia eletrônica de varredura. A primeira, de amostras dos perfis como recebidos, no microscópio eletrônico de varredura modelo JEOL JSM-6510LV pertencente ao Laboratório de Microscopia Eletrônica da PUC –Rio (Figura 24), e a segunda, de amostras dos perfis após aquecimento até 220 °C, realizada no laboratório de microscopia eletrônica do Centro de Tecnologia Mineral – CETEM.

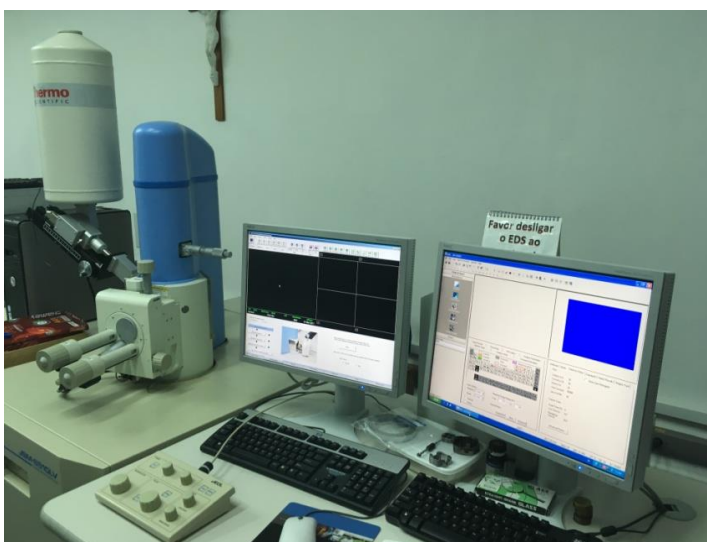


Figura 24 – Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado nas análises. Laboratório de Microscopia Eletrônica da PUC –Rio.

3.7.Ensaaios Mecânicos

3.7.1.Tração Axial

Devido às características axiais oriundas do processo de pultrusão o ensaio de tração se torna essencial no processo de caracterização. Foram realizados ensaios de tração simples, conforme as diretrizes da norma ASTM D638 – 14, em cinco corpos de prova dos perfis de matrizes poliéster e éster vinílica, com objetivo de se obter a tensão de ruptura, o módulo de elasticidade longitudinal e do alongamento na ruptura. Os ensaios foram feitos no Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC – Rio, em uma máquina de ensaios com acionamento servo-hidráulico da marca MTS (Material Test System) modelo 311.31, com capacidade de 1000KN (Figura 25). Para obtenção do alongamento específico foi utilizado um extensômetro do tipo clip gauge ligado a um sistema de aquisição de dados.



Figura 25 – Máquina servo-hidráulica utilizada no ensaio de tração axial.

Os corpos de prova utilizados foram usinados no formato “dog bone”, conforme figuras 26 e 27, seguindo as recomendações da norma ASTM D638 – 14. Esta opção foi feita porque em testes realizados anteriormente aos ensaios, com corpos de prova moldados com seção transversal constante, ou seja, como

barras retangulares, a ruptura ocorreu próxima às garras e não no meio do corpo de prova como esperado. Foi necessária também a fixação de pequenas peças metálicas (aço) nas extremidades dos corpos de prova devido ao espaço entre as garras metálicas do equipamento ser maior que a espessura das amostras.

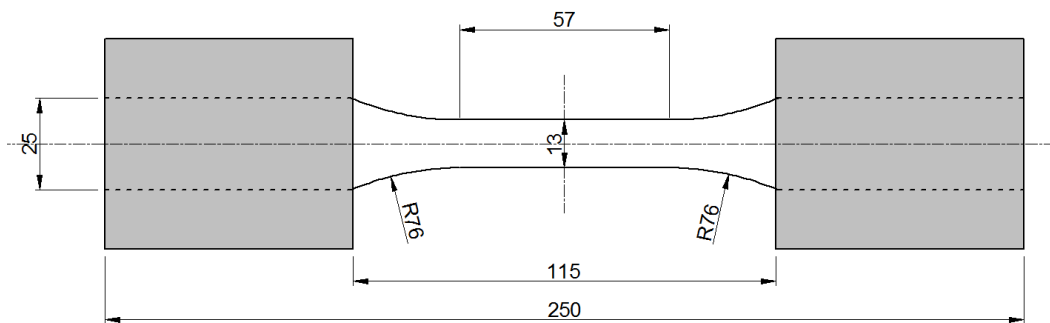


Figura 26 – Geometria do corpo de prova para o ensaio de tração axial.



Figura 27 – Corpos de prova do ensaio à tração.

Procedimento experimental

Após o corte e usinagem no formato desejado foram fixadas as peças metálicas nas extremidades dos corpos de prova, estando assim prontos para o ensaio. Cada um foi então posicionado e alinhado na máquina com o auxílio de um nível laser e o clip gage posicionado no centro do corpo de prova (Figura 28). O ensaio foi realizado a uma velocidade de deslocamento de 2mm/min e interrompido no momento de ruptura do corpo de prova.

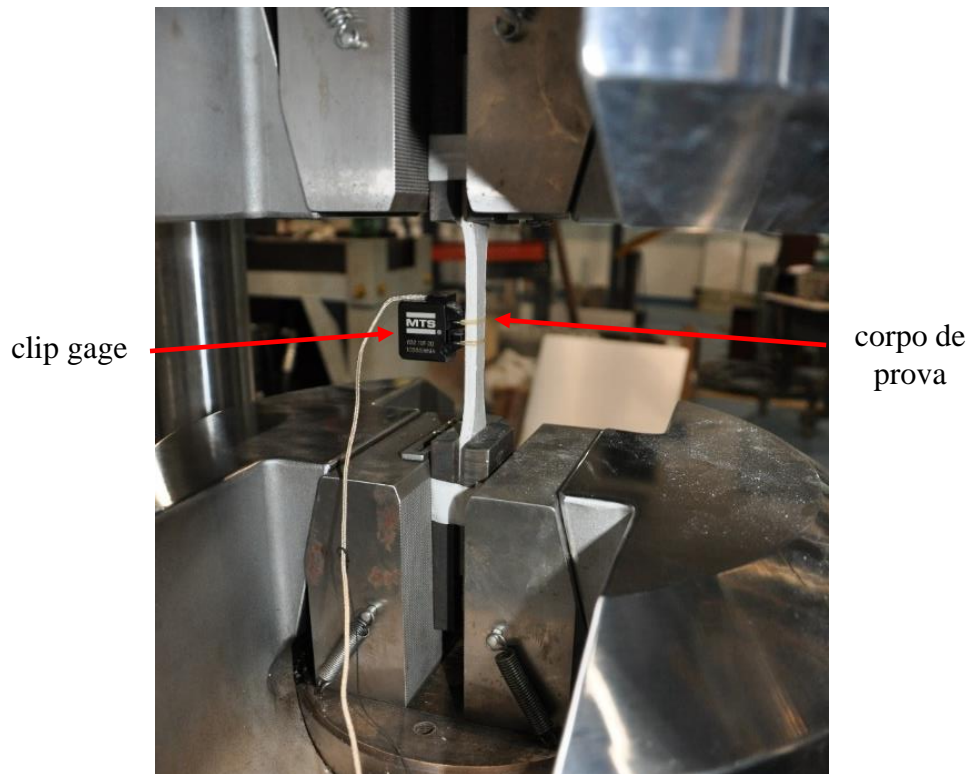


Figura 28 – Ensaio de tração axial.

Cálculo da Tensão de Tração, Deformações Axiais e Módulo de Elasticidade à Tração Axial

A tensão devido ao esforço de tração axial σ_t é calculada através da divisão do valor da carga máxima P , suportada pelo corpo de prova no momento de ruptura, pela área A da seção transversal original do segmento central do corpo de prova.

$$\sigma_t = \frac{P}{A} \quad (3.3)$$

Onde;

P é a força aplicada, em N,

A é a área inicial da seção transversal do corpo de prova, em mm².

Os valores das deformações axiais ε_t , por sua vez, correspondem às alterações no comprimento do corpo de prova em relação ao seu comprimento original, expressas pela seguinte equação:

$$\epsilon_t = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.4)$$

Onde;

ΔL é o alongamento específico, em mm,

L_0 é a distância inicial entre as garras do clip gage, em mm.

O módulo de elasticidade à tração E_t foi encontrado a partir do gráfico tensão-deformação construído com as leituras obtidas no ensaio. O módulo corresponde a tangente da reta que passa por dois pontos do gráfico, calculado conforme exemplo na Figura 29:

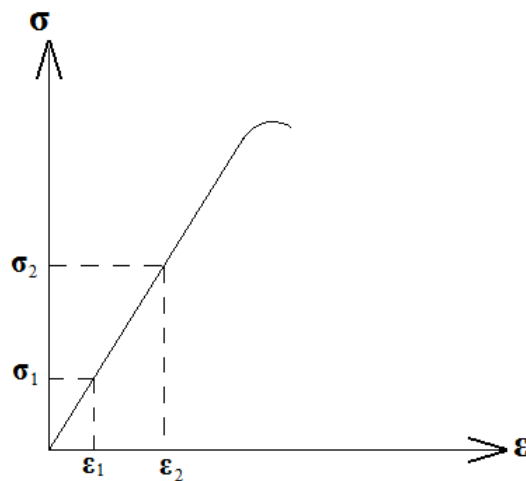


Figura 29 – Exemplo de cálculo do módulo de elasticidade um gráfico tensão x deformação.

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (3.5)$$

3.7.2. Flexão Longitudinal

O ensaio de flexão longitudinal permite a determinação da tensão de ruptura, do módulo de elasticidade à flexão e da deformação do elemento quando submetido a esforços de flexão. A resistência representa a tensão máxima suportada pelas fibras externas do elemento no momento de ruptura ou a queda brusca da carga resistente devido à falha pelo cisalhamento interlaminar. O

módulo de elasticidade é definido, igualmente ao ensaio de tração, como a razão entre a tensão e a deformação dentro do regime elástico.

O ensaio pode ser configurado com três ou quatro pontos de carregamentos. As principais diferenças ocorrem na localização do momento fletor máximo e da tensão de flexão máxima. Na configuração de quatro pontos o momento de flexão é constante entre os pontos centrais de carregamento, fazendo com que a tensão de flexão máxima seja uniforme entre esses pontos. Na configuração de três pontos, a tensão de flexão máxima está localizada diretamente sob o ponto de aplicação da carga central. Outra diferença entre as configurações é a presença da resultante da força de cisalhamento vertical na configuração de três pontos em todo o comprimento do corpo de prova, exceto sob o ponto de aplicação da carga central, enquanto que na configuração de quatro pontos a região entre os elementos centrais de aplicação de carga não apresentam resultante de forças de cisalhamento.

Nesta pesquisa, optou-se por realizar o ensaio de flexão por três pontos de acordo com as diretrizes da norma ASTM D7264/D7264M – 07. Esta norma descreve métodos de ensaios para determinação das propriedades de flexão de materiais compósitos de matriz polimérica. Para realizar os ensaios foi utilizada uma máquina com acionamento servo-hidráulico, marca MTS e célula de carga com capacidade de 100 KN, pertencente ao Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC – Rio (Figura 30). Este equipamento é acoplado a um microcomputador para a aquisição dos dados.



Figura 30 – Equipamento utilizado no ensaio de flexão.

Da mesma forma como foi feito no ensaio de tração, foram ensaiados cinco corpos de prova de cada perfil selecionado. Eles foram confeccionados no formato de barras retangulares com dimensões definidas em função do valor de relação entre vão de ensaio e espessura do corpo de prova de 20:1, sugerido no item 8.2 da norma ASTM D7264/D7264M – 07. Com isso, ambos os corpos de prova dos perfis I e U, que possuem 0,95 cm de espessura, foram confeccionados com 24 cm de comprimento e 2,5 cm de largura, para ensaios com um vão de 20 cm. Os demais corpos de prova foram confeccionados com o comprimento em torno de 15,5 cm e 1,6 cm de largura, ensaiados em um vão de 12,8 cm (Figura 31).

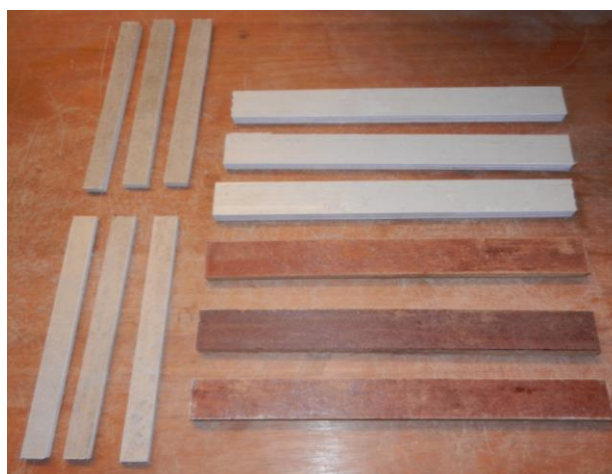


Figura 31 – Corpos de prova do ensaio à flexão.

Procedimento experimental

Para a realização do ensaio de flexão por três pontos, o corpo de prova foi apoiado e centralizado sobre um gabarito no qual os apoios são dois roletes espaçados conforme o valor do vão v do corpo de prova a ser ensaiado. Outro rolete foi fixado na célula de carga para aplicação da carga vertical na região do meio do vão do corpo de prova. O ensaio foi realizado a uma velocidade de deslocamento de 2 mm/min e a força e a deflexão foram medidas e registradas até que a falha ocorresse ou a deformação atingisse um valor pré-determinado de 0,035. As figuras 32 e 33 ilustram o ensaio e a configuração com mesmo.



Figura 32 – Ensaio de flexão.

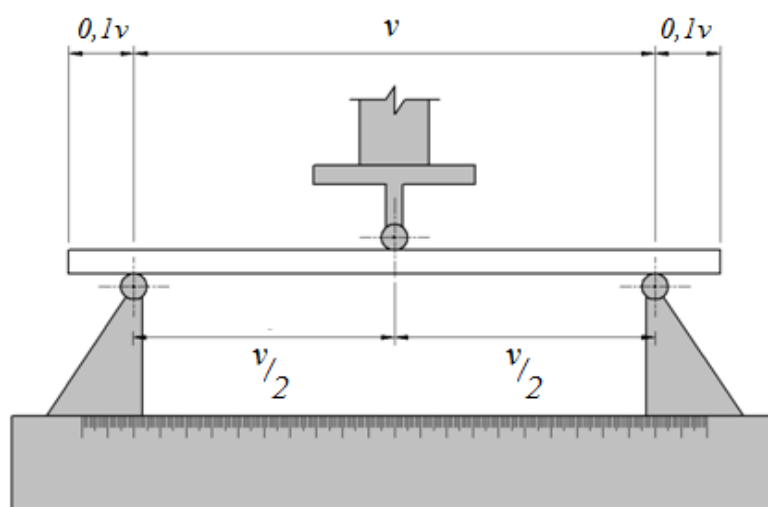


Figura 33 - Esquema do ensaio de flexão

Cálculo da Resistência, Módulo de Elasticidade e Deformação

O cálculo da tensão de flexão σ_f , em MPa, é feito pela expressão:

$$\sigma_f = \frac{3Pv}{2wt^2} \quad (3.6)$$

Onde;

- P é a força aplicada, em N,
- v é o vão de ensaio, em mm,
- w é a largura do corpo de prova, em mm,
- t é a espessura do corpo de prova (mesma do perfil), em mm.

O módulo de elasticidade é a relação entre a faixa de tensões e de deformações correspondentes. A norma ASTM D7264/D7264M – 07 recomenda, para o cálculo do módulo, uma faixa de deformação de 0,002, com o ponto inicial 0,001 e o ponto final 0,003. Se os dados não estiverem disponíveis nos pontos finais exatos da faixa de deformação, usar o ponto de dados disponível mais próximo. O módulo de elasticidade à flexão E_f é calculado a partir da Expressão 3.7:

$$E_f = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3.7)$$

Onde;

- $\Delta\sigma$ é a diferença de tensão entre os dois pontos selecionados, em MPa,
- $\Delta\varepsilon$ é a diferença de deformação entre os dois pontos selecionados.

A deformação máxima à flexão ε_f pode ser calculada da seguinte forma, em mm/mm:

$$\varepsilon_f = \frac{6\delta t}{v^2} \quad (3.8)$$

Onde;

- Δ é a deflexão no meio do vão, em mm,
 v é o vão de ensaio, em mm,
 t é a espessura do corpo de prova (mesma do perfil), em mm.

3.7.3. Resistência Residual – Flexão

O conhecimento das alterações das propriedades e do comportamento dos materiais compósitos poliméricos, como de qualquer outro material usado na construção, quando submetidos à elevação da temperatura ambiente, é um importante requisito de projeto que ainda carece de informações. O domínio do tema é fundamental para a prevenção de acidentes e danos que possam colocar a segurança de pessoas e bens em risco. Neste contexto, é apresentado um estudo de comparação e análise do comportamento à flexão do material em estudo, já resfriado, após ser submetido a temperaturas de 120 °C, 170 °C, 220 °C, 270 °C e 320 °C.

Até a temperatura de 170 °C, os corpos de prova foram aquecidos na estufa do Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC – Rio, os demais corpos de prova, submetidos a 220, 270 e 320 °C, foram aquecidos em forno tipo mufla localizado no Laboratório de Tecnologia Mineral da PUC – Rio. Após aquecimento os corpos de prova foram submetidos a ensaios de flexão por três pontos, seguindo os mesmos procedimentos dos ensaios descritos no item 3.7.2.

Procedimento experimental

O procedimento experimental foi composto por duas fases distintas, primeiro o aquecimento dos corpos de prova e depois o ensaio de flexão por três pontos. Na fase de aquecimento, eram aquecidos 12 corpos de prova por vez, sendo 3 de cada perfil analisado. Eles eram colocados no interior do forno e aquecidos até a temperatura pré-estabelecida, deixados por 30 minutos e resfriados até a temperatura ambiente de forma natural dentro do próprio equipamento. Após o resfriamento, os corpos de prova eram ensaiados a flexão e os dados registrados para comparação.

4 Apresentação e Análise dos Resultados

Neste capítulo são apresentados os dados obtidos na etapa experimental e os cálculos das grandezas desejadas. Inicialmente são apresentados os resultados da caracterização das propriedades físicas do material e, em seguida, os resultados da caracterização mecânica, que inclui a avaliação das propriedades mecânicas de tração e flexão em temperatura ambiente. As propriedades de flexão residuais, para corpos de prova submetidos a diferentes temperaturas, também são apresentadas. Para cada amostra ensaiada, são apresentadas as médias aritméticas e as medidas de dispersões, desvios padrões *DP* e coeficientes de variação *CV*.

4.1. Resultados da Determinação da Fração Volumétrica das Fibras de Vidro

As frações de fibras por massa de cada amostra estudada são apresentadas na Tabela 9 a seguir, enquanto os valores em volume são reportados no item seguinte. Os percentuais obtidos incluem tanto os *rovings* quanto as mantas de reforço. Os valores encontram-se dentro da faixa obtida por outros autores para materiais pultrudados.

Tabela 9 – Percentual de fibras por peso:

| | Amostra | M_i (g) | M_f (g) | W_r (%) | Média | DP | CV |
|-------------------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-------|------|------|
| Perfil I - Matriz Poliéster | 1 | 5,21 | 3,03 | 58,12 | 57,34 | 1,91 | 3,63 |
| | 2 | 5,17 | 3,06 | 59,19 | | | |
| | 3 | 5,19 | 2,84 | 54,72 | | | |
| Placa - Matriz Éster Vinílica | 1 | 3,20 | 1,99 | 62,31 | 62,32 | 1,79 | 3,20 |
| | 2 | 3,16 | 1,90 | 60,13 | | | |
| | 3 | 3,24 | 2,09 | 64,51 | | | |
| Perfil U - Matriz Éster Vinílica | 1 | 3,71 | 2,33 | 62,89 | 62,01 | 1,89 | 3,56 |
| | 2 | 3,62 | 2,15 | 59,39 | | | |
| | 3 | 3,78 | 2,41 | 63,76 | | | |
| Perfil I - Matriz Fenólica | 1 | 4,54 | 3,08 | 67,99 | 66,47 | 1,49 | 2,21 |
| | 2 | 4,36 | 2,81 | 64,45 | | | |
| | 3 | 4,42 | 2,96 | 66,97 | | | |

4.2. Análise Termogravimétrica

Como mencionado no capítulo 3, da análise termogravimétrica realizada foram obtidas as variações de massas sofridas pelas amostras dos perfis PRFV em função da temperatura. Nos gráficos das figuras 34, 35, 36 e 37 são apresentadas as curvas TG e DTG das amostras ensaiadas, nas cores preta e vermelha, respectivamente.

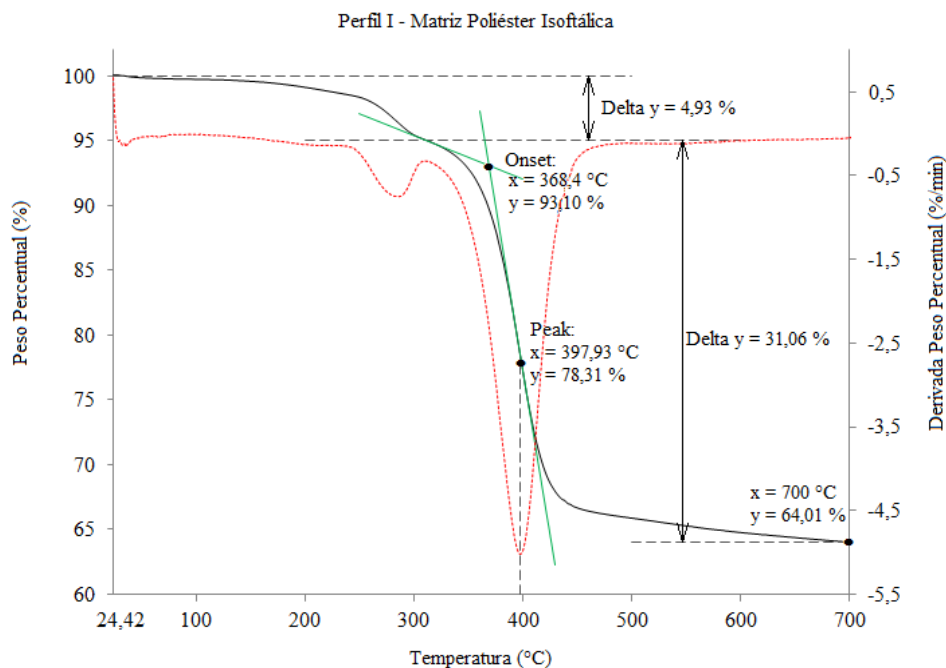


Figura 34 – Curvas TG e DTG da amostra do perfil I de matriz poliéster isoftálica.

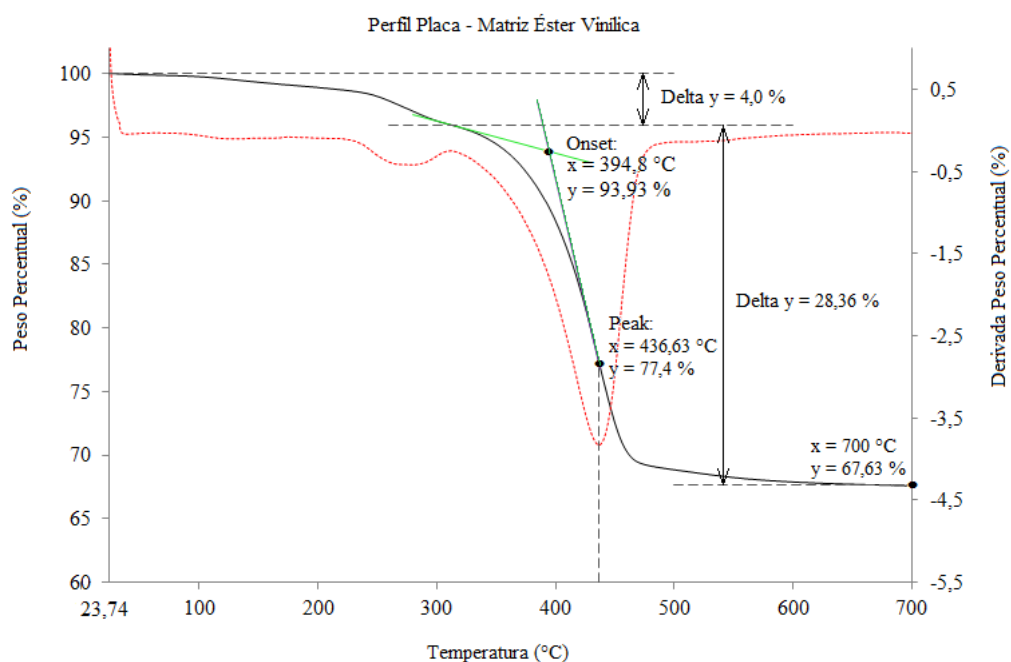


Figura 35 - Curvas TG e DTG da amostra do perfil Placa de matriz éster vinílico.

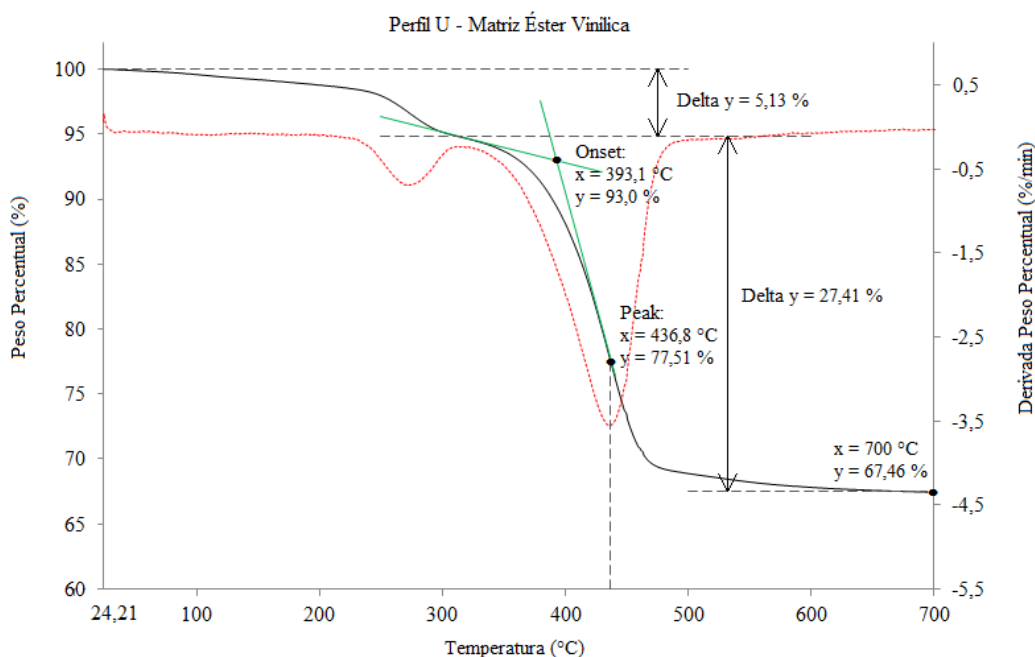


Figura 36 - Curvas TG e DTG da amostra do perfil U de matriz éster vinílica.

As curvas das amostras dos perfis I de matriz poliéster isoftálica e das amostras dos perfis Placa e U de matrizes éster vinílica, apresentam formatos semelhantes. Pode-se observar que em uma faixa inicial do aquecimento, até a temperatura de 230 °C aproximadamente, a perda de massa é pequena, com pequenas variações em torno de 1%, causadas pela vaporização da água absorvida e volatilização de alguns monômeros não reagentes (MOURITZ e GIBSON, 2006). Logo após, uma pequena inclinação é observada na curva TG e um respectivo pico na curva DTG, correspondendo a uma perda de aproximadamente 4% de peso. Esta inclinação representa a desidratação do hidróxido de alumínio, ou Alumina Tri Hidratada, presente na forma de carga retardadora de chama e supressor de fumaça, conforme será mostrado na análise no microscópio eletrônico de varredura. Segundo GALLO e AGNELLI (1998), quando um composto polimérico que contém o hidróxido atinge temperaturas da ordem de 230°C, tem início a desidratação. O mesmo pôde ser observado por HAPUARACHCHI e PEJIS (2009), ao realizarem análise termogravimétrica neste composto isolado em estudos sobre o efeito do uso de polifosfato de amônio e tri-hidróxido de alumínio como retardadores de chama em matrizes poliéster. Em seguida, a massa diminui rapidamente à medida que a decomposição da matriz polimérica se desenvolve, sendo representado por um acentuado declive da

curva TG. Esta inclinação tem uma correspondência na curva DTG onde um pico maior pode ser identificado. A temperatura referente a este pico é chamada temperatura de decomposição, menor na resina poliéster, como pode ser observado, devido a sua menor resistência térmica, conforme também observado por MOURITZ e MATHYS (1999). Nesta fase, as ligações primárias dentro da estrutura molecular da matriz polimérica são quebradas e produtos da reação são gerados em forma de gases e material carbonizado, provocando a redução de massa. Com o avanço na degradação da resina, a taxa de perda de massa começa a diminuir. Finalmente, após uma determinada duração de exposição, quando virtualmente toda a resina foi consumida, a massa tende a um valor mínimo constante.

O processo de decomposição da amostra do compósito de matriz fenólica apresenta algumas características particulares que a diferem das demais. Após uma perda inicial de massa, o processo tem início em uma temperatura mais elevada. Seu desenvolvimento ocorre com uma cinética de decomposição diferente, caracterizada pela menor inclinação da curva TG.

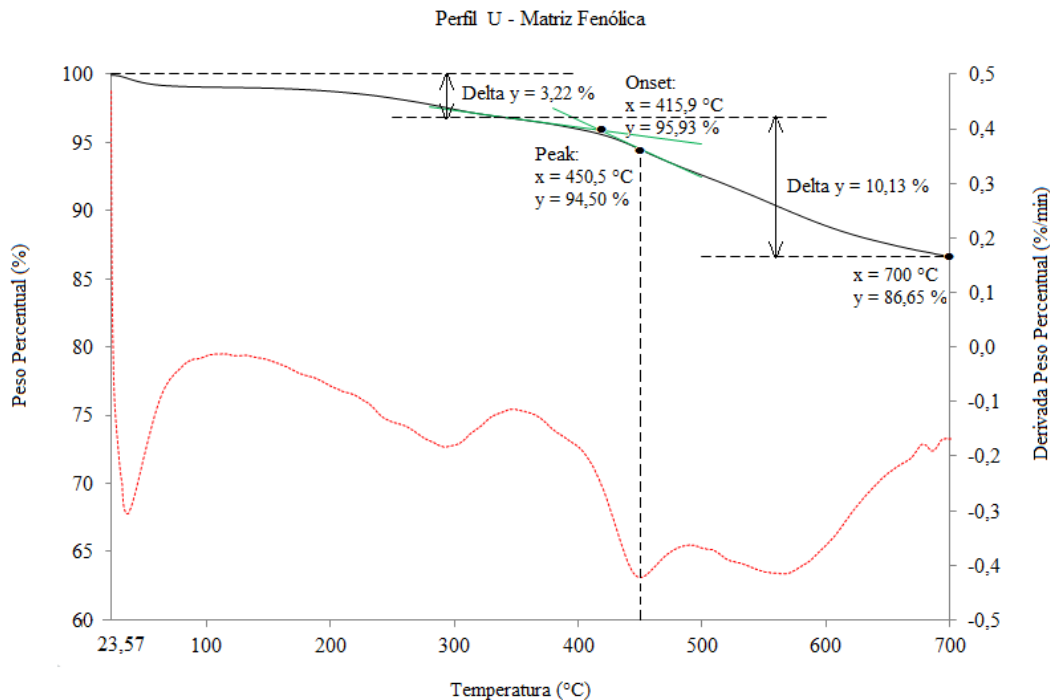


Figura 37 - Curvas TG e DTG da amostra do perfil U de matriz fenólica.

Movendo-se da esquerda para a direita, o primeiro e o segundo picos representam a vaporização da água absorvida e a volatilização de alguns monômeros. Devido a alta viscosidade da resina fenólica, usa-se água como um diluente para facilitar sua moldagem e impregnação das fibras, por isso a maior perda inicial comparando com os compósitos anteriores. Os dois últimos representam a faixa de decomposição térmica, onde ocorre a conversão da resina em material carbonizado e gases voláteis. Os dois picos, não tão aparentes no traçado da curva TG, mas visivelmente detectáveis na curva DTG, sugerem que o processo de degradação consiste em pelo menos duas fases, diferente dos ensaios anteriores. Segundo GIBSON *et. al.* (2003), a resina fenólica, que tem um maior conteúdo aromático, produz uma maior proporção de material carbonizado. Sendo assim, as duas fases correspondem à condensação primária seguida pela formação do material carbonizado. Ao final do ensaio, a inclinação da curva TG sugere que a decomposição da resina ainda não está completa, necessitando de temperaturas ainda mais elevadas.

Importante salientar que diferentes valores de temperaturas de decomposição T_d podem ser obtidos para diferentes taxas de aquecimento. Segundo BAY *et. al.* (2015), uma taxa de aquecimento mais elevada induz frequentemente a um valor mais elevado de T_d . Isto é devido ao mecanismo cinético da reação de decomposição, ou seja, uma taxa de aquecimento mais elevada, correspondente a um tempo de aquecimento mais curto, resultando em menos decomposição à mesma temperatura.

A Tabela 10 apresenta a comparação dos resultados encontrados, onde podemos observar a menor temperatura de decomposição da matriz poliéster e maior da matriz fenólica, conforme esperado. A menor massa residual da matriz poliéster isoftálica vai de encontro ao resultado encontrado no ensaio de frações volumétricas. No caso da matriz fenólica, além do maior percentual de fibra encontrado anteriormente a massa residual superior vem do fato do material gerar uma maior quantidade de material carbonizado.

Tabela 10 – Resultados das análises termogravimétricas:

| | Temperatura de início da decomposição (°C) | Massa residual da amostra (%) |
|--------------------------------------|--|-------------------------------|
| Perfil I - Matriz Poliéster | 368,4 | 64,01 |
| Perfil Placa - Matriz Éster Vinílica | 394,8 | 67,63 |
| Perfil U - Matriz Éster Vinílica | 393,1 | 67,46 |
| Perfil I - Matriz Fenólica | 415,9 | 86,65 |

A partir dos resultados acima as frações volumétricas são então calculadas e os resultados apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Fração volumétrica de fibras:

| | W_f (%) | ρ_c (g/cm ³) | ρ_f (g/cm ³) | V_f (%) |
|--|-----------|----------------------------------|----------------------------------|-----------|
| Perfil I - Matriz Poliéster Isoftálica | 64,01 | 2,04 | | 51,41 |
| Perfil Placa - Matriz Éster Vinílica | 67,63 | 1,97 | 2,54 | 52,45 |
| Perfil U - Matriz Éster Vinílica | 67,46 | 1,97 | | 52,32 |
| Perfil U - Matriz Fenólica | 86,00 | 2,16 | | 73,13 |

A fração volumétrica da amostra do perfil U de matriz fenólica apresentou um valor alto em função da grande quantidade de material carbonizado presente ao final do ensaio, gerando um resultado não confiável.

Comparando com os resultados do item 4.1, é observada uma diferença nos valores encontrados. A dificuldade de se medir com precisão a massa final da amostra, após a queima da resina no ensaio anterior, pode gerar essas distorções nos resultados. Ao final da queima são observados resíduos na forma de pó, no fundo do cadinho e presos aos filamentos de fibra, de difícil remoção e que influenciam a pesagem final da amostra.

4.3. Análise Microestrutural

As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas para um maior detalhamento da seção transversal dos compósitos. Foram feitas varreduras ao longo da espessura das amostras em diferentes posições, onde se procurou observar a disposição das fibras, presença de vazios e presença de materiais de carga. Através de uma escala da cor cinza é possível observar as diferentes fases componentes do compósito, onde o tom cinza mais escuro representa a matriz, o mais claro a fibra e, no caso das amostras de matrizes poliéster isoftálica e éster vinílica, uns pontos de tom intermediário representando a carga. Morfologicamente, é possível observar as camadas e orientações das fibras, distribuídas de forma heterogênea ao longo da seção. Consta-se também a existência de vazios distribuídos aleatoriamente, frutos da reação de polimerização das resinas ou da má impregnação das fibras pelas resinas.

Nas figuras 38, 39, 40 e 41 são apresentadas algumas micrografias das amostras dos perfis como recebidos.

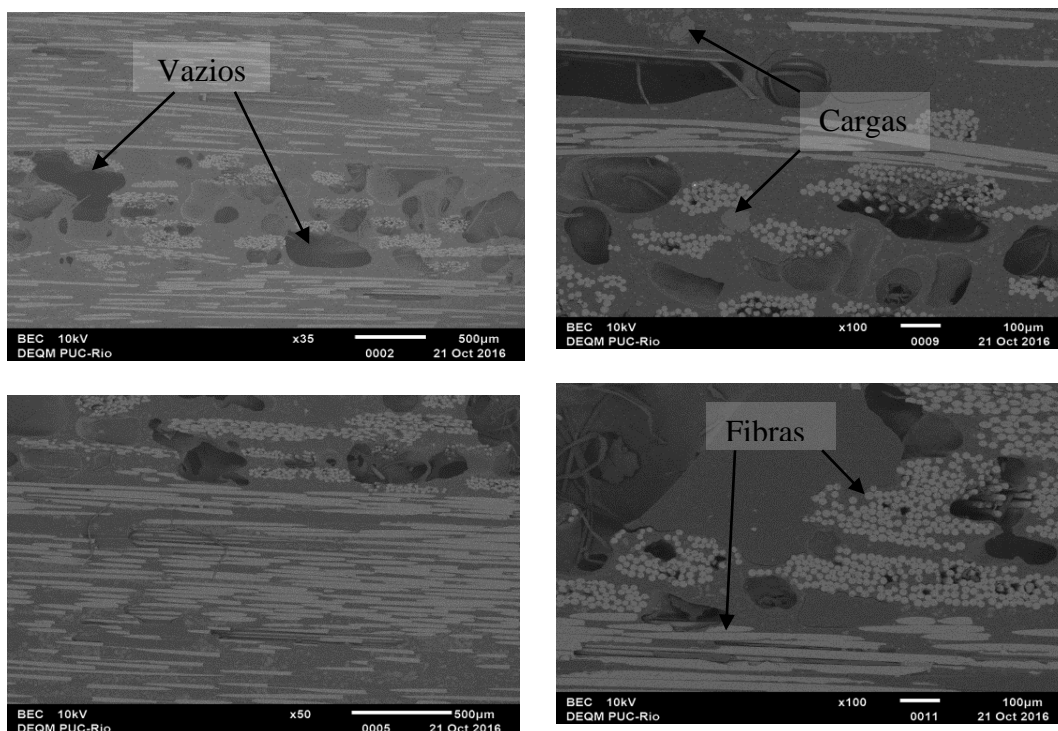


Figura 38 – Micrografias da amostra do perfil I de matriz poliéster isoftálica.

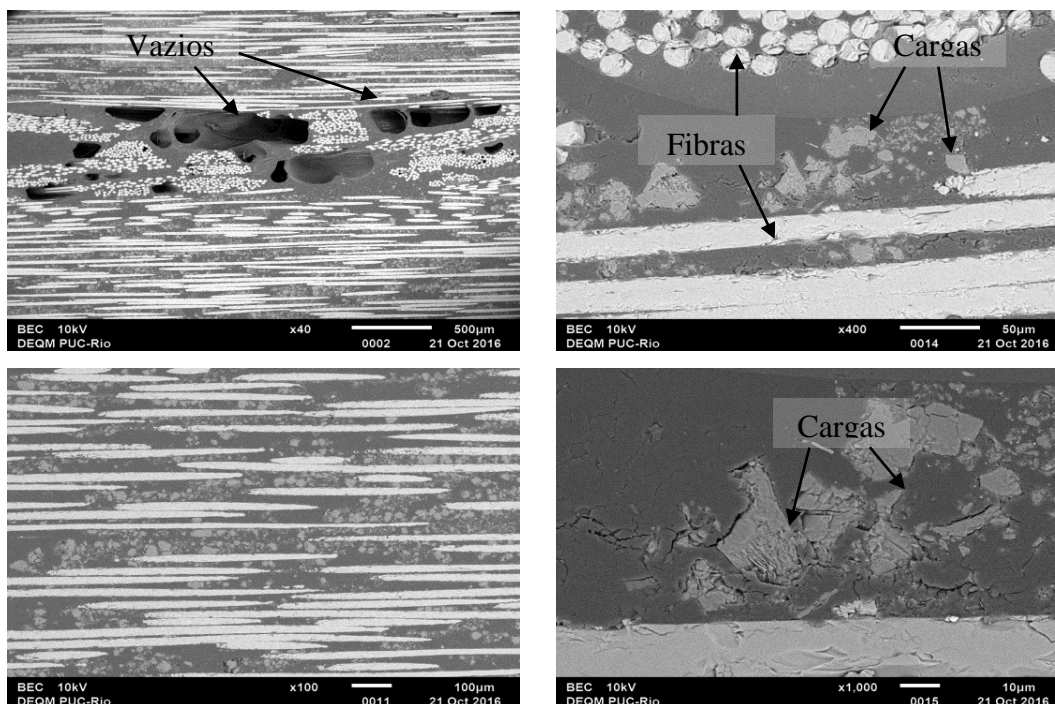


Figura 39 - Micrografias da amostra do perfil U de matriz éster vinílica.

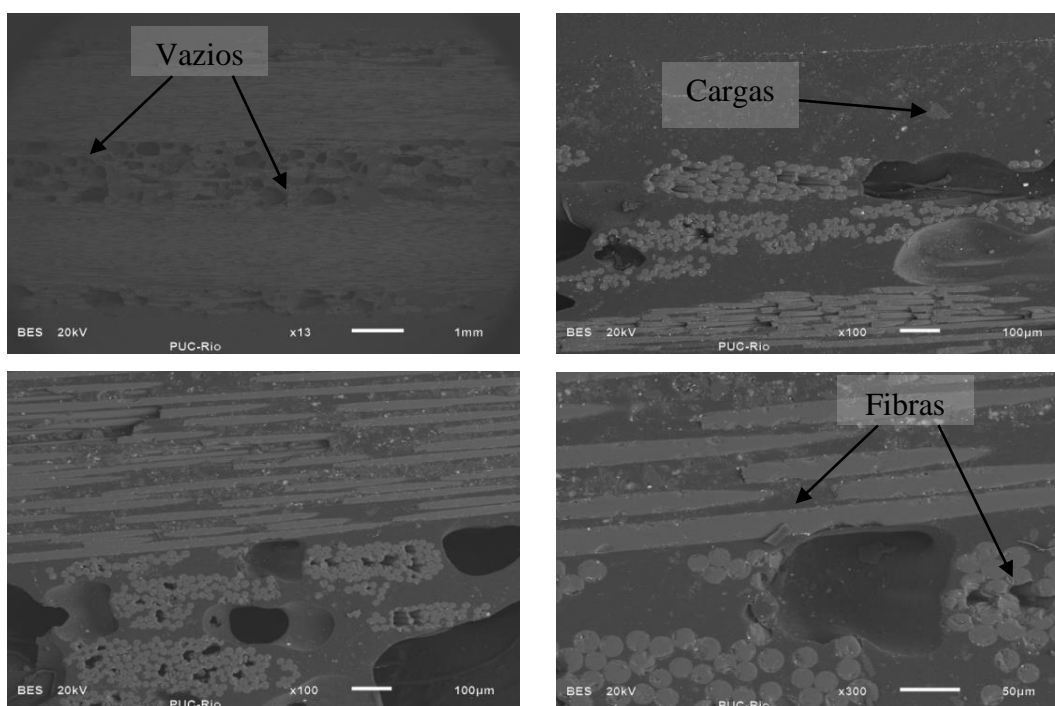


Figura 40 - Micrografias da amostra do perfil Placa de matriz éster vinílica.

Na amostra de matriz fenólica, pode ser notada uma maior presença de vazios e microfissuras, provavelmente formados pela pressão interna no interior do perfil causada pelo vapor de água gerado na reação de polimerização e, também, pela maior dificuldade de penetração e impregnação das fibras pela

resina, associado à alta viscosidade da matriz fenólica. Também é possível observar uma maior fração de fibras, ilustrando um dos motivos da maior massa residual encontrada.

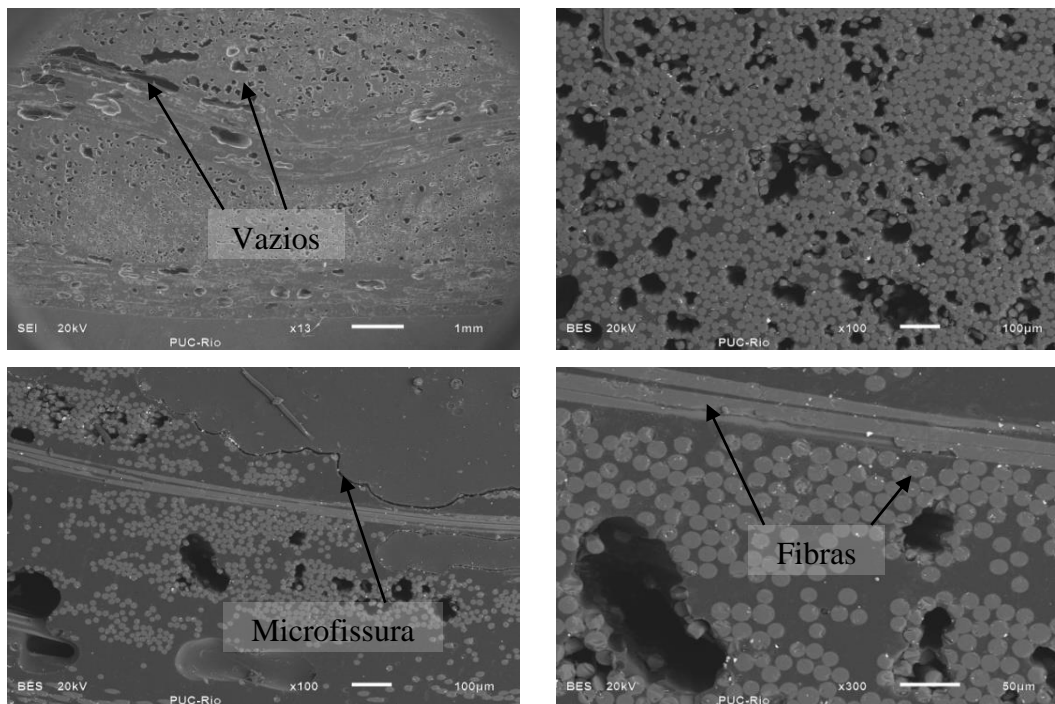


Figura 41 - Micrografias da amostra do perfil U de matriz fenólica.

Outra possibilidade da análise no MEV foi a identificação dos elementos constituintes de cada material componente de cada fase com compósito. As amostras de matrizes poliéster isoftálica e éster vinílica apresentaram as mesmas composições, sendo assim, será apresentada a análise de somente uma das três amostras, além da análise da amostra de matriz fenólica.

Na Figura 42 é apresentada uma das imagens capturadas da amostra do perfil U de matriz éster vinílica. Cada fase presente é marcada por um ponto numerado e seus elementos constituintes são identificados.

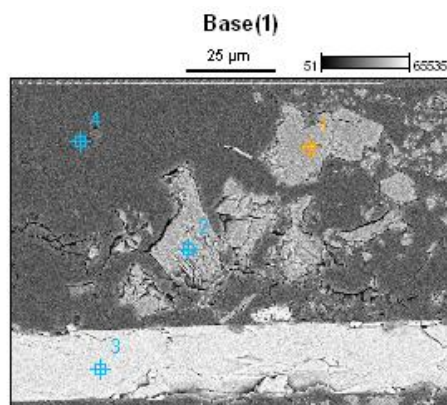


Image Name: Perfil U – Éster Vinílico

Accelerating Voltage: 10.0 kV

Magnification: 1000

Detector: NanoTrace

Figura 42 – Imagem da análise de microscopia eletrônica de varredura da amostra do perfil U de matriz éster vinílico.

Pelas figuras 43 e 44, observamos nos pontos 1 e 2 uma alta concentração de oxigênio e alumínio, sugerindo a presença do aditivo alumina tri-hidratada, um tipo de hidróxido de alumínio incorporado em sistemas poliméricos como retardante de chama e eliminador de fumaça (GALLO e AGNELLI, 1998). No ponto 3 (Figura 45), localizado sobre a fibra de reforço, são identificados em maior proporção os elementos silício, oxigênio, magnésio, alumínio e cálcio, principais elementos dos compostos químicos que compõem a fibra de vidro tipo E (Tabela 12). Por fim, no ponto 4 (Figura 46), são identificados o carbono e o oxigênio, principais elementos constituintes da matriz polimérica. Vale ressaltar, que a presença do elemento ouro em todos os pontos, ocorre em função da metalização da amostra durante a fase de preparação, descrita no item 3.6.

Tabela 12 - Composição química de fibra de vidro tipo E (adaptado de HOLLAWAY e HEAD, 2001):

| Componente | Percentual (%) |
|--|----------------|
| SiO ₂ - sílica (dióxido de silício) | 54,0 |
| CaO - óxido de cálcio | 17,5 |
| Al ₂ O ₃ - óxido de alumínio | 14,0 |
| B ₂ O ₃ - óxido de boro | 10,0 |
| MgO - óxido de magnésio | 4,5 |

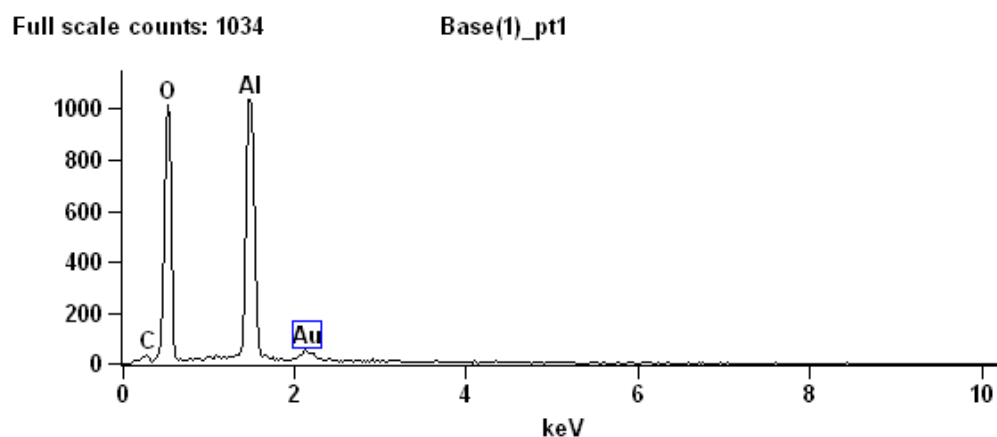


Figura 43 – Elementos identificados no ponto 1 (carga) da Figura 42.

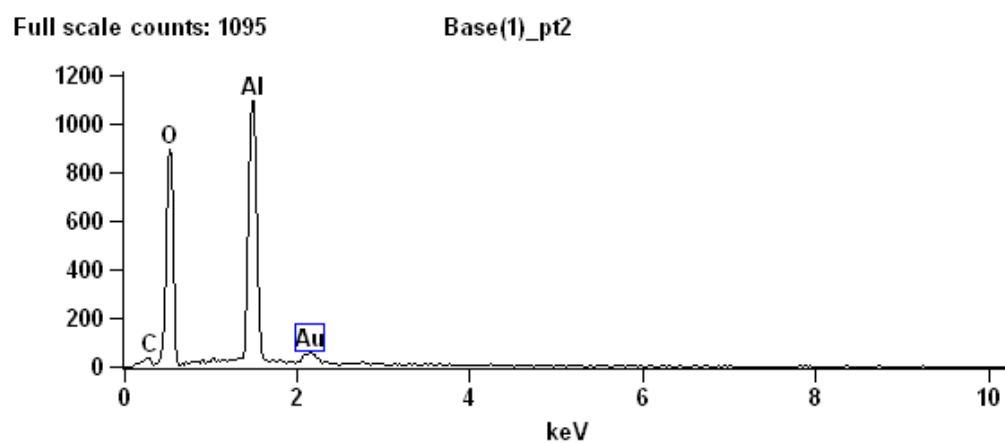


Figura 44 - Elementos identificados no ponto 2 (carga) da Figura 42.

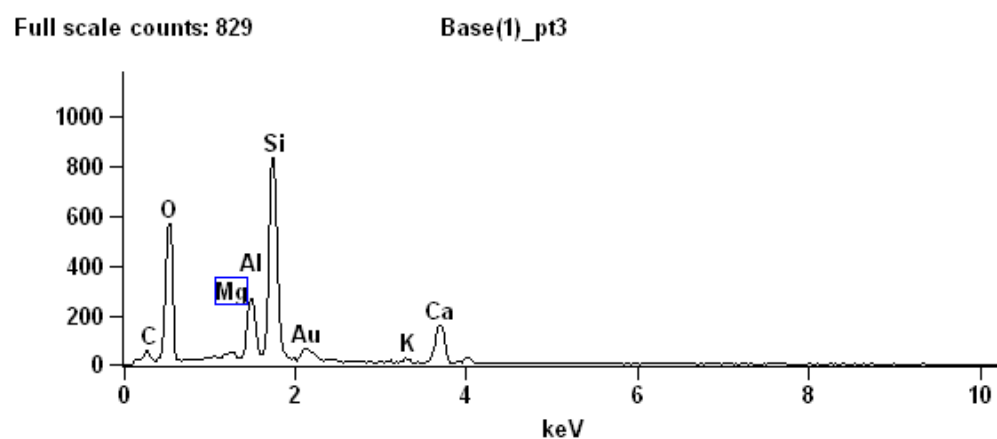


Figura 45 - Elementos identificados no ponto 3 (fibra) da Figura 42.

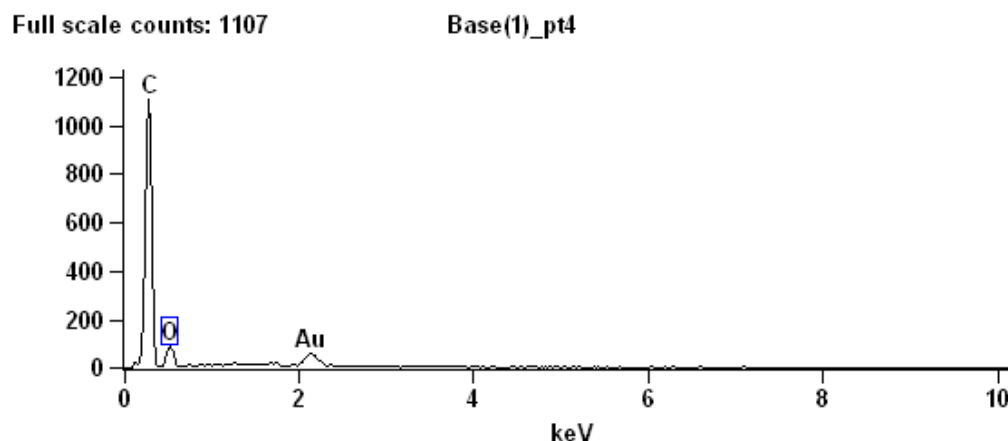


Figura 46 – Elementos identificados no ponto 4 (resina) da Figura 42.

Uma das imagens capturadas na análise da amostra do perfil de matriz fenólica é apresentada a seguir (Figura 47). Diferente da imagem da análise anterior, nessa podemos notar apenas duas tonalidades de cinza, o tom mais escuro representando a matriz e o mais claro a fibra de reforço, caracterizando a ausência de aditivos ou cargas. As regiões pretas representam vazios no interior da amostra.

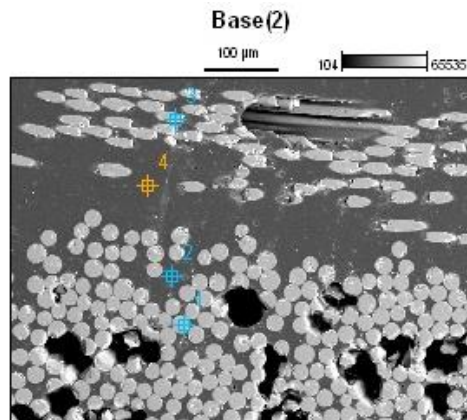


Image Name: perfil I - Fenólica

Accelerating Voltage: 20.0 kV

Magnification: 200

Detector: NanoTrace

Figura 47 - Imagem da análise de microscopia eletrônica de varredura da amostra do perfil U de matriz fenólica.

A identificação dos elementos, apresentada nas figuras 48, 49, 50 e 51, revela a mesma composição encontrada na análise anterior para componentes da resina polimérica e da fibra de vidro.

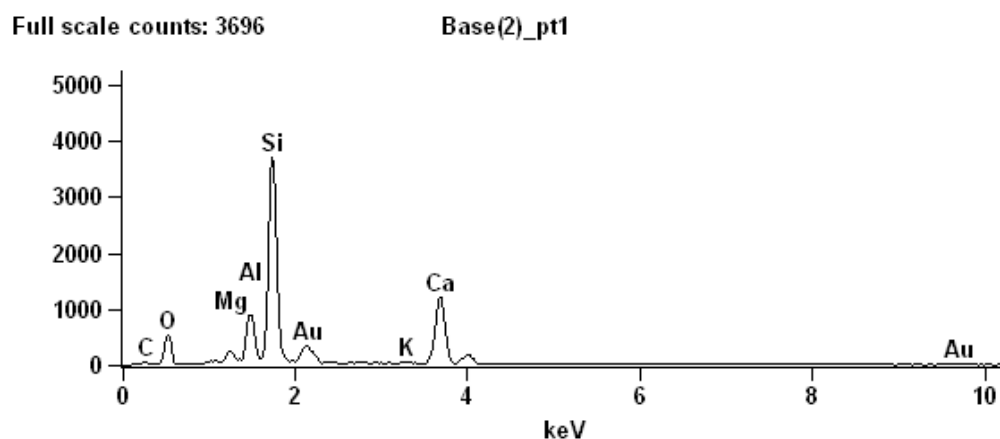


Figura 48 – Elementos identificados no ponto 1 (fibra) da Figura 47.

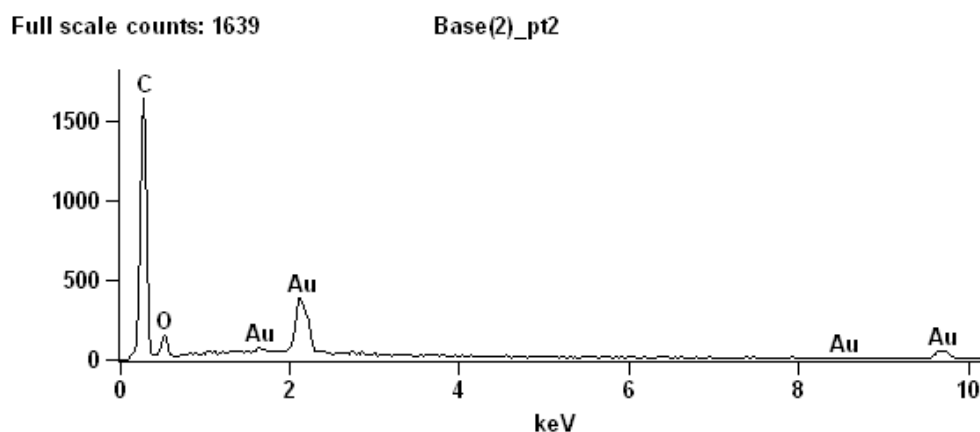


Figura 49 – Elementos identificados no ponto 2 (resina) da Figura 47.

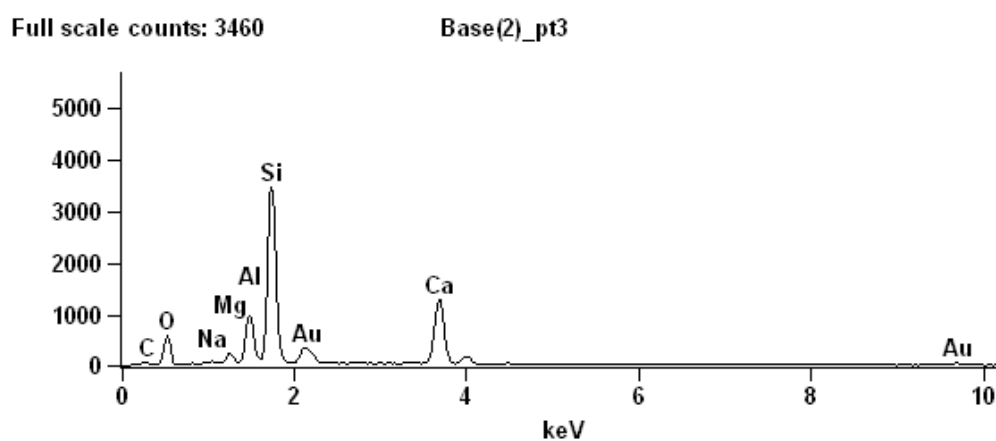


Figura 50 – Elementos identificados no ponto 3 (fibra) da Figura 47.

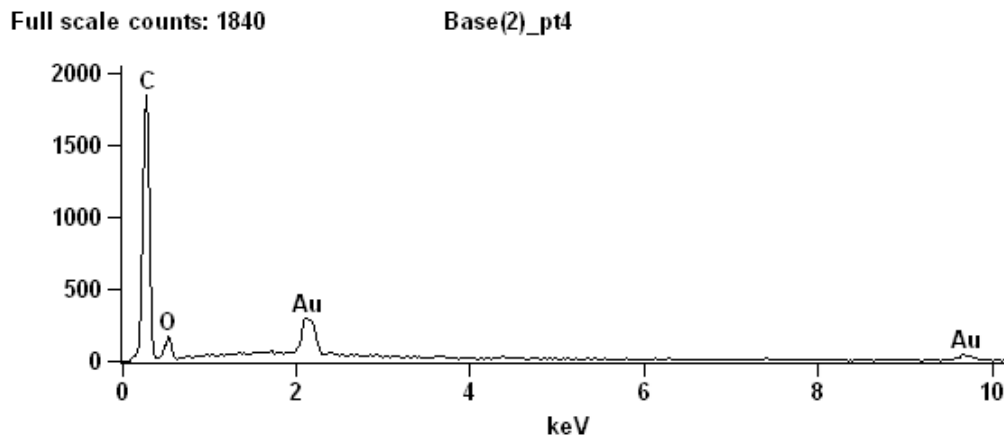


Figura 51 - Elementos identificados no ponto 4 (resina) da Figura 47.

4.4. Resultados dos Ensaio Mecânicos

4.4.1. Tração Axial

Os perfis de matriz éster vinílica apresentaram maiores tensões de ruptura comparadas ao perfil I de matriz poliéster isoftálica. Esse resultado pode ser explicado pela maior fração volumétrica de fibras resina éster vinílica e pela maior qualidade da interface. O mesmo pode ser observado com relação aos valores dos módulos de elasticidade.

Da análise dos gráficos tensão-deformação, elaborados através das forças aplicadas e das leituras de deformações do clip gage, pôde-se observar que o material apresentou um comportamento linear até à ruptura. Todos os corpos de prova sofreram rupturas bruscas, típicas de materiais frágeis. As figuras 52, 53 e 54 apresentam os gráficos tensão-deformação das amostras válidas de cada perfil ensaiado.

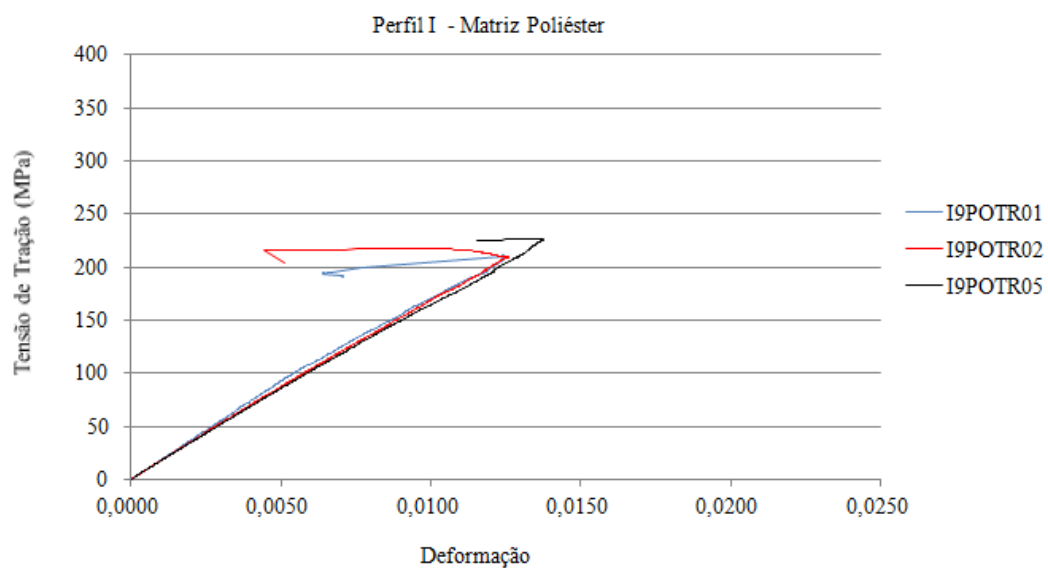


Figura 52 – Gráfico tensão-deformação - perfil I de matriz poliéster isoftálica.

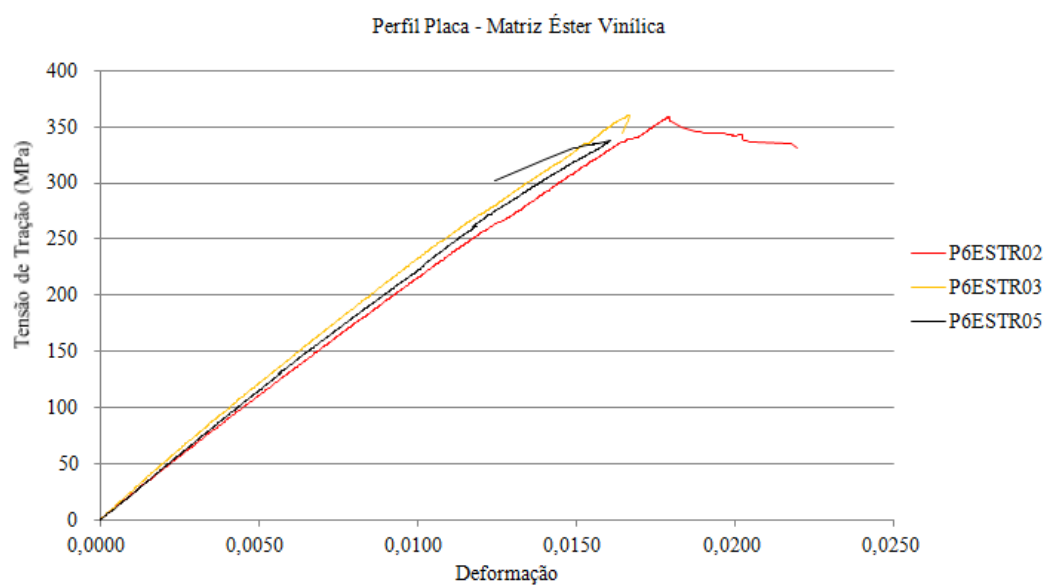


Figura 53 - Gráfico tensão-deformação - perfil placa de matriz éster vinílico.

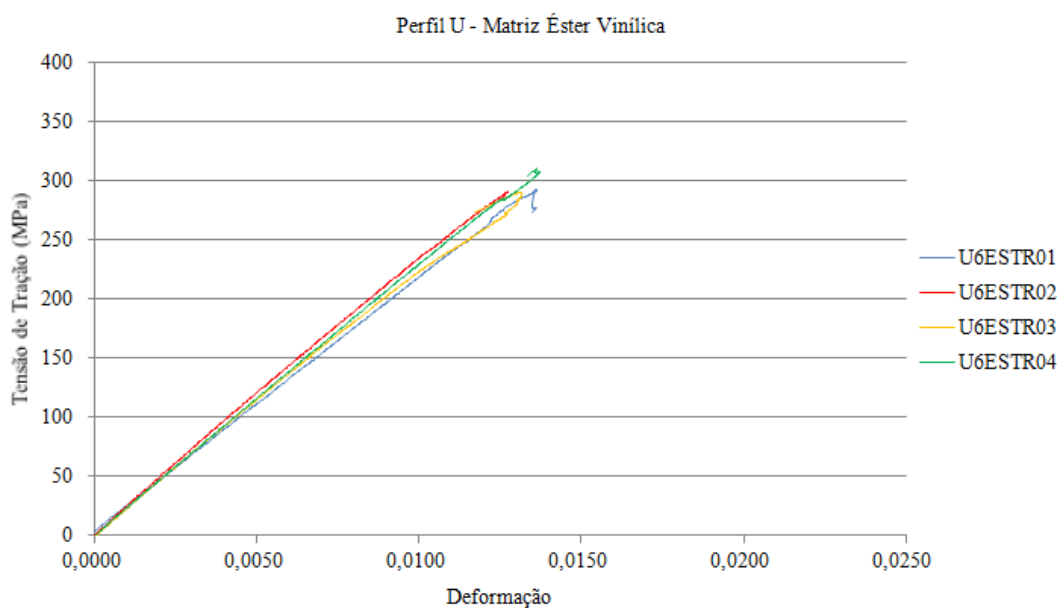


Figura 54 - Gráfico tensão-deformação - perfil U de matriz éster vinílica.

Os valores médios e os desvios padrões do módulo de elasticidade, tensão de ruptura e deformação, obtidos para as amostras ensaiadas são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação na ruptura obtidos nos ensaios de tração.

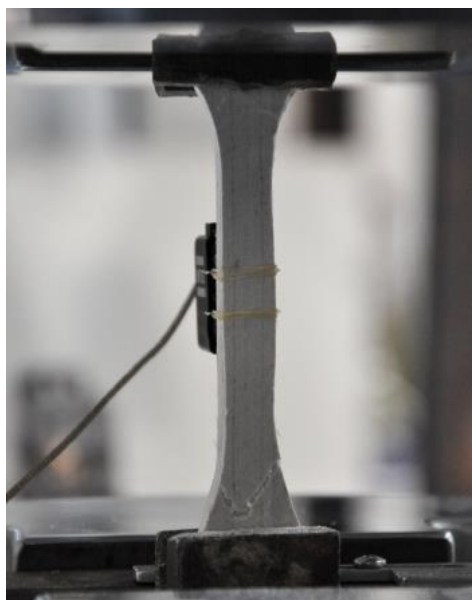
| | Tensão de Ruptura | | |
|--------------------------------------|---------------------|-------------|-----------|
| | σ_t (MPa) | DP (MPa) | CV (%) |
| Perfil I - Matriz Poliéster | 218,3 | 6,6 | 0,03 |
| Perfil Placa - Matriz Éster Vinílica | 352,6 | 10,4 | 0,03 |
| Perfil U - Matriz Éster Vinílica | 296,0 | 8,2 | 2,78 |

| | Módulo de Elasticidade | | |
|--------------------------------------|------------------------|-------------|-----------|
| | E_t (GPa) | DP (GPa) | CV (%) |
| Perfil I - Matriz Poliéster | 17,8 | 0,4 | 2,49 |
| Perfil Placa - Matriz Éster Vinílica | 23,6 | 1,0 | 4,45 |
| Perfil U - Matriz Éster Vinílica | 23,2 | 1,0 | 4,32 |

| | Deformação na Ruptura | | |
|--------------------------------------|-----------------------|--------|--------|
| | ϵ_t | DP | CV (%) |
| Perfil I - Matriz Poliéster | 0,013 | 0,0003 | 0,0240 |
| Perfil Placa - Matriz Éster Vinílica | 0,017 | 0,0005 | 0,0280 |
| Perfil U - Matriz Éster Vinílica | 0,013 | 0,0004 | 2,9644 |

Os resultados dos ensaios de tração axial mostram que, apesar do estreitamento da seção ter sido feito de maneira gradual, cinco, de um total de quinze corpos de prova ensaiados, apresentaram rupturas próximas às garras de fixação (Figura 55-a). Esses resultados não foram utilizados nos cálculos das propriedades. Com exceção de dois corpos de prova do perfil Placa e um do perfil U, onde a ruptura ocorreu na seção mediana, a ruptura ocorreu por delaminação da camada mais externa, o que caracteriza uma interface pouco resistente entre as camadas do compósito (Figura 55-b). Nas micrografias apresentadas no item anterior pôde ser observada a grande presença de vazios. Este fato limita a resistência do material, impedindo que a mesma se caracterize em função da resistência de seus materiais constituintes.

a)



b)

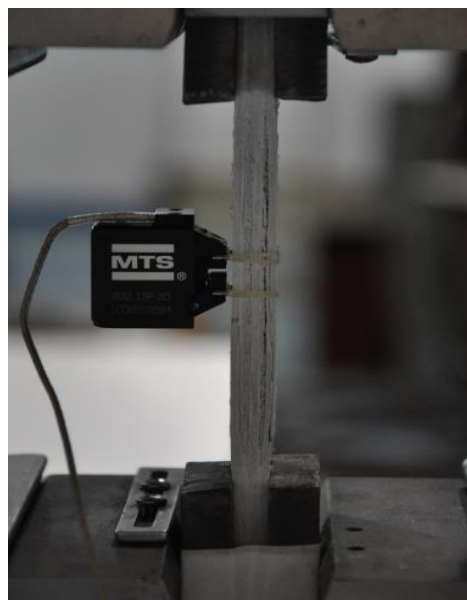


Figura 55 – Modos de ruptura dos corpos de prova do ensaio a tração axial: a) próximo a garra; b) delaminação da camada externa.

4.4.2.Flexão

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de flexão longitudinal, em forma de gráficos tensão-deformação nas figuras 57 a 60 e nas tabelas 14 a 17, com os valores dos módulos de elasticidade, tensão de ruptura e deformação máxima, encontrados para cada conjunto de corpos de prova ensaiados. Os valores utilizados para a construção do gráfico foram calculados de acordo com a formulação apresentada no item 3.7.2.

De acordo com a norma ASTM D7264/D7264M – 07, adotada para este ensaio, para se considerar a tensão de ruptura como tensão resistente é necessário que a ruptura do corpo de prova ocorra em qualquer uma de suas faces externas, sem falha de cisalhamento interlaminar (Figura 56) ou falha de esmagamento na seção de apoio ou de carregamento. No entanto, conforme descrito nos parágrafos seguintes, os modos de falha por cisalhamento interlaminar foram observados em muitos dos ensaios, mas suas resistências serão reportadas para efeito de comparação.

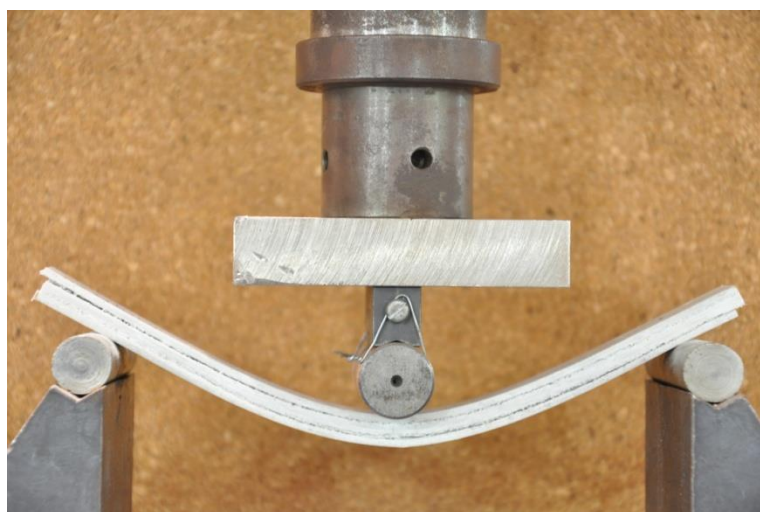


Figura 56 – Falha por cisalhamento interlaminar.

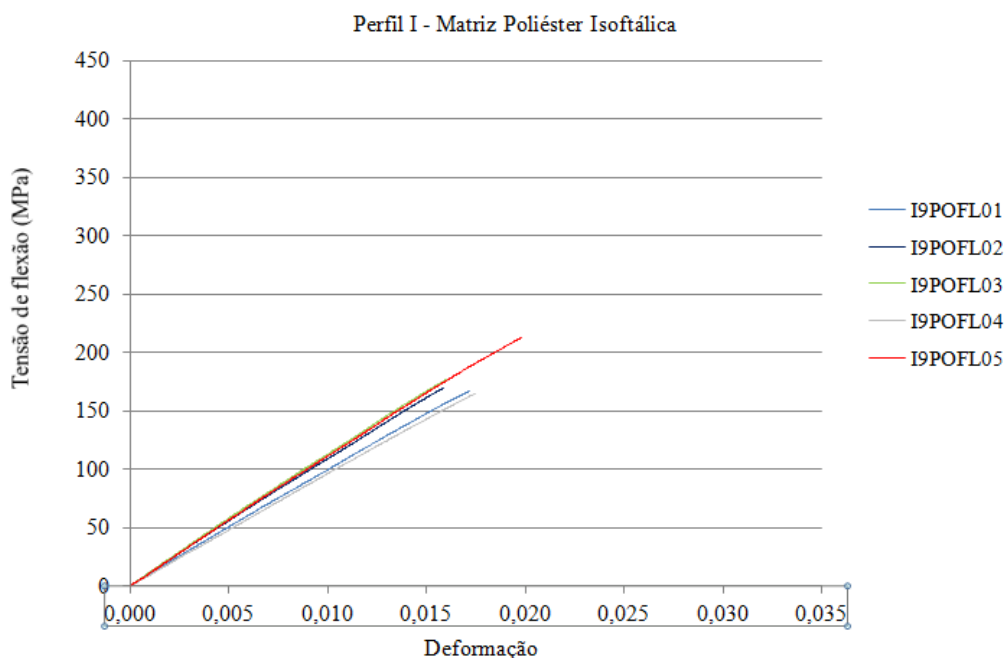


Figura 57 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica.

Tabela 14 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica.

| Tensão de Ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|-------------|-----------|------------------------|-------------|-----------|-----------------------|-------|-------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV |
| 178,02 | 17,87 | 10,04 | 10,85 | 0,77 | 7,14 | 0,017 | 0,001 | 8,253 |

Como pode ser observado no gráfico, os corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica apresentaram comportamento linear até a ruptura. Todos os corpos de prova romperam por cisalhamento interlaminar, apesar das dimensões dos corpos de prova terem sido selecionadas de acordo com a norma ASTM D7264/D7264M – 07 para justamente evitar esse efeito. Isso caracteriza uma interface de baixa resistência entre camadas de *roving* e da manta de filamentos contínuos, o que já corrobora as observações feitas nos ensaios de tração, quando os corpos de prova romperam por delaminação.

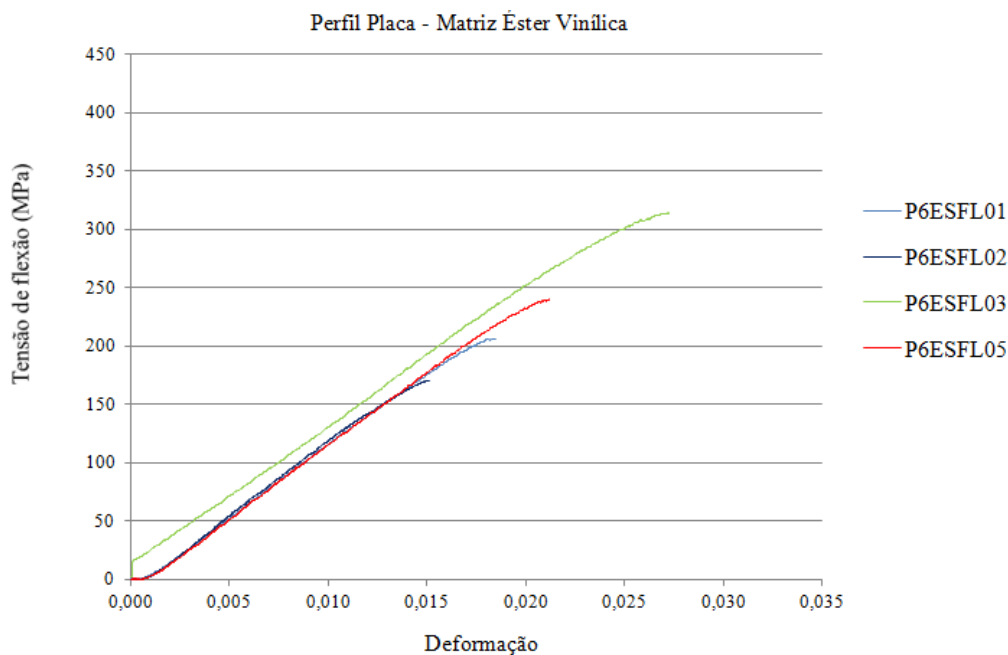


Figura 58 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica.

Tabela 15 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica.

| Tensão de Ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|-------|-------|------------------------|-------|------|-----------------------|-------|--------|
| Média | DP | CV | Média | DP | CV | Média | DP | CV |
| (MPa) | (MPa) | % | (GPa) | (GPa) | % | (%) | (%) | (%) |
| 232,88 | 53,20 | 22,84 | 12,05 | 0,41 | 3,36 | 0,02 | 0,004 | 21,729 |

Assim como nos resultados anteriores, os corpos de prova do perfil placa de matriz éster vinílica, apresentaram comportamento linear até a ruptura. No entanto, nesse caso, três corpos de prova romperam por cisalhamento interlaminar (P6ESFL01, P6ESFL02 e P6ESFL05) enquanto o P6ESFL03 apresentou modo de ruptura por tração na fibra. Uma maior dispersão de dados pôde ser observada neste material. Segundo BANK (2006), esta dispersão é fruto da falta de homogeneidade na distribuição de fibras durante o processo de fabricação dos compósitos pultrudados, levando a diferentes propriedades mecânicas dependendo da localização de onde corpo de prova é extraído.

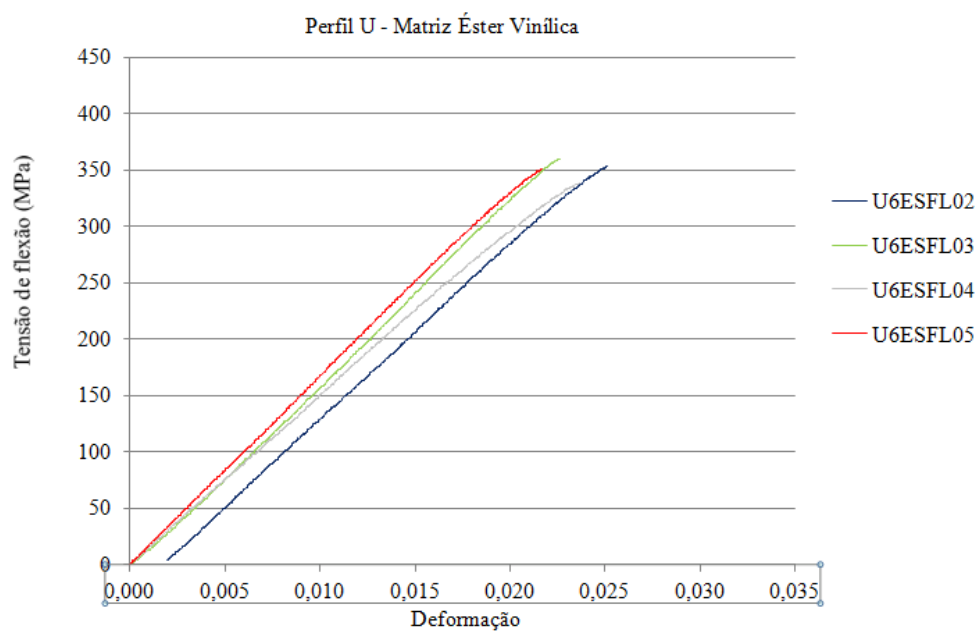


Figura 59 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica.

Tabela 16 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica.

| Tensão de Ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|-------|------|------------------------|-------|------|-----------------------|-------|-------|
| Média | DP | CV | Média | DP | CV | Média | DP | CV |
| (MPa) | (MPa) | % | (GPa) | (GPa) | % | | | % |
| 350,42 | 9,88 | 2,82 | 15,44 | 0,54 | 3,51 | 0,02 | 0,001 | 4,331 |

Os corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica apresentaram os maiores valores entre as grandezas calculadas. Todos os corpos de prova apresentaram ruptura por cisalhamento interlaminar.

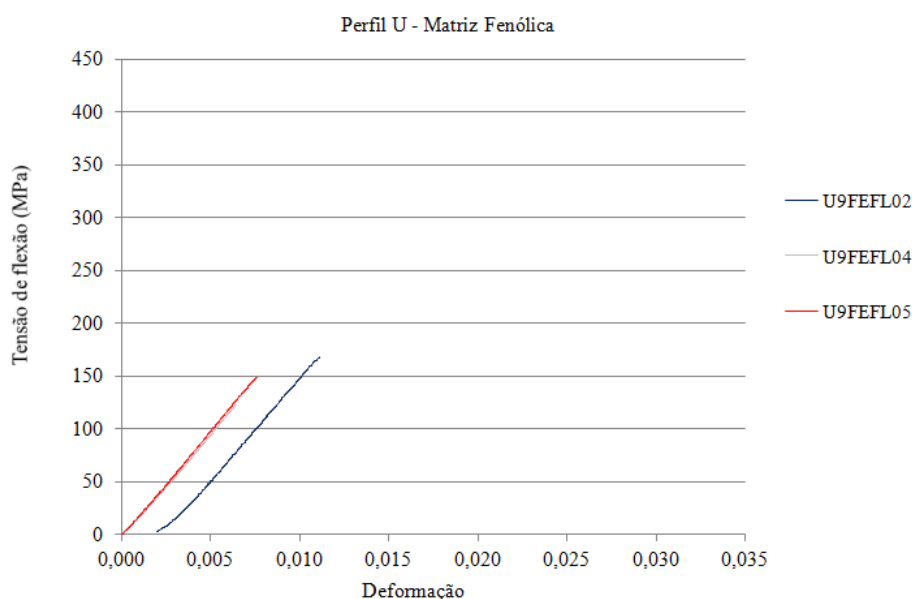


Figura 60 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica.

Tabela 17 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica.

| Tensão de Ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|-------------|-----------|------------------------|-------------|-----------|-----------------------|-------|-----------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV (%) |
| 146,26 | 19,92 | 13,62 | 18,57 | 0,63 | 3,38 | 0,01 | 0,002 | 23,234 |

Conforme os demais ensaios, os corpos de prova do perfil U de matriz fenólica também apresentaram comportamento linear até a ruptura. O maior módulo de elasticidade e a menor deformação caracterizam o comportamento deste compósito como o mais frágil entre os ensaiados. Também foi verificada a menor tensão de ruptura, sendo, portanto, o que apresentou a menor resistência, mesmo apresentando o maior percentual de fibras, de acordo com o item 3.4. Todos os corpos de prova romperam por cisalhamento interlaminar, caracterizando também uma baixa qualidade da interface entre as camadas do compósito, já verificada visualmente pela maior porosidade do material.

De modo geral, os resultados encontrados estão de acordo com a bibliografia disponível. GIBSON (1994) e CALLISTER (1999) atribuem à resina fenólica os maiores módulos de elasticidade e menores limites de resistência e de deformação, comparadas com as mesmas propriedades das resinas poliéster e éster vinílico. Segundo CORREIA, BAI e KELLER (2015), as propriedades mecânicas

de materiais de PRFV produzidos com resinas fenólicas são normalmente mais baixas do que as obtidas com demais resinas termofixas. Para KAW (2006), a resina fenólica possui um inconveniente que é o alto conteúdo vazios, formados principalmente durante as reações de polimerização. Este fenômeno enfraquece a interação fibra-matriz e impede a adequada transferência de esforços. d'ALMEIDA *et. al.* (2002), encontraram resultados maiores de resistência e módulo de elasticidade para corpos de prova provenientes de perfil putrudados em compósitos PRFV de matriz éster vinílica, comparando a corpos de prova de perfis de compósitos PRFV de matriz poliéster.

Mesmo adotando um valor para relação entre vão de ensaio e espessura dos corpos de prova sugerido pela norma ASTM D7264/D7264M – 07, a ruptura da maioria dos corpos de prova ocorreu por cisalhamento interlaminar. Este comportamento, além de permitir observar consideráveis deformações por cisalhamento e a forte influência das tensões de cisalhamento na resistência a esforços de flexão, fato também observado por NETO e LA ROVERE (2007), caracteriza a deficiente interface entre as camadas de manta de filamentos contínuos e de *rovings*, principalmente pela presença excessiva de vazios e má impregnação das fibras pela resina. BANK (2006) atribui a alta deformação por cisalhamento na flexão ao baixo módulo de cisalhamento apresentado pelos compósitos poliméricos reforçados com fibras. Para ele quanto maior o grau de anisotropia existente no material, maior será a influência do cisalhamento no comportamento à flexão. O menor valor do módulo de elasticidade encontrado nos ensaios à flexão em relação à tração é explicado por TOLF e CLARIN (1984) como função de grandes deformações de cisalhamento e da heterogeneidade do material, que proporciona uma distribuição de tensão não linearmente contínua, mas linear apenas em algumas partes, tornando a formulação de cálculo incorreta.

4.4.3. Flexão Residual

No presente item são apresentados os resultados dos ensaios de flexão longitudinal realizados nos corpos de prova após submetê-los a temperaturas de até 320 °C. São também apresentadas imagens dos corpos de prova e micrografias das amostras após serem expostas a 220 °C.

Temperatura de 120 °C

As figuras 61, 62, 63 e 64 mostram os gráficos tensão-deformação dos corpos de prova ensaiados após exposição a 120°C e as tabelas 18, 19, 20 e 21 apresentam as respectivas grandezas calculadas.

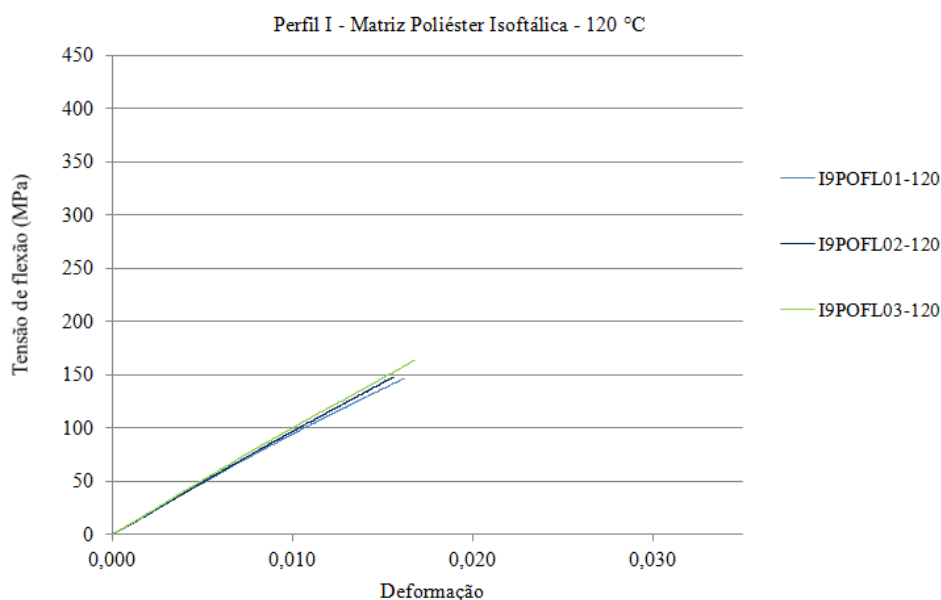


Figura 61 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 120 °C.

Tabela 18 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 120 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|-------------|-----------|------------------------|-------------|-----------|-----------------------|-------|-----------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV (%) |
| 152,39 | 7,85 | 5,15 | 10,00 | 0,26 | 2,65 | 0,016 | 0,000 | 2,984 |

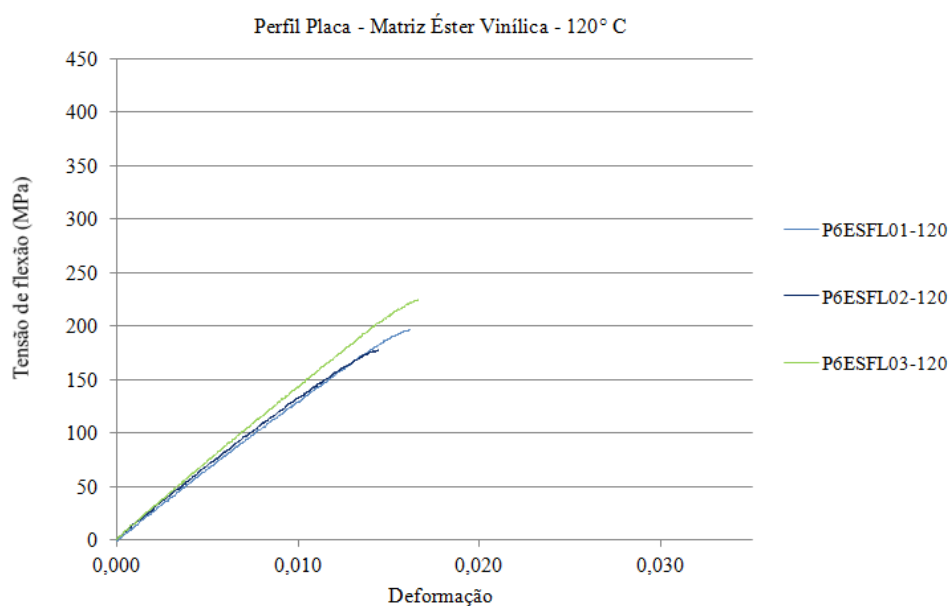


Figura 62 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 120 °C.

Tabela 19 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 120 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|----------|--------|------------------------|----------|--------|-----------------------|-------|--------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV (%) |
| 200,23 | 19,47 | 9,72 | 14,05 | 0,72 | 5,15 | 0,016 | 0,001 | 6,011 |

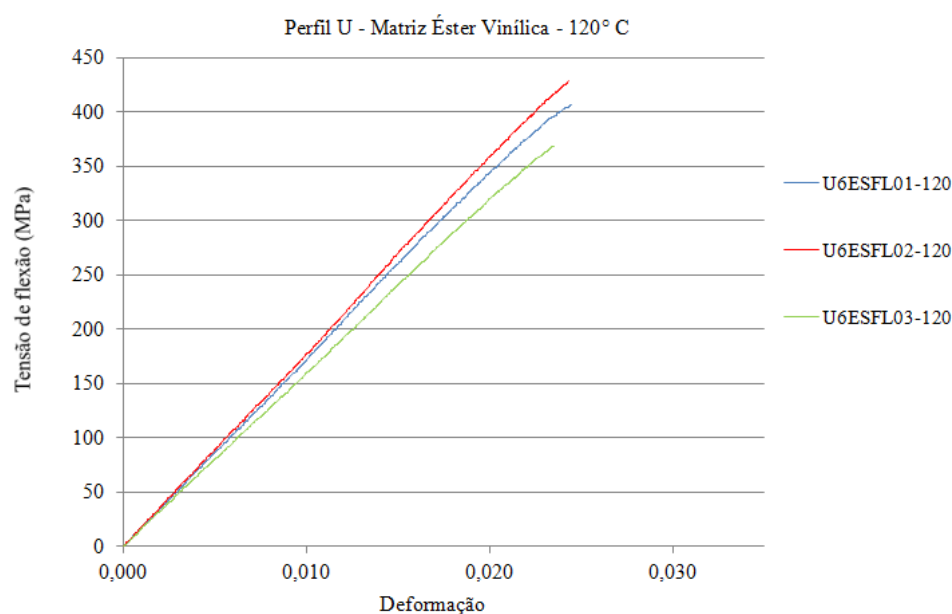


Figura 63 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 120 °C.

Tabela 20 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 120 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|-------------|-----------|------------------------|-------------|-----------|-----------------------|-------|-----------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV (%) |
| 400,80 | 24,69 | 6,16 | 17,03 | 0,44 | 2,61 | 0,024 | 0,000 | 1,692 |

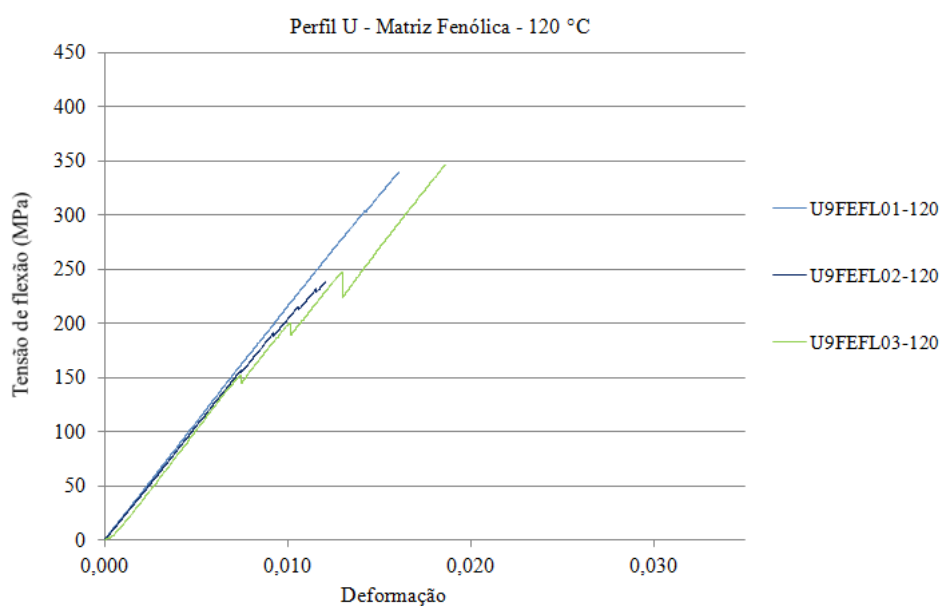


Figura 64 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 120 °C.

Tabela 21 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 120 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|-------------|-----------|------------------------|-------------|-----------|-----------------------|-------|-----------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV (%) |
| 308,22 | 49,21 | 15,97 | 21,09 | 0,39 | 1,87 | 0,016 | 0,003 | 17,232 |

Temperatura de 170 °C

As figuras 65, 66, 67 e 68 mostram os gráficos tensão-deformação dos corpos de prova ensaiados após exposição a 170°C e as tabelas 22, 23, 24 e 25 apresentam as respectivas grandezas calculadas.

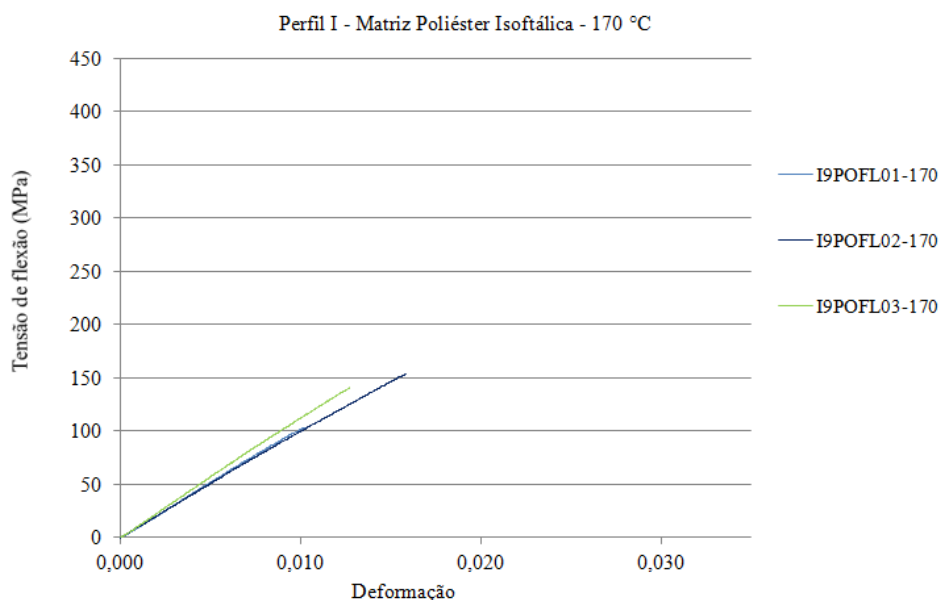


Figura 65 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 170 °C.

Tabela 22 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 170 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|-------------|-----------|------------------------|-------------|-----------|-----------------------|-------|-----------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV (%) |
| 132,48 | 21,21 | 16,01 | 10,71 | 0,48 | 4,51 | 0,013 | 0,002 | 17,660 |

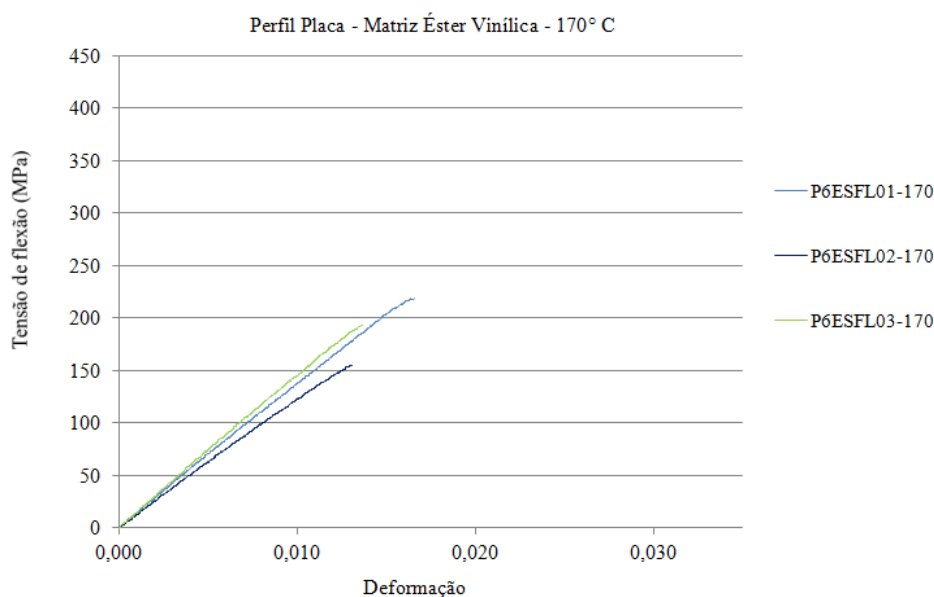


Figura 66 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 170 °C.

Tabela 23 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 170 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|----------|--------|------------------------|----------|--------|-----------------------|-------|--------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV (%) |
| 188,81 | 26,18 | 13,87 | 13,81 | 0,90 | 6,52 | 0,014 | 0,002 | 11,051 |

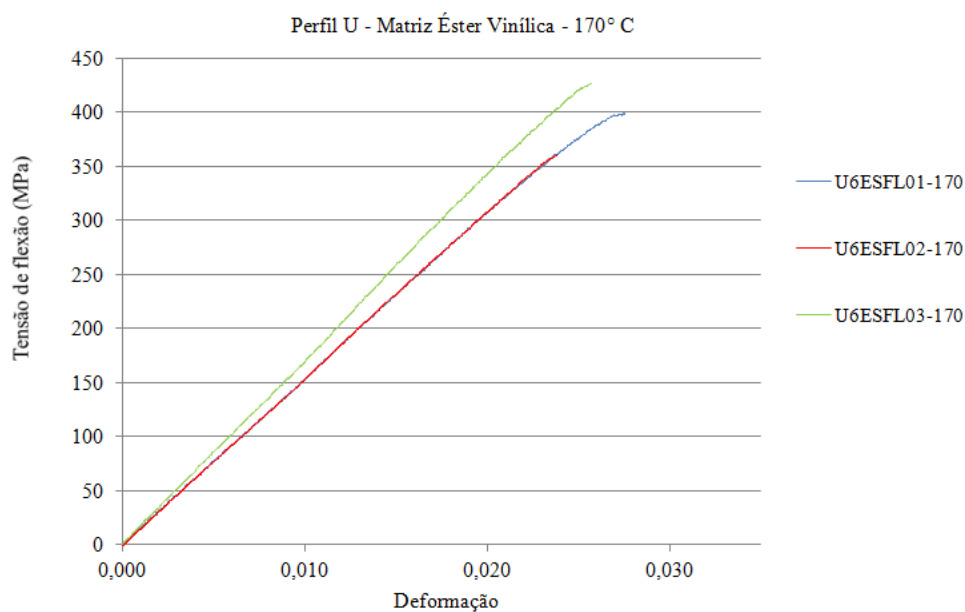


Figura 67 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 170 °C.

Tabela 24 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 170 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|----------|--------|------------------------|----------|--------|-----------------------|-------|--------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV (%) |
| 395,46 | 27,09 | 6,85 | 15,95 | 0,71 | 4,45 | 0,026 | 0,002 | 5,968 |

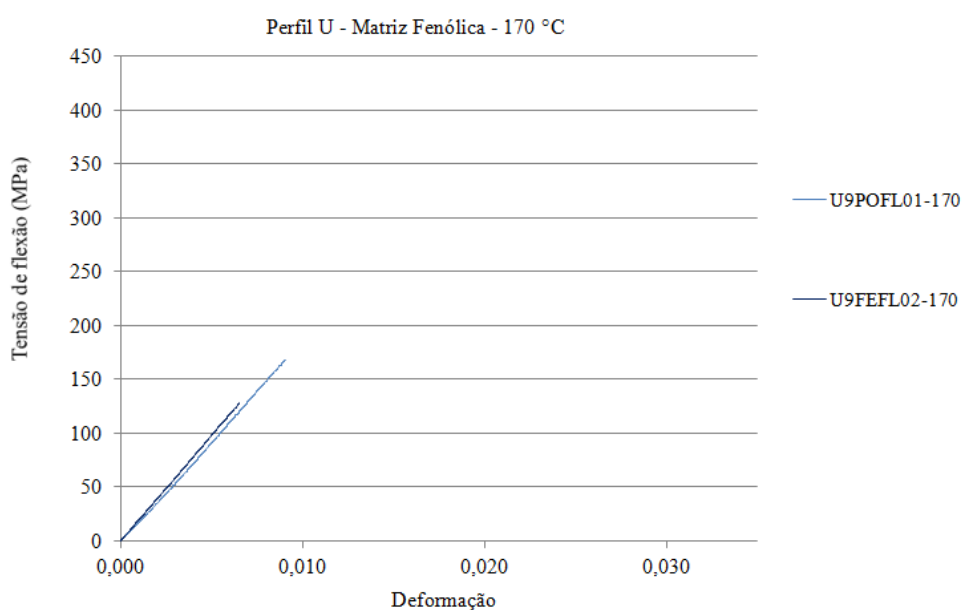


Figura 68 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 170 °C.

Tabela 25 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 170 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|----------|--------|------------------------|----------|--------|-----------------------|-------|--------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV (%) |
| 147,82 | 20,15 | 13,63 | 18,55 | 0,63 | 3,41 | 0,008 | 0,001 | 16,227 |

Temperatura de 220 °C

As figuras 69, 70, 71 e 72 mostram os gráficos tensão-deformação dos corpos de prova ensaiados após exposição a 220°C e as tabelas 26, 27, 28 e 29 apresentam as respectivas grandezas calculadas.

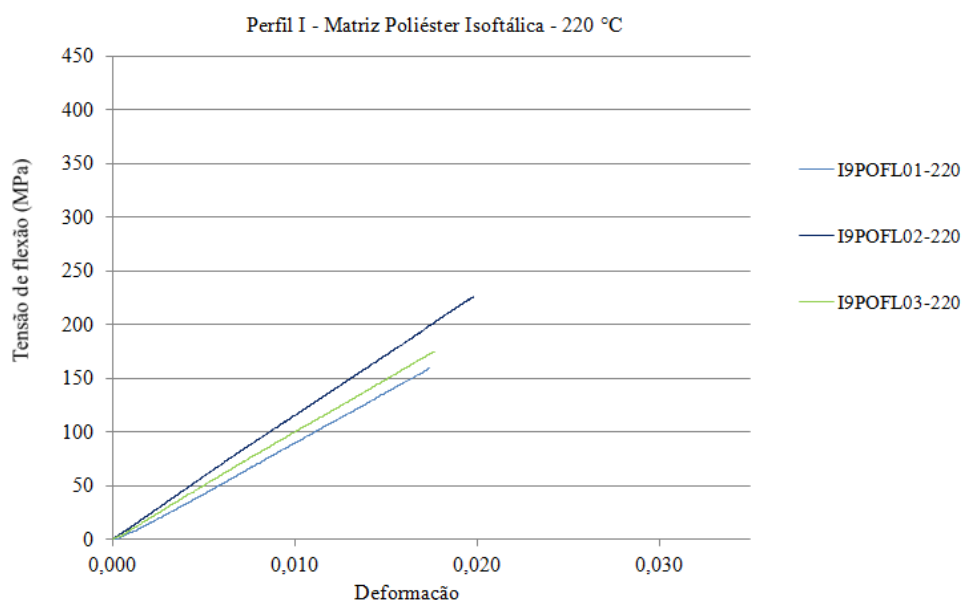


Figura 69 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 220 °C.

Tabela 26 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 220 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|-------------|-----------|------------------------|-------------|-----------|-----------------------|-------|-----------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV (%) |
| 186,51 | 28,33 | 15,19 | 10,39 | 1,29 | 12,43 | 0,018 | 0,001 | 5,878 |

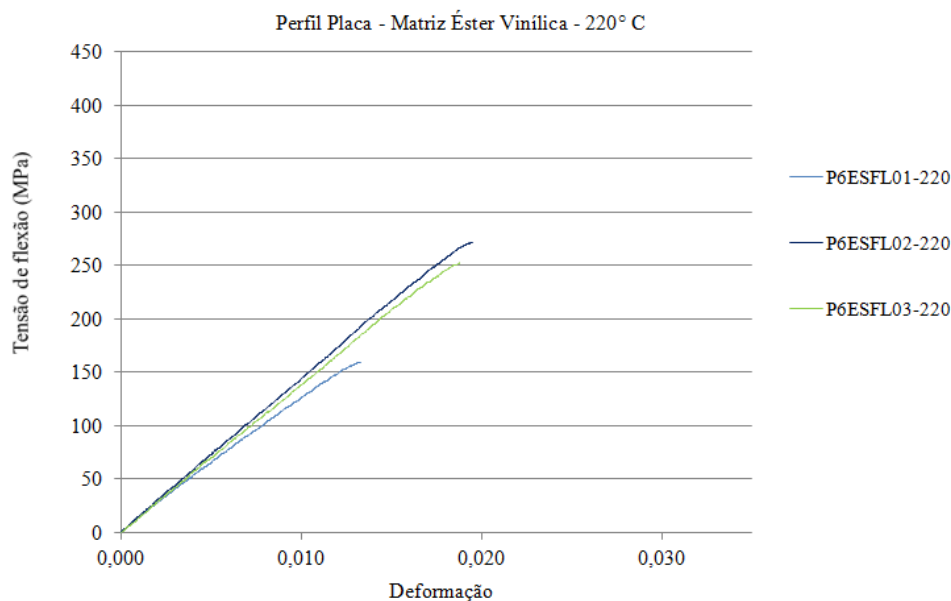


Figura 70 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 220 °C.

Tabela 27 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 220 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|-------------|-----------|------------------------|-------------|-----------|-----------------------|-------|-----------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV (%) |
| 227,60 | 49,05 | 21,55 | 13,72 | 0,48 | 3,52 | 0,017 | 0,003 | 16,267 |

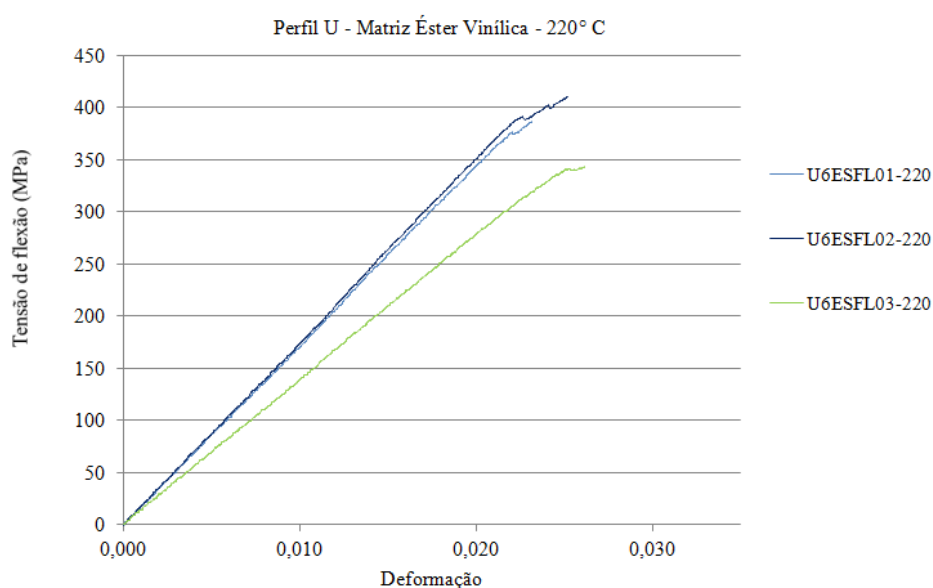


Figura 71 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 220 °C.

Tabela 28 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 220 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|----------|--------|------------------------|----------|--------|-----------------------|-------|--------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV (%) |
| 380,17 | 27,83 | 7,32 | 15,96 | 1,69 | 10,61 | 0,025 | 0,001 | 5,053 |

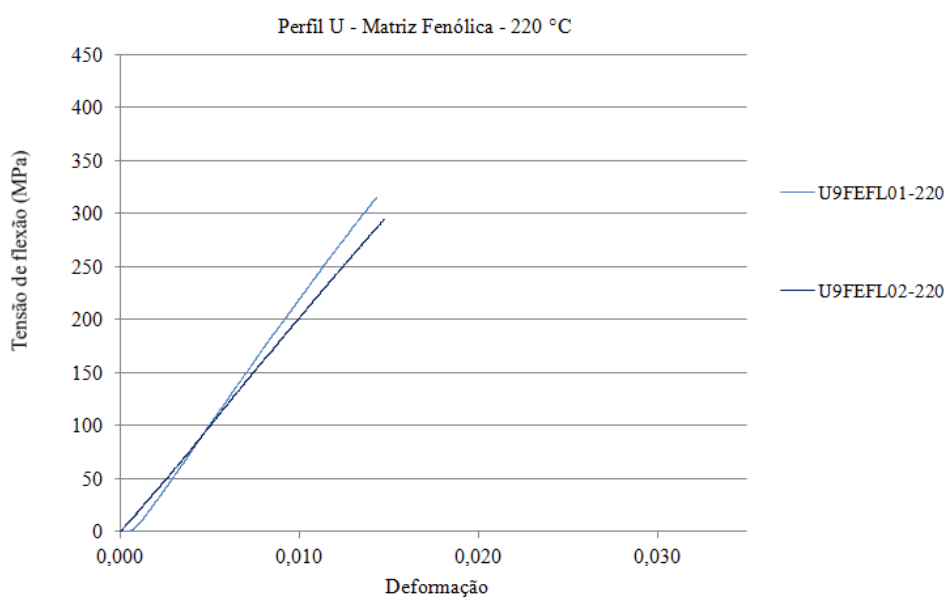


Figura 72 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 220 °C.

Tabela 29 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 220 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|----------|--------|------------------------|----------|--------|-----------------------|-------|--------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV (%) |
| 304,96 | 10,30 | 3,38 | 20,91 | 1,20 | 5,76 | 0,015 | 0,000 | 1,424 |

Temperatura de 270 °C

As figuras 73, 74, 75 e 76 mostram os gráficos tensão-deformação dos corpos de prova ensaiados após exposição a 270°C e as tabelas 30, 31, 32 e 33 apresentam as respectivas grandezas calculadas.

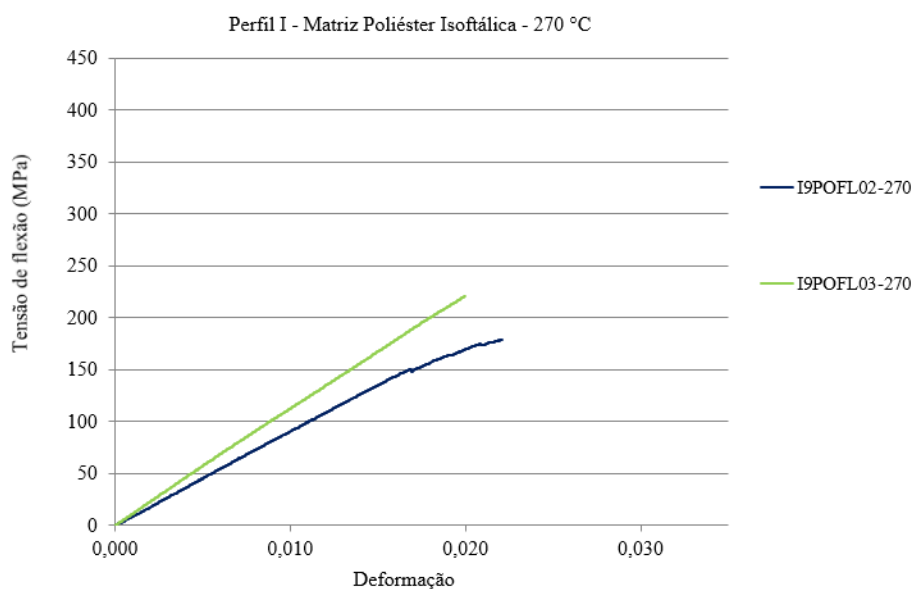


Figura 73 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 270 °C.

Tabela 30 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 270 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|-------------|-----------|------------------------|-------------|-----------|-----------------------|-------|-----------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV (%) |
| 199,87 | 20,70 | 10,36 | 10,39 | 1,14 | 10,97 | 0,021 | 0,001 | 5,040 |

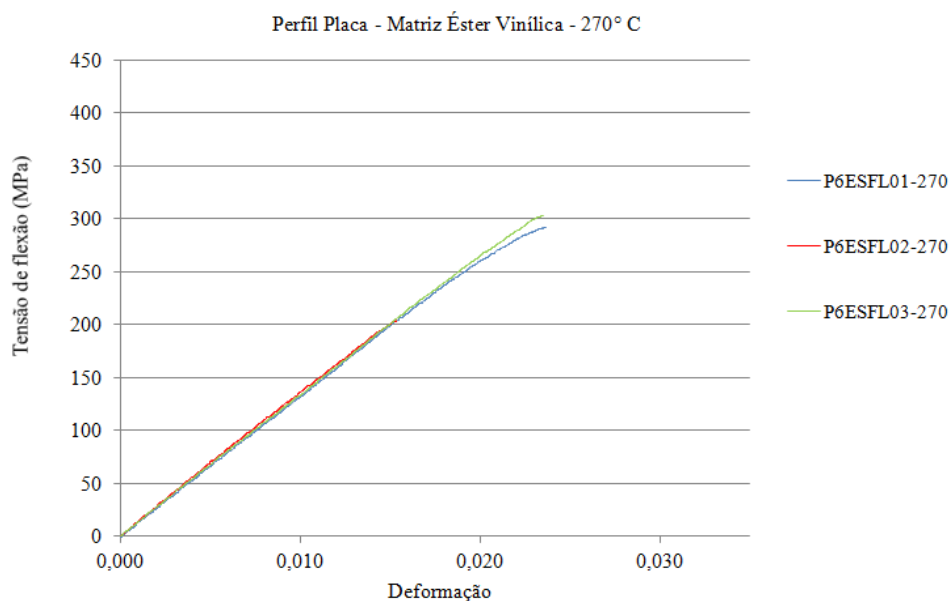


Figura 74 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 270 °C.

Tabela 31 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 270 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|----------|--------|------------------------|----------|--------|-----------------------|-------|--------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV (%) |
| 266,24 | 44,47 | 16,70 | 13,39 | 0,34 | 2,51 | 0,021 | 0,004 | 18,549 |

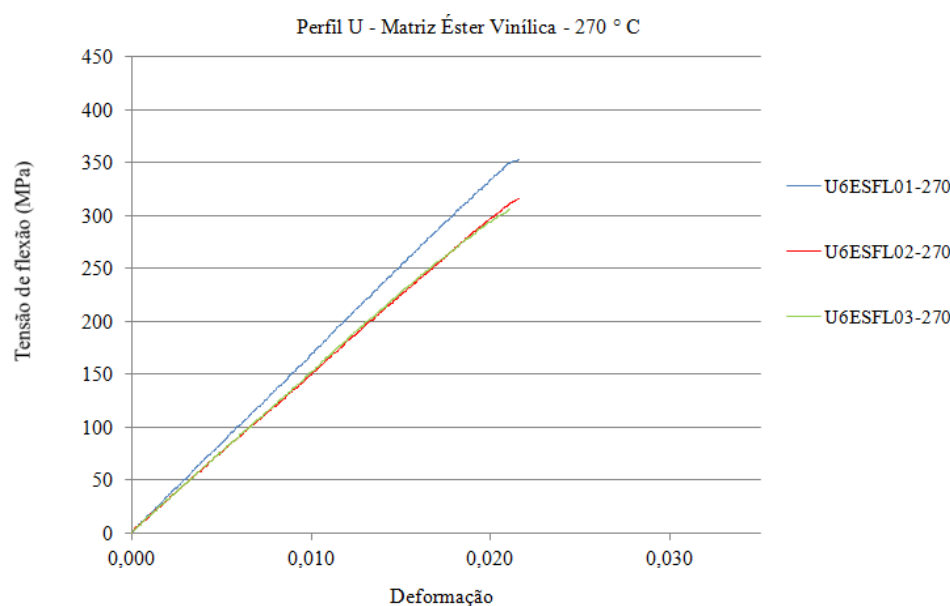


Figura 75 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 270 °C.

Tabela 32 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 270 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|----------|--------|------------------------|----------|--------|-----------------------|-------|--------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV (%) |
| 324,82 | 20,31 | 6,25 | 15,65 | 0,60 | 3,81 | 0,021 | 0,000 | 1,064 |

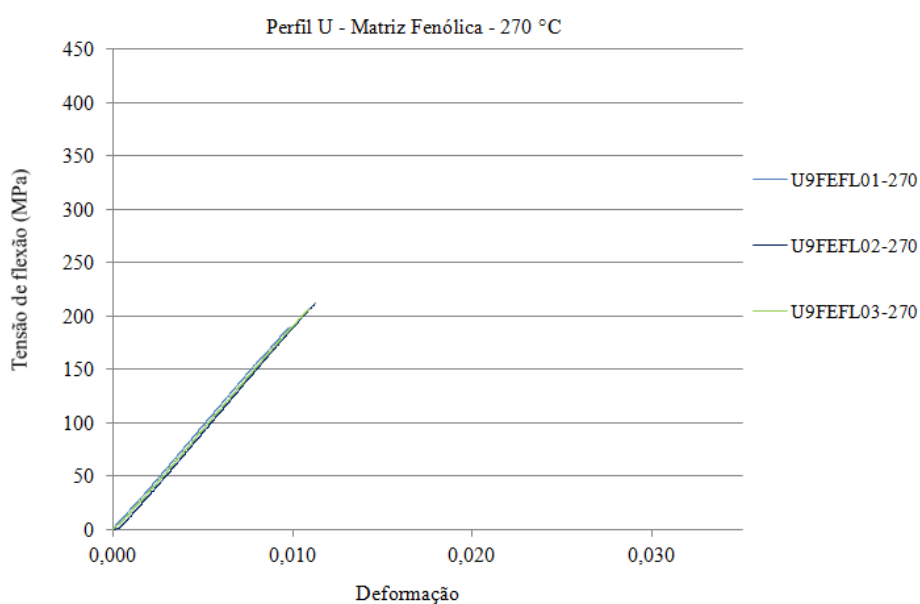


Figura 76 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 270 °C.

Tabela 33 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 270 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|----------|--------|------------------------|----------|--------|-----------------------|-------|--------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV (%) |
| 202,87 | 9,57 | 4,72 | 18,97 | 0,17 | 0,90 | 0,011 | 0,001 | 5,627 |

Temperatura de 320 °C

As figuras 77, 78, 79 e 80 mostram os gráficos tensão-deformação dos corpos de prova ensaiados após exposição a 320°C e as tabelas 34, 35, 36 e 37 apresentam as respectivas grandezas calculadas.

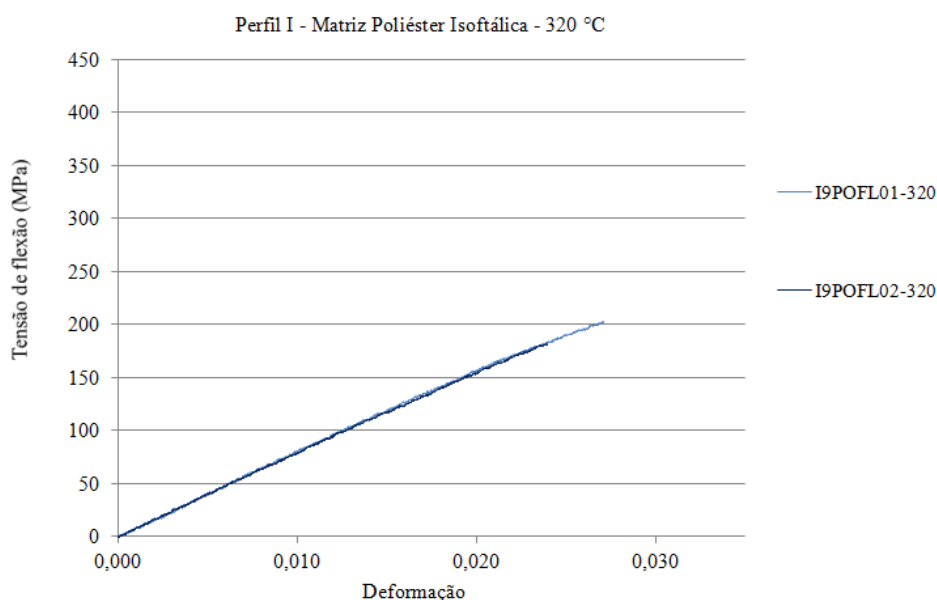


Figura 77 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 320 °C.

Tabela 34 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica submetidos a 320 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|-------|------|------------------------|-------|------|-----------------------|-------|-------|
| Média | DP | CV | Média | DP | CV | Média | DP | CV |
| (MPa) | (MPa) | % | (GPa) | (GPa) | % | | | |
| 192,58 | 10,45 | 5,43 | 8,57 | 0,07 | 0,77 | 0,022 | 0,002 | 9,162 |

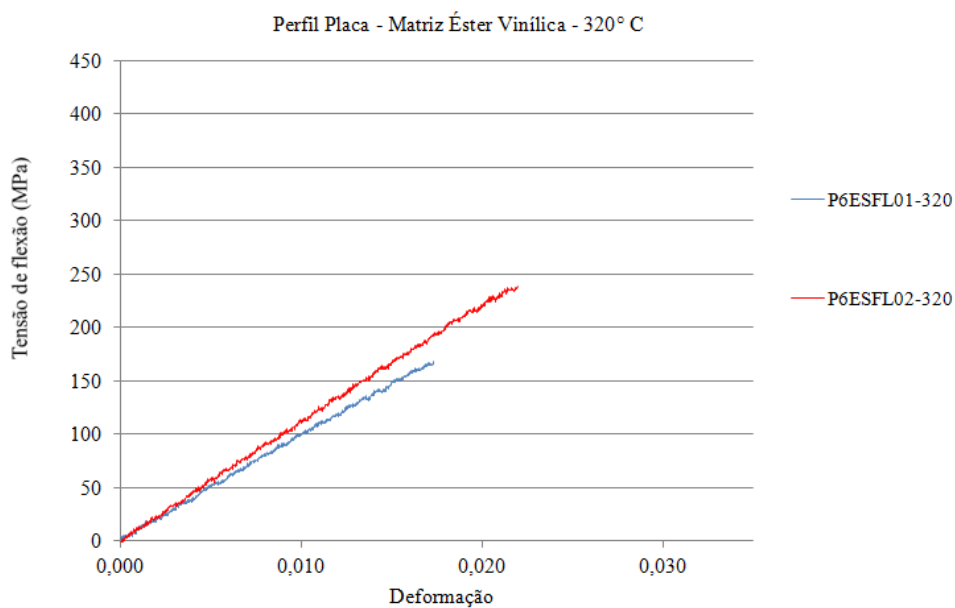


Figura 78 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 320 °C.

Tabela 35 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica submetidos a 320 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|-------|-------|------------------------|-------|------|-----------------------|-------|--------|
| Média | DP | CV | Média | DP | CV | Média | DP | CV |
| (MPa) | (MPa) | % | (GPa) | (GPa) | % | | | |
| 203,53 | 34,93 | 17,16 | 10,89 | 0,96 | 8,84 | 0,020 | 0,002 | 11,810 |

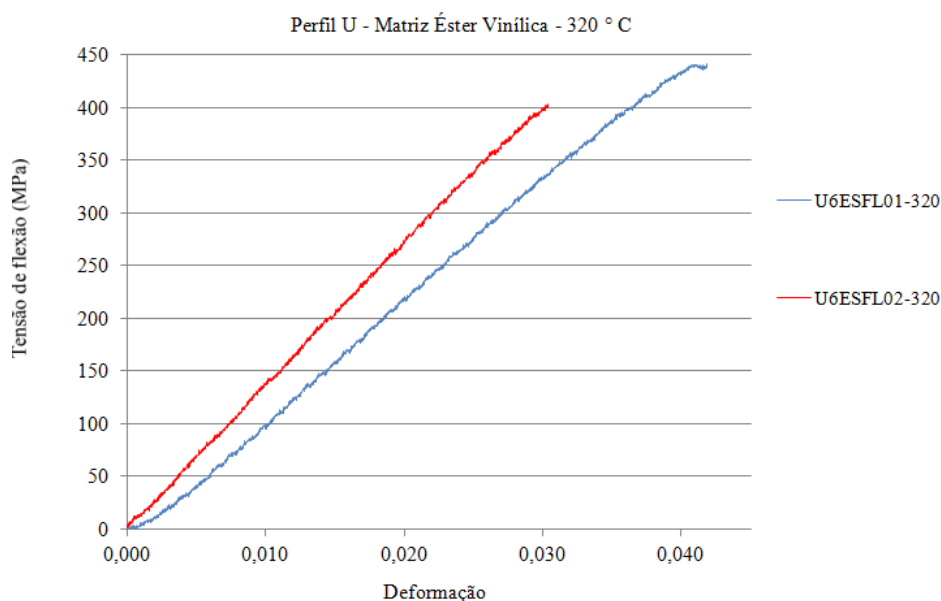


Figura 79 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 320 °C.

Tabela 36 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica submetidos a 320 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|-------------|-----------|------------------------|-------------|-----------|-----------------------|-------|--------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV |
| | | | | | | | | |
| 421,96 | 19,19 | 4,55 | 13,37 | 1,06 | 7,90 | 0,036 | 0,006 | 15,801 |

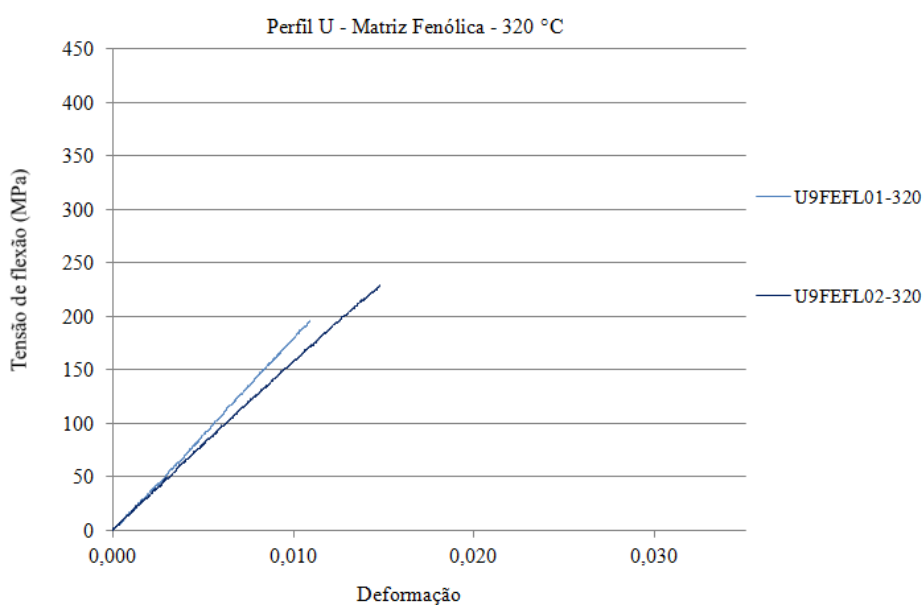


Figura 80 – Gráfico tensão-deformação dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 320 °C.

Tabela 37 – Valores médios da tensão de ruptura, módulo de elasticidade e deformação máxima dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica submetidos a 320 °C.

| Tensão de ruptura | | | Módulo de Elasticidade | | | Deformação na Ruptura | | |
|-------------------|-------------|-----------|------------------------|-------------|-----------|-----------------------|-------|--------|
| Média (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Média (GPa) | DP (GPa) | CV (%) | Média | DP | CV |
| | | | | | | | | |
| 212,26 | 16,75 | 7,89 | 17,02 | 0,61 | 3,56 | 0,013 | 0,002 | 15,297 |

Para melhor análise do comportamento dos materiais são apresentadas as tabelas 38, 39 e 40 com o resumo dos resultados obtidos. Já os gráficos das figuras 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87 e 88 apresentam os valores médios encontrados, com os respectivos desvios padrões, das tensões de ruptura e módulos de elasticidade para cada temperatura de exposição.

Tabela 38 – Quadro resumo dos valores de tensões de ruptura:

| | Tensão de Ruptura (MPa) | | | | | |
|---------------------------------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | T. Ambiente | 120 °C | 170 °C | 220 °C | 270 °C | 320 °C |
| Perfil I - Poliéster Isoftálica | 178,0 | 152,4 | 132,5 | 186,5 | 199,9 | 192,6 |
| Perfil Placa - Éster Vinílica | 232,9 | 200,2 | 188,8 | 227,6 | 266,2 | 203,5 |
| Perfil U - Éster Vinílica | 350,4 | 400,8 | 395,5 | 380,2 | 324,8 | 422,0 |
| Perfil U - Fenólica | 146,3 | 308,2 | 147,8 | 305,0 | 202,9 | 212,3 |

Tabela 39 – Quadro resumo dos valores de módulo de elasticidade:

| | Módulo de Elasticidade (GPa) | | | | | |
|---------------------------------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | T. Ambiente | 120 °C | 170 °C | 220 °C | 270 °C | 320 °C |
| Perfil I - Poliéster Isoftálica | 10,9 | 10,0 | 10,7 | 10,4 | 10,4 | 8,6 |
| Perfil Placa - Éster Vinílica | 12,0 | 14,0 | 13,8 | 13,7 | 13,4 | 10,9 |
| Perfil U - Éster Vinílica | 15,4 | 17,0 | 15,9 | 16,0 | 15,7 | 13,4 |
| Perfil U - Fenólica | 18,6 | 21,1 | 18,6 | 20,9 | 19,0 | 17,0 |

Tabela 40 – Quadro resumo dos valores de deformação na ruptura:

| | Deformação na Ruptura | | | | | |
|---------------------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | T. Ambiente | 120 °C | 170 °C | 220 °C | 270 °C | 320 °C |
| Perfil I - Poliéster Isoftálica | 0,017 | 0,016 | 0,013 | 0,018 | 0,021 | 0,022 |
| Perfil Placa - Éster Vinílica | 0,021 | 0,016 | 0,014 | 0,017 | 0,021 | 0,020 |
| Perfil U - Éster Vinílica | 0,023 | 0,024 | 0,026 | 0,025 | 0,021 | 0,036 |
| Perfil U - Fenólica | 0,008 | 0,016 | 0,008 | 0,015 | 0,011 | 0,013 |

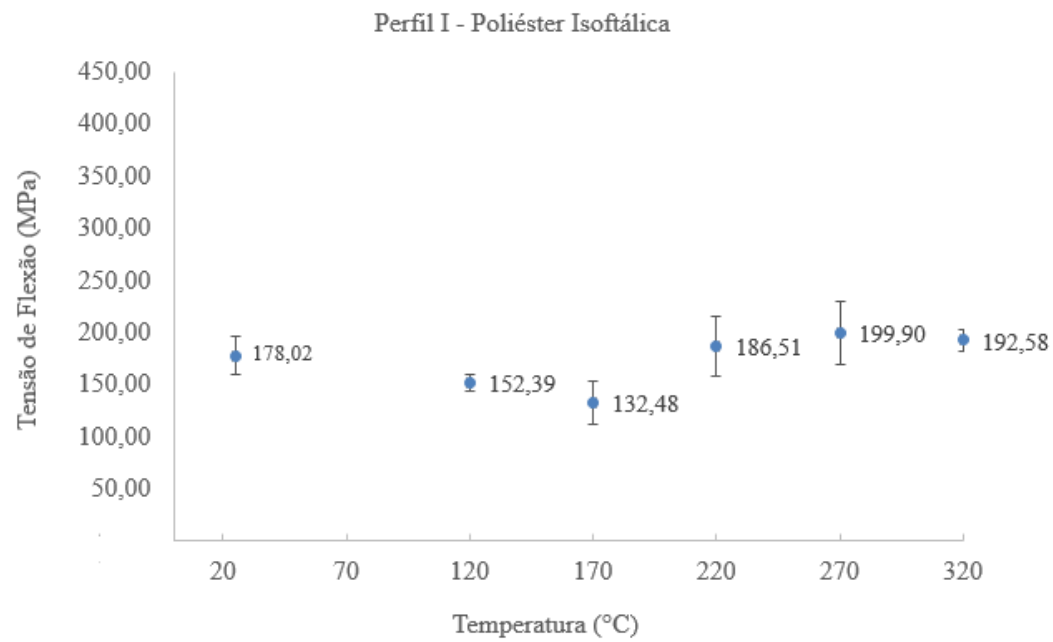


Figura 81 – Médias das tensões de ruptura dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica.

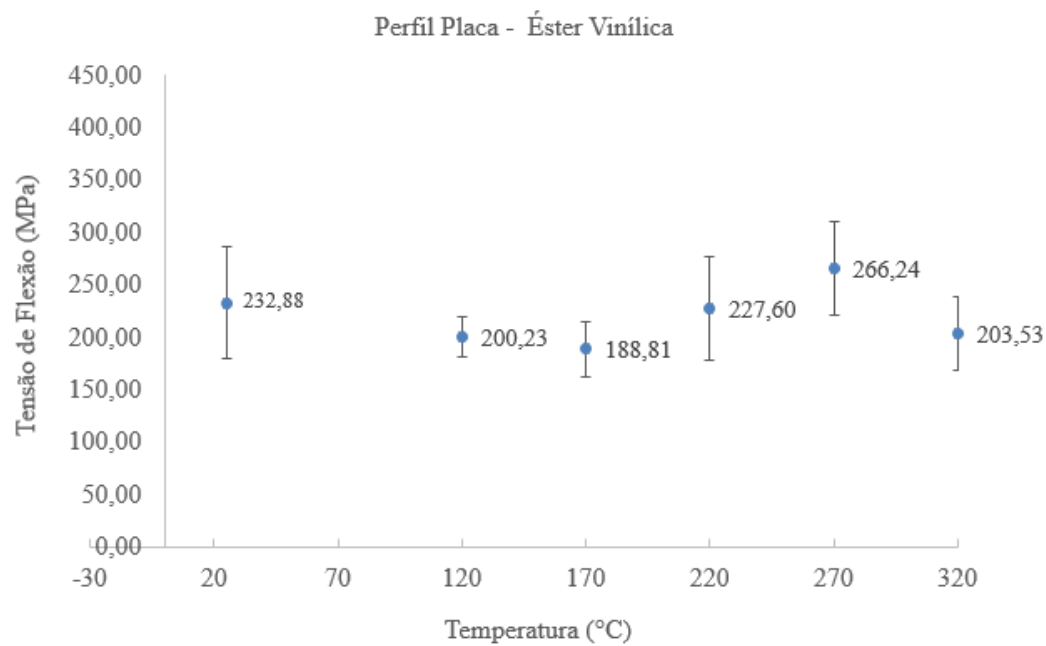


Figura 82 - Médias das tensões de ruptura dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílico.

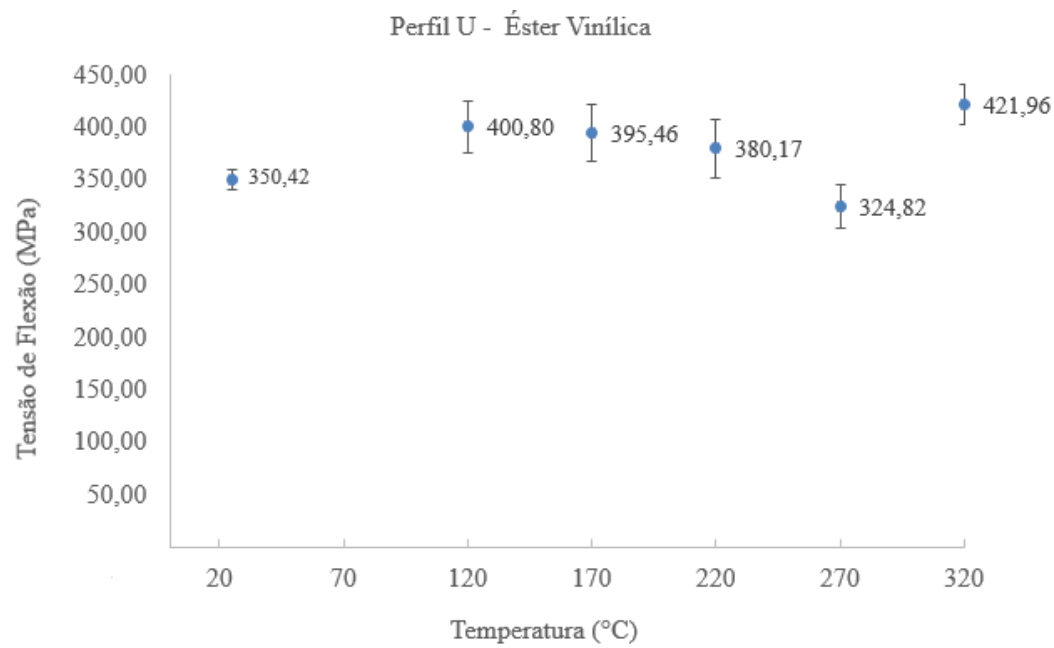


Figura 83 - Médias das tensões de ruptura dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílica.

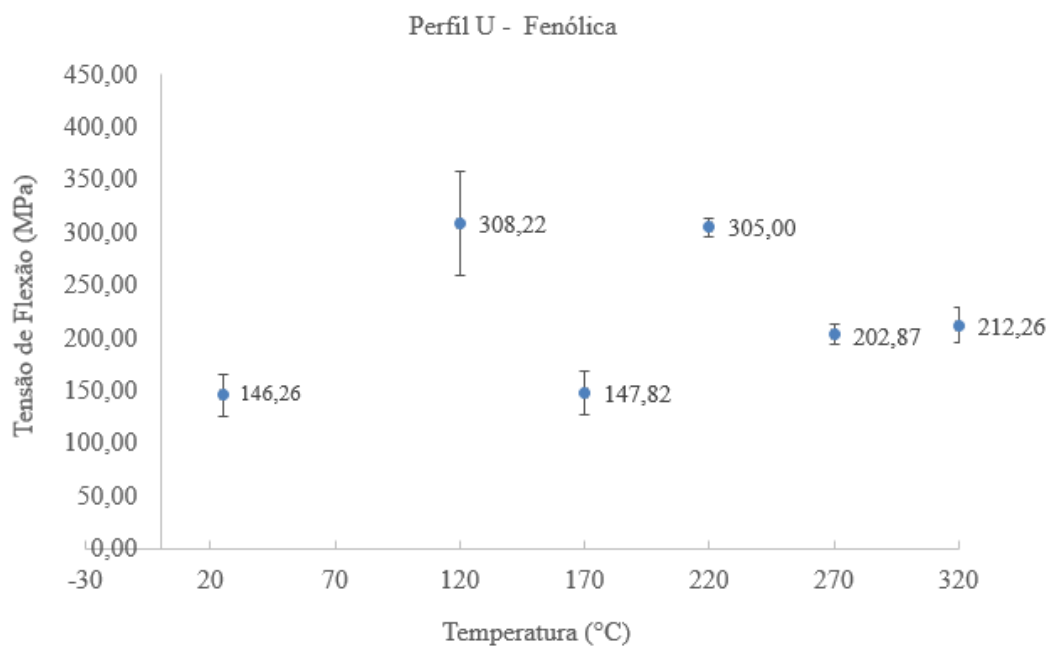


Figura 84 - Médias das tensões de ruptura dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica.

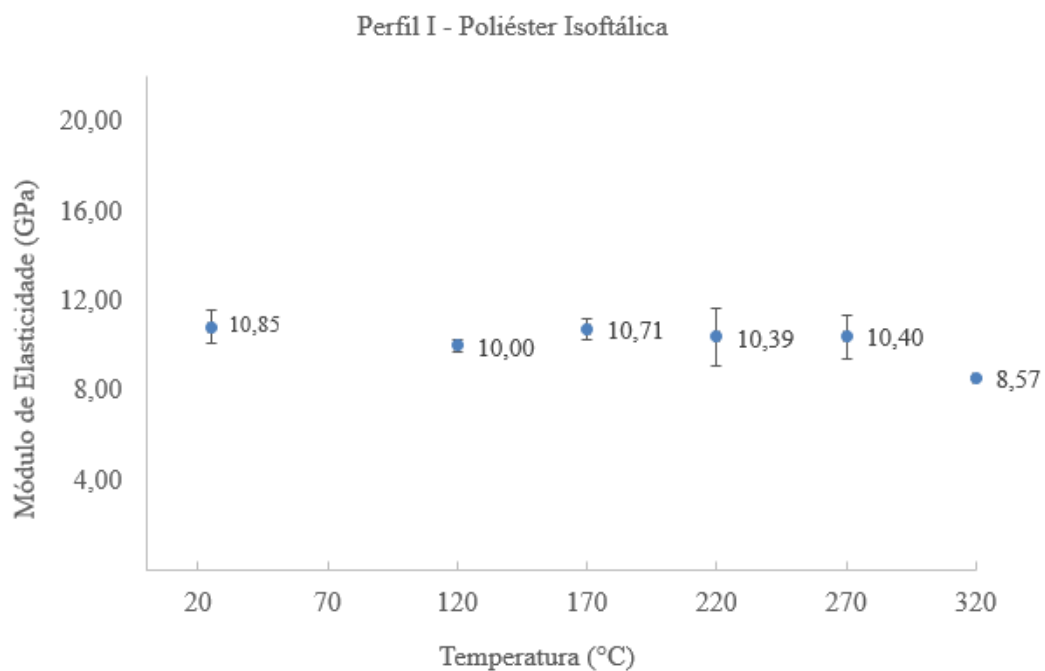


Figura 85 - Médias dos módulos de elasticidade dos corpos de prova do perfil I de matriz poliéster isoftálica.

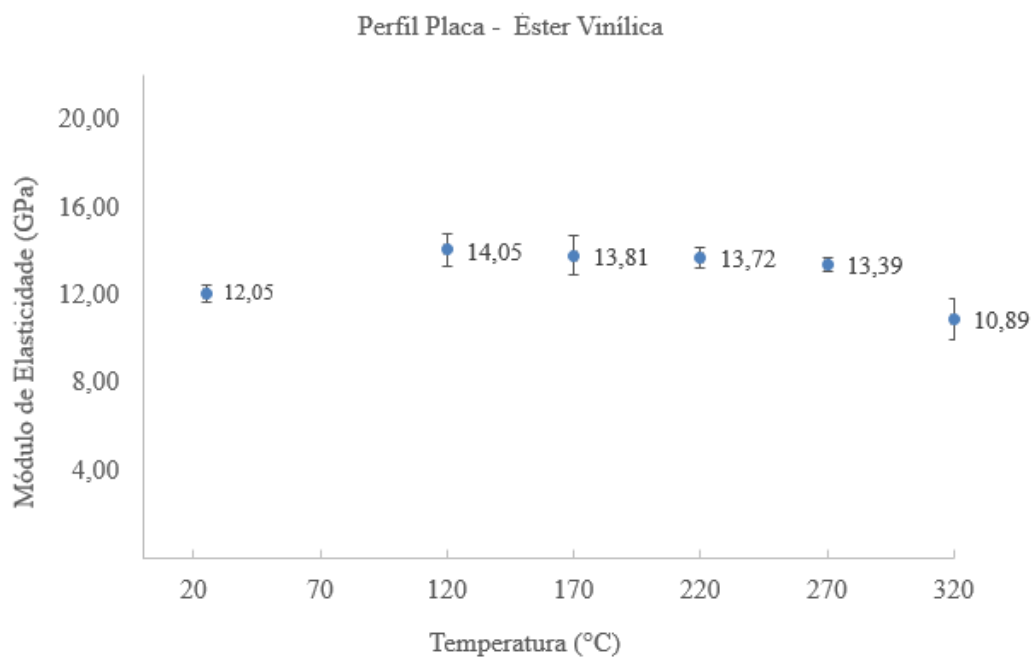


Figura 86 - Médias dos módulos de elasticidade dos corpos de prova do perfil Placa de matriz éster vinílica.

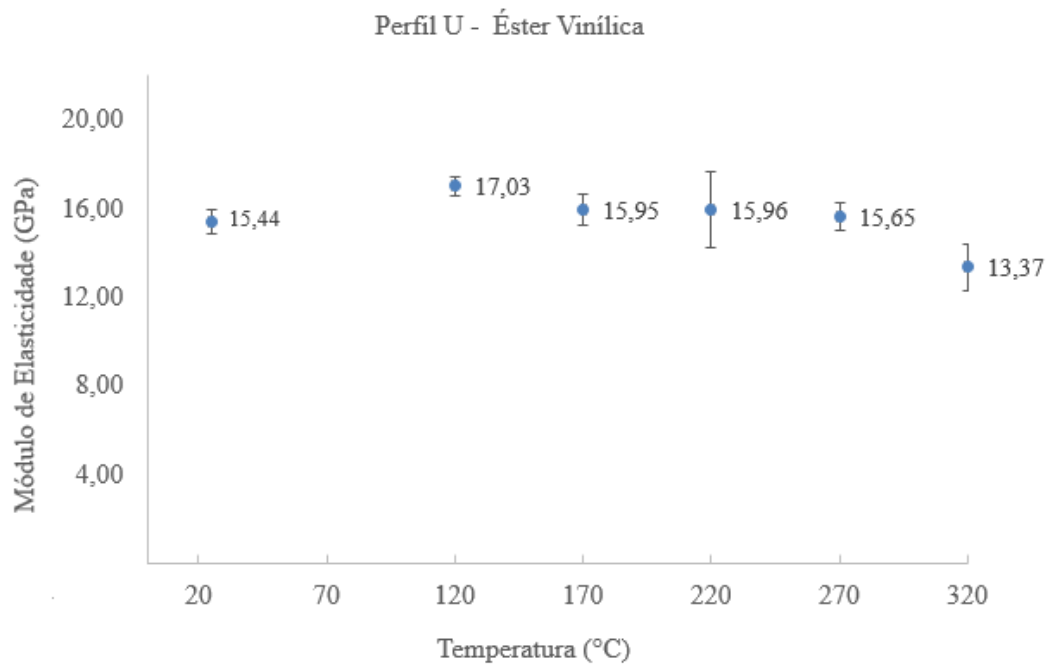


Figura 87 - Médias dos módulos de elasticidade dos corpos de prova do perfil U de matriz éster vinílico.

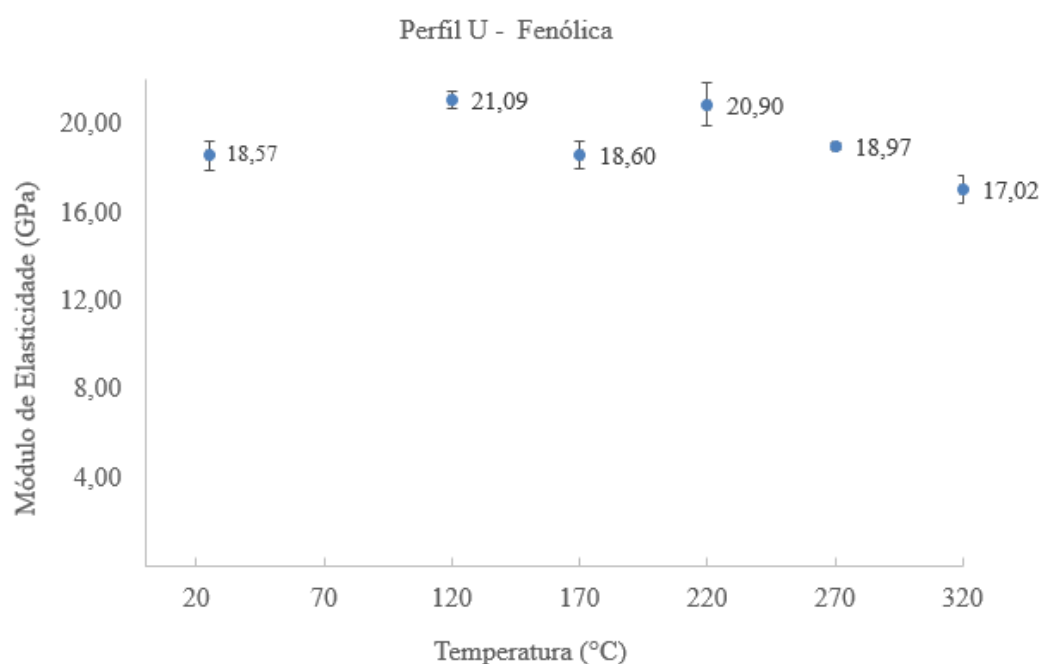


Figura 88 - Médias dos módulos de elasticidade dos corpos de prova do perfil U de matriz fenólica.

Os resultados dos ensaios indicam que os comportamentos dos materiais pouco foram influenciados pelas temperaturas ou ao tempo de exposição de 30

minutos, a que foram submetidos. Após 320 °C somente um compósito apresentou resistência menor que a inicial, os demais apresentaram resistências maiores. Os módulos de elasticidade apresentaram uma leve diminuição enquanto as deformações apresentaram um pequeno aumento. Esse comportamento está de acordo com o observado por BAI, KELLER e CORREIA (2015), que após aquecimento dos compósitos a temperaturas próximas de T_g , mas menor que T_d , e resfriamento, verificaram a recuperação de um alto percentual do valor inicial do módulo de elasticidade.

Todos os corpos de prova ensaiados apresentaram comportamento linear e ruptura por cisalhamento interlaminar. Até 170 °C de exposição, quase nenhuma mudança de cor na superfície externa dos corpos de prova foi observada, já para exposições de 220 °C, a superfície mudou para uma cor amarelada, adquirindo um tom de amarelo mais escuro quando a temperatura de exposição aumentou para 320 °C, no caso dos compósitos de resinas éster vinílica e poliéster isoftálica. No compósito de resina fenólica, naturalmente marrom, sua coloração foi escurecendo à medida que a temperatura de exposição aumentava. As mudanças podem ser observadas nas figuras 89 e 90 apresentadas abaixo. Os corpos de prova encontram-se em ordem crescente de temperatura a que foram expostos, sendo o primeiro a temperatura ambiente.

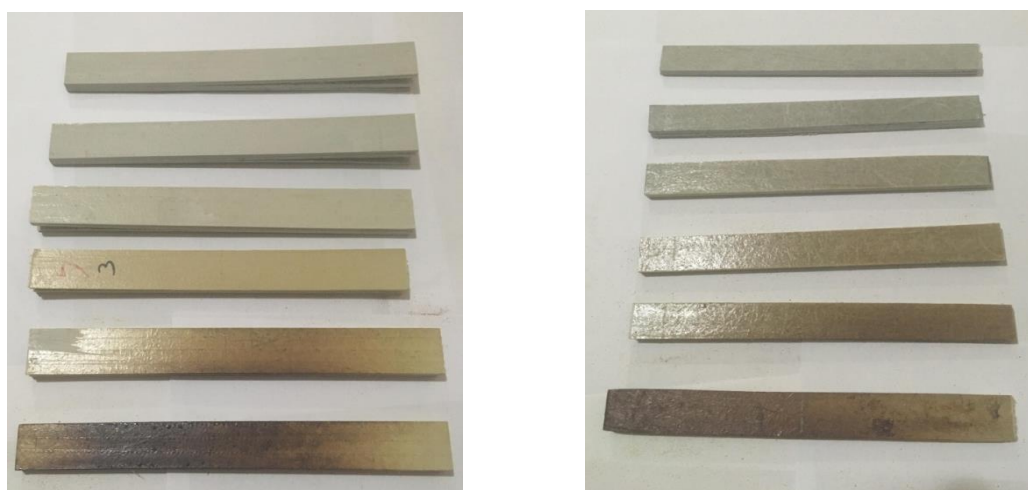


Figura 89 – Corpos de prova dos perfis I de matriz poliéster isoftálica (esquerda) e perfil Placa de matriz éster vinílica (direita).



Figura 90 – Corpos de prova do perfil U de matriz fenólica.

Para uma comparação visual são apresentadas a seguir, nas figuras 91, 92, 93 e 94, micrografias de amostras após serem submetidas a aquecimento de 220 °C.

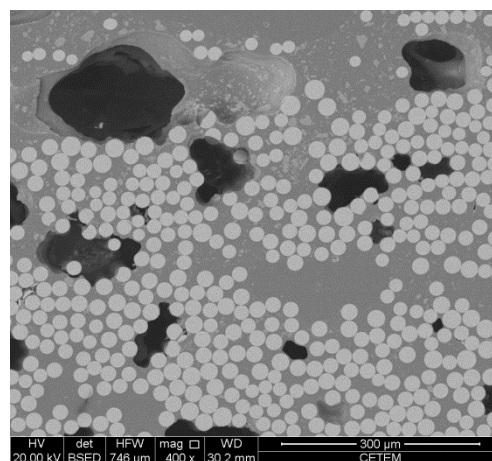
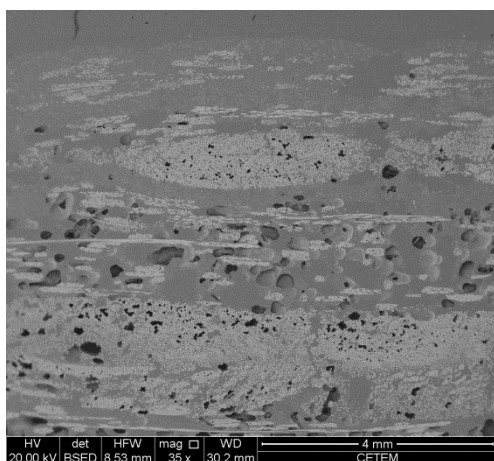


Figura 91 - Micrografias da amostra do perfil I de matriz poliéster isoftálica após aquecimento a 220 °C.

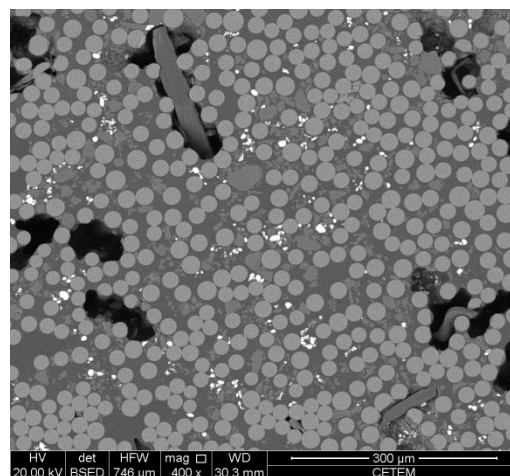
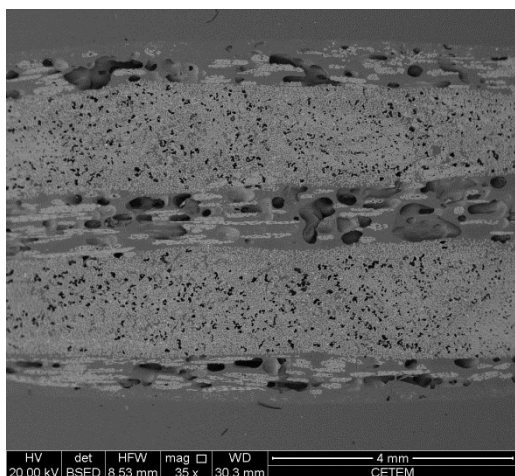


Figura 92 - Micrografias da amostra do perfil U de matriz éster vinílica após aquecimento a 220 °C.

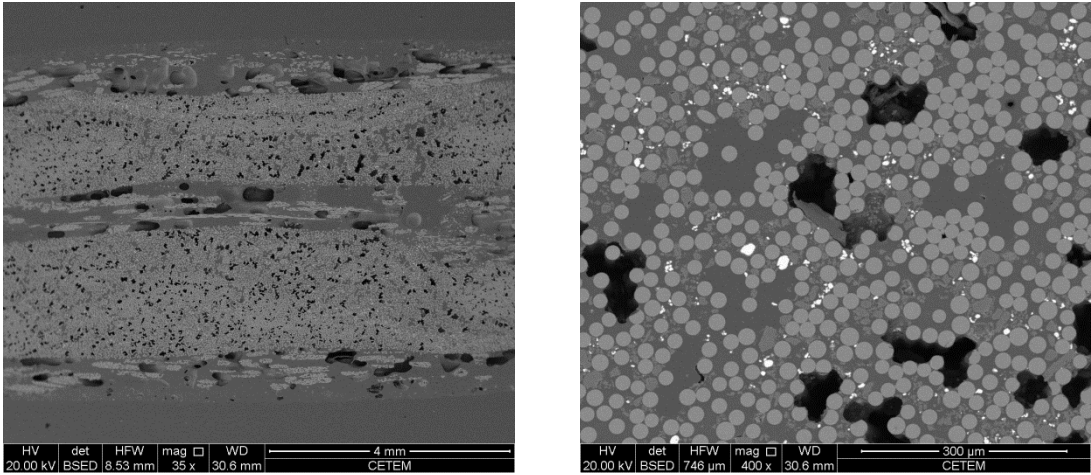


Figura 93 - Micrografias da amostra do perfil Placa de matriz éster vinílica após aquecimento a 220 °C.

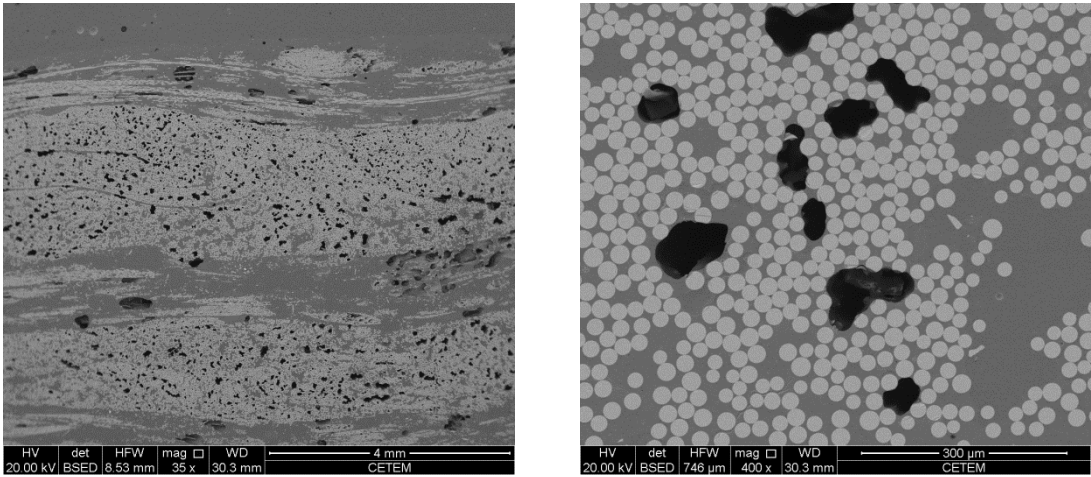


Figura 94 - Micrografias da amostra do perfil U de matriz fenólica após aquecimento a 220 °C.

5 Conclusão

5.1.Considerações Finais

A presente dissertação teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico residual à flexão de quatro diferentes tipos de compósitos poliméricos pultrudados reforçados com fibra de vidro após exposições a temperaturas de até 320 °C durante 30 minutos, um intervalo que engloba a temperatura de transição vítrea, mas exclui o processo de decomposição das resinas poliméricas constituintes das matrizes dos perfis em estudo.

A avaliação foi realizada através de uma campanha experimental seguindo recomendações normativas, na qual foram determinadas propriedades físicas e mecânicas em termos de tensão de ruptura, módulos de elasticidade, deformação antes da ruptura e modos de falha de corpos de prova submetidos a esforços de flexão na direção paralela ao reforço principal do material. Também foram realizadas análises de imagens no microscópio eletrônico de varredura (MEV) onde foi possível identificar mudanças físicas no material em função de sua exposição.

Os resultados dos ensaios mecânicos mostraram que os materiais não apresentaram mudanças significativas nas propriedades medidas em função das temperaturas e do tempo de exposição. Em geral, foi constatado um aumento na resistência após a exposição comparando com a resistência do material ensaiado como recebido. Os compósitos de resina éster vinílica apresentaram as maiores tensões de ruptura e as maiores deformações. O compósito de resina poliéster isoftálica apresentou as menores tensões de ruptura e também o menor percentual de reforço. Já o compósito de resina fenólica apresentou os maiores módulos de elasticidade e as menores deformações, caracterizando um comportamento mais frágil entre os ensaiados. Os corpos de prova, em sua grande maioria, apresentaram ruptura por cisalhamento interlaminar prematura, o que mostra a forte dependência da resistência à qualidade da interface entre os constituintes.

Apesar da mudança na cor superficial, não foram observadas formações de camadas de material carbonizado, principal fator para a redução da resistência a flexão segundo a bibliografia. Fazendo um paralelo com as análises termogravimétricas, foi observado que os materiais apresentaram ganho de resistência após a evaporação da água e de monômeros voláteis presentes no interior da matriz. O processo de polimerização é um processo altamente dependente da temperatura e ocorre “de fora para dentro” do material. O aquecimento dos corpos de prova ajudou o processo melhorando as ligações na interface, o que resultou em aumento das propriedades mecânicas, principalmente da resistência.

Pelas análises de micrografias do microscópio eletrônico de varredura foi possível verificar a presença de microvazios no interior do material oriundos do processo de polimerização da resina, antes e após a exposição à temperatura de 220 °C, sendo constatado um aumento após a exposição, mas que não chegou a afetar o comportamento mecânico à flexão.

Por fim, pelos resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se concluir que o comportamento residual a flexão longitudinal, na direção paralela ao reforço principal, de perfis pultrudados em compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro, após exposição a temperaturas de até 320 °C durante trinta minutos apresentou pequenas variações, mas não gerou significativas perdas de desempenho. Apesar da rápida degradação das propriedades mecânicas de flexão desse material quando carregado em ambientes com temperaturas elevadas, próximas a sua temperatura de transição vítrea, relatada por outros pesquisadores, o mesmo recupera essas propriedades após o resfriamento até a temperatura ambiente de 25 °C, aproximadamente.

5.2.Propostas para Trabalhos Futuros

Visando aprimorar o conhecimento acerca do comportamento mecânico sob influência de temperaturas elevadas de compósitos poliméricos pultrudados reforçados com fibras de vidro, tem-se como sugestão a investigação do comportamento à flexão na direção do reforço principal do compósito após exposição a temperaturas superiores a 320 °C, bem como investigações do comportamento do material quando submetidos a esforços de tração, compressão, cisalhamento e torção, antes após exposição a temperaturas elevadas. Outra forma de abordagem julgada importante seriam as investigações sobre a influência de temperaturas elevadas no comportamento do compósito já carregado, caracterizando uma situação mais próxima da realidade.

6 Referências bibliográficas

ALMEIDA, S. P. S. **Avaliação das Propriedades Mecânicas de Compósitos Pultrudados de Matriz Polimérica com Reforço de Fibra de Vidro**. Rio de Janeiro, 2004. 101p. Tese – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

ALSAYED, S. *et. al.* **Performance of Glass Fiber Reinforced Polymer Bars Under Elevated Temperatures**, Composites: Part B, 43. p.2265-2271, 2012.

ASTM Standard **D3171 - 11, Standard Test Method Constituent Content of Composite Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM Standard **D638 - 14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM Standard **D7264/D7264M – 07, Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA.

BAGHERPOUR, S. **Fiber Reinforced Polyester Composites**. InTech Open Access Publisher, 2012.

BAI, Y.; KELLER, T.; CORREIA, J. R. **A Review of the Behaviour of Pultruded PRFV Structural Profiles for Civil Engineering Applications**, Composite Structures 127, p.267-287, 2015.

BAI, Y.; KELLER, T.; VALLÉE, T. **Modeling of Stiffness of FRP Composites Under Elevated and High Temperatures**, Composites Science and Technology, 2008, 68, pp. 3099-3106.

BAKIS, C. E. *et. al.* **Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction – State-of-the-Art Review**. Journal of Composites for Construction, may, 2002.

BANK, L. C. **Composites for Construction Structural Design with FRP Materials**. John Wiley & Sons, New Jersey, 2006.

BANNISTER, M. **Challenges for Composites Into the Next Millennium – A Reinforcement Perspective**, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 32, p.901–910, 2001.

BRANCO, F. A. *et. al.* **First-order, Buckling and Post-Buckling Behaviour of GFRP Pultruded Beams. Part 1: Experimentaly Study**, Computers and Structures 89, p.2052–2064, 2011.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, LTC, 5ª edição, 1999.

CAMPBELL, F. C. **Structural Composite Materials**. 1st ed. ASM International, Ohio, 2010. ISBN 978-1-61503-037-8.

CARNEIRO, L. A. V.; TEIXEIRA, A. M. A. J. **Propriedades e Características dos Materiais Compósitos Poliméricos Aplicados na Engenharia de Construção**. Revista Militar de Ciência e Tecnologia, 3º quadrimestre de 2008.

CHAWLA, K. K. **Composite Materials: Science and Engineering**, 3rd ed. Springer, New York, 2012. ISBN 978-0-387-74364-6.

COELHO, R. M. L.; CALDO V. M. A. **An Optimization Procedure for the Pultrusion Process Based on a Finite Element Formulation**. Polymer Composites 23, p.329-341, 2002.

CORREIA, J. R. et al. (2013) **Mechanical Behaviour of Pultruded Glass Fibre Reinforced Polymer Composites at Elevated Temperature: Experiments and Model Assessment**, Composite Structures 98, p.303–313, 2013.

CORREIA, J. R. **The New FRP Materials for Civil Engineering Structural Applications**, 57th Meeting of the European Council of Civil Engineers, Lisboa, mai. 2013.

CORREIA, J.R. **PRFV Pultruded Profiles in Civil Engineering: Hybrid Solutions, Bonded Connections and Fire Behaviour**, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2008.

CORREIA, J.R.; FERREIRA, J.; BRANCO, F.A. **Utilização de Perfis Pultrudidos de Fibra de Vidro (PRFV) na Construção**, Construção 2004, Congresso Nacional da Construção, FEUP, Porto, dez. 2004.

d'ALMEIDA, J. R. M. *et. al.* **Analysis of the mechanical behavior and characterization of pultruded glass fiber-resin matrix composites**, Composites Science and Technology 63, 2003, p. 295-304.

DANIEL, I.M.; ISHAI, O. **Engineering Mechanics of Composite Materials**. Oxford University Press Company, 1994, ISBN: 9780195075069.

DAS, S. C.; NIZAM, E. H. **Applications of Reinforced Polymer Composites (FRP) in Civil Engineering**, Internacional Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering, vol. 03, 03, 2014.

DAVALOS, J. F. *et. al.* **Analysis and Design of Pultruded FRP Shapes Under Bending**. Composites: Part B 27B, p.295-305, 1996.

DAVALOS, J. F. *et. al.* **Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction – State of the Art Review**, Journal of Composites for Construction 6, Issue 2, may 2002.

EGERTON, R. F. **Physical Principles of Electron Microscopy: An Introduction to TEM, SEM and AEM**, Springer, New York, 2005. ISBN 0-387-25800-0.

FAIRUZ, A. M. *et. al.* **Polymer Composite Manufacturing Using a Pultrusion Process: A Review**. American Journal of Applied Science 11 (10), p.1798-1810, 2014.

FEIH, S. *et. al.* **Influence of Water Content on Failure of Phenolic Composites in Fire**. Polymer Degradation and Stability, 93, p.376-382, 2008.

FERNANDES, P. R. M. **Simulação do Comportamento Termoquímico de Perfis Pultrudidos de Fibra de Vidro (GFRP) em Situação de Incêndio**. Dissertação de Mestrado, IST – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2009.

FONSECA, S. C., **Materiais Compósitos de Matriz Polimérica Reforçada com Fibras Usados na Engenharia Civil – Características e Aplicações, Informação Científica e Técnica**, LNEC, Lisboa, 2005.

GALLO, J. B.; AGNELLI, J. A. M. **Aspectos do Comportamento de Polímeros em Condições de Incêndios**. Polímeros: Ciência e Tecnologia 8 (1), 1998.

GIBSON, A. G. *et. al.* **The Integrity of Polymer Composites During and After Fire**, Journal of Composite Materials, Vol. 38, 15, 2004.

GIBSON, R. F. **Principles of Composite Material Mechanics**, Mc Graw-Hill International Series in Mechanical Engineering, 1994. ISBN 0-07-113335-6.

HEYER, M. W. **Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials**, Mc Graw-Hill International Editions, Singapore, 1998. ISBN 0-07-115983-5.

HAPUARACHCHI, T. D.; PEJIS, T. **Aluminium Trihydroxide in Combination With Ammonium Polyphosphate as Flame Retardants for Unsaturated Polyester Resin**, Express Polymer Letters, vol. 3, n. 11, pp. 743-751, 2009.

HOLLAWAY, L. C. **A Review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their importante in-service properties**, Construction and Building Materials 21, p.2419-2445, 2010.

HOLLAWAY, L. C. **Polymer Composites in Construcion: a Brief History**, Engineering and Computational Mechanics 162 Issue EM3, p.107-118, set. 2009.

HOLLAWAY, L. C. **The Evolution of and the Way Forward for Advanced Polymer Composites in the Civil Infrastructure**, Construction and Building Materials 17, p.365–378, 2003.

HOLLAWAY, L. C.; HEAD, P. R. **Advanced Polymer Composites and Polymers In the Civil Infrastructure**. 1st ed. Oxford: Elsevier, 2001. 336p.

HULL, D.; CLYNE, T. W. **An Introduction to Composite Materials**, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1996. ISBN 0-521- 38190-8.

JONES, R. M. **Mechanics of Composite Materials**, 2nd ed., Taylor & Francis, Philadelphia, 1999. ISBN:1-56032-712-X.

KARBHARI, V. M. **Building Materials for the Renewal of Civil Infrastructure**, RP Asia 2004 Conference, Bangkok, sept. 2004.

KARBHARI, V. M. **Durability of Composites For Civil Structural Applications**, Woodhead Publishing, Cambridge, 2007. ISBN 978-1-84569-356-5.

KARBHARI, V. M. *et. al.* **Durability Gap Analysis for Fiber-reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure**. Journal of Composites for Construction 7(3), p.238-247, 2003.

KARBHARI, V. M.; ZHAO, L. **Use of Composites for 21st Century Civil Infrastructure**. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 185, p.433-454, 2000.

KAW, A. K. **Mechanics of Composite Materials**, 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, 2006. ISBN 0-8493-1343-0.

KIM, S. J.; SMITH, S. T.; KEMP, M. **Characteristic Values of Pultruded Fibre Composite Sections For Structural Design**, 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials vol. 1, p. 527-532, 2014.

KODUR, V.; BAINGO, D. **Fire Resistance of FRP Reinforced Concrete Slabs**, Institute for Research in Construction, Internal Report No. 758, 1998.

LAM, Y. C.; LI J.; JOSHI C. S. **Simultaneous Optimization of Die-Heating and Pull-Speed in Pultrusion of Thermosetting Composites**. Polymer Composites 24 (1), p.199-209, 2003.

MANGIRE, R.; SRINIVASAN, M. N. **Mechanical Behavior of Glass Fiber Reinforced Polymer Pultruded Composite Gratings**, Modern Mechanical Engineering 2013, 3, pp. 142-146.

MARANAN, G. B. *et. al.* **Flexural Behaviour of Glass Fibre Reinforced Polymer (PRFV) Bars Subjected to Elevated Temperatures**. 23rd

Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, vol. I, Byron Bay, dec 2014, pp. 187-192. ISBN: 9780994152008.

MOURITZ, A. P.; MATHYS, Z. **Post-fire Properties of Marine Polymer Composites**, Composite Structures 47, p.643–653, 1999.

NAGARAJ V.; GANGARAO, H. V. S. **Static Behavior of Pultruded PRFV Beams**, Journal of Composites for Construction, ASCE, vol. 1, n. 3, p.120-129, 1997.

NETO, A. B. S. S.; LA ROVERE, H. L. **Flexural Stiffness Characterization of Fiber Reinforced Plastic (FRP) Pultruded Beams**, Composite Structures, 2007, 81, pp. 274-282.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais Ciência e Tecnologia**, 1ª ed. Editora Edgard Blücher, São Paulo, 2006. ISBN: 8521203977.

OPRISAN, G. *et. al.* **Structural Response of Pultruded GRFP Profiles Subjected to Bending**. Bulletin of the Polytechnic Institute of Iasi, Volume 62 (66), number 3, 2016.

POTYRALA, P. B. **Use of Fiber Reinforced Polymer Composites in Bridge Construction. State of Art in Hybrid and All-Composite Structures**. Barcelona, 2011. 93p. Projecte O Tesina D'Especialitat – Universitat Politècnica de Catalunya.

REIS, J. M. L. *et al.* **Tensile Behavior of Glass/Epoxy Laminates at Varying Strain Rates and Temperatures**, Composites: Part B 43, 2012, pp. 2041-2046.

RICCIARDI, M. R. R. *et. al.* **Thermal Decomposition and Fire Behavior of Glass Fiber Reinforced Polyester Resin Composites Containing**

Phosphate-based Fire-retardant Additives, Journal of Fire Sciences 30 (4), p.318-330, 2012.

ROBERT, M.; BENMOKRANE, B. **Behavior of PRFV reinforcing bars subjected to extreme temperatures**, Journal of Composites for Construction, Vol. 14, No. 4, p. 353-360, 2010.

SANTOS, G. M.; GOMES, C. A.; ARAKAKI, F. K. **Análise da Propriedade Mecânica de Tração em Perfis Estruturais Pultrudados em Fibra de Vidro e Resina Termofixa**. In: XIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação, 2009, Universidade do Vale do Paraíba.

SANTOS, L. S. *et. al.* **CFD-Optimization Algorithm to Optimize the Energy Transport in Pultruded Polymer Composites**. Brazil Journal of Chemical Engineering 29 (3), p.559-566, 2012.

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

SIMS, G. D.; JOHNSON A. F.; HILL R. D. **Mechanical and Structural Properties of a Pultruded Section**, Composite Structures, Volume 8, Issue 3, p.173-187, 1987.

SKINNER, J. M. **A Critical Analysys of The Aberfeldy Footbridge**, Scoltland, Proceedings of Bridge Engineering 2 Conference 2009, Bath, 2009.

SOARES, C.M; MARTINS, J.G. **Reforço de Estruturas de Betão Armado Com CFR**, Série Reabilitação, 1ª ed., 2006.

THOMASON, J. L. **The Interface Region In Glas Fibre-reinforced EpoxyResin Composites: 1. Sample Preparation, Void Content and Interfacial Strength**, Composites 26, 1995, pp. 467-475.

THOMASON, J. L.; VLUG, M. A. **Influence of Fibre Length and Concentration on The Properties of Glass Fibre-reinforced Polypropylene: 1. Tensile and Flexural**. Composites: Part A, 27A, p.477-484, 1996.

TOLF, G.; CLARIN, P. **Comparison Between Flexural and Tensile Modulus of Fibre Composite**. Fibre Science and Technology 21, p.319-326, 1984.

VAN DEN EINDE, L.; ZHAO, L.; SEIBLE, F. **Use of FRP composites in civil structural applications**, Construction and Building Materials 17, p.389–403, 2003.

VAN ERP, G. **Mechanics and Technology of Fibre Composites**. University of Southern Queensland, Toowoomba, 2008.

WALLENBERGER, F. T. et. al. **Glass Fibers**. ASM Handbook, vol.21: Composites, 2001.

WANG, H W. et. al. **Analysis of Effect of Fiber Orientation on Young's Modulus for Unidirectional Fiber Reinforced Composite**. Composites: Part B 56, p.733-739, 2014.

WEBB, P.A.; ORR, C. **Analytical Methods in Fine Particle Technology**, Micromeritics Instrument Corporation, USA, 1997.

WIJAYAWARDANE, I. S. K. et. al. **Flexural Behaviour of Glass Fibre-reinforced Polymer and Ultra-high-strength Fibre-reinforced Concrete Composite Beams Subjected to Elevated Temperature**. Advances in Structural Engineering, 2016.