

Tese apresentada à Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em ciências no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, na Área de Física e Química dos Materiais Aeroespaciais.

José Antônio Peixoto Cunha

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIPOS DE
CONDICIONAMENTOS AMBIENTAIS NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DE COMPOSITOS DE FIBRAS DE CARBONO/EPÓXI.**

Tese aprovada em sua versão final pelos abaixo assinados:


Profª Mirabel Cerqueira Rezende
Orientadora

Prof. Celso Massaki Hirata
Pró-Reitor de Pós-Graduação e Pesquisa

Campo Montenegro
São José dos Campos, SP - Brasil
2010

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Divisão de Informação e Documentação

Cunha, José Antônio Peixoto

Estudo da influência de diferentes tipos de condicionamentos ambientais nas propriedades mecânicas de compósitos de fibras de carbono/epóxi / José Antônio Peixoto Cunha.
São José dos Campos, 2010.

Dissertação de doutorado - Engenharia Aeronáutica e Mecânica - Física e Química dos Materiais Aeroespaciais - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2010. Orientadora: Prof^a Dra. Mirabel Cerqueira Rezende.

1. Compósitos carbono/epóxi. 2. Condicionamento ambiental. 3. Comportamento mecânico. I. Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Aeronáutica e Mecânica. II. Estudo da influência de diferentes tipos de condicionamentos ambientais nas propriedades mecânicas de compósitos de fibras de carbono/epóxi.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Cunha, José Antônio Peixoto. **Estudo da influência de diferentes tipos de condicionamentos ambientais nas propriedades mecânicas de compósitos de fibras de carbono/epóxi**. 2010. 239f. Tese de doutorado em Física e Química dos Materiais Aeroespaciais – Instituto Tecnológico de aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: José Antônio Peixoto Cunha.

TÍTULO DO TRABALHO: Estudo da influência de diferentes tipos de condicionamentos ambientais nas propriedades mecânicas de compósitos de fibras de carbono/epóxi.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Tese / 2010

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias desta tese e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

José Antônio Peixoto Cunha

Av. Independência, 2373 - Independência - Taubaté , São Paulo. CEP: 12032-000

Estudo da influência de diferentes tipos de condicionamentos ambientais nas propriedades mecânicas de compósitos de fibras de carbono/epóxi.

José Antônio Peixoto Cunha

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos de Moura Neto	Presidente	ITA/CTA
Prof ^a . Dra. Mirabel Cerqueira Rezende	Orientadora	IAE/AMR
Prof. Dr. José Ricardo Tarpani		EESC-USP
Prof ^a . Dra. Michelle Leali Costa		IAE-UNESP
Prof. Dr. Luis Cláudio Pardini		IAE/AMR

ITA

*Dedico este trabalho à minha esposa Rosana,
companheira e amiga. E às minhas filhas
Carolina e Isabela, razões do meu viver.*

Agradecimentos

À minha orientadora, Dra. Mirabel Cerqueira Rezende (CTA/IAE/AMR) pela amizade, paciência, orientação, dedicação e conhecimento, fatores esses que impõem segurança e personalidade na formação de seus orientados.

Aos funcionários da Divisão de Materiais (CTA/AMR), João, Andreza, Duque, Jefferson, Fábio, Luciana, Bete, Duarte, Dalci, Rodolfo, Fábio, que direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

Ao IAE e ao ITA, que permitiram a realização do meu aperfeiçoamento profissional, em particular à Divisão de Materiais, que proporcionou toda a infra-estrutura e facilidades para a realização da pesquisa e dos ensaios necessários para a formação do conhecimento.

À EMBRAER e à Hexcel Compósitos, pelo fornecimento e pela fabricação dos materiais para a realização deste estudo.

À minha esposa Rosana Franco Cunha, minhas filhas Carolina Franco Cunha e Isabela Franco Cunha, pela dedicação, carinho, incentivo e compreensão durante toda esta jornada.

Por fim, a todos àqueles que, de forma direta ou indireta, participaram para tornar possível esta tese.

Resumo

O aumento da aplicação de compósitos poliméricos estruturais, principalmente nos setores aeronáutico e naval, resulta no inevitável contato desses materiais com líquidos e vapores, que podem afetar o desempenho mecânico dos componentes produzidos. Dadas estas observações, o presente trabalho objetiva contribuir no entendimento dos efeitos de diferentes condicionamentos ambientais no comportamento mecânico de compósitos de fibra de carbono/resina epóxi 8552. São avaliados cinco diferentes tipos de condicionamentos: ambiente, higrotérmico (80°C e 90% de umidade relativa), névoa salina, ozônio e imersão em água. Foram realizados ensaios de resistências à compressão, cisalhamento interlaminar e de tração longitudinal e transversal foram realizados às temperaturas ambiente (22°C) e elevada (82°C). Os resultados obtidos mostram que o comportamento mecânico dos compósitos estudados é principalmente afetado pela exposição em ambientes úmidos, como condicionamentos em câmara higrotérmica e por imersão em água. Condicionamentos em ambiente de névoa salina e em ozônio mostram-se também deletérios ao comportamento mecânico do material, mas em menor intensidade, pelo fato da difusão de água no compósito não ser favorecida em ambiente salino e do ataque do ozônio ocorrer preferencialmente na superfície externa do material. Análises fractográficas das superfícies de fratura mostram que o decréscimo das referidas propriedades mecânicas é acompanhado da degradação da matriz polimérica, com a presença de delaminação e enfraquecimento da interface.

Palavras-chave: Compósitos carbono/epóxi, Condicionamento ambiental, Comportamento mecânico.

Abstract

The wide range of structural composite material applications, mainly in aeronautical and naval fields, can result in an almost inevitable contact with liquids and vapors, which can affect the mechanical performance of processed components. In this context, the present work aims to contribute in the understanding of different environmental conditioning effects on the mechanical behavior of carbon fiber/epoxy 8552 composites. Five different conditionings were performed: room temperature, hygrothermal (80°C and 90% relative humidity), salt spray, ozone and water immersion. Compression, interlaminar shear, longitudinal and transversal tension strength tests were carried out in two different temperatures: room (22°C) and high (82°C) temperatures. The obtained results show that the mechanical behavior of the studied composites is mainly affected by humidity exposition, as found in hygrothermal chamber and water immersion. Conditionings in both salt spray and ozone chambers show also deleterious effects on the mechanical behavior of material, but in minor intensity. This behavior is attribute to the fact that the water diffusion in the composites is not favored in salt environment and also due to the ozone attack to occur preferentially on the specimen external surface. Fractographic analyses of the fracture surfaces show that the mechanical properties decreasing are associated with the polymer matrix degradation, delamination presence and interface weakness.

Keywords: Epoxy/carbon composites, Environmental conditioning, Mechanical behavior

Lista de figuras

Figura 1 -	Etapas de execução do presente trabalho.....	32
Figura 2 -	Conceito da união de dois materiais distintos.....	33
Figura 3 -	Tipos de compósitos baseados na forma do reforço.....	35
Figura 4 -	Modos de falhas típicos em compósitos: (a) flambagem, (b) quebra da fibra, (c) fissuração da matriz e (d) delaminação.....	43
Figura 5 -	Os três modos de falha característicos para materiais compósitos: a) intralaminar, b) interlaminar e c) translaminar.....	44
Figura 6 -	Carregamento em compressão com falha tipo zona de dobra (<i>kink zone</i>).....	46
Figura 7 -	Análise por MEV do compósito constituído de aramida/vidro/epóxi (laminado) na condição seca (a, c); condição úmida saturada (b, d). As setas mostram a delaminação e a trinca interfacial entre a aramida (seta branca) e o vidro (seta preta).....	47
Figura 8 -	Esquema de fratura por tração longitudinal.....	48
Figura 9 -	Esquemas de fratura por tração transversal.....	49
Figura 10 -	Modos de falhas possíveis de ocorrer em cisalhamento interlaminar.....	50
Figura 11 -	Ciclo de cura em autoclave utilizado na cura da resina epóxi 8552...	54
Figura 12 -	Ilustração estenográfica da identificação dos corpos de prova.....	57
Figura 13 -	Béquer utilizado para o condicionamento dos corpos de prova em água.....	59
Figura 14 -	Câmara de névoa salina utilizada, marca Equilam, mod. SSE 500.....	60
Figura 15 -	Câmara de climatização utilizada, marca Climats – Sapratin, mod.	

	Excal 2214-HE.....	61
Figura 16 -	Câmara de ozônio utilizada, marca Gramma.....	62
Figura 17 -	Corpos de prova utilizados nos ensaios de tração: (a) transversal e (b) longitudinal.....	63
Figura 18 -	Máquina universal de ensaios Instron mod. 1332 utilizada.....	64
Figura 19 -	Máquina universal de ensaios com câmara a quente, utilizada.....	65
Figura 20 -	Corpo de prova de cisalhamento interlaminar.....	66
Figura 21 -	(a) Máquina universal de ensaios Instron mod. 4301 utilizada, (b) Posicionamento do corpo de prova no dispositivo para ILSS.....	67
Figura 22 -	Esquema do posicionamento do cdp no ensaio de cisalhamento (<i>short beam</i>).....	68
Figura 23 -	Corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão: (a) Laminado unidirecional e (b) tecido.....	69
Figura 24 -	Dispositivo de ensaio de compressão.....	69
Figura 25 -	Fluxograma que resume todo o raciocínio estatístico utilizado para avaliar os dados do presente trabalho.....	73
Figura 26 -	Ganho de massa médio dos corpos de prova de tração longitudinal do compósito unidirecional condicionado em câmaras de climatização e de névoa salina.....	76
Figura 27 -	Ganho de massa médio dos corpos de prova de tração transversal do compósito unidirecional condicionado em câmaras de climatização e de névoa salina.....	76
Figura 28 -	Ganho de massa médio dos corpos de prova de cisalhamento interlaminar do compósito unidirecional condicionado em câmaras de	

	climatização e de névoa salina.....	77
Figura 29 -	Ganho de massa médio dos corpos de prova de compressão do compósito unidirecional condicionado em câmaras de climatização e de névoa salina.....	77
Figura 30 -	Resistência à tração transversal de compósitos unidirecionais, submetidos a diferentes condicionamentos ambientais, à temperatura ambiente.....	80
Figura 31 -	Resistência à tração transversal de compósitos unidirecionais, submetidos a diferentes condicionamentos ambientais, em temperatura elevada.....	82
Figura 32 -	Resistências à tração transversal de compósitos unidirecionais, com diferentes condicionamentos, em temperaturas ambiente e elevada.....	83
Figura 33 -	Micrografias obtidas pela técnica de microscopia óptica representativa da seção dos compósitos unidirecionais utilizados nos ensaios.....	84
Figura 34 -	Vista do corpo de prova após ensaio de tração transversal no compósito unidirecional.....	85
Figura 35 -	Análise por MEV do compósito polimérico unidirecional sem condicionamento higrotérmico e ensaiado em tração transversal à temperatura ambiente (22°C).....	86
Figura 36 -	Análise por MEV com detalhe do compósito polimérico unidirecional sem condicionamento higrotérmico e ensaiado em tração transversal à temperatura ambiente (22°C).....	86
Figura 37 -	Análise por MEV do compósito polimérico unidirecional sem condicionamento higrotérmico e ensaiado em tração transversal em	

	temperatura elevada (82°C).....	87
Figura 38 -	Análise por MEV com detalhe do compósito polimérico unidirecional sem condicionamento higrotérmico e ensaiado em tração transversal em temperatura elevada (82°C).....	87
Figura 39 -	Análise por MEV do compósito polimérico unidirecional condicionado em câmara de névoa salina e ensaiado em tração transversal à temperatura ambiente.....	88
Figura 40 -	Análise por MEV com detalhe do compósito polimérico unidirecional condicionado em câmara de névoa salina e ensaiado em tração transversal à temperatura ambiente (22°C).....	89
Figura 41 -	Análise por MEV do compósito polimérico unidirecional condicionado em câmara de névoa salina e ensaiado em tração transversal em temperatura elevada.....	89
Figura 42 -	Análise por MEV do compósito polimérico unidirecional condicionado em câmara de climatização e ensaiado em tração transversal à temperatura ambiente (22°C).	90
Figura 43 -	Análise por MEV com detalhe do compósito polimérico unidirecional condicionado em câmara de climatização e ensaiado em tração transversal à temperatura ambiente (22°C).....	91
Figura 44 -	Análise por MEV do compósito polimérico unidirecional condicionado em câmara de climatização e ensaiado em tração transversal em temperatura elevada (82°C).....	91
Figura 45 -	Análise por MEV da região central da superfície de fratura do compósito polimérico unidirecional condicionado em câmara de ozônio e ensaiado em tração transversal à temperatura ambiente	

	(22°C).....	93
Figura 46 -	Análise por MEV que mostra a superfície externa do corpo de prova, com o ataque do ozônio, e a região da superfície de fratura do compósito polimérico unidirecional ensaiado em tração transversal em temperatura elevada (82°C).....	93
Figura 47 -	Análise por MEV com detalhes da superfície externa do corpo de prova unidirecional, com o ataque do ozônio, ensaiado em tração transversal em temperatura elevada (82°C).....	94
Figura 48 -	Resistência à tração longitudinal de compósitos unidirecionais, ensaiados à temperatura ambiente (22°C).....	96
Figura 49 -	Resistência à tração longitudinal de compósitos unidirecionais ensaiados em temperaturas ambiente e elevada (82°C).....	97
Figura 50 -	Resistência à tração longitudinal de compósitos unidirecionais ensaiados em temperaturas ambiente e elevada (82°C).....	100
Figura 51 -	Vista representativa dos corpos de prova após o ensaio de tração longitudinal, das amostras de compósitos unidirecionais.....	101
Figura 52 -	Resistência à compressão dos compósitos unidirecionais ensaiados à temperatura ambiente (22°C).....	103
Figura 53 -	Resistência à compressão dos compósitos unidirecionais, ensaiados em temperatura elevada (82°C).....	104
Figura 54 -	Resistência à compressão dos compósitos unidirecionais, ensaiados às temperaturas ambiente (22°C) e elevada (82°C).....	105
Figura 55 -	Vista do corpo de prova após o ensaio de compressão.....	106
Figura 56 -	Análise por MEV do compósito polimérico unidirecional, sem condicionamento, após ensaio de compressão à temperatura ambiente	

	(22°C).....	107
Figura 57 -	Vista de topo da amostra de compósito polimérico unidirecional, sem condicionamento, após ensaio de compressão à temperatura ambiente (22°C).....	107
Figura 58 -	Análise por MEV da seção longitudinal do compósito polimérico unidirecional, sem condicionamento, após ensaio de compressão à temperatura ambiente (22°C).....	108
Figura 59 -	Análise por MEV da seção transversal do corpo de prova unidirecional, com condicionamento em câmara de climatização, após ensaio de compressão em temperatura elevada (82°C).....	109
Figura 60 -	Análise por MEV da seção longitudinal do corpo de prova unidirecional, com condicionamento em câmara de climatização, após ensaio de compressão em temperatura elevada (82°C).....	109
Figura 61 -	Análise por MEV da seção longitudinal do corpo de prova unidirecional, com condicionamento em câmara de névoa salina, após ensaio de compressão em temperatura elevada (82°C).....	110
Figura 62 -	Resistência ao cisalhamento interlaminar de compósito unidirecional submetido a diferentes condicionamentos ambientais e ensaiado à temperatura ambiente (22°C).....	113
Figura 63 -	Resistência ao cisalhamento interlaminar de compósito unidirecional submetido a diferentes condicionamentos ambientais e ensaiado em temperatura elevada (82°C).....	114
Figura 64 -	Resistência ao cisalhamento interlaminar de compósito unidirecional submetido a diferentes condicionamentos ambientais e ensaiado às temperaturas ambiente (22°C) e elevada(82°C).....	115

Figura 65 -	Análise por MEV da superfície de fratura de compósito unidirecional sem condicionamento e ensaiado em cisalhamento interlaminar à temperatura ambiente (22°C).....	116
Figura 66 -	Análise por MEV com detalhe da superfície de fratura de compósito unidirecional sem condicionamento e ensaiado em cisalhamento interlaminar à temperatura ambiente (22°C).....	117
Figura 67 -	Análise por MEV da superfície de fratura de compósito unidirecional sem condicionamento e ensaiado em cisalhamento interlaminar em temperatura elevada (82°C).....	118
Figura 68 -	Análise por MEV com detalhe da superfície de fratura de compósito unidirecional sem condicionamento e ensaiado em cisalhamento interlaminar em temperatura elevada (82°C).....	118
Figura 69 -	Análise por MEV da superfície de fratura do compósito unidirecional condicionado em câmara de névoa salina e ensaiado em cisalhamento interlaminar à temperatura ambiente (22°C).....	119
Figura 70 -	Análise por MEV com detalhe de superfície de fratura do compósito unidirecional condicionado em câmara de névoa salina ensaiado em cisalhamento interlaminar à temperatura ambiente (22°C).....	119
Figura 71 -	Análise por MEV da superfície de fratura do compósito unidirecional condicionado em câmara de névoa salina e ensaiado em cisalhamento interlaminar em temperatura elevada (82°C).....	120
Figura 72 -	Análise por MEV com detalhe da superfície de fratura do compósito unidirecional condicionado em câmara de névoa salina e ensaiado em cisalhamento interlaminar em temperatura elevada (82°C).....	120
Figura 73 -	Análise por MEV da superfície de fratura do compósito unidirecional	

	condicionado em câmara de climatização e ensaiado em cisalhamento interlaminar à temperatura ambiente (22°C).....	121
Figura 74 -	Análise por MEV com detalhe da superfície de fratura do compósito unidirecional condicionado em câmara de climatização e ensaiado em cisalhamento interlaminar à temperatura ambiente (22°C).....	121
Figura 75 -	Análise por MEV da superfície externa do compósito unidirecional condicionado em câmara de ozônio e ensaiado em cisalhamento interlaminar à temperatura ambiente (22°C).....	122
Figura 76 -	Análise por MEV com detalhe da superfície externa do compósito unidirecional condicionado em câmara de ozônio e ensaiado em cisalhamento interlaminar à temperatura ambiente (22°C).....	123
Figura 77 -	Análise por MEV da superfície externa do compósito unidirecional condicionado em câmara de ozônio e ensaiado em cisalhamento interlaminar em temperatura elevada (82°C).....	123
Figura 78 -	Ganho de massa médio dos corpos de prova de tração transversal do compósito de tecido, condicionados em câmaras de climatização e de névoa salina.....	125
Figura 79 -	Ganho de massa médio dos corpos de prova de cisalhamento interlaminar do compósito de tecido, condicionados em câmaras de climatização e de névoa salina.....	126
Figura 80 -	Ganho de massa médio dos corpos de prova de compressão do compósito de tecido, condicionados em câmaras de climatização e de névoa salina.....	126
Figura 81 -	Resistência à tração dos compósitos reforçados com tecido, ensaiados à temperatura ambiente (22°C).....	129

Figura 82 - Resistência à tração dos compósitos reforçados com tecido, ensaiados à temperatura elevada (82°C).....	130
Figura 83 - Resistência à tração dos compósitos reforçados com tecido submetidos a diferentes condicionamentos e ensaiados às temperaturas ambiente (22°C) e elevada (82°C).....	131
Figura 84 - Vista do corpo de prova de compósito reforçado com tecido após ensaio de tração.....	132
Figura 85 - Análise por MEV do compósito reforçado com tecido sem condicionamento e ensaiado em tração à temperatura ambiente (22°C).....	133
Figura 86 - Análise por MEV do compósito reforçado com tecido sem condicionamento e ensaiado em tração à temperatura de 82°C.....	134
Figura 87 - Análise por MEV com detalhes da superfície de fratura do compósito reforçado com tecido, sem condicionamento, e ensaiado em tração a 82°C.....	134
Figura 88 - Análise por MEV do compósito reforçado com tecido, condicionado por imersão em água e ensaiado em tração à temperatura de 22°C.....	135
Figura 89 - Análise por MEV com detalhe do compósito reforçado com tecido, condicionado em câmara de ozônio e ensaiado em tração à temperatura de 82°C.....	136
Figura 90 - Resistência à compressão dos compósitos de tecido submetidos a diferentes condicionamentos e ensaiados à temperatura ambiente (22°C).....	138
Figura 91 - Resistência à compressão dos compósitos de tecido submetidos a diferentes condicionamentos e ensaiados à temperatura elevada	

	(82°C).....	139
Figura 92 -	Resistência à compressão dos compósitos de tecido submetidos a diferentes condicionamentos e ensaiados às temperaturas ambiente (22°C) e elevada (82°C).....	141
Figura 93 -	Vista de um corpo de prova de compósito reforçado com tecido após o ensaio de compressão.....	142
Figura 94 -	Análise por MEV do compósito polimérico de tecido sem condicionamento e ensaiado em compressão à temperatura ambiente (22°C).....	143
Figura 95 -	Análise por MEV com detalhe de região de topo de compósito polimérico de tecido sem condicionamento ensaiado em compressão a 82° C.....	143
Figura 96 -	Resistência ao cisalhamento interlaminar dos compósitos de tecido submetidos a diferentes condicionamentos e ensaiados à temperatura ambiente (22°C).....	146
Figura 97 -	Resistência ao cisalhamento interlaminar dos compósitos de tecido submetidos a diferentes condicionamentos e ensaiados à temperatura elevada (82°C).....	147
Figura 98 -	Resistência ao cisalhamento interlaminar dos compósitos de tecido submetidos a diferentes condicionamentos e ensaios às temperaturas ambiente (22°C) e elevada (82°C).....	149
Figura 99 -	Análise por MEV do compósito polimérico de tecido sem condicionamento e ensaiado em cisalhamento interlaminar à temperatura ambiente (22°C).....	150
Figura 100 -	Análise por MEV do compósito polimérico de tecido sem	

	condicionamento e ensaiado em cisalhamento interlaminar a 82°C.....	151
Figura 101 -	Análise por MEV do compósito polimérico de tecido condicionamento por imersão e ensaiado em cisalhamento interlaminar a 82°C.....	151
Figura 102 -	Análise por MEV com detalhe da interface do compósito polimérico de tecido condicionamento por imersão e ensaiado em cisalhamento interlaminar a 82°C.....	152

Lista de Tabelas

Tabela 1-	Tabela de teste dos corpos de prova de resistência à tração longitudinal.....	55
Tabela 2 -	Tabela de teste dos corpos de prova de resistência à tração transversal.....	56
Tabela 3 -	Matriz de teste dos corpos de prova de resistência ao cisalhamento interlaminar (ILSS).....	56
Tabela 4 -	Tabela de teste dos corpos de prova de resistência à compressão (IITRI).....	56
Tabela 5 -	Resultados de absorção de umidade nos compósitos poliméricos unidirecionais condicionados em câmaras de climatização e de névoa salina.....	75
Tabela 6 -	Resultados dos ensaios de resistência à tração transversal dos compósitos unidirecionais.....	79
Tabela 7 -	Resultados dos ensaios de resistência à tração longitudinal dos laminados unidirecionais.....	95
Tabela 8 -	Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos compósitos unidirecionais.....	102
Tabela 9 -	Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento interlaminar dos compósitos unidirecionais, submetidos a diferentes condicionamentos.....	112
Tabela 10 -	Resultados de absorção de umidade nos compósitos reforçados com tecido, condicionados em câmaras de climatização e de névoa salina..	125
Tabela 11 -	Resultados dos ensaios de resistência à tração dos compósitos com	

	tecido, submetidos a diferentes condicionamentos.....	128
Tabela 12 -	Resultados de ensaios de resistência à compressão de compósitos de tecido submetidos a diferentes condicionamentos ambientais.....	137
Tabela 13 -	Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento interlaminar dos compósitos de tecido submetidos a diferentes condicionamentos ambientais.....	144

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AD	Teste de Anderson-Darling
CC	Condicionamento em câmara de climatização
cdp	Corpo de prova
cdps	Corpos de prova
CO	Condicionamento em câmara de ozônio
CTA	Centro Técnico Aeroespacial
DCTA	Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial
EMBRAER	Empresa Brasileira de Aeronáutica S/A
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
IAE	Instituto de Aeronáutica e Espaço
IITRI	<i>Illinois Institute of Technology Research Institute</i>
ILSS	<i>Interlaminar shear strength</i>
IM	Condicionamento por imersão
IM7	Fibra de carbono com módulo intermediário7
H _a	Hipótese alternativa
H ₀	Hipótese nula
MO	Microscopia óptica
PW	<i>Plain weave</i> (tipo de trançagem de cabos em tecidos)
TP	<i>Tape</i> (reforço unidirecional)
Mean	Média dos dados
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MTS	<i>Machine Test System</i>

N	Número de dados
NBR	Norma Brasileira
P-Value	Probabilidade de significância
R-Sq	Medida estatística que representa o percentual de um fundo de segurança
S	Erro padrão da estimativa
SS	Condicionamento em câmara de névoa salina (<i>salt spray</i>)
SC	Sem condicionamento
StDev	Desvio padrão amostral dos dados
TA	Temperatura ambiente
TE	Temperatura elevada
Tg	Temperatura de transição vítrea
τ_{rup}	Tensão de ruptura ao cisalhamento
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UR	Umidade relativa

Sumário

1 Introdução.....	26
1.1 Considerações iniciais.....	26
1.2 Objetivo.....	30
1.3 Metodologia.....	30
2 Revisão da literatura.....	33
2.1 Compósitos estruturais.....	33
2.2 Efeitos ambientais.....	37
2.3 Degradação da interface pela umidade e temperatura.....	40
2.4 Falhas em materiais compósitos.....	42
2.5 Compressão.....	45
2.6 Tração longitudinal.....	47
2.7 Tração transversal.....	49
2.8 Cisalhamento interlaminar.....	49
3 Materiais e métodos.....	52
3.1 Produção do compósito.....	52
3.2 Matrizes de testes.....	55
3.3 Identificação dos corpos de prova.....	57
3.4 Condicionamento ambiental.....	58

3.4.1	Condicionamento por imersão.....	59
3.4.2	Câmara de névoa salina (<i>salt spray</i>)	59
3.4.3	Câmara de climatização.....	60
3.4.4	Câmara de climatização em ozônio.....	62
3.5	Caracterização mecânica.....	63
3.5.1	Resistências à tração longitudinal e transversal.....	63
3.5.2	Resistência ao cisalhamento interlaminar.....	65
3.5.3	Resistência à compressão.....	68
3.6	Análise fractográfica.....	70
3.7	Análise estatística dos dados.....	71
4	Resultados e discussão.....	74
4.1	Compósito unidirecional.....	74
4.1.1	Absorção de umidade.....	74
4.1.2	Comportamento em tração transversal.....	78
4.1.3	Comportamento em tração longitudinal.....	94
4.1.4	Comportamento em compressão.....	101
4.1.5	Comportamento em cisalhamento interlaminar.....	110
4.2	Compósitos reforçados com tecido <i>Plain Weave</i>	124
4.2.1	Absorção de umidade.....	124
4.2.2	Comportamento em tração.....	127
4.2.3	Comportamento em compressão.....	136
4.2.4	Comportamento em cisalhamento interlaminar.....	144
4.3	Considerações finais.....	152
4.3.1	Compósito unidirecional.....	152

4.3.2 Compósitos de tecido.....	159
5 Conclusões.....	166
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	168
5.2 Produção técnica-científica gerada.....	169
Referências.....	171
Apêndice A – Registro de tensões.....	181
Apêndice B – Teste de normalidade.....	194
Apêndice C – Teste de igualdade de variâncias.....	207
Apêndice D – Teste de hipóteses de médias.....	211
Anexo A – Resina epóxi 8552.....	232
Anexo B – Fibra de carbono IM7.....	

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

A variedade de materiais disponíveis para uso em engenharia é extraordinariamente grande, atendendo às mais diversas aplicações do mercado industrial. Dentro deste contexto, os compósitos estruturais apresentam-se como um caso de reconhecido interesse em materiais não convencionais de engenharia (CUNHA; COSTA; REZENDE, 2006). Os compósitos estruturais, também denominados de compósitos avançados, oferecem propriedades excepcionais que são difíceis ou praticamente impossíveis de se encontrar em materiais tradicionais, como aço, alumínio e madeira (SQUIRES; NETTING; CHAMBERS, 2007).

Os materiais compósitos não são novos, os antigos chineses, israelitas e egípcios usavam tijolos feitos de argila reforçados com palha, um exemplo primitivo da aplicação dos compósitos, onde os constituintes individuais – argila e palha – não serviriam à função por eles mesmos, mas somente quando combinados. Alguns pesquisadores acreditam que a palha foi usada para evitar a formação de trincas na argila, outros sugestionam que esse componente foi utilizado para controlar a propagação das trincas na argila seca (KAW, 1997; PIHTILI, 2009).

Há algum tempo, muitas pesquisas têm sido dedicadas para o desenvolvimento de materiais compósitos para uso em estruturas primárias (partes da aeronave com compromisso mecânico elevado). O compósito estrutural tem sido largamente utilizado em aplicações aeronáutica, espacial, marítima, automotiva e esportiva, por conta de suas elevadas resistências mecânica e à corrosão, aliadas à elevada rigidez, quando comparadas com materiais mais tradicionais (KANG; LIM; KIM, 2008).

Os compósitos estruturais foram introduzidos de maneira definitiva na indústria aeroespacial a partir da década de 60, com a disponibilização da fibra de carbono pela Royal Aircraft Establishment de Farnborough, UK, em 1964. Com o aumento na sua aplicação e experiência no seu uso, o processamento de materiais compósitos com matrizes poliméricas, dos tipos termorrígida e termoplástica, tornou-se uma realidade, com um crescimento contínuo. Isto se deve, principalmente, como já mencionado, às suas excelentes propriedades mecânicas, que permitem a substituição de materiais mais convencionais, como alumínio e ligas de titânio, em estruturas primárias com segurança (SOUTIS, 2005).

Assim, os compósitos podem ser definidos como materiais de engenharia, constituídos por fibras de reforço, com orientação definida ou não, dispersas em uma matriz metálica, cerâmica ou polimérica. O reforço fibroso é o principal constituinte do compósito e ocupa a maior fração em volume do material, sendo responsável pela resistência ao carregamento e com maior influência nas propriedades mecânicas. Seu desempenho estrutural depende da disposição das fibras em uma ou mais direções, empilhadas em uma sequência de camadas definida no projeto da estrutura, a fim de se obter produtos com valores de resistência desejáveis (BARBOSA, 1995; FRANCO, 2003; MAYER, 2003).

Outro importante constituinte é a matriz polimérica. Esse componente tem as funções de agregar as fibras, dar proteção às suas superfícies contra danos por abrasão e atenuar os efeitos adversos das condições ambientais na utilização do compósito. A matriz deve apresentar uma adesão adequada à superfície do reforço, de tal forma que na aplicação da carga a matriz se deforme e transfira a carga entre as fibras contínuas e/ou descontínuas do compósito. Também as propriedades de resistência à compressão, resistência ao cisalhamento interlaminar, resistência à tração transversal e a temperatura de serviço do material são dominadas pelo sistema de matriz polimérica (STRONG, 1989; COSTA, 2002).

O desenvolvimento de fibras de carbono, boro e quartzo permitiu aos projetistas maior flexibilidade nos projetos estruturais, atendendo às exigências de desempenho em voo de aeronaves e veículos espaciais. Historicamente, estruturas aeronáuticas em compósitos têm sido fabricadas utilizando-se fibras contínuas, com comprimento igual à dimensão do componente que está sendo fabricado. Assim, ocorre a máxima transferência das propriedades mecânicas da fibra para o compósito, sob determinadas condições de carregamento do reforço.

No entanto, a fabricação de estruturas mais complexas, utilizando fibras contínuas, exige uma quantidade de trabalho manual significativa, equipamentos complexos e de elevado custo para o corte do reforço e consolidação das lâminas. Além de conhecimento tecnológico para a adequada especificação e laminação dos pré-impregnados, e também para a avaliação do ciclo de cura a ser utilizado no processamento do componente. Nesse sentido, os resultados têm mostrado vantagens de custo, de processabilidade e, principalmente, na relação peso/resistência, em comparação ao componente metálico substituído (BOTELHO; REZENDE, 2000).

As condições de serviço nas quais os compósitos são submetidas implicam, quase que invariavelmente, no contato com líquidos, vapores e/ou exposição química ou a raios ultravioleta ou ozônio, podendo afetar de imediato ou a longo prazo o desempenho do material. Sendo assim, quando são utilizados compósitos avançados, os aspectos ambientais têm que ser cuidadosamente considerados. Isto se aplica, em particular, ao fenômeno da penetração de umidade em compósitos, que muitas vezes se torna uma das principais limitações para o uso de tais materiais pela indústria.

Em geral, os materiais à base de polímeros não são solúveis em água, mas podem absorver certa quantidade dessa substância, dependendo de sua formulação e natureza química, assim como da concentração de umidade e temperatura do ambiente a que estão

expostos. Em consequência, a exposição prolongada à água pode afetar significativamente o comportamento da matriz, produzindo mudanças nas suas naturezas física e química, por si só, ou em conjunto com outros agentes físicos e/ou químicos, tais como calor e radiação ultravioleta (PAVLIDOU; PAPASPYRIDES, 2003; CUNHA; COSTA; REZENDE, 2008).

A umidade absorvida resulta em efeitos prejudiciais nas características termofísicas, mecânicas e químicas da matriz dos compósitos avançados por plasticização e hidrólise, como também afeta a interface fibra-matriz (NAKAMURA; SINGH; VADDADI, 2006).

Nesse sentido, o crescente aumento no uso dos compósitos avançados nas indústrias aeronáutica e espacial tem tornado de importância estratégica o domínio do conhecimento desses materiais nas áreas que envolvem seu processamento e aplicação. Associado também à análise de seu comportamento mecânico quando esses materiais são expostos a agentes que possam afetar esse comportamento. Entendam-se como agentes, os diferentes ambientes a que esses materiais podem ficar expostos, por exemplo, temperatura e umidade, imersão em água e em solução salina, além da exposição a ambientes agressivos como radiações ultravioleta e ozônio, solventes, entre outros.

Assim, este trabalho visa contribuir com o setor aeroespacial nacional no estudo do comportamento mecânico de compósitos poliméricos termorrígidos de uso atual e recente, disponibilizando dados e discussões relativas ao comportamento mecânico de compósitos poliméricos de fibras de carbono/resina epóxi 8552, após a exposição dos mesmos em diferentes ambientes agressivos (higrotérmico, névoa salina, ozônio e em imersão em água). Este estudo com diferentes condicionamentos e temperaturas de ensaio disponibiliza aos estudiosos da área e processadores de artefatos em compósitos estruturais uma matriz de resultados e correlações muito útil ao entendimento do comportamento desses materiais frente a diferentes possíveis aplicações. Somando a isto, deve ser dada ênfase ao condicionamento em atmosfera de ozônio, focando principalmente aplicações espaciais, onde é praticamente

inexistente a disponibilização de estudos sistemáticos envolvendo o contato de compósitos estruturais com este tipo de atmosfera.

1.2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo estudar o efeito combinado da temperatura e umidade em compósitos de tecido e de fita unidirecional de fibra de carbono, pré-impregnados com matriz de resina epóxi tipo 8552, submetidos a diferentes tipos de condicionamentos (higrotérmico, névoa salina, ozônio e em imersão em água), avaliando possíveis mudanças na sua resistência mecânica por meio de ensaios de compressão, de cisalhamento interlaminar, de tração longitudinal e transversal, conforme estabelecido em normas ASTM. Posteriormente, os resultados obtidos nesses ensaios são relacionados com observações pela técnica de microscopia eletrônica de varredura para estudar a influência da temperatura de ensaio e dos diferentes ambientes de condicionamento na interface fibra/matriz dos referidos compósitos.

1.3 Metodologia

Além do capítulo de introdução, o conteúdo deste trabalho está estruturado em outros seis capítulos, quatro apêndices e dois anexos, adotando as etapas de execução relacionadas na Figura 1.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura extraída de trabalhos fundamentais referentes aos compósitos poliméricos termorrígidos, a influência do condicionamento higrotérmico, da névoa salina, de estudos de imersão em água e da temperatura nas propriedades mecânicas dos compósitos laminados poliméricos. São assuntos

encontrados em periódicos, anais de congressos, teses, livros e informações de fontes eletrônicas, publicados, na sua maioria, nos últimos vinte anos.

O Capítulo 3 detalha os materiais e os procedimentos experimentais utilizados, destacando os condicionamentos ambientais, caracterizações mecânicas e as análises morfológicas dos materiais em estudo.

O Capítulo 4 refere-se à análise dos resultados experimentais obtidos, realizando a correlação entre os dados das propriedades mecânicas e as observações feitas por microscopia eletrônica de varredura.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho, as propostas para futuras investigações e os trabalhos técnico-científicos gerados durante o desenvolvimento desta tese. Finalmente, é apresentada toda a referência consultada, normalizada segundo a norma ABNT NBR 6023-02, bem como todas as citações no corpo de trabalho, que estão de acordo com a NBR 10520-02.

Nos apêndices deste trabalho estão apresentados os dados obtidos nos ensaios mecânicos e nas análises estatísticas, relativos a este estudo, e nos anexos, a especificação das matérias-primas utilizadas.

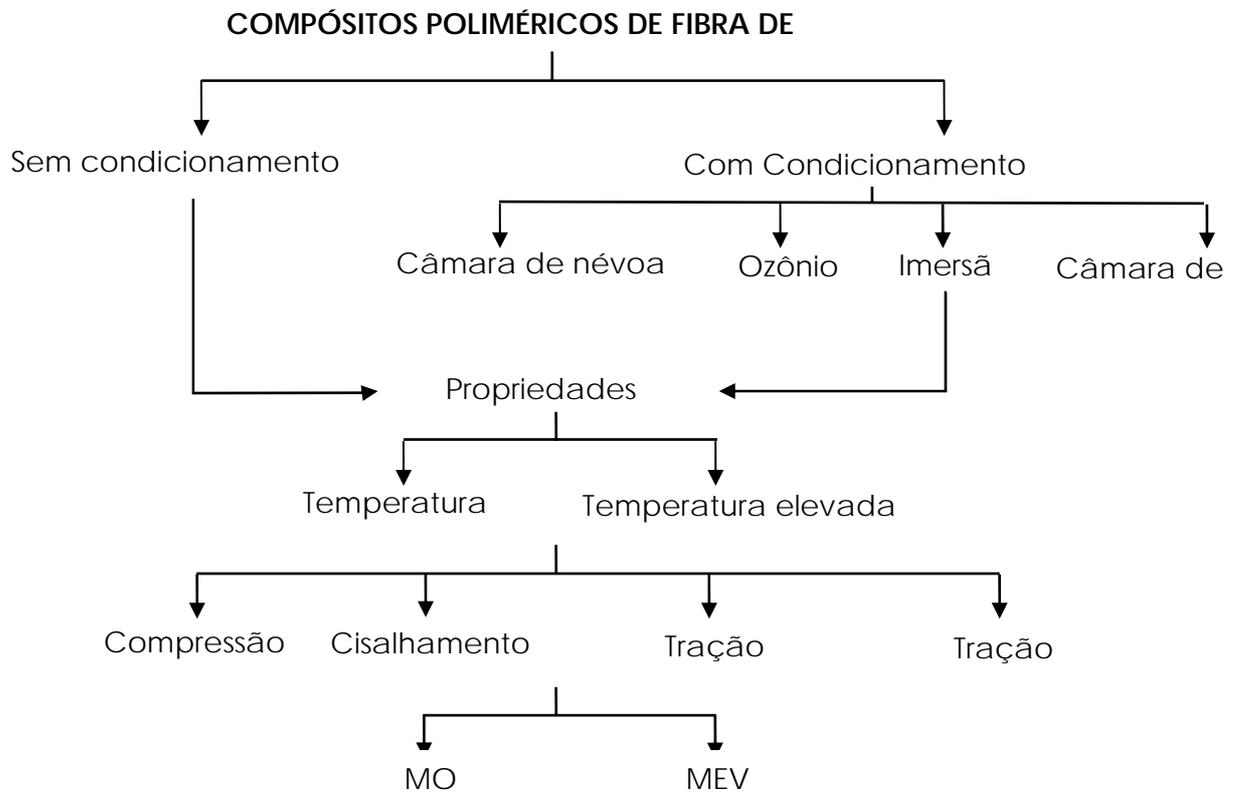


Figura 1: Etapas de execução do presente trabalho.

2 Revisão da literatura

2.1 Compósitos estruturais

Um compósito estrutural consiste na combinação de dois ou mais materiais diferentes, sem serem solúveis um no outro, escolhidos de acordo com as aplicações e as propriedades mecânicas desejadas (Figura 2). Os materiais são combinados na escala macroscópica para funcionarem como uma unidade, visando obter um conjunto de propriedades que nenhum dos componentes individualmente possui. No compósito uma fase é chamada de reforço e a outra, na qual a primeira fica envolvida, é chamada de matriz (KAW, 1997; MENDONÇA, 2005).

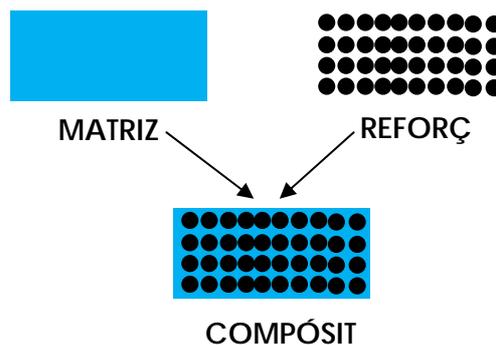


Figura 2 - Conceito da união de dois materiais distintos (PARDINI, 2003).

São possíveis muitas combinações e frações de misturas, e as propriedades dos compósitos, em geral, são governadas pelas fibras, pela matriz e pela interface estabelecida entre estes dois componentes. Não somente as propriedades das fibras e das matrizes são importantes, mas também a maneira pela qual as fibras são orientadas no compósito. Os parâmetros importantes são suas quantidades relativas, frequentemente descritas pela fração volumétrica da fibra, e pela orientação espacial das fibras (BRONDSTED; LILHOLT; LYSTRUP, 2005).

Os compósitos de materiais poliméricos reforçados por fibras contínuas estão continuamente substituindo materiais metálicos convencionais nas indústrias aeroespacial,

militar, naval, automobilística, de engenharia civil e de material esportivo e lazer, por apresentarem elevada resistência mecânica, elevada relação rigidez/peso e boa resistência à corrosão, em comparação às ligas metálicas (HOSUR; ALEXANDER; VAIDYA, 2001; TEWARI, 2003; SUDARISMAN; DAVIES; HAMADA, 2007), além de resistência química superior contra ácidos e bases, água salina e solventes orgânicos (BISMARCK; HOFMEIER; DÖRNER, 2007).

Os vários tipos de compósitos podem ser classificados de acordo com a geometria, com a forma das fases presentes, e com a composição química dos constituintes. Componentes na forma de fibras curtas ou longas, contínuas ou descontínuas, particulados, laminados e tecido trançado em uma ou mais direções podem ser incorporados em uma matriz, proporcionando diferentes estruturas aos compósitos. Materiais com características orgânicas podem ser conjugados com aqueles de natureza inorgânica. Geralmente, os materiais compósitos são constituídos pela combinação de materiais cerâmicos, metálicos e poliméricos (Figura 3) (GIBSON, 1994; KOLLÁR; SPRINGER, 2003).

Comparando-se os compósitos com reforço de fibras curtas, longas e mistas, os tecidos são únicos em sua capacidade de fornecer resistência mecânica tanto na direção longitudinal quanto na transversal, adaptando-se a superfícies curvas sem dobrar, além de ser de fácil manipulação no processo de moldagem à compressão. O carbono, o vidro e a aramida são fibras comumente usadas para reforçar os compósitos, especialmente para fabricar compósitos que enfrentem severas condições de operação, como elevadas tensões, deslocamentos e temperaturas. Entre os vários reforços disponíveis, as fibras de carbono têm sido muito usadas para o reforço de polímeros, não apenas por possuírem uma excelente estabilidade térmica, elevadas resistências mecânica e ao desgaste e módulo, mas também por auxiliarem na condutividade térmica. A dissipação rápida de calor de atrito produzido nos contatos do

material protege a matriz da degradação e as fibras da delaminação, além de ajudar na retenção de todas as propriedades de desempenho em uma vasta extensão (SU, 2005).

Uma variada gama de polímeros pode ser usada como matriz para compósitos poliméricos reforçados com fibras, com o papel de estabilizar as fibras em compressão (fornecendo apoio lateral), transferir as propriedades da fibra para o compósito e minimizar os danos, devido ao impacto pela exposição à deformação plástica (SU, 2005). As matrizes poliméricas são classificadas em termorrígidas (por exemplo: epóxi e poliéster) e termoplásticas (por exemplo: poliamida e náilon). A resina epóxi é uma resina termorrígida com propriedades atrativas para o processamento de compósitos estruturais, por apresentar elevadas resistência mecânica e dureza, boas estabilidades térmica e química e resistência ao desgaste (TONG; MOURITZ; BANNISTER, 2002; ZHOU; SUN; WANG, 2009).

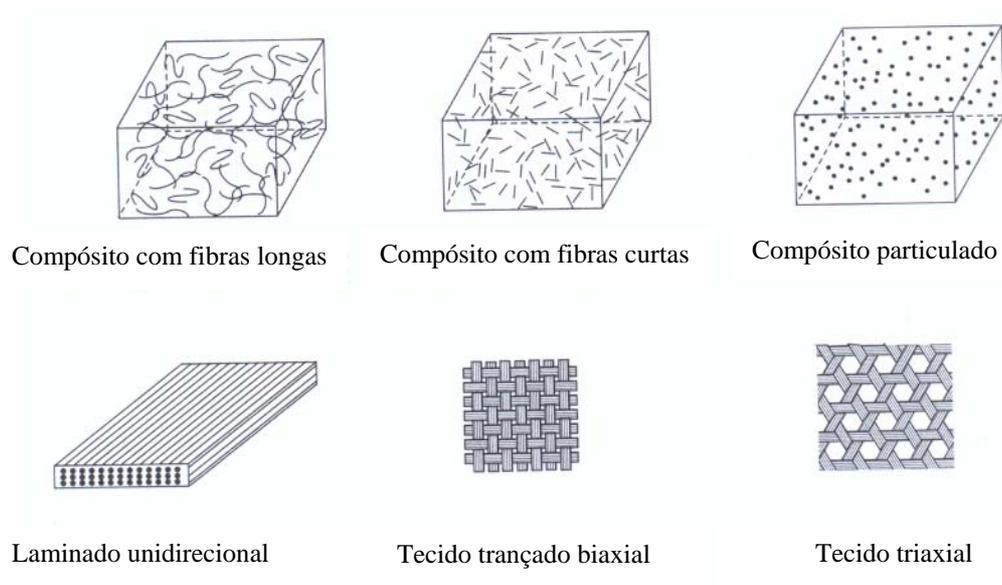


Figura 3 - Tipos de compósitos baseados na forma do reforço (KOLLÁR; SPRINGER, 2003).

Vários parâmetros influenciam no desempenho dos compósitos, tipo e teor volumétrico de matriz e de fibras, seu alinhamento com respeito à direção de carga, interface fibra/matriz, técnica de processamento e orientação das fibras (SHARMA; RAO; BIJWE, 2009).

Segundo ZHANG e BREIDT (2004), a resistência da adesão da fibra/matriz exerce um importante papel nas propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos reforçados com fibra. Quando a carga é aplicada ao compósito, ela é distribuída e transferida através das interfaces fibra/matriz. Uma forte ligação na interface promove um melhor envolvimento das fibras, aumentando a resistência do compósito. Entretanto, fibras de carbono normalmente desempenham uma ligação fraca com a matriz polimérica, devido à sua inércia química e superfície lisa. Para melhorar as propriedades de ligação das fibras de carbono, podem ser aplicados alguns tratamentos, classificados em oxidantes e não-oxidantes.

GOERTZEN e KESSKER (2006) destacam que, em muitos compósitos estruturais poliméricos reforçados com fibras, a durabilidade em longo e em curto prazos é de grande importância. A estrutura não deve falhar quando submetida a tensões sobre um curto período de tempo, mas pode estar inclinada a falhar ou aumentar a sua deformação, quando submetida a um período maior de tempo. Mesmo se a falha não ocorrer, a lenta deformação do material compósito pode causar na estrutura uma diminuição em sua eficiência.

A caracterização do desempenho dos compósitos poliméricos reforçados com fibras submetidas a tensões, por um longo período de tempo, é especialmente importante devido ao comportamento viscoelástico da matriz polimérica. As matrizes de compósitos poliméricos reforçados com fibras exibem uma temperatura chamada de temperatura de transição vítrea, T_g , a partir da qual as propriedades dos compósitos se degradam significativamente. Tipicamente, é necessário que a temperatura de aplicação para a estrutura do compósito esteja abaixo da temperatura de transição vítrea, no sentido de assegurar que a rigidez mecânica e a resistência à fluência do material não sejam afetadas.

Uma das principais rotas de se produzir compósitos poliméricos é utilizar pré-impregnados. Os pré-impregnados são materiais de comprovada qualidade, prontos para o processamento e comumente denominados de *prepregs* na indústria de compósitos. A

durabilidade do pré-impregnado, à temperatura ambiente, varia normalmente de dias a algumas semanas, dependendo do sistema de resina. Por isso, o pré-impregnado é tipicamente armazenado à temperatura de -18°C , resultando numa vida útil de 6 a 12 meses (BRONDSTED; LILHOLT; LYSTRUP, 2005). O termo pré-impregnado é aplicado a todo produto intermediário, pronto para moldagem, e pode ser definido como sendo uma composição de fibras de reforço com um determinado polímero, termorrígido formulado ou termoplástico, em uma fração particular em massa (PARDINI, PERES, 1996; COSTA, 2002; CUNHA, 2004).

2.2 Efeitos ambientais

Compósitos à base de fibras de vidro ou carbono e resina termorrígida do tipo epóxi são os materiais mais utilizados em compósitos aeronáuticos. Contudo, estruturas feitas com esses tipos de materiais em geral trabalham em ambientes agressivos, ou seja, temperatura, umidade, exposição química ou ambientes corrosivos. Sendo assim, a susceptibilidade desses materiais aos diferentes parâmetros ambientais deve ser levada em conta, antes da estrutura ser colocada em serviço. Quando os parâmetros umidade e temperatura atuam ao mesmo tempo, representam uma ameaça para a integridade das estruturas. De acordo com a literatura, a variação da temperatura e de absorção de umidade pode causar uma irreversível deterioração higrotérmica dos compósitos de matriz polimérica (BOUKHOULADA; ADDA; MADANI, 2006), em função de mudanças dimensionais e no estado de tensões, induzido pelo intumescimento da matriz e pela expansão térmica. A absorção de umidade pode induzir alterações mecânicas e físico-químicas na matriz polimérica e deteriorar a interface fibra/matriz pelo surgimento de delaminação ou microtrincas (CÂNDIDO, 2007).

Os efeitos ambientais causados pela temperatura e umidade relativa do ar podem ser reversíveis, quando o período de exposição é de curta duração. Porém, quando a exposição ocorre em ciclos prolongados, onde a combinação da umidade com mudança de temperatura está presente, os efeitos produzidos podem ser irreversíveis, devido à afinidade da água por grupos funcionais específicos de matrizes poliméricas de natureza polar. Nesse caso, geralmente ocorrem alterações destrutivas na interface reforço/matriz polimérica, devido à degradação das interações físico-químicas existentes entre a resina e a fibra. Em consequência, ocorre o descolamento da fibra, provocando a delaminação do compósito com a redução das propriedades mecânicas e termofísicas do material compósito (CUNHA; COSTA; REZENDE, 2008).

De acordo com o trabalho de BOUKHOULDA, ADDA e MADANI (2006), a evolução da concentração de umidade através da espessura do compósito não é uma função apenas do coeficiente de difusão e do perfil da distribuição, mas também das condições ambientais e da orientação das fibras. Os autores concluem que:

- a temperatura afeta a absorção de umidade em vários aspectos. Como a difusão é um processo ativado termicamente, um aumento na temperatura acelera a difusão e aumenta o coeficiente de difusão;
- a umidade é absorvida principalmente pelas resinas;
- a qualidade de fabricação dos compósitos tem uma importante influência na absorção. As imperfeições que existem em um material compósito favorecem consideravelmente a absorção da água e aceleram a degradação do material;
- a influência das condições ambientais higroscópicas pode ser representada pela variação do peso da umidade absorvida pelo material estudado.

Na verdade, a deterioração das propriedades mecânicas dos materiais compósitos durante longo tempo sob condições ambientais é consequência direta do desenvolvimento de

dano específico, como a microtrinca da matriz, delaminação entre a fibra e a resina e a fratura da fibra (FRANCO, 2008).

A influência da umidade também é avaliada por MAYER (2003) em compósitos de carbono/epóxi, vidro/epóxi e aramida/epóxi reparados estruturalmente com diferentes sobreposições de tecido de carbono, aramida e vidro. Os compósitos com e sem reparos foram submetidos ao condicionamento ambiental em duas condições diferentes: ambiente (23°C e 50% de umidade relativa (UR)) e úmida (65°C e 95% de UR), e submetidos a carregamento em tração sob temperaturas ambiente (23°C) e elevada (82°C). Verificou-se que o condicionamento com umidade e temperatura elevadas diminuiu significativamente a propriedade mecânica em tração dos compósitos reparados, favorecendo a falha por descolamento entre o compósito base e o reparo.

Um aspecto interessante com relação ao ganho de umidade em compósitos de fibras de carbono com resina epóxi é abordado nos estudos de CÂNDIDO (2007), onde se apresenta que o teor de umidade no compósito aumenta rapidamente com o tempo na primeira semana do condicionamento higrotérmico e alcança o equilíbrio depois da quarta semana de exposição a um ambiente com alta concentração de umidade (~90% UR). Além disso, os resultados indicam que a sequência de empilhamento e orientação das fibras exercem pequena influência sobre o processo de absorção de umidade no condicionamento higrotérmico.

Segundo BAO e YEE (2002), em estudos envolvendo o condicionamento higrotérmico e a difusão da umidade de um determinado compósito de fibras de carbono unidirecional, após uma prolongada absorção de água à temperatura de 50°C, não foi observado nenhum dano interfacial apreciável nas amostras submetidas à umidade induzida. No entanto, foram observadas numerosas falhas na interface das amostras expostas a 90°C. O estudo conclui que a combinação de alta temperatura e umidade é especialmente prejudicial à interface fibra/matriz.

COSTA (2002) avaliou o efeito de diferentes níveis de porosidade em três famílias de compósitos de carbono/epóxi e carbono/bismaleimida, submetidas à saturação em câmara higrotérmica. Os resultados revelam que os compósitos com maior volume de vazios absorvem maior quantidade de umidade, e que o teor de vazios é um dos fatores dominantes nas características de absorção. Observou-se, também, que a absorção de umidade pelo compósito é definida pelo menos por dois diferentes caminhos: um referente aos compósitos com baixo teor de vazios e o outro para compósitos com elevado nível de porosidade.

2.3 Degradação da interface pela umidade e temperatura

Além da carga aplicada, deformações em laminados compósitos também podem ocorrer devido a mudanças de temperatura e pela absorção de umidade. Isto é conhecido como o efeito higrotérmico. Uma vez que fibras sintéticas são menos afetadas por mudanças ambientais, a susceptibilidade ambiental dos compósitos dá-se principalmente por intermédio da matriz.

Os efeitos de temperatura e umidade sobre o desempenho mecânico de estruturas em compósitos poliméricos têm sido muito estudados, mostrando que as distorções higrotérmicas podem levar a instabilidades estruturais e perturbações durante a sua vida em serviço. Todo tipo de limitação à expansão livre de matrizes, fibras ou camadas produz tensões ou deformações; este é o caso, por exemplo, de fios unidirecionais arrançados com diferentes ângulos de orientação em relação à uma direção de referência (GIGLIOTTI; JACQUEMIN; VAUTRIN, 2005).

Compósitos termorrígidos são cada vez mais utilizados em aplicações nas quais há exposição a ambientes severos, que combinam temperatura e umidade. Na literatura, muitos estudos foram dedicados ao envelhecimento higrotérmico de várias matrizes poliméricas e

seus compósitos (KUMOSA et al, 2004; ABDO; SHAMSELDEEN; LAFDEE, 2008). Neste sentido, sabe-se que a absorção de água provoca uma severa degradação nas propriedades mecânicas dos compósitos, degradação que não está relacionada somente à plasticização, degradação química, hidrólise e à modificação da matriz polimérica, mas também ao descolamento (*debonding*), que por sua vez é afetada pela alteração da interface fibra/matriz (FOULC, 2005).

A literatura (CHOU, 1992) mostra ainda que em compósito unidirecional a temperatura e a umidade têm um efeito muito maior sobre as propriedades de tração transversal e de cisalhamento, que na propriedade de tração longitudinal. O autor ainda apresenta a variação da difusividade térmica e do coeficiente de difusão de umidade dentro do material. Em geral, esses parâmetros dependem da temperatura e da concentração de umidade.

Segundo os estudos de ZHANG, 2007, na maioria dos ambientes a umidade (ou água) pode penetrar nos compósitos, o que pode resultar em mudanças na estrutura química dos seus constituintes, com a possível deterioração da interação entre os mesmos. Estas mudanças frequentemente comprometem a capacidade dos compósitos de suportar cargas, aumentando o nível de degradação com o aumento da quantidade de umidade absorvida. Além disso, do ponto de vista das microligações, um sério efeito causado pela absorção de umidade é a deslocamento entre a fibra e a matriz, que gera uma redução no potencial de transferência de carga entre a fibra e a matriz, com a conseqüente queda nas propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos como um todo. Assim, reduções na rigidez, na resistência e na tenacidade são frequentemente encontradas em compósitos submetidos a ambientes úmidos, bem como inversões no comportamento termomecânico (muitas vezes a absorção de umidade também poder promover um aumento nas propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos).

Segundo os estudos de RAY (2006), a presença de umidade e de concentradores de tensões gerados com a absorção de umidade causa a redução da tolerância a danos e da durabilidade estrutural. A integridade estrutural e o desempenho associado ao tempo de vida das fibras dos compósitos poliméricos são fortemente ligados à estabilidade da região da interface fibra/polímero. A umidade pode penetrar nos materiais compósitos poliméricos pelos processos de difusão e/ou capilaridade. As mudanças reversíveis e irreversíveis que ocorrem nas propriedades físico-químicas e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas dos compósitos termorrígidos, são resultados da quantidade e da forma de como a umidade foi absorvida pelo sistema.

A plasticização e o intumescimento da matriz polimérica são conseqüências adversas da absorção de água pelo polímero. A plasticização induz a deformação plástica com a redução da Tg (temperatura de transição vítrea), pois é a Tg que estabelece a temperatura de trabalho do material a ser utilizado (ZHOU, LUCAS, 1999), enquanto que, a dilatação está relacionada com o diferencial de tensão que é criado pela força de expansão exercida pelo líquido que alonga a cadeia polimérica.

2.4 Falhas em materiais compósitos

A tolerância ao dano é uma das limitações mais importantes de desempenho que deve ser considerada nos materiais utilizados em projetos de aeronaves modernas. As normas de trabalho aeronáutico exigem que a falha estrutural catastrófica, devido a danos, deva ser evitada por toda a vida operacional de uma aeronave. Uma forma de dano, que é uma ameaça séria para a sobrevivência de estruturas de aeronaves, é a presença de trincas. As trincas frequentemente iniciam-se em defeitos dos materiais ou pela existência de vazios ou de áreas sob carregamento cíclico. Os materiais compósitos avançados fibrosos são muito usados em

aplicações em aeronaves, exibindo boas resistências a iniciação e propagação de trincas causadas pela fadiga (WHITCOMB, 1988).

Segundo os estudos de AFAGHI-KHATIBI e MAI (2002), o comportamento da fratura na interface de ligação fibra/matriz influencia na resistência e na tenacidade dos materiais compósitos sob as condições de trabalho. Dependendo das propriedades da interface, tais como a natureza e eficiência da ligação e superfície morfológica, podem ocorrer vários mecanismos de tenacidade relacionada à interface, alterando a tenacidade integral da fratura do compósito. MADHUKAR e DRZAL (1991) revelam que a resistência à tração longitudinal, compressão, resistência transversal e a tenacidade à fratura do compósito unidirecional dependem das propriedades da interface fibra/matriz.

As falhas de compósitos reforçados com fibras podem ser causadas pela flambagem (*buckling*) das fibras, que dá origem às zonas de dobra (*kink zones*), quebra das fibras (*breakage*), fissuração (*cracking*) da matriz e delaminação (*delamination*), ou pela combinação destes fatores (Figura 4) (KOLLÁR; SPRINGER, 2003).

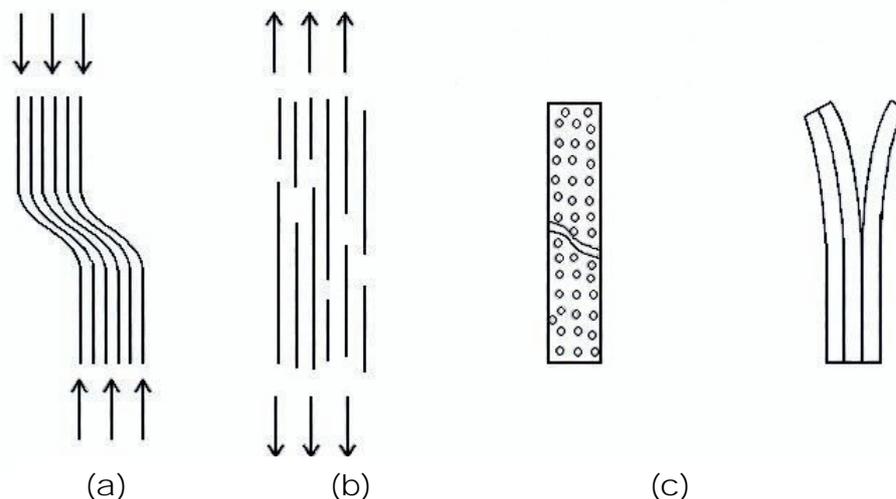


Figura 4 - Modos de falhas típicos em compósitos: (a) flambagem, (b) quebra da fibra, (c) fissuração da matriz e (d) delaminação (KOLLÁR; SPRINGER, 2003).

Segundo FROST (2002), as falhas em materiais compósitos podem ser descritas pelos mecanismos de danos que ocorrem na superfície de fratura, sabendo-se que defeitos e danos

das estruturas fabricadas em compósitos reduzem a sua resistência, a sua rigidez e a vida em serviço. Os defeitos podem ocorrer durante a manufatura, acidentalmente em serviço ou, ainda, devido a problemas decorrentes do projeto, em função da introdução de descontinuidades, como conexões estruturais. Entre os defeitos comumente introduzidos estão o desalinhamento das fibras, descolamento de camadas, tensões residuais, inclusões, vazios na matriz e na interface (FRANCO, 2008).

Devido à construção anisotrópica dos compósitos poliméricos com fibras contínuas, os danos podem ocorrer de várias maneiras. Os tipos desses danos estão diretamente relacionados com a orientação das fibras e a direção de aplicação do carregamento. Os modos de falha podem ser dos tipos interlaminar, intralaminar e translaminar (SMITH, 1987; FRANCO, 2003; CUNHA, 2004), como apresentado na Figura 5.

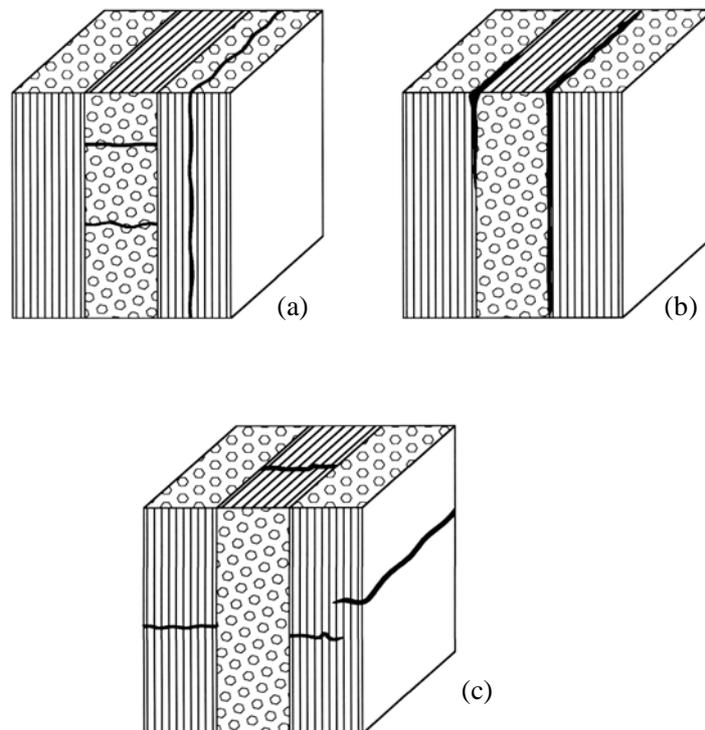


Figura 5 - Os três modos de falha característicos para materiais compósitos: a) intralaminar, b) interlaminar e c) translaminar (SMITH, 1987; FRANCO, 2003; CUNHA, 2004).

2.5 Compressão

Quando um compósito polimérico é submetido ao carregamento em compressão na direção das fibras (0°), elas podem flambar em uma pequena região da seção do corpo de prova ensaiado (CARLSSON; PIPES, 1997; COSTA, 2002). A flambagem causa a formação de dobras ou zonas de dobra (*kink zones*) e o rompimento das fibras ocorre devido às tensões de flexão localizadas. Estudos experimentais têm demonstrado que a localização da movimentação de rotação das fibras, devido à flambagem, está associada ao processo de dobramento. As propriedades das fibras e da matriz afetam imensamente o início e a magnitude da flambagem da fibra, resultando na perda das propriedades de compressão do compósito (KOLLÁR; SPRINGER, 2003). A resistência à fratura das fibras é vista como a principal propriedade que governa a formação de dobra. A zona de dobra é nucleada num ponto de defeito do material, tal como uma região com defeito no alinhamento de fibras ou uma inclusão, que atua como um concentrador de tensões. A propagação do dobramento através do compósito é precedida por um processo de sucessivas flambagens, cisalhamento da matriz e fraturas das fibras adjacentes para formar as zonas de dobra (Figura 6) (WHITCOMB, 1988; ZWEBEN; HAHN; CHOU, 1989; SCHULTHEISZ; WAAS, 1996; CARLSSON; PIPES, 1997; COSTA, 2002).

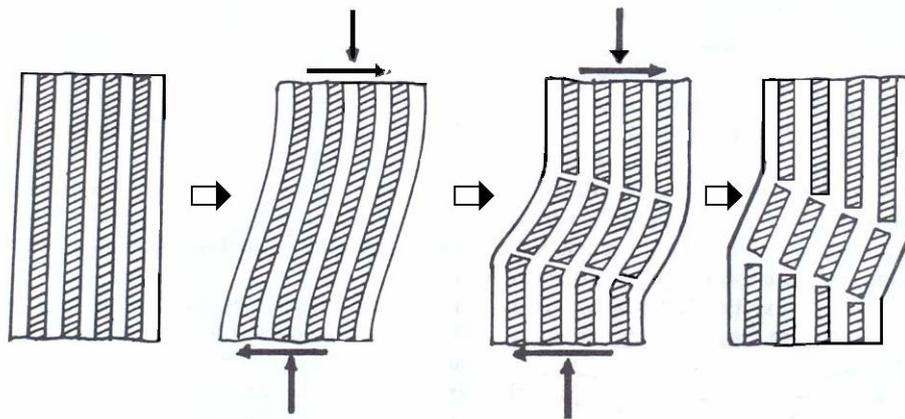


Figura 6 – Carregamento em compressão com falha tipo zona de dobra (*kink zone*) (WHITCOMB, 1988).

IMIELINSKA e GUILLAUMAT (2004) investigaram compósitos de tecidos de fibras de vidro e de aramida com resina epóxi, submetendo-os ao envelhecimento em imersão em água, seguido por ensaio de impacto de baixa velocidade. O impacto no compósito foi testado de forma repetitiva e estática em compressão para determinar a resistência residual, avaliando a tolerância ao dano do material. O efeito do envelhecimento em imersão em água sobre a integridade microestrutural dos compósitos é ilustrado na Figura 7, que mostra trincas finas e a delaminação da interface fibra/matriz. A seta branca na Figura 7(c) aponta para a trinca da interface fibra de aramida/matriz, que por sua vez é mostrada em detalhes na Figura 7(d). A fraca adesão da fibra de aramida à resina epóxi é evidente. Esta fraca adesão pode facilmente produzir delaminação na interface fibra/matriz, mesmo na ausência de água, como um resultado da expansão térmica diferenciada da fibra e da matriz durante a cura do compósito.

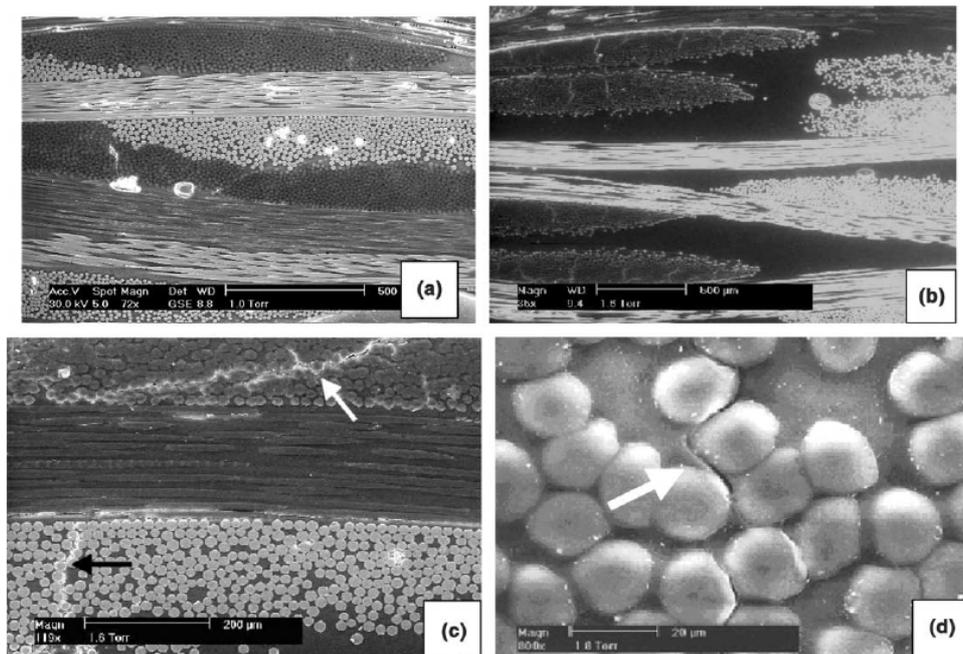


Figura 7 – Análise por MEV do compósito constituído de aramida/vidro/epóxi (laminado) na condição seca (a, c); condição úmida saturada (b, d). As setas mostram a delaminação e a trinca interfacial entre a aramida (seta branca) e o vidro (seta preta) (IMIELINSKA; GUILLAUMAT, 2004).

Observa-se ainda, que as trincas também estão presentes nas regiões das fibras de vidro (seta preta na Figura 7(c)), indicando que não há dúvida que a incompatibilidade higrotérmica da fibra-matriz deu origem à trinca na interface do compósito. Nesse estudo, os pesquisadores concluem que o envelhecimento em imersão em água afetou a integridade da microestrutura nos dois materiais utilizados nos compósitos, causando numerosos defeitos internos, e que a resistência à compressão dos dois materiais sofreu uma redução de 28%, devido à absorção de água.

2.6 Tração longitudinal

O principal papel das fibras é o de suportar carga, principalmente em tração. Quando a fibra encontra-se sozinha (sem a matriz em torno dela) e rompe, ela não pode executar o seu papel de suportar a carga de tração. Quando as fibras são envoltas pela matriz, a matriz age

como uma ponte sobre a fibra quebrada e transmite a carga através da lacuna criada, para as fibras adjacentes (Figura 8). Compósitos reforçados com fibras contínuas possuem o limite de resistência à tração superior ao do feixe de fibras secas (sem matriz) devido ao desalinhamento das fibras sem resina.

Danos na matriz frequentemente ocorrem em compósitos laminados e, geralmente, não resultam em falha final do laminado. Contudo, a fissura da matriz tem muitos efeitos prejudiciais, como: facilitam a absorção de umidade, reduzem a rigidez dominante da matriz do laminado e podem se propagar na interface entre as camadas adjacentes, iniciando uma delaminação (KOLLÁR; SPRINGER, 2003).

A delaminação, por sua vez, reduz a resistência à flexão e rigidez, assim como a capacidade do laminado de suportar carga sob tração e compressão. Sob cargas repetidas o tamanho da delaminação pode aumentar a um ponto crítico. Uma vez que esse tamanho crítico é alcançado, o crescimento da delaminação torna-se instável, levando a uma rápida perda da resistência à tração (KOLLÁR; SPRINGER, 2003; CÂNDIDO, 2007).

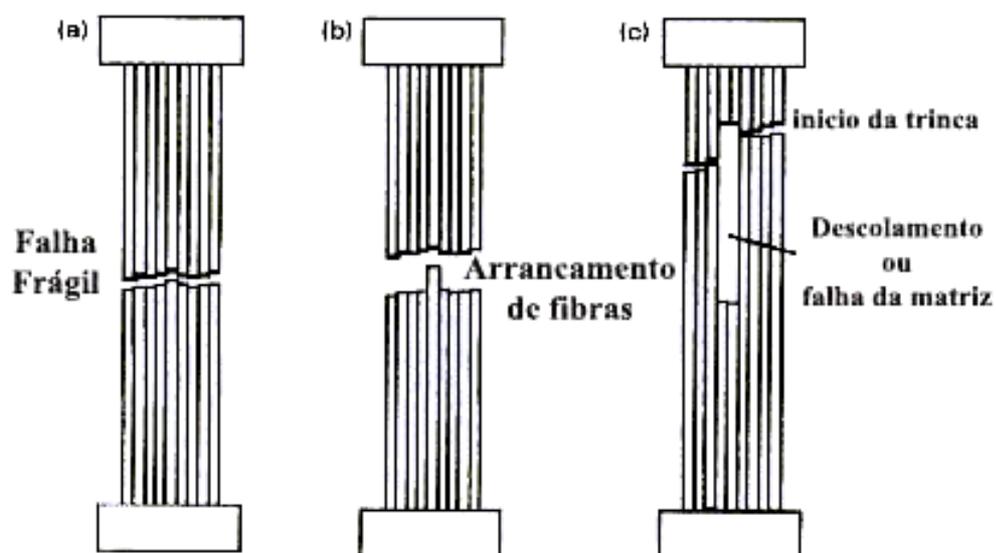


Figura 8 - Esquema de fratura por tração longitudinal (adaptado de SMITH, 1987).

2.7 Tração transversal

Na tração transversal, a falha começa nas inclusões e espalha-se radialmente conforme mostrado na Figura 9. Os padrões radiais ondulados, em compósitos, podem ser vistos por meio das pontas das fibras quebradas.

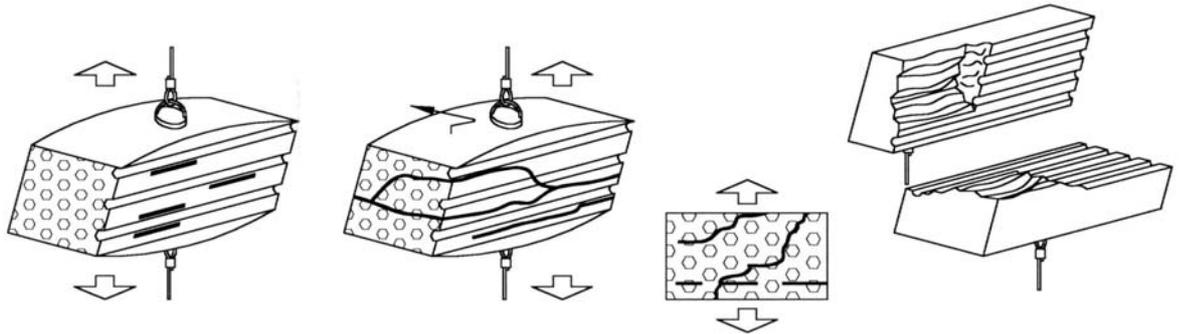


Figura 9 - Esquemas de fratura por tração transversal (SMITH, 1987; FRANCO, 2003; CUNHA, 2004).

Em materiais muito frágeis, a trinca pode se propagar diametralmente através das fibras. Pode ocorrer, também, em alguns compósitos, a fratura na resina, deixando uma camada de matriz sobre as fibras. Esse aspecto ocorre quando a adesão fibra/matriz é muito mais resistente que a resina ao redor da fibra (PURSLOW, 1986; FRANCO, 2003).

2.8 Cisalhamento interlaminar

Os compósitos de matriz polimérica são uma das principais aplicações das fibras de carbono. A interface entre as fibras de carbono e a resina da matriz tem um papel crítico no controle geral das propriedades dos compósitos, assim como na resistência, na ductibilidade à fratura e na estabilidade ambiental. As características da interface determinam de que maneira as cargas podem ser transferidas do polímero para a fibra, sendo frequentemente quantificados em termos de resistência ao cisalhamento interlaminar (ILSS) (XU, 2007).

Nas tensões de cisalhamento, a falha idealmente ocorre por cisalhamento interlaminar das camadas ao longo do plano horizontal. A aparência macroscópica da falha em cisalhamento é sem brilho e esbranquiçada. Particularmente, para o caso da falha interlaminar, a fratura tende a ocorrer na região rica em resina entre as lâminas e, assim, permanece plana (PURSLOW, 1986; SMITH, 1987). Muitas vezes, a falha ocorre fora do plano médio esperado, pois não é possível eliminar os efeitos de flexão. Por isso, esse ensaio não é adequado para a geração de dados de projeto. Os tipos de falhas válidos e não válidos possíveis de ocorrer nos corpos de prova de resistência ao cisalhamento interlaminar estão apresentados na Figura 10.

RAY (2006) destaca em seu estudo que, a temperatura elevada durante o envelhecimento higrotérmico não somente aumenta a velocidade de absorção de umidade pelo compósito, mas também pode modificar o local de início da tensão requerida para a nucleação da delaminação. A temperatura elevada atua como um ativador da difusão das moléculas de água através do compósito. O baixo valor de ILSS obtido para um mesmo nível de absorção de umidade, em presença de temperatura elevada, pode ser atribuído à acentuada degradação da interface do compósito, que ocorre em consequência da temperatura.

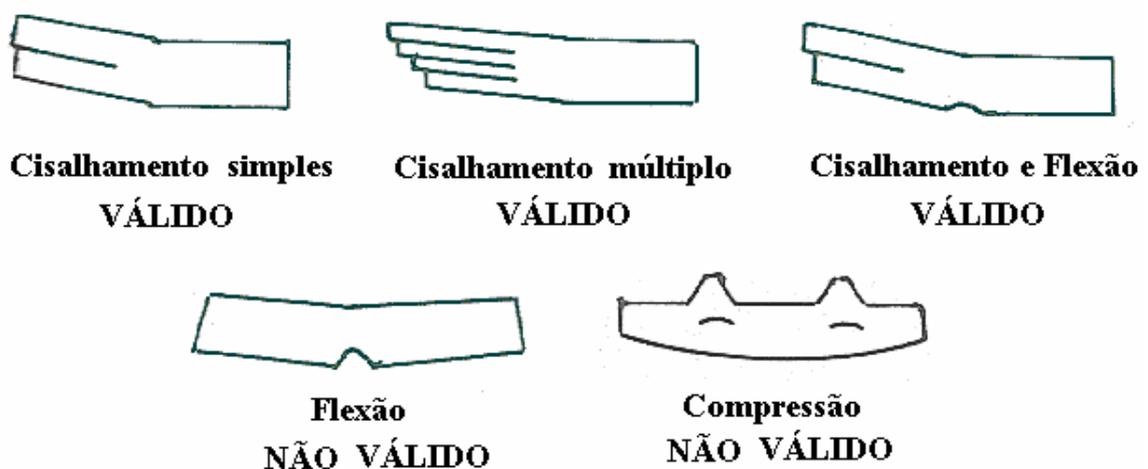


Figura 10 - Modos de falhas possíveis de ocorrer em cisalhamento interlaminar (CARLSSON; PIPES, 1997; COSTA, 2002; FRANCO, 2008).

O ensaio de ILSS realizado à temperatura ambiente reflete a natureza irreversível da falha da interface promovido pela exposição do compósito a ambiente com temperatura elevada. É razoável concluir que a região da interface, nos compósitos de carbono/epóxi e de vidro/epóxi, é mais afetada pelo envelhecimento higrotérmico na condição de temperatura elevada e pelo maior tempo de exposição (no qual o compósito absorve maior quantidade de umidade). O estudo de RAY (2006) mostra, ainda, que a redução nos valores de ILSS é significativa tanto nos compósitos de fibra de vidro como nos de fibra de carbono, para um mesmo nível de absorção de umidade e na condição de temperatura elevada. O autor atribui essa redução drástica nos valores de ILSS tanto ao processo e forma de difusão da umidade no interior do compósito, quanto ao fenômeno de degradação interfacial que ocorre em compósitos poliméricos.

3 Materiais e métodos

Este capítulo apresenta os materiais utilizados na preparação dos corpos de prova avaliados, os tipos de condicionamentos a que esses foram submetidos (umidade, temperatura, ambiente salino, ozônio e imersão em água), os ensaios mecânicos realizados, juntamente com os parâmetros experimentais adotados, para a obtenção das propriedades mecânicas e, finalmente, as condições experimentais da caracterização dos materiais por análises dinâmico-mecânicas.

3.1 Produção do compósito

A matéria-prima mais comumente utilizada na fabricação de compósitos estruturais termorrígidos é denominada de material pré-impregnado ou *pregreg*. Esse material é produzido a partir de fibras na forma de fita unidirecional contínua (*tape*) ou entrelaçadas como tecido bidirecional (por exemplo: o *plain weave*), sendo ambos os tipos previamente impregnados com uma matriz polimérica termorrígida.

O reforço utilizado na fabricação dos *pregregs* para a fabricação dos corpos de prova (cdps), avaliados neste trabalho, foi a fibra de carbono de alta resistência, módulo intermediário (IM7) (módulo de elasticidade de, aproximadamente, 276 GPa), possuindo massa específica de $1,78 \text{ g.cm}^{-3}$, deformação máxima de 1,8%, e previamente tratada para uma maior compatibilidade química com a resina epóxi modificada, de alta resiliência e resistência ao impacto (HEXCEL COMPOSITES, 2009). Todos os pré-impregnados utilizados neste trabalho foram produzidos pela empresa *Hexcel Composites* e fornecidos pela EMBRAER na forma de placas, com reforços de tecido estilo *plain weave* (PW) e

unidirecional (*tape*), ambos de carbono, impregnados com resina epóxi 8552. Os materiais *prepregs* utilizados são codificados pelo fabricante, ou seja:

- T-T145-12"-F8552, onde a primeira letra T significa *tape* e a segunda que a fibra é de carbono de módulo padrão T300 com 6000 filamentos por cabo, 145 indica o tratamento superficial dado à fibra de carbono para maior compatibilidade química com o sistema de impregnação, 12" (30,48 cm) é a largura do tecido e F8552 é o sistema de resina epóxi utilizado no *prepreg*.
- FT145-12"-F8552, onde a letra F significa *fabric* (tecido) e a letra T que a fibra é de carbono de módulo padrão T300 com 6000 filamentos por cabo, 145 indica o tratamento superficial dado à fibra de carbono para maior compatibilidade química com o sistema de impregnação, 12" (30,48 cm) é a largura do tecido e F8552 é o sistema de resina epóxi utilizado no *prepreg*.

Os anexos A e B apresentam as fichas informativas dos materiais estudados, que apresentam separadamente informações do reforço de fibra de carbono IM7 e do sistema de matriz epóxi 8552.

A cura do compósito de pré-impregnado deve ser realizada em autoclave pelo processo a vácuo para garantir a porcentagem volumétrica de fibra (~60% em volume) e a adesão entre as camadas do laminado. No caso de reforços com fitas unidirecionais de fibras de carbono tem-se a vantagem de obtenção dos melhores resultados de propriedades de engenharia, com economia de peso, devido ao conteúdo de filamentos por cabo de fibras ser arranjado de forma unidirecional, facilitando a melhor consolidação do laminado. Também, a distribuição de resina por unidade de área nos *prepregs* é cuidadosamente controlada durante o processo de fabricação do pré-impregnado, proporcionando uma boa distribuição do impregnante no produto laminado final (CÂNDIDO, 2001).

Todos os laminados deste estudo foram curados em autoclave de acordo com o ciclo de cura sugerido pelo fornecedor dos pré-impregnados na EMBRAER. A autoclave é um vaso de pressão que permite a aplicação de forma combinada de pressão, calor e vácuo para a consolidação do laminado, favorecendo de maneira controlada as reações de reticulação da resina, transformando-a em um termorrígido.

A Figura 11 mostra o gráfico do ciclo de cura utilizado para a consolidação dos laminados de fibra de carbono/epóxi 8552. O ciclo de cura é composto de 5 etapas: aquecimento até 116°C à taxa de aquecimento de 2,5°C/min; isoterma a 116°C por 60 min; aquecimento de 116°C até 177°C à taxa de aquecimento de 2,5°C/min, isoterma a 177°C por 120 min e resfriamento até 65°C à taxa de resfriamento de 2,5°C/min. A aplicação da pressão de 0,69 MPa foi realizada a 116°C (CUNHA, 2006) .

Os compósitos utilizados neste estudo foram obtidos de famílias de pré-impregnados de fitas unidirecionais e de tecidos de carbono/resina epóxi, de onde foram preparados os corpos de prova para os ensaios de resistências ao cisalhamento interlaminar, à compressão, à tração longitudinal e à tração transversal, tanto à temperatura elevada ($82 \pm 1^\circ\text{C}$) como à temperatura ambiente ($22 \pm 3^\circ\text{C}$).

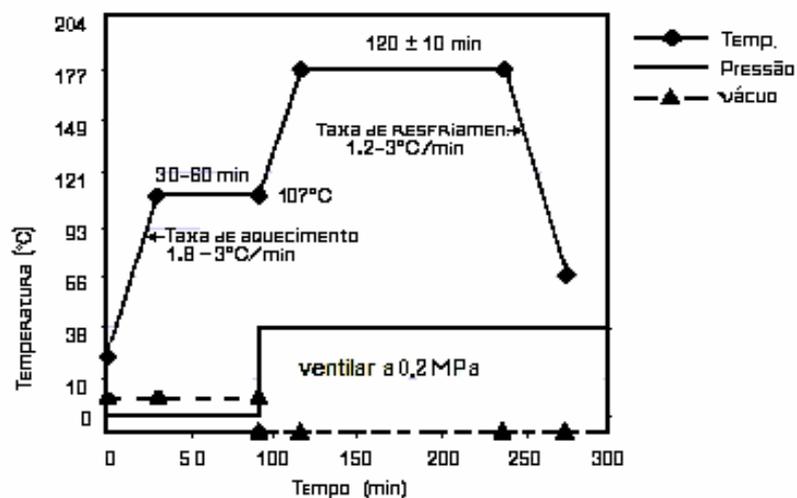


Figura 11 - Ciclo de cura em autoclave utilizado na cura da resina epóxi 8552 (HEXCEL COMPOSITES, 2007).

3.2 Matrizes de testes

Para as atividades experimentais desta pesquisa, os corpos de prova foram divididos em cinco famílias: a primeira foi mantida em condição ambiente normal do laboratório, denominada como seco ou sem condicionamento, a segunda foi exposta a uma câmara de climatização, a terceira foi exposta a uma câmara de névoa salina, a quarta foi exposta a imersão até a saturação de umidade e a quinta foi submetida a uma câmara de ozônio. Posteriormente, foram feitos ensaios de resistências ao cisalhamento interlaminar, à compressão, à tração longitudinal e à tração transversal às temperaturas ambiente ($22 \pm 3^\circ\text{C}$) e elevada ($82 \pm 1^\circ\text{C}$). Os ensaios realizados à temperatura elevada visam atender aos requisitos recomendados pela norma MIL-HDBK-17 - 02, editada e publicada pelo governo dos Estados Unidos da América para materiais compósitos, que considera a condição mais crítica para o ensaio de um compósito polimérico.

As Tabelas 1 a 4 apresentam as matrizes de testes dos corpos de prova utilizados neste trabalho.

Tabela 1 - Tabela de teste dos corpos de prova de resistência à tração longitudinal.

Condicionamento	Laminado				Propriedade ensaiada
	Unidirecional		Tecido		
	Temperatura de ensaio				
	22°C	82°C	22°C	82°C	
Seco*	6	6	6	6	Tração Longitudinal
Câmara higrotérmica	6	6	6	6	Tração Longitudinal
Câmara de névoa salina	6	6	6	6	Tração Longitudinal
Câmara de ozônio	6	6	6	6	Tração Longitudinal
Imersão	6	6	6	6	Tração Longitudinal

*sem condicionamento

Tabela 2 - Tabela de teste dos corpos de prova de resistência à tração transversal.

Condicionamento	Laminado		Propriedade ensaiada
	Unidirecional		
	Temperatura de ensaio		
	22°C	82°C	
Seco*	6	6	Tração Transversal
Câmara higrotérmica	6	6	Tração Transversal
Câmara de névoa salina	6	6	Tração Transversal
Câmara de ozônio	6	6	Tração Transversal
Imersão	6	6	Tração Transversal

*sem condicionamento

Tabela 3 - Matriz de teste dos corpos de prova de resistência ao cisalhamento interlaminar (ILSS).

Condicionamento	Laminado				Propriedade ensaiada
	Unidirecional		Tecido		
	Temperatura de ensaio				
	22°C	82°C	22°C	82°C	
Seco*	6	6	6	6	Cisalhamento interlaminar
Câmara higrotérmica	6	6	6	6	Cisalhamento interlaminar
Câmara de névoa salina	6	6	6	6	Cisalhamento interlaminar
Câmara de ozônio	6	6	6	6	Cisalhamento interlaminar
Imersão	6	6	6	6	Cisalhamento interlaminar

*sem condicionamento

Tabela 4 - Tabela de teste dos corpos de prova de resistência à compressão (IITRI).

Condicionamento	Laminado				Propriedade ensaiada
	Unidirecional		Tecido		
	Temperatura de ensaio				
	22°C	82°C	22°C	82°C	
Seco*	6	6	6	6	Compressão
Câmara higrotérmica	6	6	6	6	Compressão
Câmara de névoa salina	6	6	6	6	Compressão
Câmara de ozônio	--	--	6	6	Compressão
Imersão	6	6	6	6	Compressão

*sem condicionamento

3.3 Identificação dos corpos de prova

Cada família de laminados é única na combinação do tipo de material, propriedade mecânica, condição ambiental e temperatura de condicionamento. Para facilitar a apresentação dos resultados dos ensaios de resistência é feita a identificação individual dos corpos de prova, adotando-se uma notação estenográfica representada por códigos conforme a nomenclatura:

XXWWWYYZZ

A informação está dividida em quatro partes: 1ª) o símbolo indica que o laminado pertence à família conforme o tipo de material utilizado, onde: PW = *plain weave* e TP = *tape*; 2ª) consiste do símbolo para representar o tipo de ensaio mecânico a que os corpos de prova foram submetidos, podendo ser cisalhamento interlaminar = CIS, tração transversal = TRT ou longitudinal = TRL, e compressão = COM; 3ª) indica qual o condicionamento ambiental em que os corpos de prova foram submetidos, sendo CC para câmara de climatização, SS para *salt spray*, IM para imersão, CO para câmara de ozônio e SC para os corpos de prova sem condicionamento (referência); 4ª) possui o símbolo que indica a informação da temperatura em que os ensaios foram executados, TA para os corpos de prova ensaiados em temperatura ambiente (22°C) e TE para aqueles ensaiados em temperatura elevada (82°C). Uma ilustração dessa estenografia é exemplificada na figura 12:

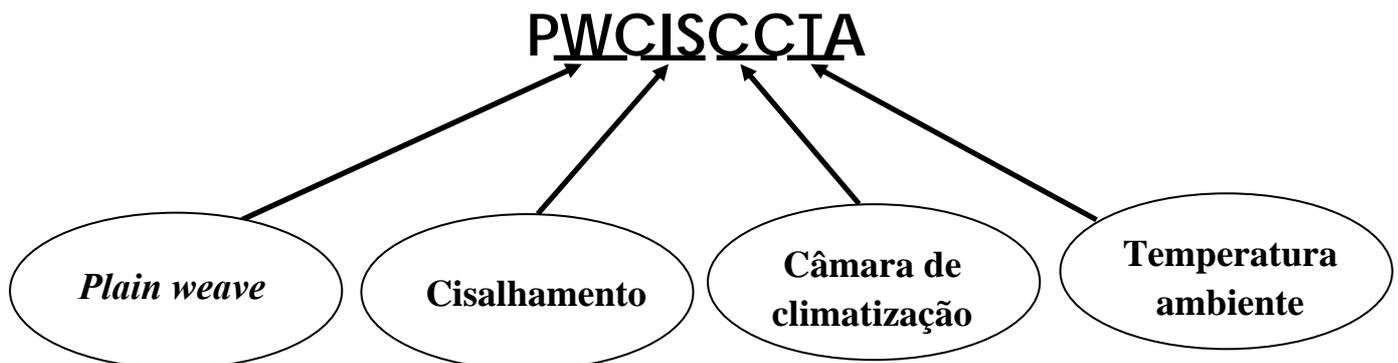


Figura 12 – Ilustração estenográfica da identificação dos corpos de prova.

3.4 Condicionamento ambiental

Para avaliar os efeitos dos condicionamentos ambientais nos compósitos poliméricos estudados foram fabricados 120 corpos de prova de cisalhamento interlaminar, 108 de compressão, 120 de tração longitudinal e 60 de tração transversal, que foram submetidos a quatro diferentes condicionamentos higrotérmicos.

O primeiro condicionamento de corpos de prova foi realizado em uma câmara de névoa salina, pela exposição dos cdps a uma solução de cloreto de sódio (NaCl) em um equipamento também conhecido como *salt spray*. Outro conjunto de amostras foi condicionado pela exposição higrotérmica em água destilada e temperatura elevada em uma câmara de climatização. O terceiro condicionamento foi realizado por meio de imersão dos corpos de prova em água destilada em um recipiente e o quarto foi realizado em uma câmara de ozônio.

Antes de iniciar qualquer condicionamento, todos os corpos de prova foram secados em estufa ($60 \pm 2^\circ\text{C}$) por quatro horas. Após esse período, as amostras de acompanhamento foram rapidamente removidas da estufa para um dessecador até que atingissem a temperatura ambiente e pesadas em balança analítica, marca Mettler-Toledo modelo AB-204-S, com resolução de $\pm 0,1$ mg, alocada no Laboratório de Físico-Química da Divisão de Materiais do IAE/CTA, enquanto os outros corpos de prova permaneciam na estufa. Este procedimento foi realizado com base na norma ASTM C 562 - 10 e a operação repetida várias vezes até que a massa seca das amostras ficasse constante, com precisão de $\pm 0,002$ g. Em seguida, esses corpos de prova e amostras de acompanhamento foram transferidos para os seus respectivos ambientes de condicionamento e iniciados os ensaios.

3.4.1 Condicionamento por imersão

Os condicionamentos por imersão foram realizados conforme previsto pela norma ASTM D570-10 para verificar a resistência dos corpos de prova em condição extrema de umidade. Os corpos de prova foram imersos em água destilada, à temperatura ambiente de $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Para a exposição foi utilizado um béquer com um volume de água destilada suficiente para cobrir os corpos de prova, devidamente vedado para evitar a evaporação da água (Figura 13). Os cdps colocados em água permaneceram neste meio durante tempo e temperatura controlados e, posteriormente, retirados da exposição para que fossem submetidos aos ensaios mecânicos.



Figura 13 - Béquer utilizado para o condicionamento dos corpos de prova em água.

3.4.2 Câmara de névoa salina (*salt spray*)

O condicionamento em câmara de névoa salina foi realizado segundo a norma ASTM B 117 – 09, para verificar a resistência dos corpos de prova em condição salina. As amostras de acompanhamento e os corpos de prova foram suspensos entre 15° e 30° na vertical,

paralelos à direção principal do fluxo horizontal de névoa através da câmara, posicionados de forma a não permitir o contato entre eles. A solução salina foi preparada pela dissolução de 5 partes de cloreto de sódio em 95 partes de água destilada, com pH na faixa de 6,5 a 7,2.

Os corpos de prova foram expostos à temperatura de 35°C, sendo que, para obter a saturação da solução salina, os valores recomendados pela norma são de temperatura igual a 46°C e pressão de 9,81 N/cm². Estes parâmetros foram programados em uma câmara de névoa salina da marca Equilam – modelo SSE-500, calibrada para manter por monitoração automática o valor da temperatura na faixa de +1,1°C a -1,7°C (Figura 14), por um período de sete semanas.

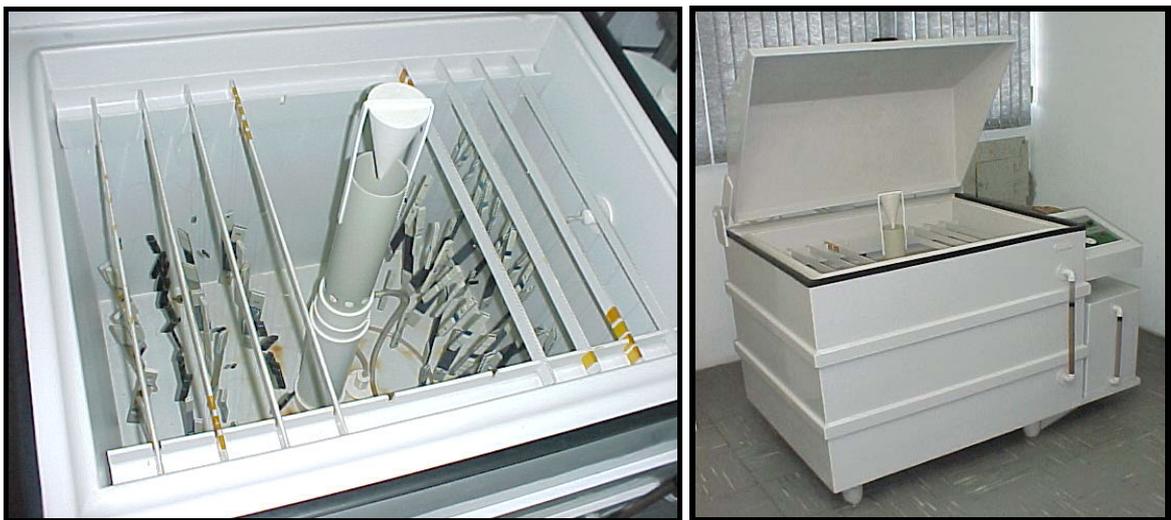


Figura 14 - Câmara de névoa salina utilizada, marca Equilam, mod. SSE 500.

3.4.3 Câmara de climatização

A exposição higrotérmica em câmara de climatização foi baseada no Procedimento B da norma ASTM D 5229-10 para materiais compósitos a serem submetidos a ensaios mecânicos na condição úmida. Os corpos de prova foram expostos à temperatura de 80°C, que é o máximo valor recomendado pela norma para matriz epóxi curada a 177°C. O teor de umidade relativa escolhido foi de 90%, por um período de nove semanas (período para se

atingir a saturação de umidade). Estes parâmetros foram programados em uma câmara de condicionamento higrotérmico Climats-Sapratin - modelo Excal 2214-HE, calibrada para manter por monitoração automática o valor da temperatura na faixa de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ e o teor de umidade relativa na faixa de $\pm 1\%$ (Figura 15).

O controle do ganho de massa até atingir o limite efetivo de saturação do compósito, ou seja, até que a massa das amostras de acompanhamento permanecesse constante, foi realizado por medidas de massa, semanalmente, pela retirada dos corpos de prova de acompanhamento, enquanto os outros cdps permaneciam na câmara, de maneira similar ao descrito no item 3.4. Neste caso, sempre o mesmo operador realizava uma rápida secagem do cdp com papel absorvente antes da pesagem, procurando executar esta atividade da maneira mais sistemática possível, de modo a diminuir a influência do procedimento experimental utilizado. Este procedimento foi realizado até que o corpo de prova de acompanhamento não mais apresentasse variação de massa, processo que leva em média de 8 a 10 semanas.

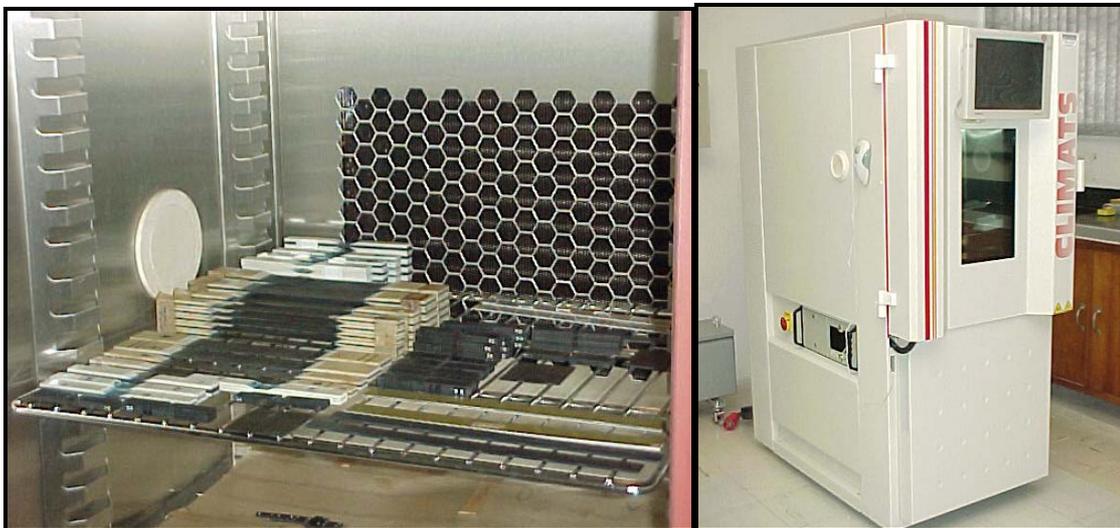


Figura 15 - Câmara de climatização utilizada, marca Climats-Sapratin, mod. Excal 2214-HE.

3.4.4 Câmara de climatização em ozônio

A exposição em câmara de ozônio (O_3) foi realizada conforme previsto pela norma ASTM D1149-07. Este ensaio permite verificar a resistência do material ao intemperismo em ambiente de gás ozônio. Basicamente, o ensaio consiste em um tubo (dielétrico), no qual passa o oxigênio, onde uma descarga elétrica constante (efeito corona), gerada através de um transformador nele existente, transforma a molécula de oxigênio (O_2) em uma molécula de ozônio (O_3), pela adição de um átomo de oxigênio. A seguir, o gás (ozônio) é succionado por um sistema “Venturi” e misturado com a água a ser tratada, em um misturador que opera na sua linha principal de água, que recebe o ozônio proveniente do gerador ou no presente caso do tratamento do ar (OZONTECHNIK DO BRASIL, 2003).

Os corpos de prova do material compósito em estudo foram expostos à atmosfera de ozônio, na concentração de 50 ppm (partes por milhão) pelo período de 72 horas, à temperatura de $40 \pm 1^\circ C$, conforme recomendado pela norma. Os parâmetros foram programados em uma câmara de ozônio da marca Gramma, conforme mostrado na Figura 16.



Figura 16 - Câmara de ozônio utilizada, marca Gramma.

3.5 Caracterização mecânica

3.5.1 Resistências à tração longitudinal e transversal

As geometrias dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de resistências à tração transversal e longitudinal atendem a norma ASTM D 3039-08 (Figura 17). Os *tabs* dos cdps para fixação na máquina de ensaios são de fibra de vidro, sendo colados nas extremidades dos corpos-de-prova.

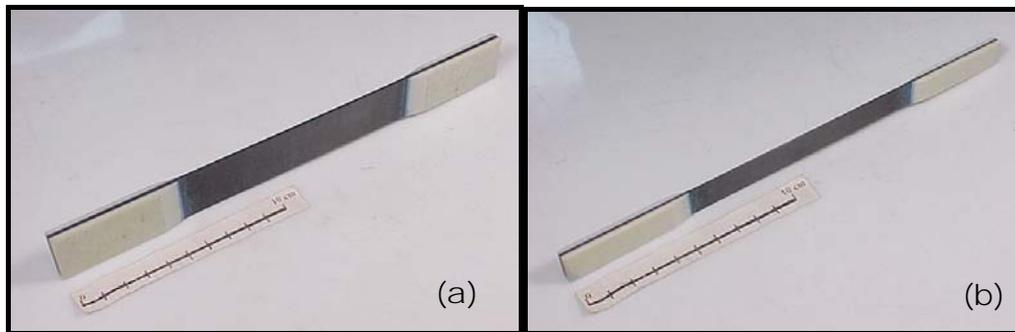


Figura 17 - Corpos de prova utilizados nos ensaios de tração: (a) transversal e (b) longitudinal.

Os corpos de prova mantidos na condição ambiente e os submetidos aos diferentes condicionamentos foram ensaiados conforme a norma ASTM D 3039-08. Dos 108 corpos de prova condicionados em câmara de climatização, em câmara de névoa salina e em imersão em água, 54 foram removidos dos ambientes de condicionamento, colocados em dessecador sem sílica previamente ao ensaio e, imediatamente, ensaiados à temperatura ambiente, em uma máquina universal de ensaios Instron modelo 1332, com capacidade de aplicar carga até 150 kN, localizada no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Divisão de Materiais do IAE/CTA (Figura 18).



Figura 18 - Máquina universal de ensaios Instron mod. 1332 utilizada.

O restante dos corpos de prova foi removido das câmaras, embalados em folha de alumínio e selados em sacos plásticos e transferidos para o local onde os ensaios foram executados. Esta fase do trabalho foi realizada no menor período de tempo possível e os ensaios ocorreram à temperatura elevada (82°C), em uma máquina universal de ensaios, com célula de carga de 100 kN, alocada no Laboratório de Ensaios Mecânicos da FEG/UNESP (Figura 19). Os corpos de prova foram fixados de modo que seus eixos coincidisse com a linha de centro da garra, usando um esquadro para minimizar algum possível desalinhamento.

As resistências à tração longitudinal e transversal foram calculadas de acordo com a Equação 1, dada pela norma ASTM D 3039-08:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \quad (1)$$

onde: σ = resistência à tração máxima aplicada ao corpo de prova, em MPa;

F = carga de ruptura, em N e

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

Com a aplicação da carga, as deformações que ocorreram no corpo de prova foram uniformemente distribuídas, pelo menos até atingir a carga máxima, permitindo medir a resistência do compósito. Os ensaios às temperaturas ambiente e elevada foram realizados com velocidade de $1,27 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. No ensaio de tração longitudinal, a maior concentração de esforços está no reforço, já que este está alinhado no sentido de carregamento da máquina, enquanto que, no ensaio de tração transversal, o maior esforço é aplicado na resina, principalmente no caso dos compósitos unidirecionais, onde todas as fibras estão orientadas perpendicularmente ao eixo de solitação do esforço (FRANCO, 2003; BERTHELOT; SEFRANI, 2007).

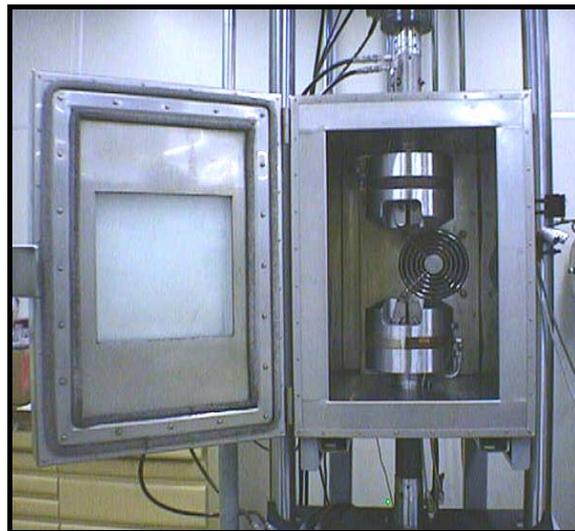


Figura 19 - Máquina universal de ensaios com câmara a quente, utilizada.

3.5.2 Resistência ao cisalhamento interlaminar

O método de ensaio de resistência ao cisalhamento interlaminar mais utilizado para determinar esta propriedade de compósitos é o ensaio de cisalhamento em três pontos, denominado *short-beam shear test*, normalizado pela ASTM D 2344-06. Estudos realizados por XIE e ADAMS (1995), utilizando a análise por elementos finitos, comprovam que as

amostras de *short-beam shear test* devem falhar no centro, mostrando que o método de ensaio de cisalhamento em três pontos concorda com os dados experimentais.

Esse ensaio, também conhecido como ILSS (*Interlaminar Shear Strength*), é recomendado para avaliação e controle da qualidade dos materiais, por ser simples e rápido na avaliação das condições de processamento de compósitos (CARLSSON; PIPES, 1997; COSTA, 2002).

O método de cisalhamento em três pontos descrito na norma estabelece a utilização de uma amostra retangular apoiada em dois cilindros de sustentação, que permitem o movimento lateral. A carga é aplicada por um cilindro de carregamento no centro do comprimento da amostra. Para os compósitos reforçados com fibras de carbono, a norma recomenda ainda que os corpos de prova tenham razão comprimento útil/espessura de no mínimo 4 e razão comprimento/espessura de no mínimo 6. Assim sendo, foram utilizados 60 corpos de prova com as camadas unidirecionais das fibras dispostas no sentido longitudinal, com dimensões de, aproximadamente, 18,9 mm x 6,4 mm x 2,6 mm, e mais 60 corpos de prova contendo camadas de tecido com dimensões de, aproximadamente, 18,3 mm x 6,1 mm x 3,3 mm (Figura 20).

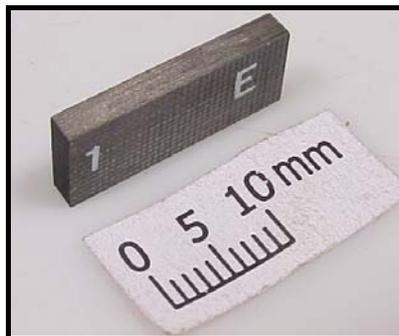


Figura 20 - Corpo de prova de cisalhamento interlaminar.

Este método de ensaio foi realizado à temperatura ambiente, em uma máquina universal de ensaios Instron modelo 4301, com célula de carga de 5 kN, alocada no

Laboratório de Ensaios Mecânicos do IAE/CTA (Figura 21a) e em temperatura elevada (82°C) em uma máquina universal de ensaios com célula de carga de 100 kN, alocada no Laboratório de Ensaios Mecânicos da FEG/UNESP. O dispositivo de ensaio utilizado usa o sistema de fixação do ensaio de flexão em três pontos, onde as extremidades dos corpos de prova são apoiadas em dois suportes do dispositivo de ensaio com 3,30 mm de diâmetro, espaçados em um vão com uma razão vão/espessura (v/e) recomendada de 4:1 para os compósitos reforçados com fibras de carbono. A carga é aplicada no ponto médio do corpo de prova por um rolete de 6,36 mm de diâmetro, a uma velocidade de $1,3 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ até o laminado falhar (Figura 21b) (CARLSSON; PIPES, 1997; CUNHA, 2004).

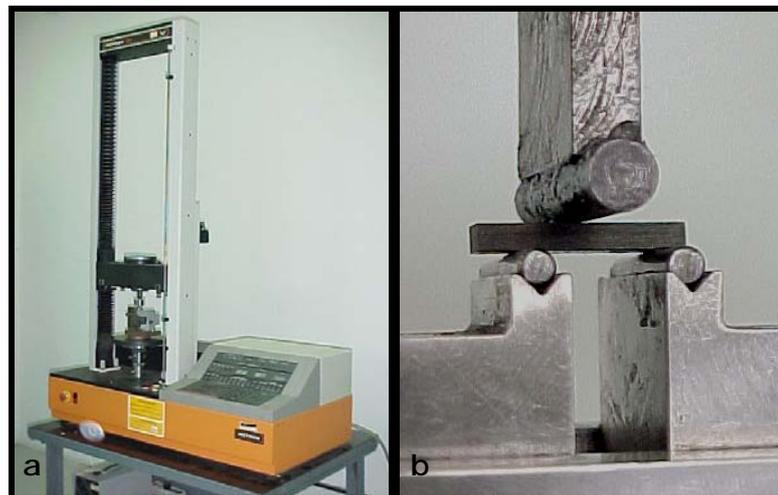


Figura 21 - (a) Máquina universal de ensaios Instron mod. 4301 utilizada, (b) Posicionamento do corpo de prova no dispositivo para ILSS.

A máxima tensão de cisalhamento normalmente ocorre no plano médio do laminado por ser suficientemente pequena a relação entre o vão dos suportes e a espessura dos corpos de prova e a falha idealmente ocorre por cisalhamento interlaminar das camadas ao longo do plano horizontal. Esse método de ensaio é sensível ao alinhamento das fibras e à qualidade de acabamento da superfície do laminado.

A resistência ao cisalhamento interlaminar pode ser calculada pela Equação 2 dada pela norma ASTM D 2344-06 (Figura 22) (RAY, 2006; BOTELHO; PARDINI; REZENDE, 2007):

$$\tau_{m\acute{a}x} = 0,75 \frac{P_{m\acute{a}x}}{le} \quad (2)$$

onde : $\tau_{m\acute{a}x}$ = resistência ao cisalhamento interlaminar, em MPa;

$P_{m\acute{a}x}$ = carga máxima de ruptura, em N;

l = largura do corpo de prova, em mm ,

e = espessura do corpo de prova, em mm.

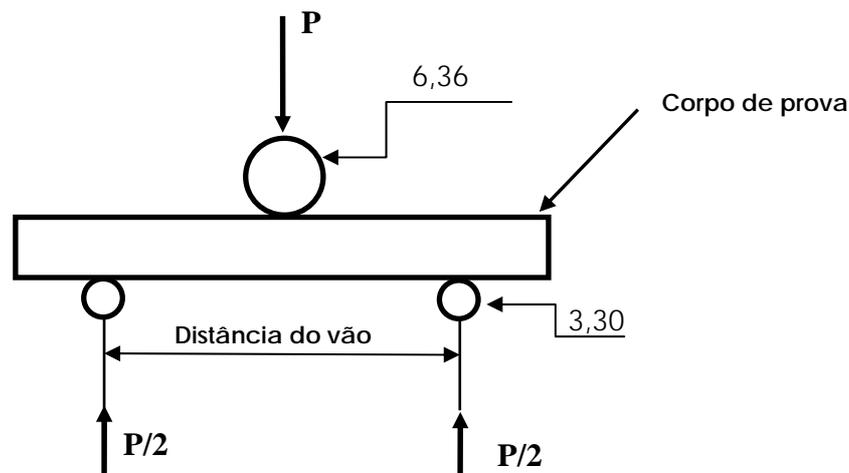


Figura 22- Esquema do posicionamento do cdp no ensaio de cisalhamento (*short beam*).

3.5.3 Resistência à compressão

Os corpos de prova utilizados no ensaio de resistência à compressão, fabricados com fita unidirecional e tecido, tiveram *tabs* colados na extremidade para fixação na máquina de ensaio. Porém, esses *tabs* foram de fibra de carbono medindo, aproximadamente, 65,2 mm x 25,1 mm. Assim, foram utilizados 48 cdps contendo a família de compósito unidirecional que apresentaram dimensões de, aproximadamente, 76,7 mm x 12,8 mm x 1,6 mm (Figura 23a) e

mais 60 corpos de prova contendo a família de tecido com dimensões de, aproximadamente, 140 mm x 25,2 mm x 2,03 mm (Figura 23b).

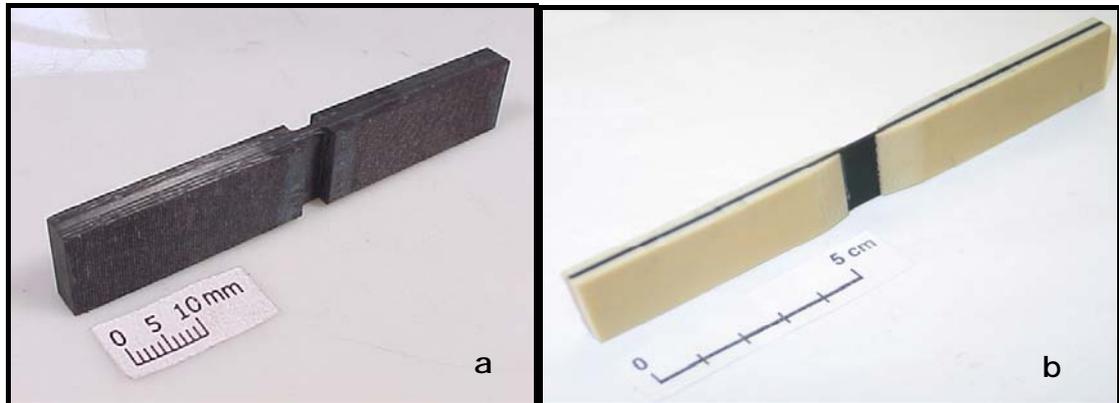


Figura 23 - Corpos de prova utilizados nos ensaios de compressão: (a) laminado unidirecional e (b) tecido.

Para a realização dos ensaios de compressão, foi utilizado o teste do tipo IITRI (desenvolvido pelo *Illinois Institute of Technology Research Institute*), que segue a norma ASTM D 3410-08, em uma máquina universal de ensaios MTS, com célula de carga de 100kN, alocada no Laboratório de Ensaios Mecânicos da EMBRAER.

Este dispositivo utiliza um corpo de prova relativamente pequeno e possui mancais deslizantes e colunas de aço para garantir o alinhamento no carregamento. As garras na forma de cunhas alojam-se em cavidades usinadas nas bases inferior e superior (Figura 24).

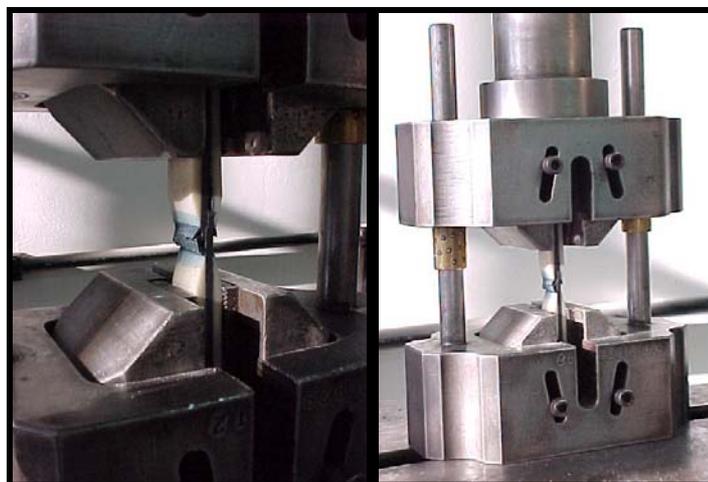


Figura 24 - Dispositivo de ensaio de compressão.

3.6 Análise fractográfica

O exame da microestrutura do compósito fornece informações sobre a morfologia do compósito, orientação e número de camadas, distribuição das fibras na região de fratura, o tamanho e a distribuição de falhas que podem ser causadas por defeitos de fabricação, tais como vazios, objetos estranhos, desalinhamento de fibras, rugas nas camadas, bolsa de resina, além de danos estruturais causados por delaminações e microtrincas (CÂNDIDO, 2001).

Várias técnicas podem ser aplicadas na análise microestrutural dos compósitos, por exemplo, microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV), que revelam os defeitos e dão subsídios de suas formações. Na maioria das situações, essas técnicas são complementares, cada uma delas tendo seu campo específico de aplicação (CUNHA, 2004).

A caracterização microscópica dos compósitos foi realizada utilizando-se um microscópio óptico da marca LEICA, modelo DMRXP. As amostras selecionadas para análise por microscopia óptica são representativas dos diferentes condicionamentos ambientais e dos ensaios mecânicos.

A análise microestrutural da adesão interfacial fibra/resina no plano de falha dos laminados ensaiados em tração, compressão e cisalhamento interlaminar foi realizada nos microscópios eletrônicos de varredura LEO modelo 435 Vpi e Zeiss modelo DSM 950. As análises foram conduzidas no Laboratório Metalográfico da Divisão de Materiais do IAE/CTA.

3.7 Análise estatística dos dados

Para a análise estatística dos dados coletados foi utilizado um programa de computador voltado para fins estatísticos, chamado Minitab. Esse software é muito utilizado nos cursos introdutórios de estatística e em empresas, num nível mais avançado de utilização, tendo funções mais específicas voltadas para gerenciamento e análise para resolução de problemas. Sua interface é parecida com a de uma planilha eletrônica como Microsoft Excel, mas com a capacidade de executar análises estatísticas complexas (CAMPOS, 2003).

O programa foi utilizado para análise exploratória dos dados por meio do Teste de Normalidade, Teste de Homogeneidade de Variâncias e Teste de Hipóteses para médias (método *One-way ANOVA* ou *Two-Sample t*). Essas análises estão evidenciadas nos Apêndices de A a D. Este procedimento de cálculo de base estatística foi realizado conforme recomendado pela norma MIL-HDBK-17 - 02.

O Teste de Normalidade foi utilizado para verificar a normalidade das amostras por meio de um teste de hipóteses para examinar se as observações seguem ou não uma distribuição normal. Para o Teste de Normalidade, as hipóteses são: hipótese nula (H_0), os dados são iguais a uma distribuição normal, versus a hipótese alternativa (H_a), os dados diferem de uma distribuição normal, com nível de significância adotado de 5%.

H_0 : *Todas as Amostras = Normal (Valor $P > 0,05$);*

H_a : *Pelo menos uma Amostra \neq Normal (Valor $P \leq 0,05$).*

Em seguida, foi realizado o teste de homogeneidade de variâncias que utiliza um teste de hipóteses para comparar a variância das amostras, onde é considerado o resultado do teste

de Bartlett se as amostras forem normais, ou utilizado o resultado do teste de Levene, se as amostras não forem normais. O Minitab calcula e exibe uma estatística de teste e um valor-p (probabilidade de significância, que é a adequação de se rejeitar a hipótese nula em um teste de hipóteses) para o teste de Bartlett e para o teste de Levene, em que a hipótese nula (H_0) é a de igualdade de variâncias e a hipótese alternativa (H_a) é a de que ao menos uma variância é diferente das demais, ou seja:

$$H_0 : \text{Variâncias de todas as amostras são iguais (Valor } P > 0,05);$$

$$H_a : \text{Pelo menos uma amostra com variância diferente (Valor } P \leq 0,05).$$

Por último foi aplicado o teste de hipóteses de médias pelo método *One-way ANOVA*, quando as amostras possuem igualdade de variância e usando o método *Two-Sample t*, quando as amostras não possuem desigualdade de variâncias, para testar a hipótese de que as médias de duas ou mais populações são iguais. A análise avalia a importância de um ou mais fatores, comparando as médias da variável resposta nos diferentes níveis dos fatores. A hipótese nula (H_0) supõe que todas as médias populacionais (médias dos níveis dos fatores) são iguais, enquanto a hipótese alternativa (H_a) supõe que a média é diferente (WIKIPEDIA,2005).

A Figura 25 apresenta um fluxograma que resume todo o raciocínio estatístico utilizado para avaliar os dados do presente trabalho.

$$H_0 : \mu_{amostra1} = \mu_{amostra2} \text{ (Valor } P > 0,05);$$

$$H_a : \mu_{amostra1} \neq \mu_{amostra2} \text{ (Valor } P \leq 0,05).$$

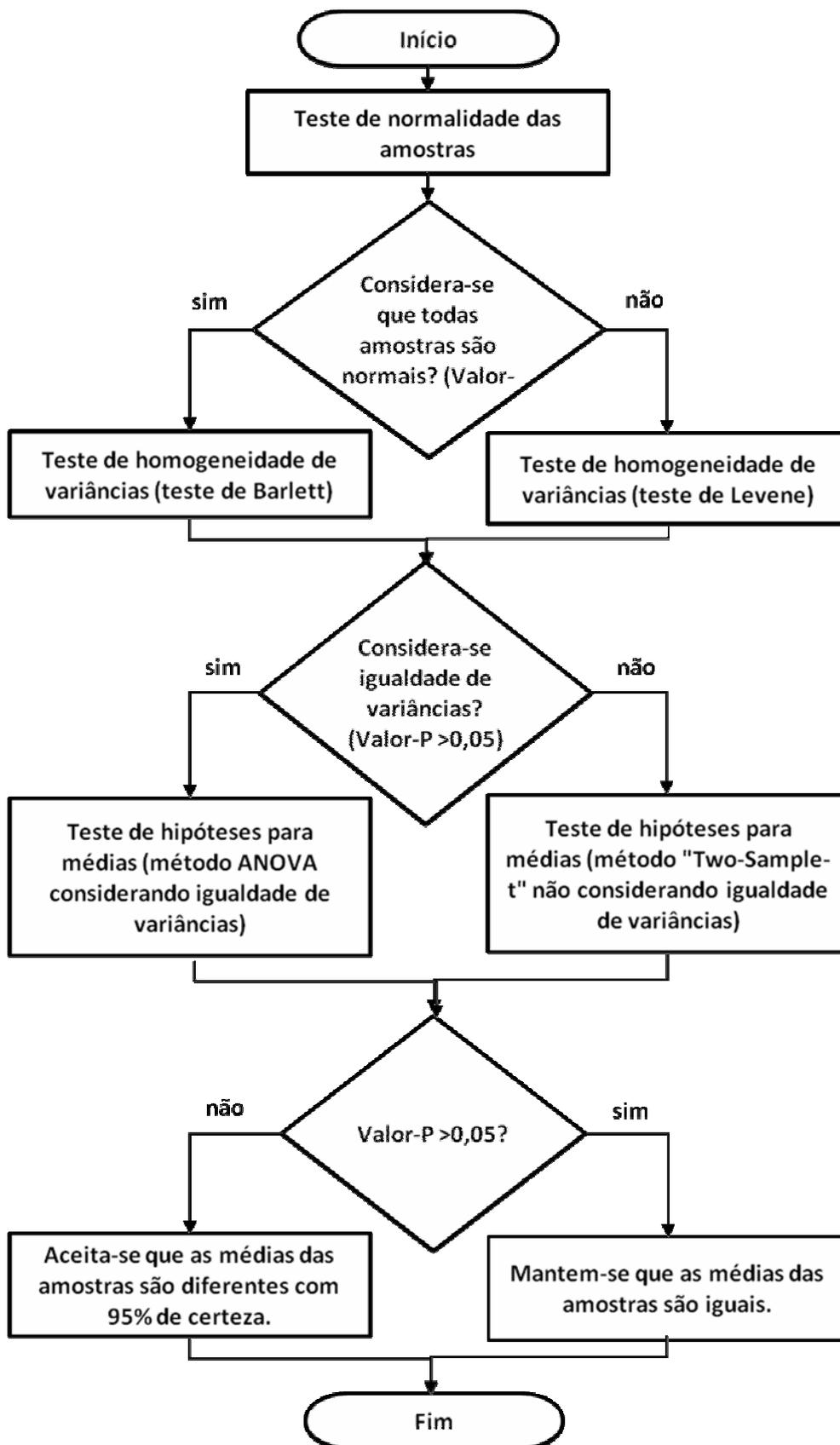


Figura 25 - Fluxograma que resume o raciocínio estatístico utilizado para avaliar os dados do presente trabalho.

4 Resultados e discussão

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos nas caracterizações mecânica e morfológica dos compósitos de resina epóxi F8552 com reforço de carbono unidirecional (*tape*) e dos processados pelo uso de tecido de carbono estilo *Plain Weave*, submetidos a diferentes condicionamentos ambientais. Inicialmente, são mostrados e discutidos os dados dos compósitos unidirecionais, com resultados de ensaios mecânicos (resistências à tração transversal e longitudinal, compressão e cisalhamento interlaminar). Análises por microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura foram conduzidas para complementar a discussão dos resultados. Em seguida, fez-se, de maneira similar, a caracterização dos compósitos com reforço cruzado (tecido).

4.1 Compósito unidirecional

4.1.1 Absorção de umidade

O ganho do teor de umidade foi medido gravimetricamente, isto é, com o controle da mudança na massa da amostra polimérica. Os conteúdos de umidade absorvidos pelas famílias de compósitos unidirecionais de fibras de carbono IM7, impregnadas com resina epóxi F8552, estão apresentados na Tabela 5, como resultado do ganho de massa médio obtido semanalmente nas amostras de acompanhamento, referentes a cada ensaio avaliado.

O cálculo da absorção de umidade em cada lote de compósito exposto ao condicionamento higrotérmico foi medido de acordo com o procedimento B da norma ASTM D 5229-10, definido como a porcentagem do ganho médio de massa expressa pela Equação 3:

$$M \% = \left[\frac{M_u - M_s}{M_s} \right] x 100, \quad (3)$$

onde: M_u é a massa da amostra úmida (g) e M_s a massa da amostra seca (g).

Tabela 5 - Resultados de absorção de umidade nos compósitos poliméricos unidirecionais condicionados em câmaras de climatização e de névoa salina.

Ganho de massa médio (%)									
	1ªsem.*	2ªsem.	3ªsem.	4ªsem.	5ªsem.	6ªsem.	7ªsem.	8ªsem.	9ªsem.
Tração transversal									
Câmara de climatização	0,52	0,73	0,75	0,76	0,87	0,89	0,92	0,92	0,93
Névoa salina	0,05	0,20	0,33	0,26	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30
Tração longitudinal									
Câmara de climatização	0,55	0,70	0,71	0,62	0,62	0,61	0,62	0,62	0,62
Névoa salina	0,22	0,38	0,38	0,35	0,36	0,37	0,37	0,37	0,37
Cisalhamento									
Câmara de climatização	0,41	0,69	0,55	0,61	0,59	0,61	0,62	0,62	0,62
Névoa salina	0,63	0,80	0,85	0,75	0,73	0,75	0,73	0,73	0,73
Compressão									
Câmara de climatização	0,16	0,28	0,40	0,37	0,38	0,41	0,39	0,39	0,39
Névoa salina	0,23	0,31	0,33	0,33	0,36	0,37	0,39	0,39	0,39

*sem. = semana

Observa-se, nas Figuras de 26 a 29, que no estágio inicial do condicionamento existe uma relação praticamente linear entre a absorção de umidade e a raiz quadrada do tempo. Por curtos períodos de tempo, o conteúdo de umidade aumenta linearmente até atingir um estado conhecido como pseudoequilíbrio, aproximadamente entre três e quatro semanas de exposição. Esse estágio de pseudoequilíbrio é praticamente o mesmo para a maioria dos compósitos poliméricos termorrígidos, pois isso é característico do comportamento de absorção de umidade, conforme a segunda lei de difusão de Fick (BOUKHOULDA, 2006) expressa pela Equação 4:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_z \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} , \quad (4)$$

A água permanece no compósito como água livre, e tende com o tempo a penetrar na resina pelo gradiente de concentração. Após essa porção linear, a absorção de umidade começa a conferir um formato côncavo na curva em relação ao eixo das abscissas, indicando um desvio positivo do estado de pseudoequilíbrio pela segunda lei de Fick. Com a contínua exposição, o processo de absorção de umidade torna-se mais lento. A literatura atribui a esse período o início do processo de relaxação da cadeia polimérica, associado ao preenchimento higrotérmico dos vazios existentes (CÂNDIDO, 2001; COSTA, 2002; CUNHA, 2006).

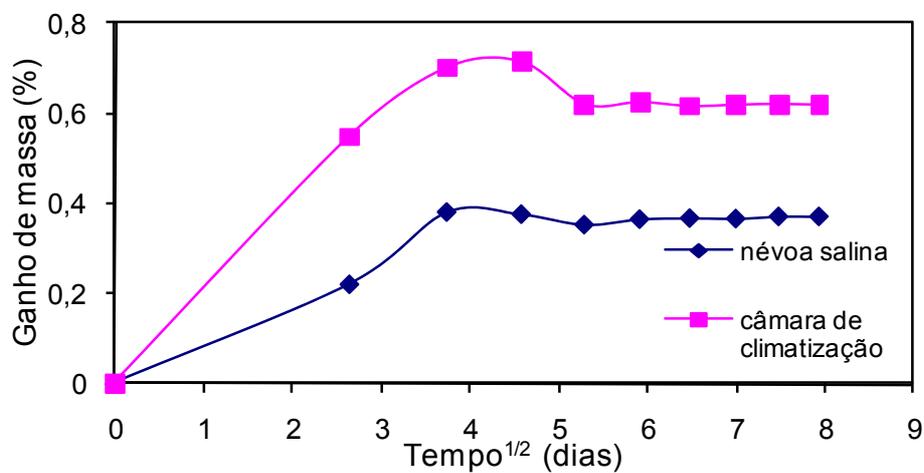


Figura 26 - Ganho de massa médio dos corpos de prova de tração longitudinal do compósito unidirecional condicionado em câmaras de climatização e de névoa salina.

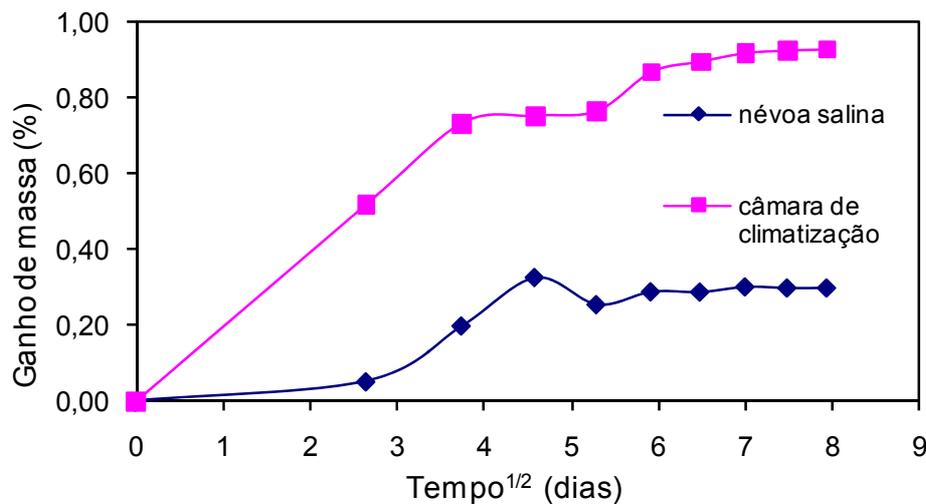


Figura 27 - Ganho de massa médio dos corpos de prova de tração transversal do compósito unidirecional condicionado em câmaras de climatização e de névoa salina.

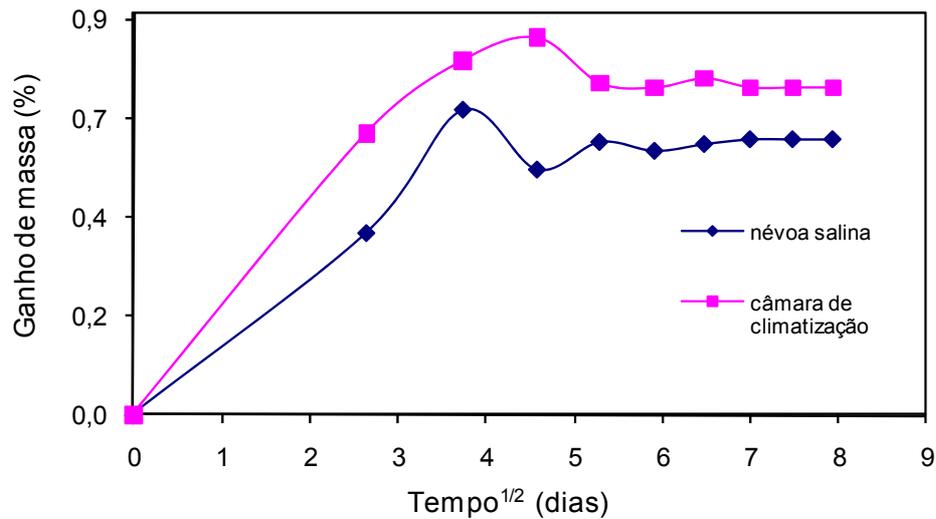


Figura 28 - Ganho de massa médio dos corpos de prova de cisalhamento interlaminar do compósito unidirecional condicionado em câmaras de climatização e de névoa salina.

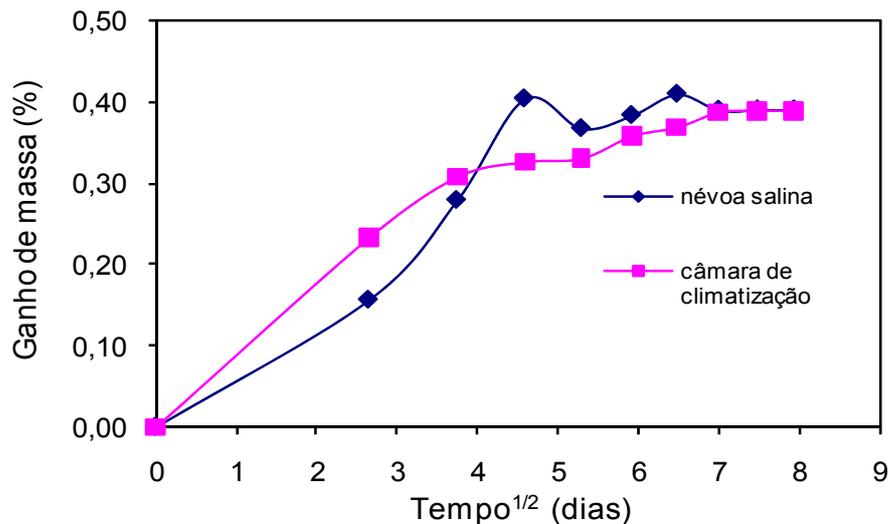


Figura 29 - Ganho de massa médio dos corpos de prova de compressão do compósito unidirecional condicionado em câmaras de climatização e de névoa salina.

Nos compósitos condicionados em câmara de climatização observa-se um ganho médio de massa entre 0,60% e 0,90%. A absorção de umidade para os compósitos condicionados em câmara de névoa salina é de, aproximadamente, 0,25% e 0,35%. Quando se compara o ganho de massa médio dos compósitos condicionados em câmara de climatização, à temperatura de 80°C, (0,60 - 0,90%), com aos submetidos em câmara de névoa salina, à

temperatura de 35°C, (0,25 - 0,35%), observa-se que os primeiros apresentam um ganho de massa maior. Essa maior absorção de umidade por parte dos compósitos submetidos à câmara de climatização deve-se, inicialmente, ao fato da temperatura utilizada nessa câmara favorecer uma maior absorção de umidade pelos compósitos. Também, é explicada pela presença de sais minerais na atmosfera da câmara de condicionamento salino, que atua como uma barreira ao processo de difusão da água, devido aos efeitos coligativos, que dificultam a absorção de umidade pela matriz polimérica (BEUMLER, 2004; VEAZIE; ROBINSON; SHIVAKUMAR, 2004; WOOD; BRADLEY, 1997).

Com relação à orientação do reforço, a análise dos perfis das curvas apresentadas mostra que existe diferença no mecanismo de absorção de umidade nas direções paralelas e perpendiculares ao reforço das amostras. O comportamento observado nos cdps usados para tração transversal a matriz polimérica fica mais exposta e, assim, favorece uma maior absorção de umidade. Já nos cdps usados para tração longitudinal, compressão e cisalhamento, a presença de fibras nas bordas dificulta a absorção e difusão de umidade no compósito. Por isto, apresenta valores menores de ganho de massa médio.

4.1.2 Comportamento em tração transversal

As medidas das resistências à tração transversal das famílias de compósitos unidirecionais, sem condicionamento e condicionados em câmara de climatização, de névoa salina, de ozônio e imersão, estão apresentadas na Tabela 6 e ilustradas nas Figuras de 30 a 33. O desvio padrão e os valores máximo e mínimo medidos são também incluídos para caracterizar a dispersão de dados. Este parâmetro estatístico nas medidas da resistência à fratura é fundamental para indicar se o processo de fabricação do compósito é consistente.

Além disso, tem uma função crítica quando utilizado na definição de valores de resistência de projeto para a fabricação de peças estruturais (CÂNDIDO, 2001).

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de resistência à tração transversal dos compósitos unidirecionais.

Ensaio à temperatura ambiente (22°C)	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Média (MPa)
Sem condicionamento	64,5	59,3	61,4 ± 1,9
Câmara de climatização	38,8	33,6	36,0 ± 2,2
Câmara de névoa salina	59,6	48,3	53,1 ± 3,7
Imersão	53,1	38,6	44,3 ± 5,8
Câmara de ozônio	48,1	42,3	44,9 ± 2,3
Ensaio em temperatura elevada (82°C)	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Média (MPa)
Sem condicionamento	52,4	43,6	47,6 ± 3,6
Câmara de climatização	25,9	21,1	23,4 ± 1,8
Câmara de névoa salina	45,1	39,0	42,4 ± 2,2
Imersão	26,9	16,2	22,6 ± 3,8
Câmara de ozônio	45,3	30,0	35,4 ± 6,9

Para dar maior confiabilidade à correlação dos resultados foi realizado um estudo estatístico, por meio do teste de hipóteses de médias pelo método *One-way* ANOVA, que testa a hipótese de que as médias de duas ou mais populações são iguais ou diferentes, com um nível de confiança (ou significância) de teste de 95%, conforme descrito no item 3.8.

A resistência à tração transversal dos corpos de prova (Tabela 6 e Figura 30), ensaiados na condição ambiente (22°C), evidencia que os compósitos unidirecionais submetidos à câmara de climatização (36,0 ± 2,2) MPa apresentam uma redução de 41,4% na sua resistência à tração, em relação às amostras sem condicionamento (61,4 ± 1,9) MPa. As amostras submetidas à câmara de névoa salina (53,1 ± 3,7) MPa apresentam uma redução de 13,5% em sua resistência à tração transversal. Já no condicionamento por imersão (44,3±5,8)MPa e em câmara de ozônio (44,9 ± 2,3) MPa observa-se uma queda na

propriedade de 27,9% e 26,8%, respectivamente. Quando estes últimos dados são analisados pelo método estatístico é evidenciado, com um nível de confiança de 95%, que esses valores de resistência são iguais. A análise da Figura 30 mostra, ainda, que o condicionamento em câmara de climatização apresenta um efeito deletério acentuado sobre a propriedade de resistência à tração transversal do compósito.

Comparando-se o resultado obtido para os corpos de prova de referência, sem condicionamento ($61,4 \pm 1,9$) MPa, com dados apresentados por FRANCO (2003) (média de 53,8 MPa), referentes à mesma família de laminado utilizada nesta tese, verifica-se que estes se encontram na mesma ordem de grandeza.

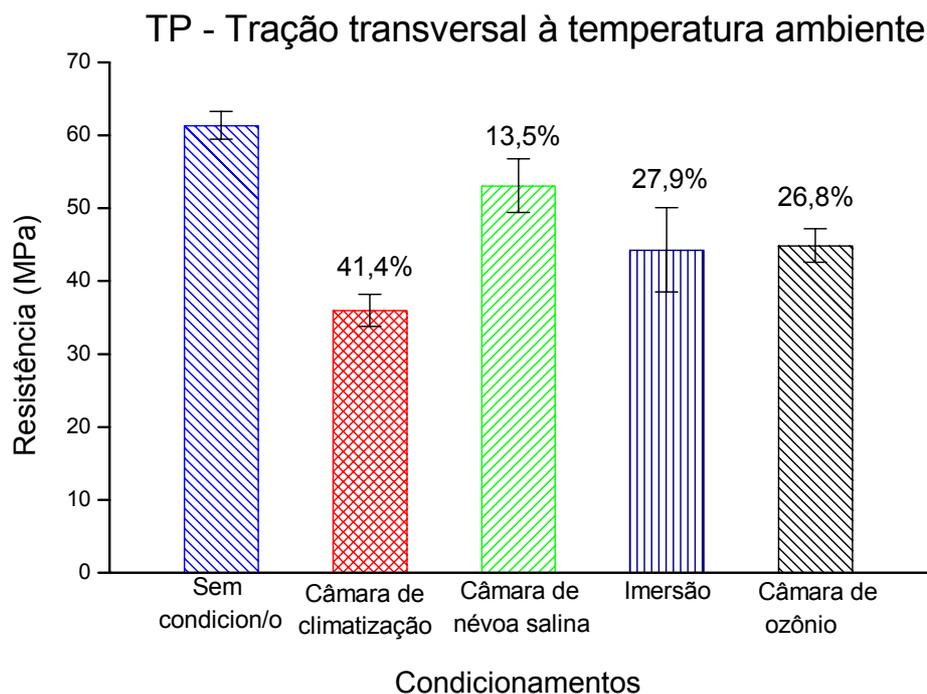


Figura 30 - Resistência à tração transversal de compósitos unidirecionais, submetidos a diferentes condicionamentos ambientais, à temperatura ambiente.

Comparando-se os dados encontrados neste estudo com os resultados obtidos por BAO e YEE (2002), que estudaram o efeito do condicionamento higrotérmico e da difusão da umidade em compósitos de fibras de carbono unidirecional e concluíram que a combinação de

alta temperatura e umidade é especialmente prejudicial à interface fibra/matriz, confirma-se o efeito danoso que a temperatura, em conjunto com a umidade, exerce sobre os compósitos condicionados em câmara de climatização.

Esta observação é também confirmada quando se comparam os comportamentos dos cdps submetidos aos condicionamentos em câmara higrotérmica e por imersão, onde se verifica que ocorre uma maior degradação desta propriedade em câmara higrotérmica, do que a verificada para os corpos de prova submetidos ao condicionamento por imersão direta em água líquida. Como mencionado anteriormente, no ensaio de tração transversal em compósitos unidirecionais o esforço é dominado pela resina, onde as fibras estão orientadas perpendicularmente ao eixo de solicitação do esforço (FRANCO, 2003; BERTHELOT; SEFRANI, 2007).

Comportamento similar é observado nas resistências à tração transversal medidas para os corpos de prova ensaiados em temperatura elevada (82°C) (Tabela 6 e Figura 31). Os compósitos unidirecionais submetidos à câmara de névoa salina ($42,4 \pm 2,2$) MPa e ensaiados em temperatura elevada apresentam uma redução de 10,9%. Os ensaiados em câmara de ozônio apresentam um decréscimo de 25,6% na sua resistência, quando comparados aos sem condicionamento ($47,6 \pm 3,6$) MPa, também ensaiados em temperatura elevada.

As amostras de compósitos poliméricos condicionadas em câmara de climatização ($23,4 \pm 1,8$) MPa e por imersão ($22,6 \pm 3,8$) MPa mostram valores estatisticamente iguais, quando analisados com um nível de significância de 95%, porém, com drásticas reduções na sua resistência à tração transversal (ordem de 50,8% e 52,5%, respectivamente), quando ensaiadas em temperatura elevada. Estes dados sugerem que a matriz polimérica, bem como a interface fibra/matriz, já se encontrava fragilizada pelo condicionamento ambiental a qual foi submetida, fazendo com que o ensaio a temperatura elevada afetasse ainda mais a resistência dos compósitos poliméricos, como menciona a literatura (BAO; YEE, 2002).

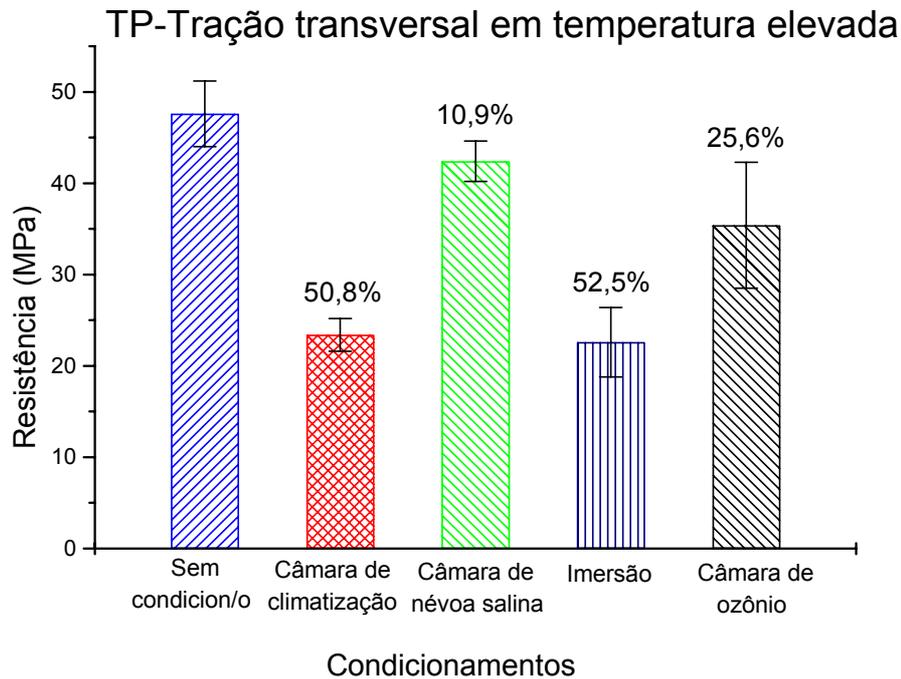


Figura 31 - Resistência à tração transversal de compósitos unidirecionais, submetidos a diferentes condicionamentos ambientais, em temperatura elevada.

Comparando-se os resultados dos compósitos unidirecionais sem condicionamento, ensaiados em condição ambiente e em temperatura elevada (Tabela 6 e Figura 32) constata-se que as amostras não condicionadas e caracterizadas em temperatura elevada ($47,6 \pm 3,6$) MPa apresentam uma redução na resistência à tração transversal de 22,5% em relação às não condicionadas e ensaiadas à temperatura ambiente ($61,4 \pm 1,9$) MPa, evidenciando mais uma vez que a temperatura apresenta influência danosa nas propriedades mecânicas dos compósitos.

Quando se comparam os resultados das amostras condicionadas em câmara de névoa salina ensaiadas à temperatura ambiente com as avaliadas em temperatura elevada, observa-se que os compósitos caracterizados em temperatura elevada ($42,4 \pm 2,2$) MPa apresentam uma perda de 20,2% na resistência à tração transversal em relação aos ensaiados à temperatura ambiente ($53,1 \pm 3,7$) MPa. Comparando-se as amostras condicionadas em câmara de ozônio,

constata-se que os compósitos ensaiados em temperatura elevada ($35,4 \pm 6,9$) MPa reduzem em 21,1% a sua resistência em relação aos avaliados à temperatura ambiente ($44,9 \pm 2,3$) MPa.

Analisando-se os resultados das amostras condicionadas em câmara de climatização, verifica-se que os compósitos ensaiados à temperatura ambiente ($36,0 \pm 2,2$) MPa são em média 35% mais resistentes do que os compósitos caracterizados em temperatura elevada ($23,4 \pm 1,8$) MPa. Da mesma forma, quando se comparam as amostras condicionadas em imersão, observa-se que os compósitos testados em temperatura elevada ($22,6 \pm 3,8$) MPa apresentam uma perda de 48,9% na sua resistência à tração transversal em relação aos ensaios realizados à temperatura ambiente ($44,3 \pm 5,8$) MPa.

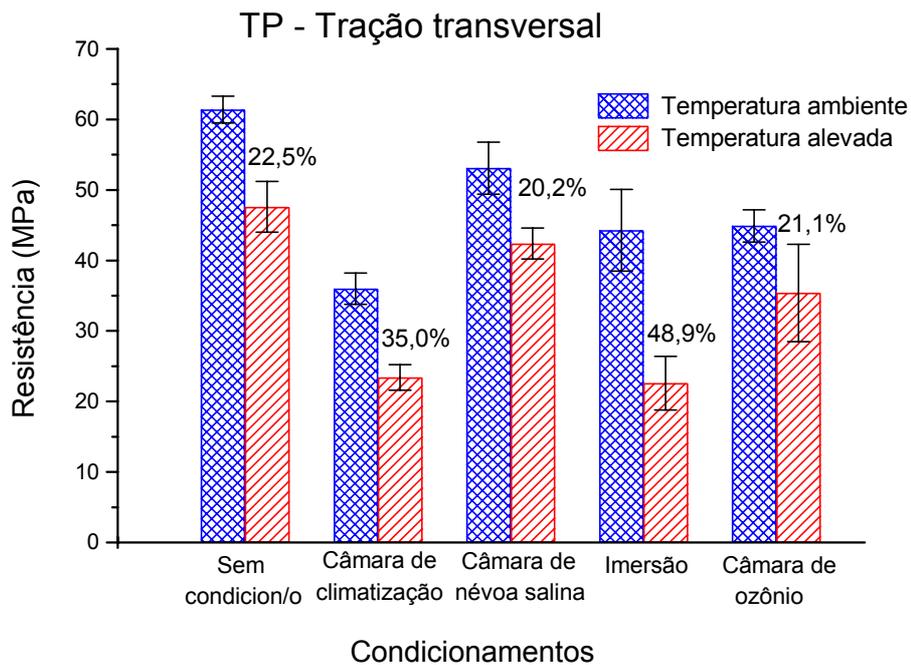


Figura 32 - Resistências à tração transversal de compósitos unidirecionais, com diferentes condicionamentos, em temperaturas ambiente e elevada.

Todos estes dados confirmam que o efeito combinado da temperatura elevada de ensaio com os condicionamentos em câmara de climatização e em imersão reduzem as resistências à tração transversal dos compósitos de carbono unidirecionais, devido à degradação da matriz polimérica e/ou da interface matriz/fibra (MAYER, 2003).

Sabendo-se que uma boa adesão entre a fibra e a resina é pré-requisito para uma adequada transferência de tensões nos compósitos, a análise do modo de falha interfacial suportado pelo conhecimento da qualidade da adesão fibra/resina é uma condição essencial para explicar a resistência à tração dos compósitos. No caso da absorção de água pelos compósitos, os resultados obtidos são dependentes das propriedades da interface fibra/resina tanto quanto da própria resina, como menciona a literatura (FOULC, 2005).

A Figura 33 apresenta imagens obtidas pela técnica de microscopia óptica da seção transversal dos compósitos utilizados nos ensaios. Pode-se observar que há uma boa infiltração da matriz nas fibras de carbono, uma vez que não há presença de poros, vazios ou irregularidades na estrutura do compósito. Isto evidencia que a pressão e o ciclo térmico utilizados foram adequados para a produção dos compósitos poliméricos.

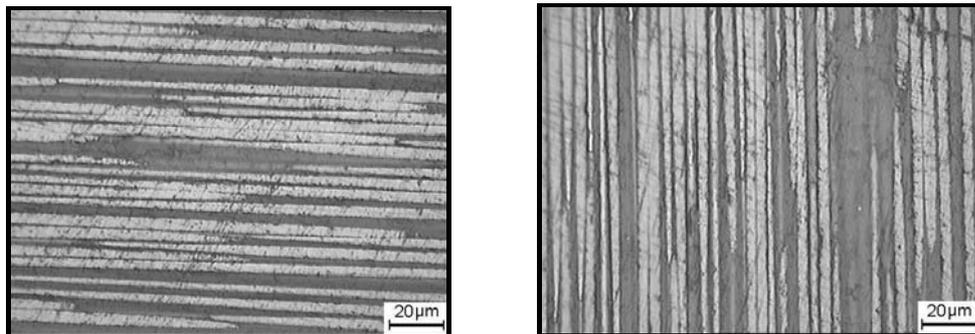


Figura 33 – Micrografias obtidas pela técnica de microscopia óptica representativa da seção dos compósitos unidirecionais utilizados nos ensaios.

Sendo assim, na tentativa de explicar a influência do condicionamento ambiental no mecanismo de adesão interfacial fibra/resina dos compósitos foi utilizada a técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A análise da região interfacial fibra/resina é realizada no plano de fratura dos compósitos sem condicionamento, condicionados em câmaras de climatização, câmara de névoa salina e condicionado por imersão, ensaiados às temperaturas ambiente e elevada.

A Figura 34 apresenta uma foto representativa dos corpos de prova caracterizados em tração transversal de compósitos unidirecional. Observa-se que, os cdps apresentam uma nítida ruptura transversal na direção de carregamento, que permite uma detalhada investigação morfológica da região fraturada.

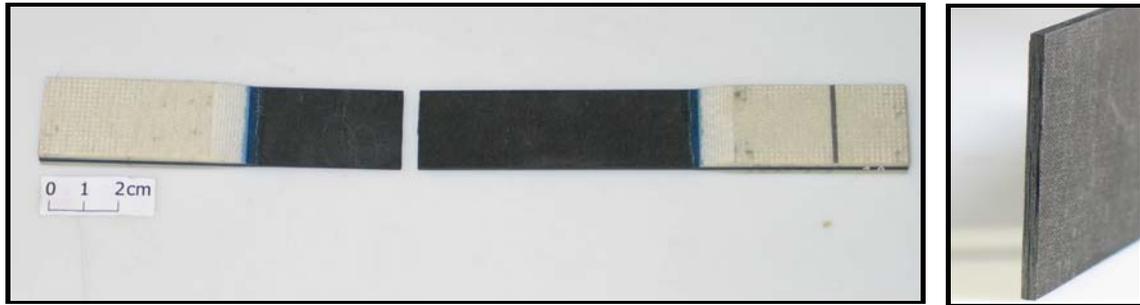


Figura 34 – Vista do corpo de prova após ensaio de tração transversal no composto unidirecional.

Comparando-se as superfícies de fratura dos corpos de prova do compósito unidirecional sem condicionamento, ensaiados às temperaturas ambiente e elevada, obtidas por microscopia eletrônica de varredura, observa-se que as amostras avaliadas à temperatura ambiente (Figuras 35 e 36) mostram a presença de resina aderida à superfície das fibras, com uma região de ancoragem bem definida da matriz na fibra. As setas indicam regiões ponteadas de resina localizadas que interligam fortemente uma fibra à outra, textura essa denominada de cúspide (*cusps*) (PURSLOW, 1986; GREENHALGH, HILEY, SINGH, 1997; FRANCO, 2003). Esse aspecto de fratura mostra que não ocorre deslocamento das fibras e revela que o rompimento das amostras durante o ensaio ocorre preferencialmente na região com resina.

Já os compósitos ensaiados à temperatura elevada (82°C) (Figuras 37 e 38) apresentam uma fina camada de resina cobrindo a superfície das fibras, mas as regiões ricas em resina mostram-se, em sua maioria, rompidas, deixando resina aderida sobre a fibra do compósito. Tal observação é atribuída à degradação da matriz, causada pelo efeito deletério da temperatura de ensaio.

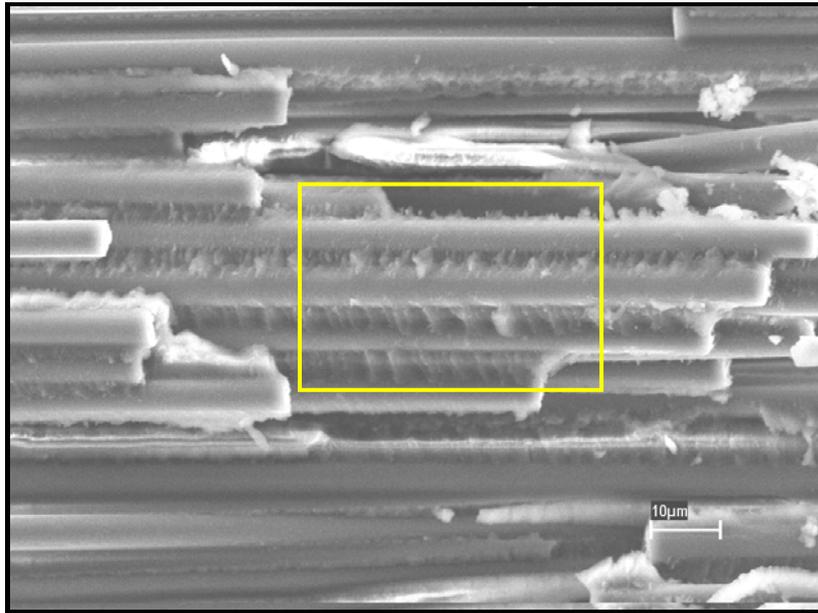


Figura 35 – Análise por MEV do compósito polimérico unidirecional sem condicionamento higrotérmico e ensaiado em tração transversal à temperatura ambiente (22°C).

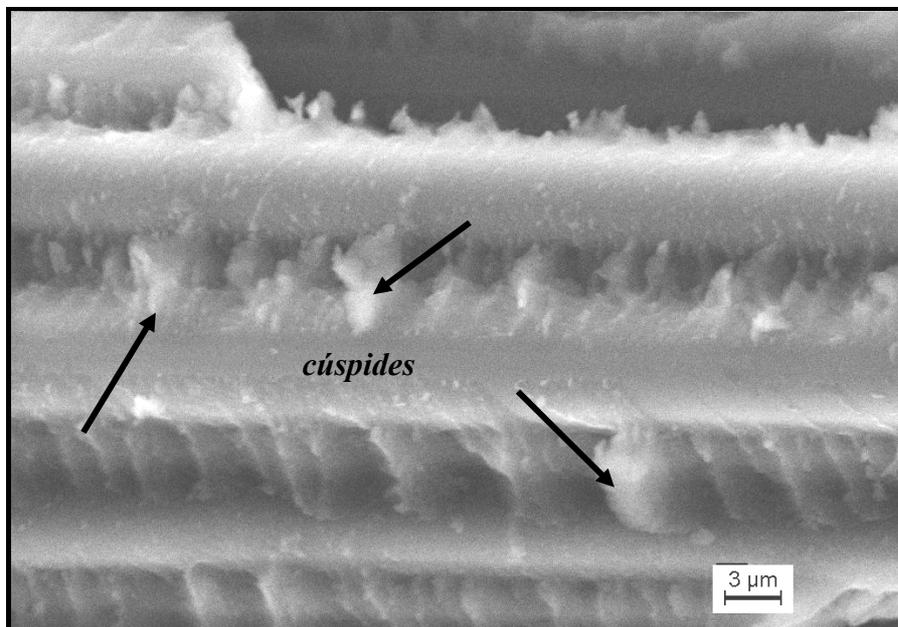


Figura 36 – Análise por MEV com detalhe do compósito polimérico unidirecional sem condicionamento higrotérmico e ensaiado em tração transversal à temperatura ambiente (22°C).

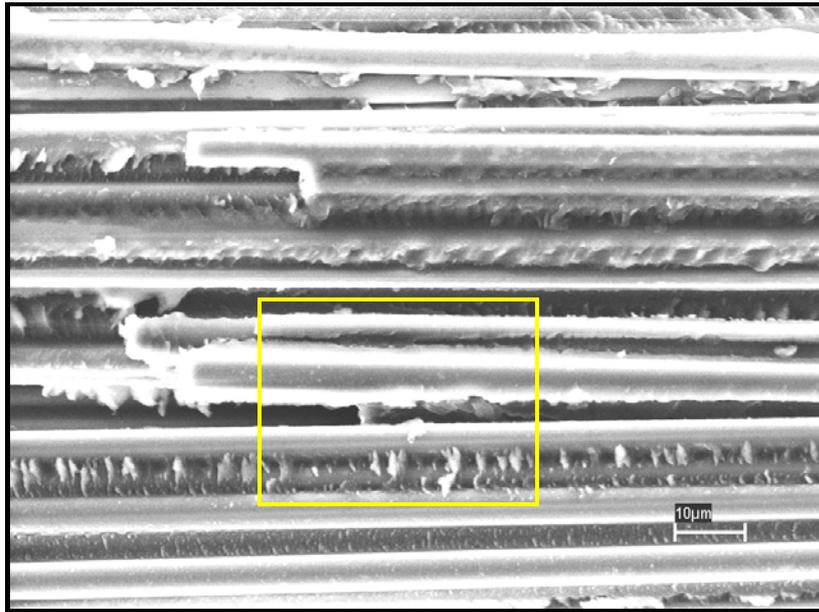


Figura 37 – Análise por MEV do compósito polimérico unidirecional sem condicionamento higrotérmico e ensaiado em tração transversal em temperatura elevada (82°C).

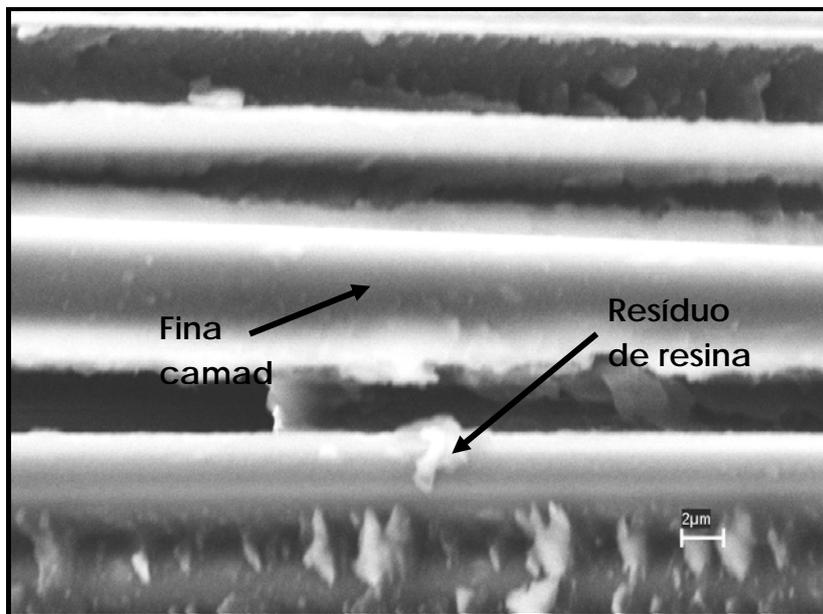


Figura 38 – Análise por MEV com detalhe do compósito polimérico unidirecional sem condicionamento higrotérmico e ensaiado em tração transversal em temperatura elevada (82°C).

Quando é feita a comparação entre as superfícies de fratura, obtidas por microscopia eletrônica de varredura, dos compósitos poliméricos unidirecionais, ensaiados à temperatura ambiente e a 82°C, submetidos às nove semanas de condicionamento em câmara de névoa

salina, observa-se que as amostras caracterizadas à temperatura ambiente (Figuras 39 e 40) possuem, na região analisada, aspectos tipo cúspides, que são o encontro de duas curvas similares na região de resina entre duas fibras (FRANCO, 2003). Observa-se ainda a presença de regiões com o rompimento da interface fibra/resina, bem como fibras envolvidas com uma fina camada de resina. Já na micrografia dos compósitos poliméricos unidirecionais avaliados em temperatura elevada (Figura 41) é observada a ausência de cúspides na resina em torno das fibras e o rompimento da interface fibra/resina, além de apresentar descontinuidade na fina camada que recobre as fibras, indicando a perda de resina na superfície do reforço.

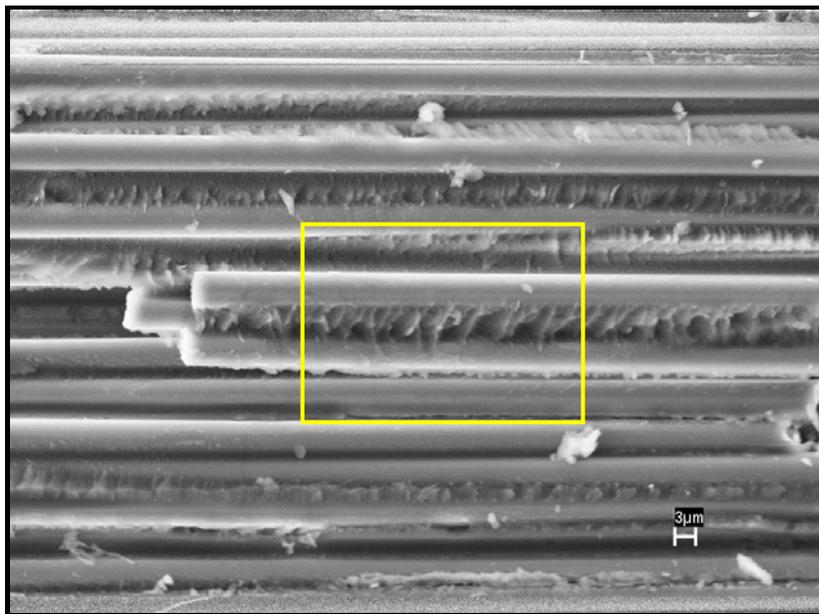


Figura 39 – Análise por MEV do compósito polimérico unidirecional condicionado em câmara de névoa salina e ensaiado em tração transversal à temperatura ambiente .

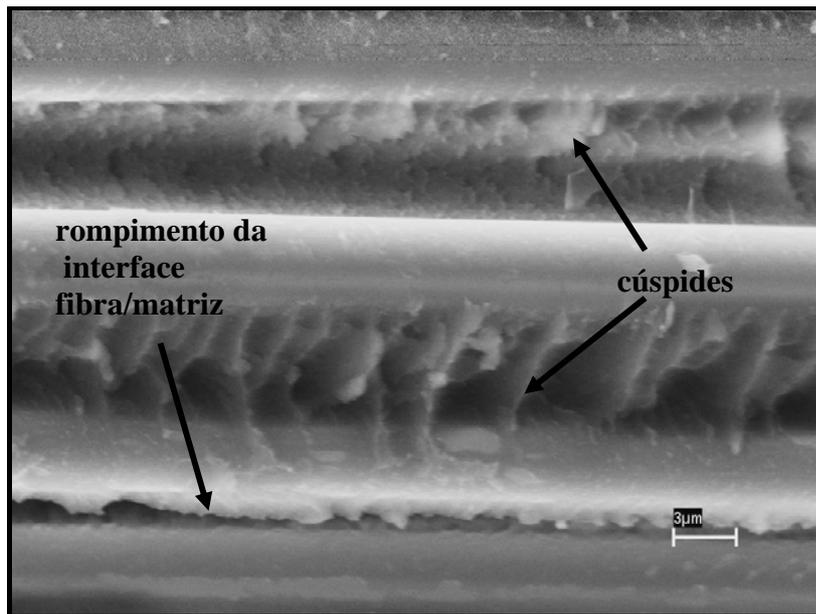


Figura 40 – Análise por MEV com detalhe do compósito polimérico unidirecional condicionado em câmara de névoa salina e ensaiado em tração transversal à temperatura ambiente (22°C).

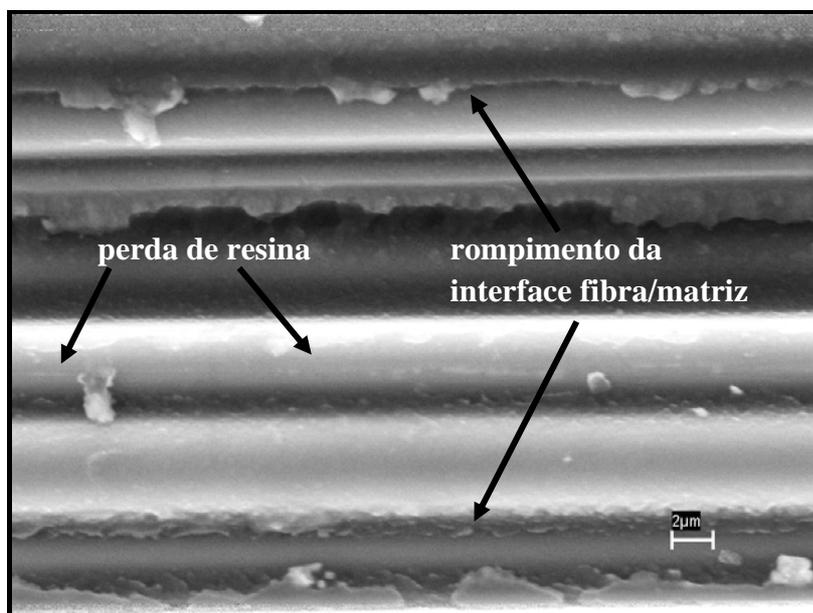


Figura 41 – Análise por MEV do compósito polimérico unidirecional condicionado em câmara de névoa salina e ensaiado em tração transversal em temperatura elevada.

As Figuras 42 a 44 mostram superfícies de fratura representativas dos laminados unidirecionais, após nove semanas de condicionamento em câmara de climatização. As

Figuras 42 e 43 apresentam o compósito ensaiado à temperatura ambiente e condicionado em câmara de climatização, onde as superfícies lisas das fibras indicam a ocorrência de descolamento interfacial nessa região durante o ensaio. A Figura 44 é representativa do compósito unidirecional caracterizado a 82°C, previamente condicionado em câmara de climatização. Esta figura mostra a imagem das superfícies das fibras lisas, praticamente sem resina, com resíduos da matriz polimérica soltos no plano de fratura.

Esta deficiência de resina na superfície da fibra indica que a falha se dá na interface fibra/resina, evidenciada pelo fato do reforço mostrar-se liso e sem resíduo da matriz polimérica aderido à fibra e, muitas vezes, solto no plano de fratura. Tal observação também é relatada por PURSLOW, 1983; GREENHALGH, HILEY, SINGH, 1997 e FRANCO 2003.

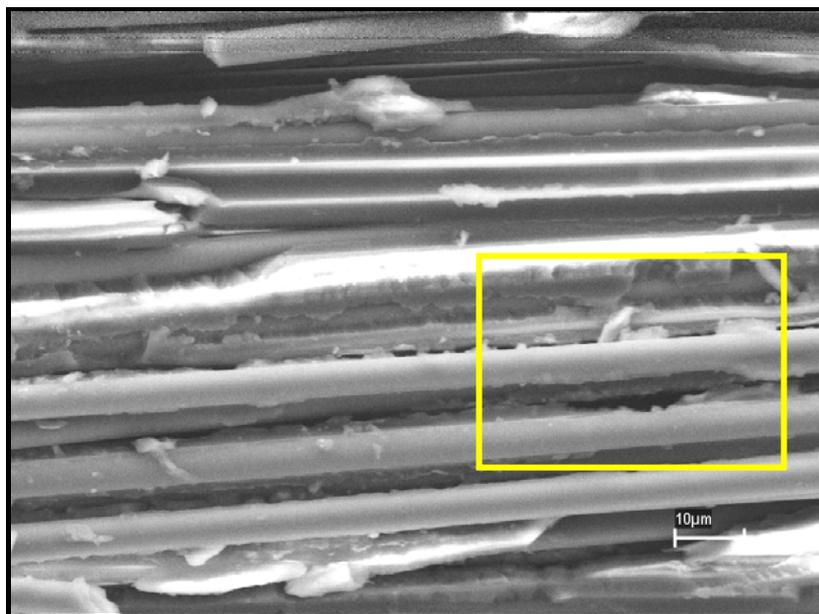


Figura 42 – Análise por MEV do compósito polimérico unidirecional condicionado em câmara de climatização e ensaiado em tração transversal à temperatura ambiente (22°C).

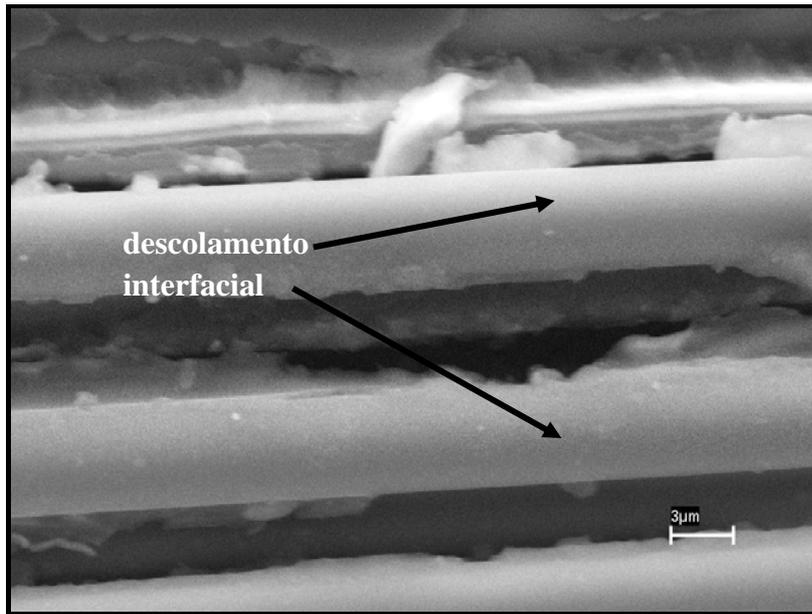


Figura 43 – Análise por MEV com detalhe do compósito polimérico unidirecional condicionado em câmara de climatização e ensaiado em tração transversal à temperatura ambiente (22°C).

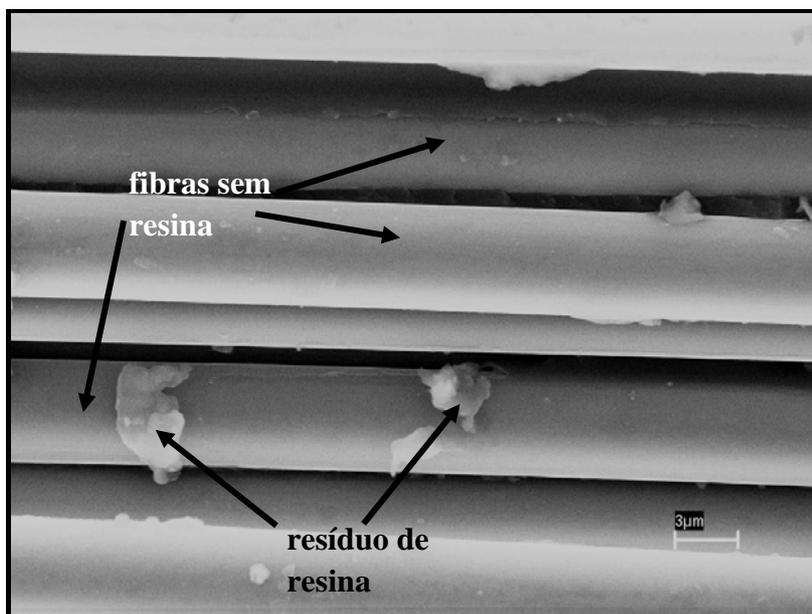


Figura 44 - Análise por MEV do compósito polimérico unidirecional condicionado em câmara de climatização e ensaiado em tração transversal em temperatura elevada (82°C).

As micrografias obtidas a partir dos compósitos poliméricos unidirecionais fraturados confirmam que o efeito combinado da temperatura elevada de ensaio com o condicionamento,

em presença de umidade degrada a matriz polimérica e/ou interface dos compósitos, como mostra a redução da resistência à tração transversal (Tabela 6), devido à degradação da matriz.

A Figura 45 mostra uma micrografia obtida pela técnica de microscopia eletrônica de varredura representativa da região central da superfície de fratura do compósito polimérico unidirecional, condicionado em câmara de ozônio e ensaiado em tração transversal à temperatura ambiente (22°C). Comparando-se esta imagem com a apresentada na Figura 35, que se refere à amostra sem condicionamento e submetida às mesmas condições de ensaio, verifica-se que o condicionamento em câmara de ozônio prejudicou a integridade do material, como revela a presença de superfícies lisas das fibras e o descolamento interfacial nessa região durante o ensaio. A análise desta imagem mostra ainda a presença de maior quantidade de detritos, oriundos da degradação da matriz polimérica. Essa degradação apresentada na Figura 45 é concordante com os dados da Tabela 6, que mostra o efeito deste condicionamento ambiental no comportamento em tração transversal, com uma queda de 26,8% nesta propriedade.

A Figura 46 mostra uma imagem obtida pela técnica de microscopia eletrônica de varredura, representativa do compósito submetido ao condicionamento em câmara de ozônio e caracterizado em tração transversal em temperatura elevada (82°C). A análise da região superior desta imagem, referente à superfície externa do corpo de prova, revela uma textura mais rugosa da resina, com a presença de fibras expostas, devido à perda de matriz polimérica. Já a região central, onde ocorreu a fratura, a textura está mais íntegra indicando que o ataque ocorre da parte externa para a interna do corpo de prova. A correlação dessas observações com a propriedade de resistência à tração transversal mostra que esta propriedade foi prejudicada, com uma queda em torno de 26%, como mostra a Figura 31.

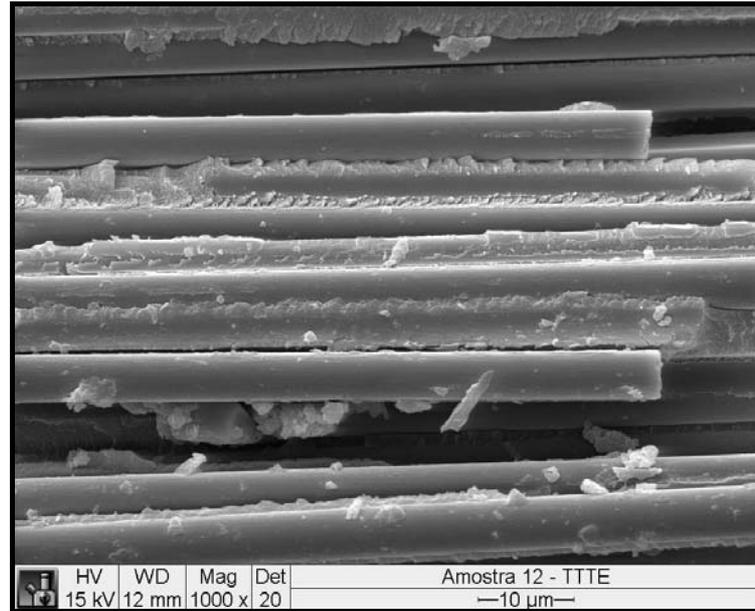


Figura 45 – Análise por MEV da região central da superfície de fratura do compósito polimérico unidirecional condicionado em câmara de ozônio e ensaiado em tração transversal à temperatura ambiente (22°C).

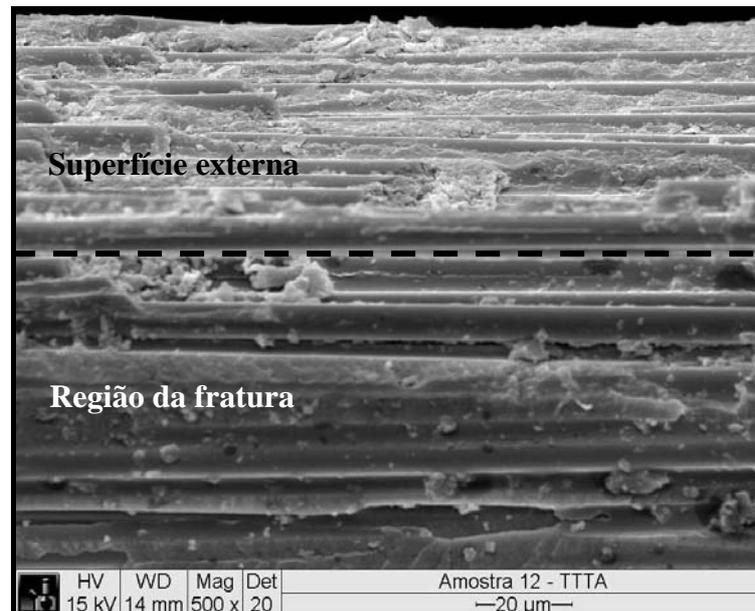


Figura 46 - Análise por MEV que mostra a superfície externa do corpo de prova, com o ataque do ozônio, e a região da superfície de fratura do compósito polimérico unidirecional ensaiado em tração transversal em temperatura elevada (82°C).

A Figura 47 apresenta em maiores detalhes a textura da superfície externa do corpo de prova submetido ao condicionamento em câmara de ozônio, revelando o severo

ataque que este condicionamento confere ao material compósito, principalmente na região de resina.

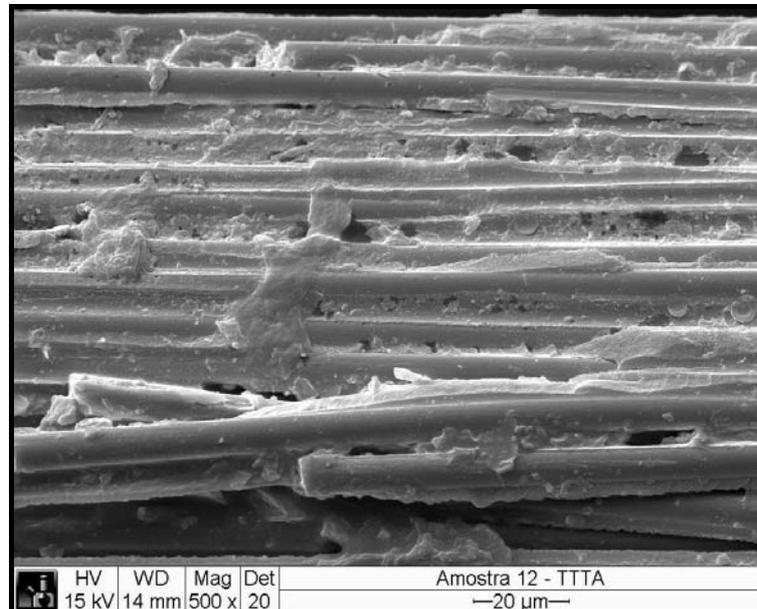


Figura 47 - Análise por MEV com detalhes da superfície externa do corpo de prova unidirecional, com o ataque do ozônio, ensaiado em tração transversal em temperatura elevada (82°C).

4.1.3 Comportamento em tração longitudinal

Os ensaios de resistência à tração longitudinal dos compósitos poliméricos, fabricados com fita unidirecional de fibra de carbono IM7 pré-impregnada com resina epóxi tipo 8552, foram realizados para determinar a resistência à tração de fibras unidirecionais posicionadas no sentido do carregamento. Ao contrário do que ocorre no ensaio de tração transversal, onde o esforço é dominado pela resina, no ensaio de tração longitudinal o esforço é dominado pela fibra. Os resultados apresentados na Tabela 7 e ilustrados nas Figura 48 a 50, para os corpos de prova condicionados e não condicionados, são os valores das médias de resistência à tração das amostras ensaiadas. O desvio padrão e os valores máximo e mínimo medidos são também incluídos para caracterizar a dispersão de dados. Neste caso, foram também realizadas análises estatísticas por meio do teste de hipóteses de médias pelo método *One-way* ANOVA,

citado no item 3.8, que testa a hipótese de que as médias de duas ou mais populações são iguais ou diferentes, com um nível de confiança (ou significância) de teste de 95%.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de resistência à tração longitudinal dos laminados unidirecionais.

Ensaio à temperatura ambiente (22°C)	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Média (MPa)
Sem condicionamento	2.809	2.462	2.627 ± 117
Câmara de climatização	2.551	2.447	2.478 ± 40
Câmara de névoa salina	2.739	2.533	2.615 ± 85
Imersão	2.133	2.043	2.079 ± 39
Câmara de ozônio	1.913	1.722	1.838 ± 67
Ensaio em temperatura elevada (82°C)	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Média (MPa)
Sem condicionamento	2.592	2.477	2.532 ± 40
Câmara de climatização	1.950	1.714	1.833 ± 92
Câmara de névoa salina	2.596	2.316	2.482 ± 118
Imersão	2.053	1.947	2.012 ± 43
Câmara de ozônio	1.937	1.607	1.812 ± 143

Comparando-se os resultados obtidos para os corpos de prova de referência, sem condicionamento e ensaiados à temperatura ambiente (2.627 ± 117) MPa, com dados apresentados pelo fornecedor do *preg* (HEXCEL COMPOSITES, 2007) (2.712 MPa) e por FRANCO (2003) (2.489 MPa) observa-se similaridade nos dados. Este comportamento é explicado pelo fato desta propriedade ser dominada pelo reforço, neste caso fibras de carbono unidirecionais.

Observa-se na Tabela 7 e na Figura 48, que as amostras submetidas ao condicionamento em câmara de névoa salina (2.615 ± 85) MPa não apresentam redução de sua resistência à tração longitudinal, quando comparadas com as amostras de referência, ou seja, não condicionadas (2.627 ± 117) MPa, e ambas ensaiadas à temperatura ambiente. Efeito similar pode ser observado nas amostras condicionadas em câmara de climatização (2.478 ± 40) MPa, que praticamente não tem sua resistência reduzida (5,7%), quando comparada com amostras sem condicionamento. Porém, as amostras submetidas ao

condicionamento por imersão (2.079 ± 39) MPa tiveram sua resistência reduzida em 21%, quando comparadas com as amostras não condicionadas.

Um fato interessante é observar que o condicionamento em câmara de ozônio afeta de maneira significativa a resistência à tração longitudinal dos compósitos poliméricos unidirecionais, onde pode ser verificada uma redução de 30% no valor da resistência, quando os resultados deste lote de corpos de prova são comparados com os das amostras sem condicionamento. A explicação para este fato é o severo ataque do ozônio tanto na matriz de resina epóxi, como no próprio reforço, levando ao decréscimo desta propriedade. Ainda neste item são apresentadas imagens obtidas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura, que evidenciam os aspectos de degradação do corpo de prova pela atmosfera de ozônio. Apesar deste ataque ocorrer da superfície para o interior do material, os defeitos induzidos na superfície acabam degradando a resistência à tração longitudinal do material como um todo, e de maneira acentuada.

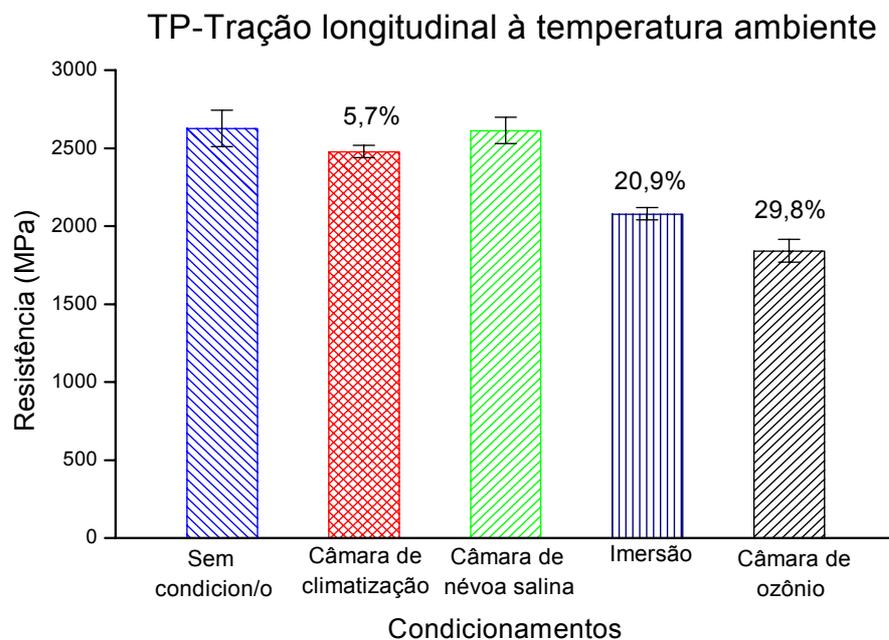


Figura 48 - Resistência à tração longitudinal de compósitos unidirecionais, ensaiados à temperatura ambiente (22°C).

Os valores médios de resistência à tração longitudinal dos corpos de prova (Tabela 7 e Figura 49), ensaiados em temperatura elevada (82°C), mostram que os compósitos unidirecionais condicionados em câmara de névoa salina (2.482 ± 118) MPa não apresentam alteração significativa na sua resistência, quando comparados com os sem condicionamento (2.532 ± 40) MPa. Este comportamento é atribuído à propriedade coligativa da solução salina e ao desfavorecimento da difusão da água de um meio mais concentrado em sal para um outro sem sal (centro do corpo de prova), conforme menciona a literatura (BEUMLER, 2004; VEAZIE; ROBINSON; SHIVAKUMAR, 2004; WOOD; BRADLEY, 1997).

Analisando-se os resultados das amostras condicionadas por imersão, verifica-se que os compósitos ensaiados à temperatura elevada (2.012 ± 43) MPa apresentam um decréscimo de 20,5% na sua resistência, quando comparados aos sem condicionamento (2.532 ± 40) MPa. Os compósitos condicionados em câmara de climatização (1.833 ± 92) MPa e câmara de ozônio (1.812 ± 143) MPa apresentam uma redução de aproximadamente 28% na sua resistência.

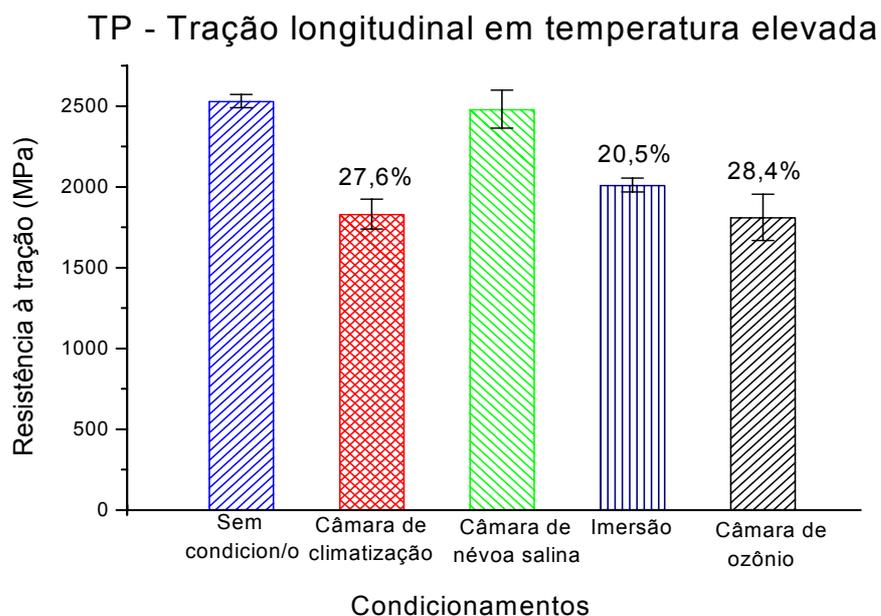


Figura 49 - Resistência à tração longitudinal do compósito unidirecional ensaiado em temperatura elevada (82°C).

Comparando-se os resultados de resistência à tração longitudinal dos compósitos ensaiados em condição ambiente e em temperatura elevada (Tabela 7 e Figura 50), constata-se que as amostras não condicionadas e ensaiadas em temperatura elevada (2.532 ± 40) MPa apresentam uma pequena redução de 3,6% na sua resistência em relação às não condicionadas e caracterizadas à temperatura ambiente (2.627 ± 117) MPa. O mesmo comportamento é observado para as amostras condicionadas em câmara de ozônio em temperatura elevada (1.812 ± 143) MPa, que apresentam uma pequena redução de 1,4% na sua resistência em relação às condicionadas à temperatura ambiente (1.838 ± 67) MPa. Nestes casos, quando se aplica o teste de hipóteses de médias pelo método *One Way* ANOVA, comprova-se que as médias dos valores de resistência não são diferentes entre si (com uma confiabilidade de 95%). Sendo assim, pode-se considerar que não ocorre alteração significativa no valor da resistência à tração longitudinal destas famílias de compósitos (sem condicionamento e condicionadas em atmosfera de ozônio), quando ensaiadas em temperaturas ambiente e elevada (82°C). Este comportamento é atribuído ao fato dos ensaios de resistência longitudinal serem prioritariamente dominados pela influência do reforço, nestes casos, os resultados mostram que a temperatura do ensaio não afetou a matriz de resina, que por sua vez não influenciou na resistência à tração longitudinal.

Quando são comparados os resultados de resistência à tração longitudinal das amostras condicionadas em câmara de névoa salina e avaliadas à temperatura ambiente (2.615 ± 85) MPa, com as caracterizadas em temperatura elevada (2.482 ± 118) MPa, observa-se que os compósitos ensaiados em temperatura elevada têm uma perda de 5,1% na sua resistência em relação aos testados à temperatura ambiente. De maneira similar, as amostras submetidas ao condicionamento por imersão e ensaiadas em temperatura elevada (2.012 ± 43) MPa apresentam uma redução de 3,2% em relação às amostras avaliadas à temperatura ambiente (2.079 ± 39) MPa. Neste caso, quando se aplica o teste de hipóteses de

médias pelo método *One Way* ANOVA, comprova-se que as médias dos valores de resistência são diferentes entre si (com uma confiabilidade de 95%). Estes resultados mostram que apesar deste ensaio ser dominado pelo reforço, foram influenciados pela matriz polimérica e ou pela interface reforço/resina, que por sua vez foram afetadas durante os respectivos condicionamentos ambientais. Este comportamento é diferente do verificado para os ensaios dos corpos de prova sem condicionamento e os expostos à atmosfera de ozônio, onde o ensaio foi somente influenciado pelo reforço, dentro de cada condicionamento.

Analisando-se os resultados das amostras condicionadas em câmara de climatização, verifica-se que os compósitos ensaiados à temperatura ambiente (2.478 ± 40) MPa são em média 26% mais resistentes do que os caracterizados em temperatura elevada (1.833 ± 92) MPa. Assim, observa-se que o efeito combinado da temperatura elevada de ensaio com o condicionamento em câmara de climatização, reduz a resistência à tração longitudinal, devido à degradação da matriz polimérica e/ou da interface fibra/matriz (WOLFRUM; EIBL; LIETCH, 2009). Neste caso, o efeito conjunto da temperatura do ensaio com o do condicionamento higrotérmico do corpo de prova é mais nítido e significativo sobre a resistência à tração longitudinal do material, sendo o mais severo dentre os cinco condicionamentos avaliados.

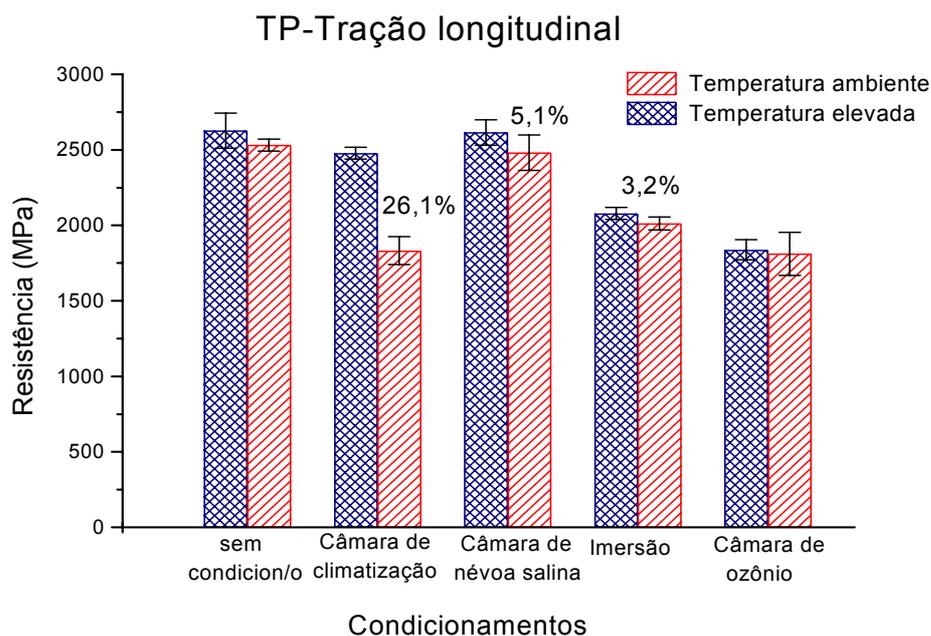


Figura 50 - Resistência à tração longitudinal de compósitos unidirecionais ensaiados em temperaturas ambiente e elevada (82°C).

A Figura 51 apresenta uma imagem representativa dos corpos de prova ensaiados em tração longitudinal. Observa-se nesta figura que os cdps apresentam uma ruptura de difícil análise do ponto de vista fractográfico, uma vez que se fragmentaram impedindo que fosse realizada uma investigação morfológica detalhada da região fraturada, como a apresentada na literatura por FRANCO (2003). Segundo esse autor, a análise fractográfica é dificultada pelo fato das superfícies de fratura se apresentarem muito danificadas, devido ao impacto de fragmentos gerados no ensaio com outras partes do próprio corpo de prova. Além disso, o corte dessas amostras, para observação em microscópio eletrônico de varredura, é dificultado pela fragilidade do compósito e pela condição em que esses se apresentam, na forma de varetas.

Este tipo de ocorrência, perda da superfície de fratura devido aos impactos ou contaminações, é comum em casos reais e impede a análise de falhas de muitas peças fraturadas em serviço ou durante a manutenção de aeronaves (KAR, 1992).

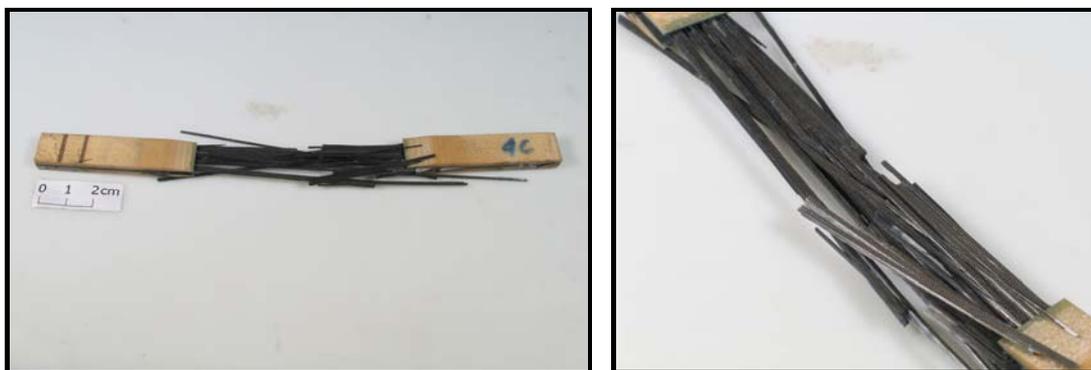


Figura 51 - Vista representativa dos corpos de prova após o ensaio de tração longitudinal, das amostras de compósitos unidirecionais.

4.1.4 Comportamento em compressão

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova submetidos aos diferentes condicionamentos, exceto os referentes ao condicionamento em atmosfera de ozônio. Além desta tabela, são também mostrados gráficos de barras comparando-se os resultados obtidos nos quatro diferentes condicionamentos ambientais estudados (sem condicionamento, higrotérmico em câmara de climatização, névoa salina e imersão em água). Os gráficos estão ilustrados nas Figuras 52 a 54. Os resultados experimentais obtidos na avaliação do comportamento dos corpos de prova em compressão foram também analisados no teste de hipóteses de médias pelos métodos *One-way* ANOVA e *Two-Sample t*, que testam a hipótese de que as médias de duas ou mais populações são iguais, com um nível de confiança (ou significância) de teste de 95%.

Tabela 8 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos compósitos unidirecionais.

Ensaio à temperatura ambiente (22°C)	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Médio (MPa)
Sem condicionamento	1.842	1.770	1.812 ± 31
Câmara de climatização	1.704	1.312	1.528 ± 163
Câmara de névoa salina	1.850	1.539	1.668 ± 107
Imersão	1.295	1.210	1.256 ± 37
Ensaio em temperatura elevada (82°C)	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Médio (MPa)
Sem condicionamento	1.588	1.462	1.519 ± 53
Câmara de climatização	1.160	1.073	1.129 ± 32
Câmara de névoa salina	1.304	1.180	1.238 ± 37
Imersão	1.226	1.111	1.173 ± 41

Os ensaios de resistência à compressão das amostras (Tabela 8 e Figura 52), realizados na condição ambiente (22°C) (1.812 ± 31) MPa, mostram que os compósitos unidirecionais têm sua resistência reduzida em 7,9%, quando condicionados em câmara de névoa salina (1.668 ± 107) MPa, indicando que a atmosfera salina é o condicionamento que menos afeta a matriz polimérica e a interface reforço/resina, pelo fato da difusão de umidade ser desfavorecida pela presença do sal, como já apresentado em itens anteriores.

Já as amostras submetidas ao condicionamento na câmara de climatização (1.528 ± 163) MPa apresentam uma redução de 15,6% na sua resistência à compressão, quando comparadas com os corpos de prova sem condicionamento. Verifica-se, ainda, que as amostras condicionadas por imersão (1.256 ± 37) MPa apresentam uma redução bem maior, da ordem de 30,7%, quando comparadas com o material não condicionado. Estes dados mostram que o condicionamento por imersão é o que mais afeta a resistência à compressão dos compósitos unidirecionais estudados, podendo então ser considerada a pior condição para a aplicação de compósitos poliméricos de resina epóxi. Isto se deve, provavelmente, à maior degradação da matriz polimérica e/ou da interface, em relação aos demais tipos de condicionamentos abordados no presente trabalho.

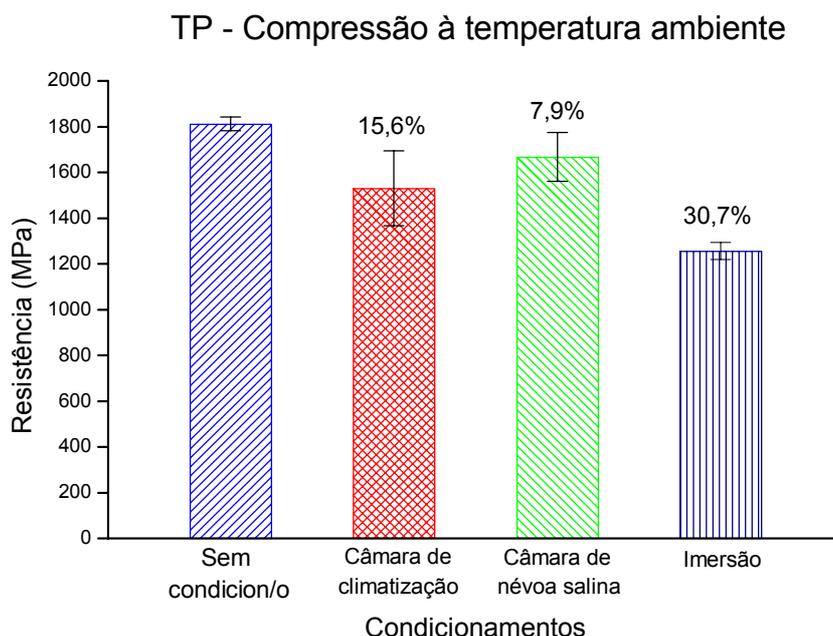


Figura 52 - Resistência à compressão dos compósitos unidirecionais ensaiados à temperatura ambiente (22°C).

O comportamento em compressão das amostras (Tabela 8 e Figura 53), ensaiadas em temperatura elevada (82°C), indica que os compósitos condicionados em câmara de climatização (1.129 ± 32) MPa apresentam um decréscimo acentuado da ordem de 25,7% na resistência, quando comparados com os sem condicionamento (1.519 ± 53) MPa, comportamento também observado por TANG e SPRINGER (1989).

Já os compósitos submetidos ao condicionamento por imersão (1.173 ± 41) MPa mostram um decréscimo de 22,8% na sua resistência e os condicionados em câmara de névoa salina (1.238 ± 37) MPa apresentam uma redução de 18,5% na sua resistência à compressão, em comparação aos compósitos não condicionados e ensaiados a 82°C.

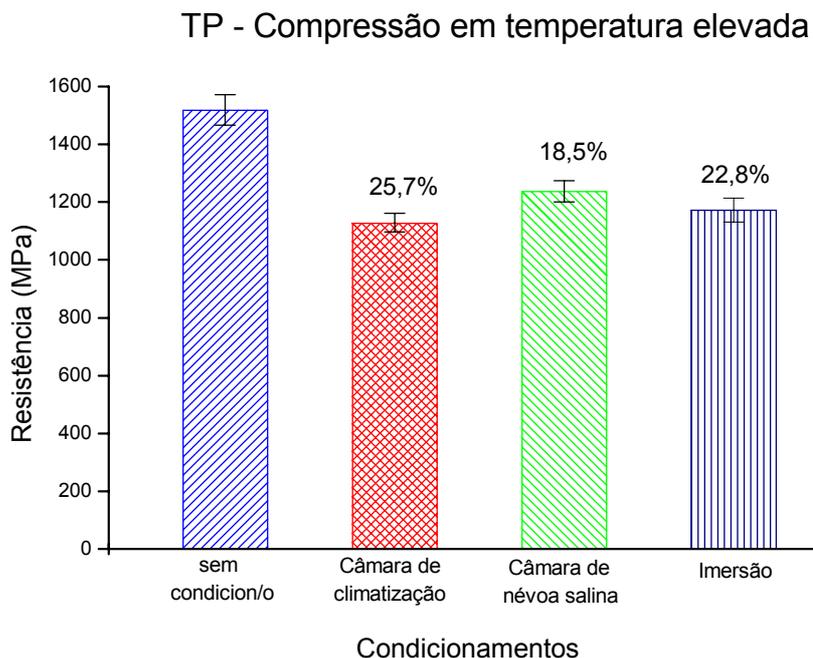


Figura 53 - Resistência à compressão dos compósitos unidirecionais, ensaiados em temperatura elevada (82°C).

A comparação dos resultados de resistência à compressão dos compósitos unidirecionais ensaiados à temperatura ambiente, com os caracterizados em temperatura elevada (82°C) (Tabela 8 e Figura 54), mostra que os compósitos não condicionados e ensaiados em temperatura elevada (1.519 ± 53) MPa apresentam um decréscimo de 16,2% em relação aos não condicionados e ensaiados à temperatura ambiente (1.812 ± 31) MPa, ficando mais uma vez evidente que a temperatura tem influência danosa nas propriedades mecânicas dos compósitos, como menciona TANG e SPRINGER (1989).

Quando os resultados das amostras condicionadas em câmara de névoa salina e ensaiadas à temperatura ambiente (1.668 ± 107) MPa são comparados com os valores obtidos para as amostras testadas em temperatura elevada (1.238 ± 37) MPa, observa-se que os compósitos avaliados em temperatura elevada mostram uma redução de 25,8% na sua

resistência. Os previamente condicionados em câmara de climatização higrotérmica apresentam um decréscimo na propriedade de 26,2%, quando caracterizados a 82°C.

Estes resultados confirmam que a combinação de condicionamentos de compósitos poliméricos, principalmente em atmosferas úmidas, com ensaios em temperatura elevada, contribui para acentuar a degradação do comportamento mecânico dessa classe de material, principalmente quando a propriedade em avaliação é dominada pela influência da matriz polimérica e/ou da interface reforço/resina.

No caso dos corpos de prova submetidos ao condicionamento por imersão verifica-se que os resultados oriundos dos ensaios em temperatura elevada são os que apresentam a menor queda (6,6% - Figura 54), em relação às amostras testadas em temperatura ambiente. Este fato se deve à maior degradação do material durante o próprio condicionamento por imersão (30,7% - Figura 52), ou seja, a contribuição da temperatura do ensaio teve contribuição deletéria minoritária, frente à degradação já imposta pela unidade no condicionamento em água.

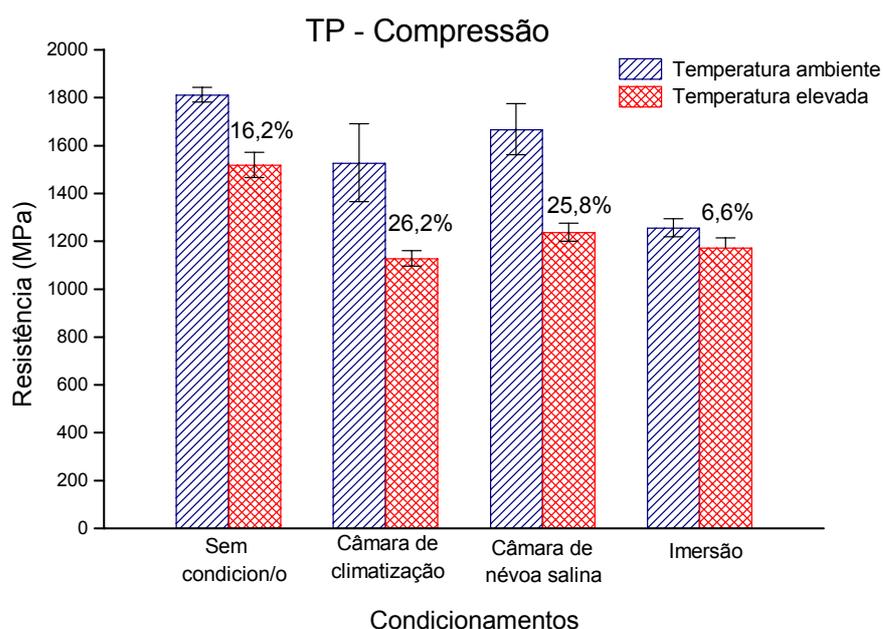


Figura 54 - Resistência à compressão dos compósitos unidirecionais, ensaiados às temperaturas ambiente (22°C) e elevada (82°C).

Devido à construção anisotrópica dos compósitos, o processo de fratura de compósitos termorrígidos sujeitos ao carregamento em compressão é muito complexo. Nessa situação, podem ocorrer simultaneamente diferentes mecanismos de falhas, influenciados por quatro fatores principais: as características das fibras, o comportamento da matriz polimérica, o ângulo de laminação e as propriedades da interface fibra/matriz (LEE; SOUTIS, 2007; FRANCO, 2008).

A Figura 55 apresenta micrografias representativas das amostras ensaiadas em compressão. Na comparação das superfícies de fratura obtidas, observa-se que os modos de falha resultantes dos compósitos caracterizados em condição ambiente (22°C) são semelhantes aos obtidos em condição úmida, que são perpendiculares à carga aplicada, predominando as fraturas interlaminar e translaminar.

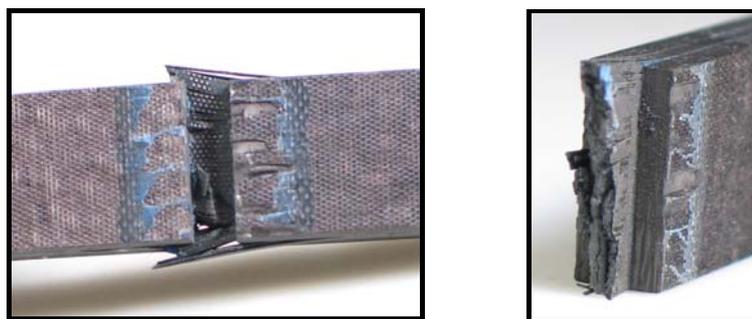


Figura 55 – Vista do corpo de prova após o ensaio de compressão.

O condicionamento em diferentes ambientes provoca mudanças nas características físico-químicas da resina e da superfície da fibra, sendo essas determinantes nos resultados de resistência à compressão. A queda nessa propriedade indica que ocorre degradação em algum componente do compósito. Para complementar a análise do comportamento em compressão dos compósitos estudados a seguir são apresentadas micrografias obtidas nas análises fractográficas.

A análise da seção transversal de uma amostra ensaiada mostra a ocorrência de regiões com esmagamentos (Figura 56) e a presença mais significativa de resíduos na superfície de

fratura, devido à rigidez das fibras de carbono e da característica frágil da resina epóxi. A Figura 57 apresenta a superfície de fratura do compósito de fibras de carbono unidirecional com uma nítida fratura frágil, devido à sobrecarga por compressão, onde a fibra não se deforma plasticamente, fraturando de maneira frágil. Conforme relatado por FRANCO (2003), esse tipo de fratura envolve possíveis aspectos de flexão no topo das fibras. São perceptíveis também aspectos de cúspides na matriz (Figura 58), que permanece aderida às fibras em grande quantidade, revelando uma boa interface entre fibras e resina. A maioria das superfícies de fratura apresenta-se danificada, devido à compressão após a falha, prejudicando a análise da fratura.

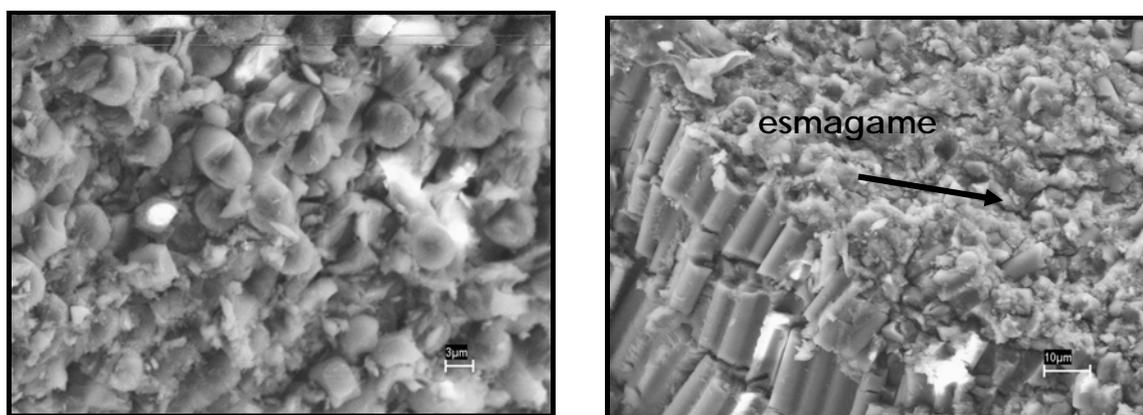


Figura 56 – Análise por MEV do compósito polimérico unidirecional, sem condicionamento, após ensaio de compressão à temperatura ambiente (22°C).

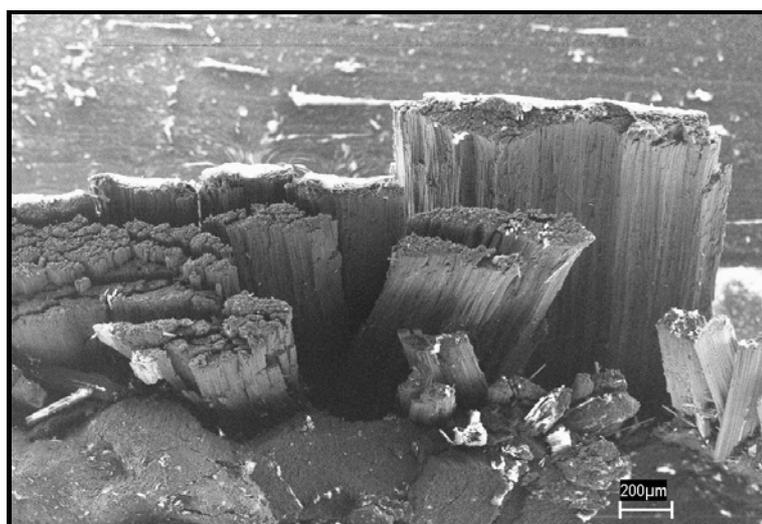


Figura 57 – Vista de topo da amostra de compósito polimérico unidirecional, sem condicionamento, após ensaio de compressão à temperatura ambiente (22°C).

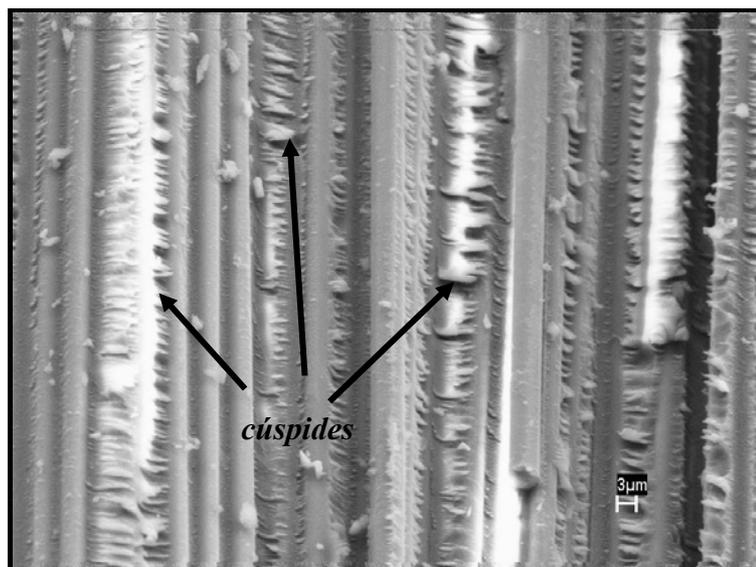


Figura 58 – Análise por MEV da seção longitudinal do compósito polimérico unidirecional, sem condicionamento, após ensaio de compressão à temperatura ambiente (22°C).

A Figura 59 é representativa de um compósito submetido ao condicionamento em câmara de climatização, ensaiado em temperatura elevada (82°C), mostrando que o compósito também apresenta fratura frágil por sobrecarga em compressão. A Figura 60 apresenta a seção longitudinal desse mesmo compósito (seção de fratura), revelando uma maior quantidade de fibras sem resina, indicando que a fratura pode ter ocorrido devido ao enfraquecimento da interface e/ou à degradação da matriz.

A Figura 61 é representativa do compósito unidirecional submetido ao condicionamento em névoa salina e ensaiado à temperatura elevada, podendo-se observar uma quantidade significativa de resíduos oriundos da fratura, que dificultam a análise dessa região.

A separação das amostras ensaiadas em compressão para observação da superfície de fratura é complicada, pelo fato das amostras não se separarem definitivamente após o fim do ensaio a permanência da aplicação da carga sobre a amostra já falhada pode, ao invés de separar a amostra, causar um dano na superfície de fratura por esmagamento, além de

deformar o topo das fibras e gerar uma grande quantidade de detritos, prejudicando a análise posterior da superfície de fratura do compósito.

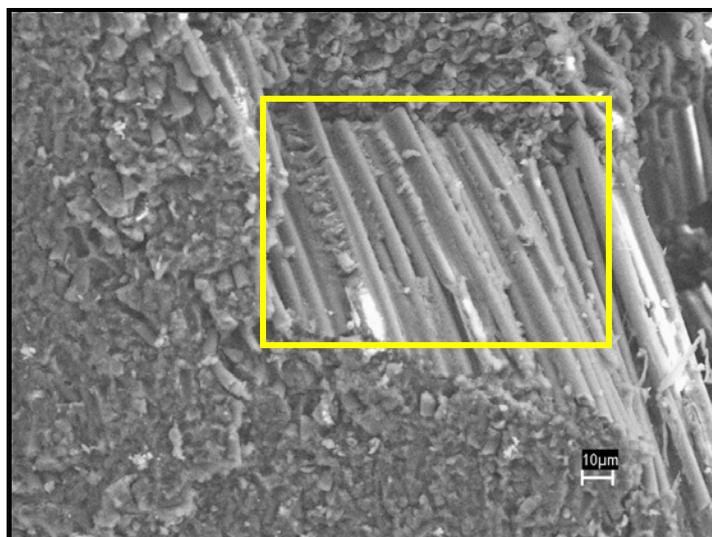


Figura 59 – Análise por MEV da seção transversal do corpo de prova unidirecional, com condicionamento em câmara de climatização, após ensaio de compressão em temperatura elevada (82°C).

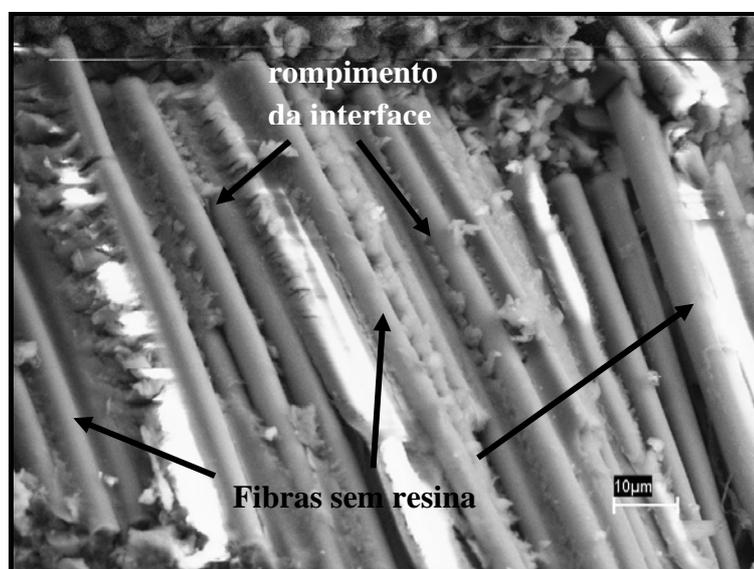


Figura 60 – Análise por MEV da seção longitudinal do corpo de prova unidirecional, com condicionamento em câmara de climatização, após ensaio de compressão em temperatura elevada (82°C).

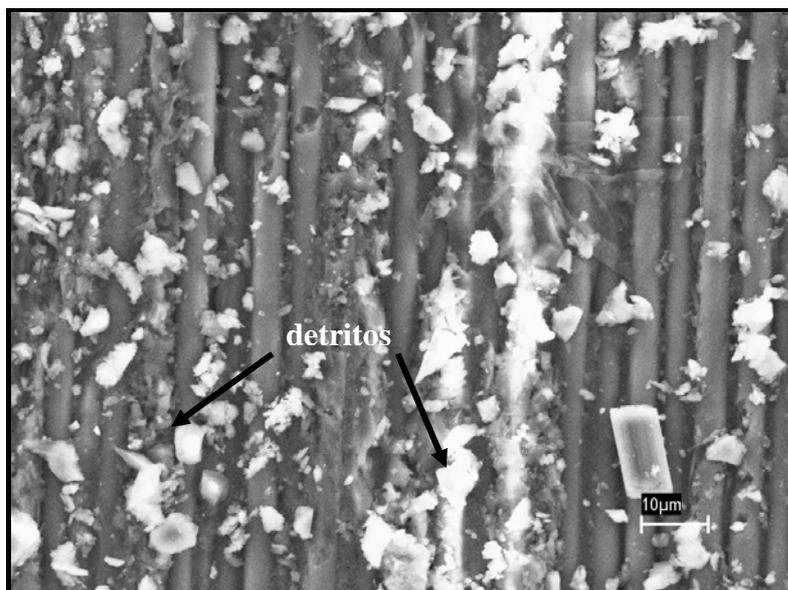


Figura 61 – Análise por MEV da seção longitudinal do corpo de prova unidirecional, com condicionamento em câmara de névoa salina, após ensaio de compressão em temperatura elevada (82°C).

4.1.5 Comportamento em cisalhamento interlaminar

A influência do condicionamento ambiental na resistência mecânica de compósitos de fibras de carbono/matriz polimérica pode ser avaliada pela adesão fibra/resina. Uma vez enfraquecida a resistência da interface pelo efeito da temperatura e/ou do condicionamento, principalmente em ambiente úmido, as propriedades mecânicas são afetadas, sendo determinantes para a durabilidade do compósito.

O interesse técnico-científico pelas propriedades da interface fibra/resina do compósito não é recente. Esse interesse surgiu porque o processo de descolamento da interface afeta as propriedades de falha macroscópica dos compósitos. Vários métodos de investigação estão disponíveis para fornecer informações sobre a interface fibra/matriz (HULL, 1987; CHAWLA, 1987; HAMADA et al, 1996). O ensaio mecânico de resistência ao

cisalhamento interlaminar (ILSS), padronizado pela norma ASTM D 2344, é um dos métodos mais utilizados para compósitos poliméricos.

O método de cisalhamento em três pontos descrito nessa norma estabelece a utilização de uma amostra retangular apoiada em dois cilindros de sustentação, que permitem o movimento lateral. A carga é aplicada por um cilindro de carregamento no centro do comprimento da amostra. Idealmente, a falha ocorre no plano médio paralelo às fibras por modo de cisalhamento (item 2.8, Figura 10) e a carga de fratura é interpretada como a medida de resistência ao cisalhamento interlaminar do compósito (XIE; ADAMS, 1995; ROSSELI; SANTARE, 1997). Devido à simplicidade do método e a pouca complexidade na preparação dos corpos de prova, este ensaio é muitas vezes utilizado como ferramenta de controle da qualidade do material, com ampla aceitação para avaliar quantitativamente as propriedades de adesão fibra/resina do compósito (DANIEL; ISHAI, 1994; KIM; DHARAN, 1995; SHORT, 1995; COSTA, 2002).

Sendo assim, foram realizadas medidas da resistência ao cisalhamento interlaminar das amostras submetidas aos diferentes condicionamentos ambientais realizados neste estudo. Os resultados estão listados na Tabela 9. Além da tabela são apresentados gráficos de barras ilustrados nas Figuras 62 a 64, que comparam os resultados obtidos na caracterização das amostras submetidas aos diferentes condicionamentos ambientais. Estes resultados foram também analisados estatisticamente pelo teste de hipóteses de médias pelo método ANOVA, que testa a hipótese de que as médias de duas ou mais populações são iguais ou diferentes, com um nível de confiança (ou significância) de teste de 95%, conforme apresentado no item 3.7 deste texto.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento interlaminar dos compósitos unidirecionais, submetidos a diferentes condicionamentos.

Ensaio à temperatura ambiente	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Média (MPa)
Sem condicionamento	102,4	97,8	100,4 ± 1,8
Câmara de climatização	97,8	90,5	94,3 ± 3,0
Câmara de névoa salina	107,3	97,3	102,5 ± 3,4
Imersão	96,7	93,3	95,0 ± 1,2
Câmara de ozônio	109,1	89,1	101,4 ± 6,2
Ensaio em temperatura elevada	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Média (MPa)
Sem condicionamento	95,1	90,3	91,9 ± 2,1
Câmara de climatização	75,1	70,3	73,2 ± 2,8
Câmara de névoa salina	83,8	77,4	80,1 ± 2,7
Imersão	66,9	61,2	63,6 ± 1,9
Câmara de ozônio	80,3	73,5	76,1 ± 3,1

Comparando-se os resultados obtidos para os corpos de prova de referência, sem condicionamento e ensaiados à temperatura ambiente ($100,4 \pm 1,8$) MPa, com dados apresentados por FRANCO, 2003, (101,9 MPa) observa-se que a resistência ao cisalhamento interlaminar do compósito estudado neste trabalho apresenta-se na mesma ordem de grandeza.

Os ensaios de resistência ao cisalhamento interlaminar realizados nas amostras (Tabela 9 e Figura 62) evidencia que os compósitos submetidos à câmara de climatização ($94,3 \pm 3,0$ MPa) apresentam uma redução de 6,1% na ILSS, quando comparados com as amostras não condicionadas ($100,4 \pm 1,8$) MPa, comportamento este também relatado na literatura (TANG, SPRINGER, 1989). Comportamento semelhante também é observado quando as amostras são condicionadas por imersão ($95,0 \pm 1,2$) MPa, que apresentam uma redução de 5,4%.

Por outro lado, a comparação das amostras condicionadas em câmara de ozônio ($101,4 \pm 6,2$) MPa e câmara de névoa salina ($102,5 \pm 3,4$) MPa não apresenta variação significativa nas resistências, quando comparadas com as amostras não condicionadas, que é

comprovado estatisticamente com um nível de confiança de 95%. Este comportamento é explicado pelo fato desse ensaio envolver o cisalhamento da região média do corpo de prova, sugerindo que os efeitos desses condicionamentos não afetaram essa região. No caso do condicionamento em atmosfera de ozônio este comportamento é explicado considerando que esse tipo de ataque ocorre da superfície externa para o interior do corpo de prova e, como o cisalhamento ocorre na região transversal média do cdp, esse ensaio não foi influenciado.

Agora analisando a situação de exposição dos cdps em névoa salina, verifica-se que esta família de laminado apresenta uma absorção de umidade (0,73%) superior à apresentada pelos cdps submetidos ao condicionamento higrotérmico (0,62%) (Tabela 5). Considerando o bom desempenho mecânico em cisalhamento da família de laminados submetida ao condicionamento em névoa salina, supõe-se que o maior ganho de massa medido deve-se à presença de sal na superfície do corpo de prova, e não, propriamente, à absorção de umidade pelo material.

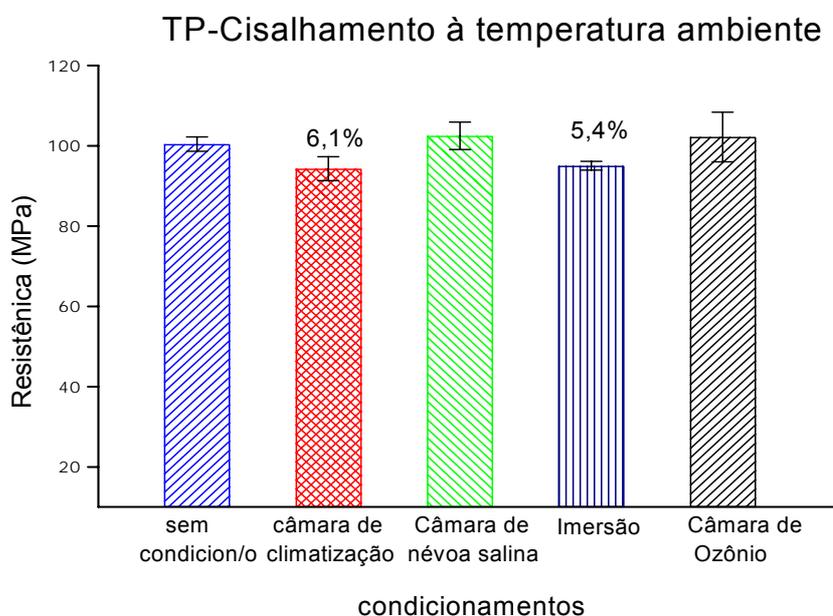


Figura 62 - Resistência ao cisalhamento interlaminar de compósito unidirecional submetido a diferentes condicionamentos ambientais e ensaiado à temperatura ambiente (22°C).

Comportamento diferente é observado nas resistências ao cisalhamento interlaminar das amostras ensaiadas em temperatura elevada (82°C) (Tabela 9 e Figura 63), mostrando que os compósitos submetidos ao condicionamento por imersão ($63,6 \pm 1,9$) MPa apresentam uma redução na ILSS de 30,8%, demonstrando a sinergia da umidade e da temperatura, influenciando de forma mais acentuada o comportamento mecânico do compósito. Já os condicionados em câmara de névoa salina ($80,1 \pm 2,7$) MPa têm uma redução de 12,8%, quando comparados com os não condicionados, evidenciando que a temperatura influencia negativamente o comportamento mecânico do material compósito, em relação ao condicionamento utilizado. Os compósitos unidirecionais condicionados em câmara de climatização ($73,2 \pm 2,8$) MPa e em câmara de ozônio ($76,1 \pm 3,1$) MPa, quando comparados com os não condicionados ($91,9 \pm 2,1$) MPa, apresentam uma redução na resistência ao cisalhamento em temperatura elevada de 20,4% e 17,2%, respectivamente. Quando estas médias são comparadas estatisticamente verifica-se que os compósitos submetidos ao condicionamento em câmara de climatização e em câmara de ozônio são iguais, com uma confiabilidade de 95%.

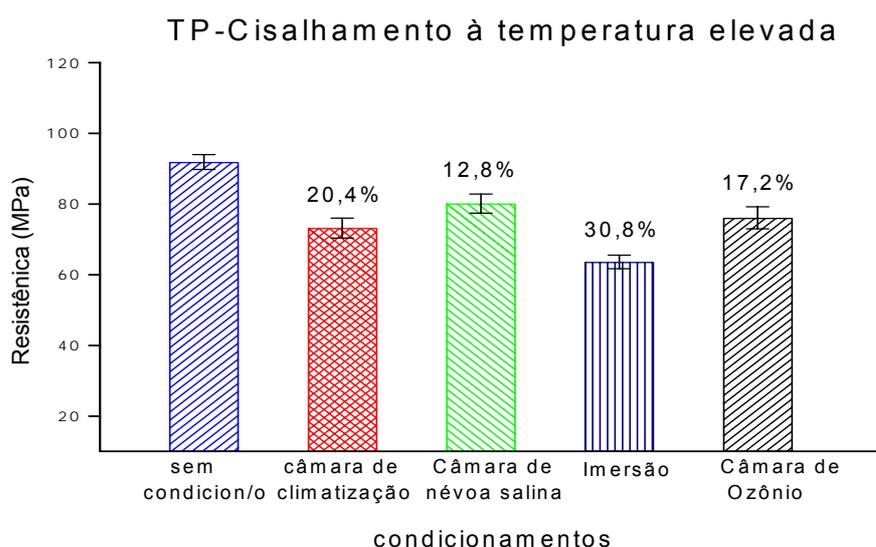


Figura 63 - Resistência ao cisalhamento interlaminar de compósito unidirecional submetido a diferentes condicionamentos ambientais e ensaiado em temperatura elevada (82°C).

Comparando-se os resultados dos compósitos ensaiados em condição ambiente e em temperatura elevada (Tabela 9 e Figura 64), observa-se que as amostras não condicionadas e as ensaiadas à temperatura ambiente ($100,4 \pm 1,8$) MPa são, em média, 8,5% mais resistentes do que os compósitos avaliados em temperatura elevada ($91,9 \pm 2,1$) MPa, evidenciando que a temperatura diminui o valor da resistência ao cisalhamento. Quando comparados os resultados das amostras caracterizadas à temperatura ambiente com os ensaiados à temperatura elevada, para os diferentes condicionamentos (câmara de climatização, câmara de névoa salina e câmara de ozônio), verifica-se que há um decréscimo médio de 23,6% na ILSS. Já no condicionamento por imersão esta redução é mais significativa de 33,1%, reforçando que o efeito combinado da temperatura com a umidade potencializa os efeitos danosos nas propriedades de cisalhamento interlaminar nos compósitos unidirecionais.

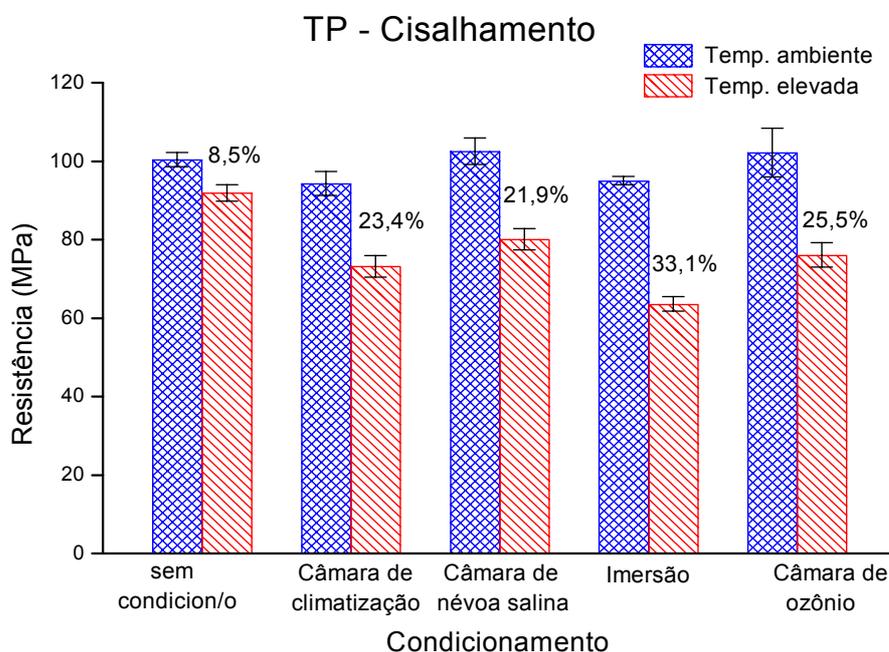


Figura 64 - Resistência ao cisalhamento interlaminar de compósito unidirecional submetido a diferentes condicionamentos ambientais e ensaiado às temperaturas ambiente (22°C) e elevada (82°C).

A análise fractográfica das amostras ensaiadas em cisalhamento interlaminar mostra que os tipos de falhas ocorridos nas amostras condicionadas e não condicionadas são semelhantes, não sendo idênticos apenas pela quantidade de aspectos tipo cúspides, mas também pela resina aderida à fibra, como também cita FRANCO, 2003. Quando se comparam as amostras não condicionadas e ensaiadas à temperatura ambiente com as testadas em temperatura elevada (82°C), observa-se que os compósitos avaliadas à temperatura ambiente (Figuras 65 e 66) apresentam uma camada mais espessa de resina cobrindo uniformemente a superfície das fibras, revelando a existência de uma boa ancoragem da resina nas fibras e uma quantidade significativa de aspectos de fratura típicos de amostras não condicionadas, como mostrado por FRANCO, 2003.

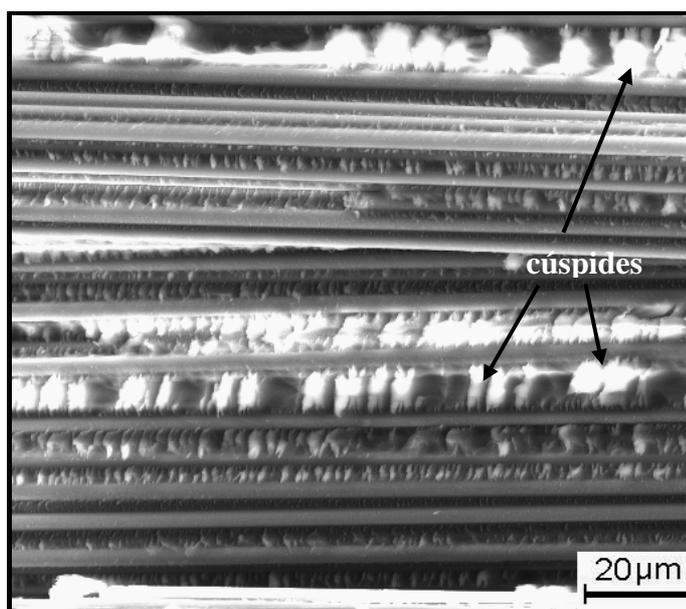


Figura 65 – Análise por MEV da superfície de fratura de compósito unidirecional sem condicionamento e ensaiado em cisalhamento interlaminar à temperatura ambiente (22°C).

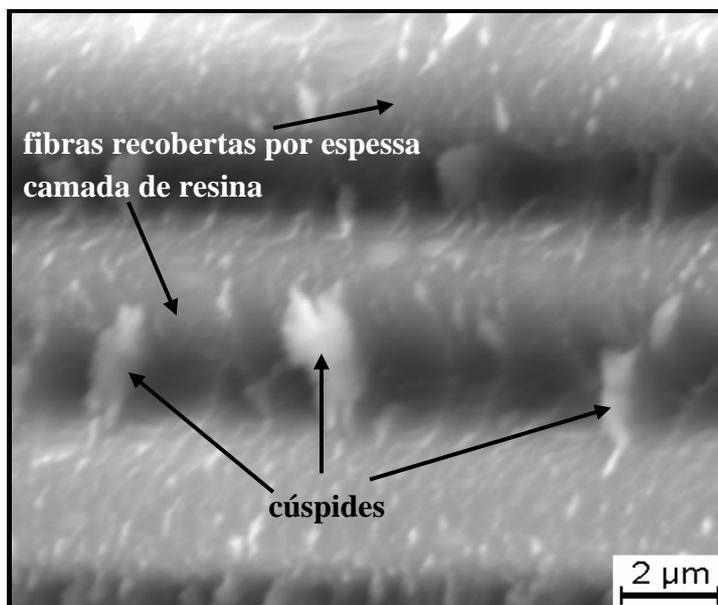


Figura 66 – Análise por MEV com detalhe da superfície de fratura de compósito unidirecional sem condicionamento e ensaiado em cisalhamento interlaminar à temperatura ambiente (22°C).

A presença de resina na superfície das fibras indica que o cisalhamento destes compósitos ocorre preferencialmente na matriz polimérica, devido à região interfacial apresentar uma interação mais forte do que a própria resina (PURSLOW, 1983; GREENHALGH; HILEY; SINGH, 1997; FRANCO 2003).

Já nas amostras ensaiadas em temperatura elevada (82°C) (Figuras 67 e 68) observa-se uma camada de resina mais fina cobrindo a superfície das fibras. Porém, verifica-se em alguns pontos que essa camada mostra-se como se estivesse se desprendendo do reforço, mas ainda com uma concentração significativa de cúspides na região de resina entre as fibras.

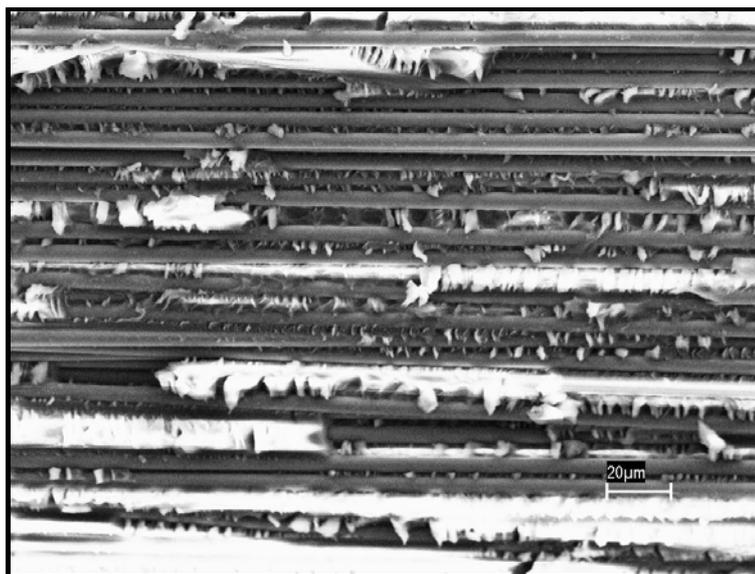


Figura 67 – Análise por MEV da superfície de fratura de compósito unidirecional sem condicionamento e ensaiado em cisalhamento interlaminar em temperatura elevada (82°C).

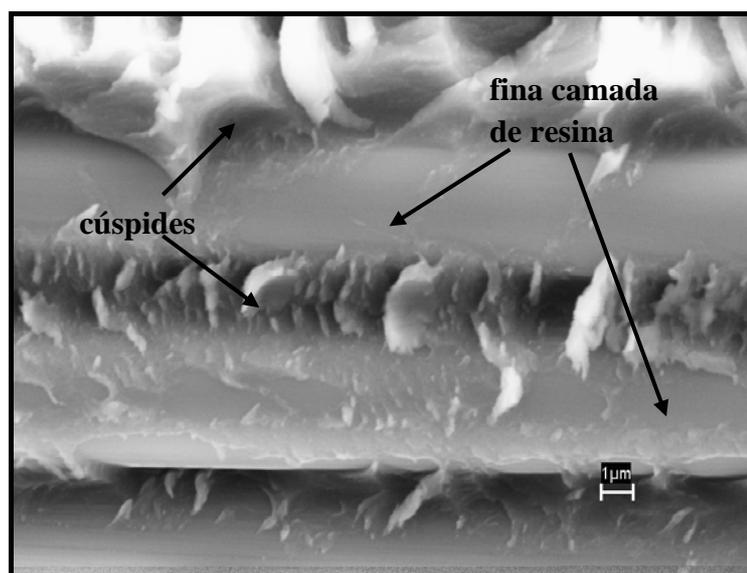


Figura 68 – Análise por MEV com detalhe da superfície de fratura de compósito unidirecional sem condicionamento e ensaiado em cisalhamento interlaminar em temperatura elevada (82°C).

As Figuras 69 e 70 mostram as regiões de fratura dos compósitos unidirecionais condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados à temperatura ambiente, onde se observa a ocorrência de regiões semelhantes às encontradas nos compósitos sem condicionamento higrotérmico ensaiados à temperatura ambiente, exceto pelo recobrimento

da fibra um pouco menor, sugerindo que a névoa salina não afeta tão significativamente a interface fibra/resina, quando o compósito é avaliado à temperatura ambiente.

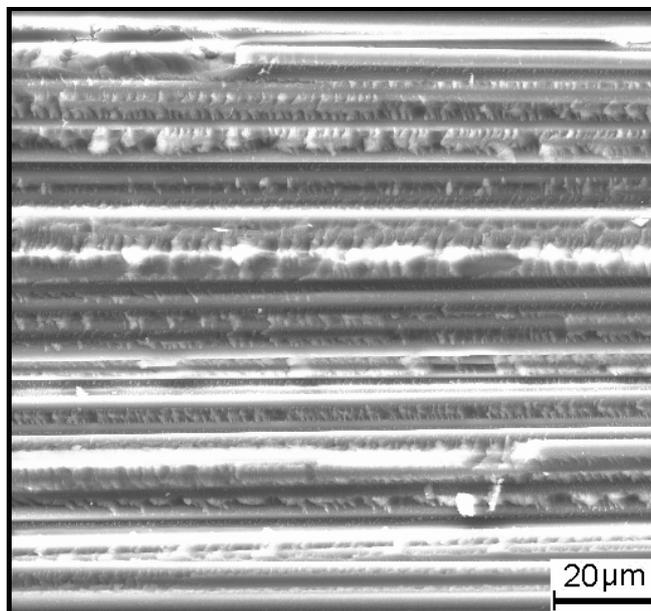


Figura 69 – Análise por MEV da superfície de fratura do compósito unidirecional condicionado em câmara de névoa salina e ensaiado em cisalhamento interlaminar à temperatura ambiente (22°C).

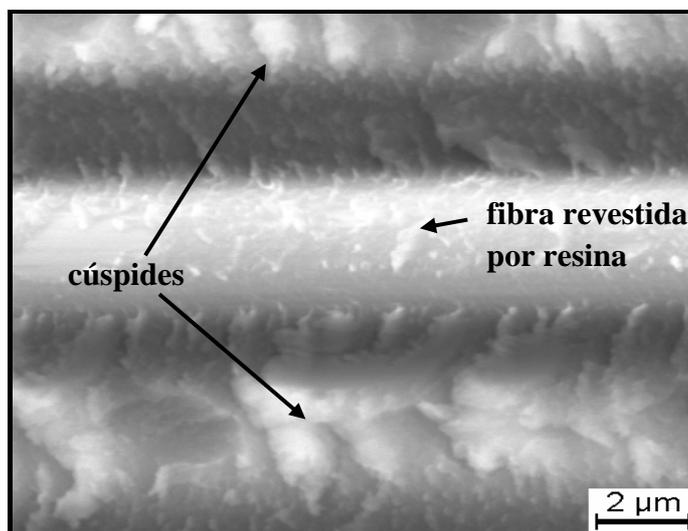


Figura 70 – Análise por MEV com detalhe de superfície de fratura do compósito unidirecional condicionado em câmara de névoa salina ensaiado em cisalhamento interlaminar à temperatura ambiente (22°C).

Quando os compósitos climatizados em névoa salina e ensaiados à temperatura ambiente são comparados com os compósitos caracterizados em temperatura elevada, nota-se uma perda de ancoragem da resina da superfície das fibras e uma menor incidência e maior dispersão dos cúspides (Figuras 71 e 72).

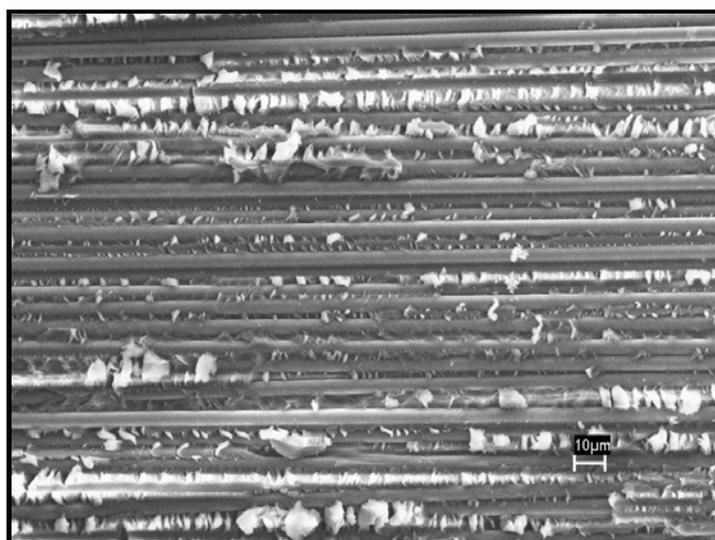


Figura 71 – Análise por MEV da superfície de fratura do compósito unidirecional condicionado em câmara de névoa salina e ensaiado em cisalhamento interlaminar em temperatura elevada (82°C).

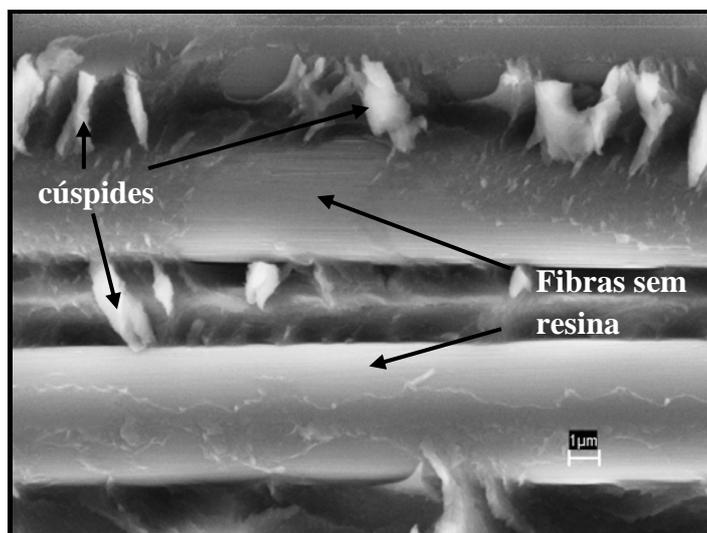


Figura 72 – Análise por MEV com detalhe da superfície de fratura do compósito unidirecional condicionado em câmara de névoa salina e ensaiado em cisalhamento interlaminar em temperatura elevada (82°C).

A análise fractográfica das amostras submetidas em câmara de climatização e ensaiadas à temperatura ambiente mostra a presença de cúspides nas regiões entre as fibras.

No entanto, estas regiões apresentam uma textura alterada, com cúspides menores, devido ao seu rompimento na região da resina. Observam-se também regiões mais extensas sobre a fibra de carbono sem resina, indicando que a interface reforço/resina foi afetada (Figuras 73 e 74).

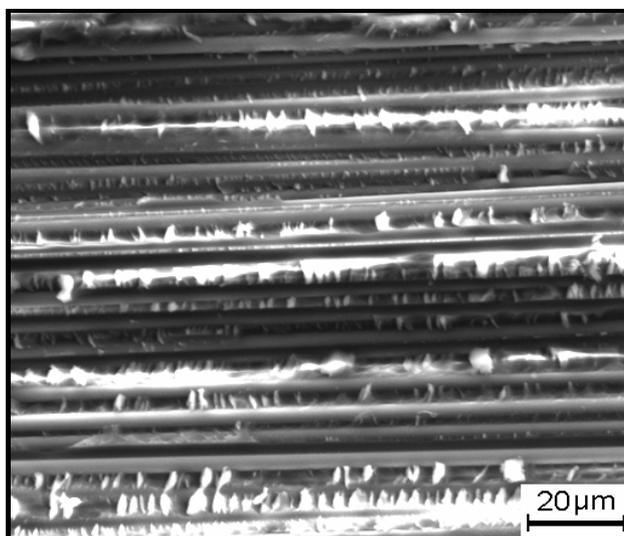


Figura 73 – Análise por MEV da superfície de fratura do compósito unidirecional condicionado em câmara de climatização e ensaiado em cisalhamento interlaminar à temperatura ambiente (22°C).

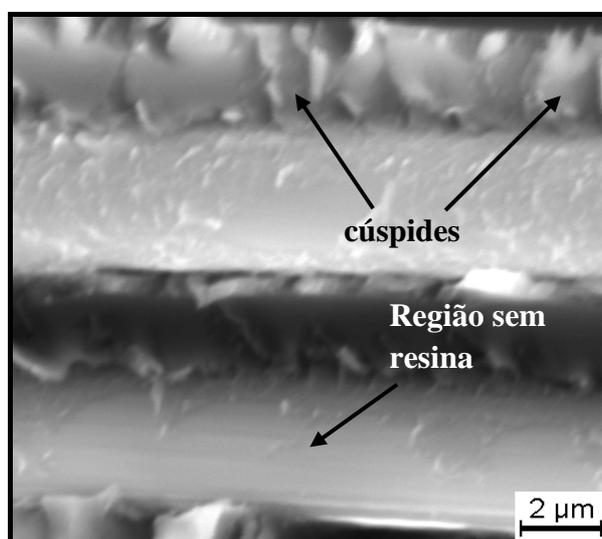


Figura 74 – Análise por MEV com detalhe da superfície de fratura do compósito unidirecional condicionado em câmara de climatização e ensaiado em cisalhamento interlaminar à temperatura ambiente (22°C).

A análise fractográfica das superfícies de fratura das amostras com condicionamento em câmara de ozônio e ensaiadas em cisalhamento interlaminar apresentam aspectos

semelhantes aos observados para as amostras não condicionadas e avaliadas à temperatura ambiente (Figuras 75 e 76). Vale também mencionar que estas amostras não apresentam diferenças significativas no seu desempenho mecânico em relação às amostras de referência, a não ser por um desvio padrão da média relativamente maior que o das amostras sem condicionamento (Tabela 9, Figura 62). No entanto, a análise da superfície externa desses corpos de prova apresenta um severo ataque pela atmosfera de ozônio (Figura 75), com a degradação intensa da resina, ao ponto de expor as fibras de reforço (Figuras 76 e 77). Este comportamento observado justifica também o maior desvio padrão observado nos ensaios de cisalhamento interlaminar e de tração longitudinal (item 4.1.3, Tabela 7).

No caso da Figura 77, que ilustra um cdp condicionado em câmara de ozônio e ensaiado em temperatura elevada (82°C) verifica-se a presença de regiões livres de fragmentos de resina, revelando as fibras de carbono. Este aspecto é atribuído ao fato do ensaio em temperatura elevada danificar ainda mais a matriz e a interface fibra-resina, fazendo com que a matriz fique solta na superfície, sendo mais facilmente removida durante a preparação da amostra para a análise microscópica.

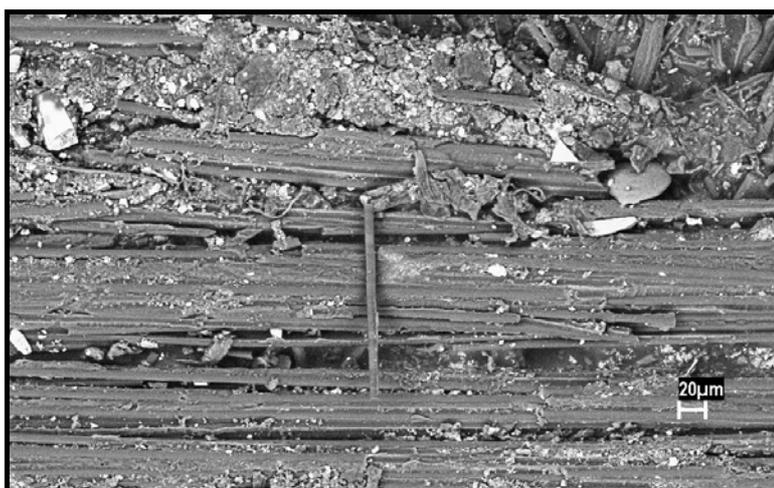


Figura 75 – Análise por MEV da superfície externa do compósito unidirecional condicionado em câmara de ozônio e ensaiado em cisalhamento interlaminar à temperatura ambiente (22°C).

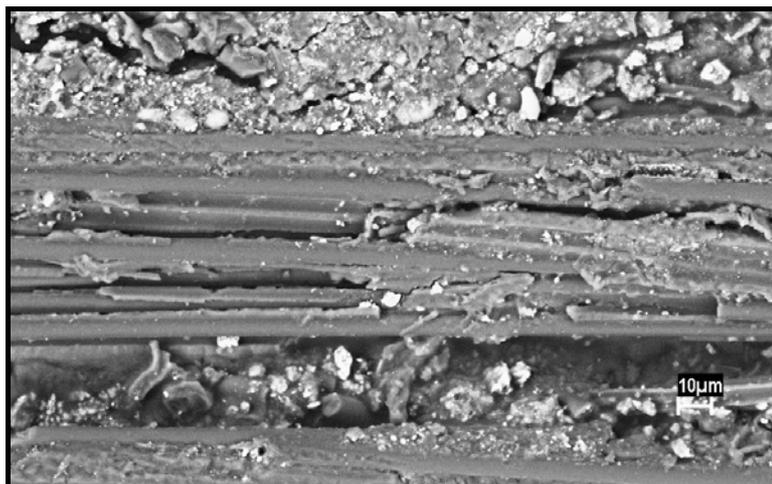


Figura 76 – Análise por MEV com detalhe da superfície externa do compósito unidirecional condicionado em câmara de ozônio e ensaiado em cisalhamento interlaminar à temperatura ambiente (22°C).

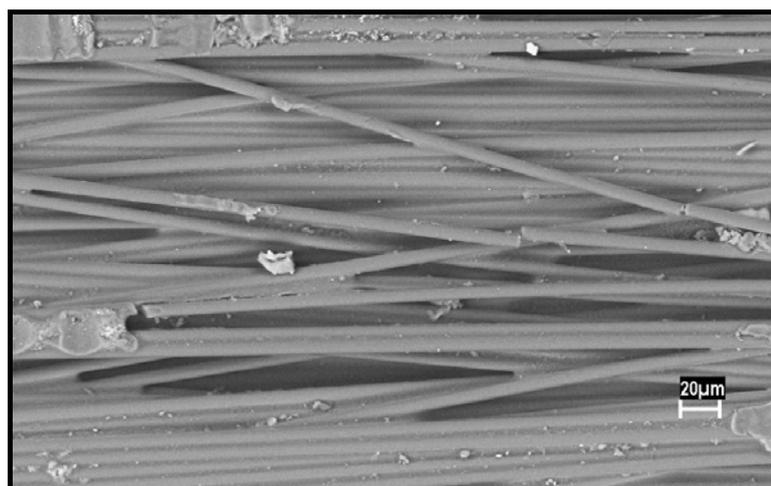


Figura 77 – Análise por MEV da superfície externa do compósito unidirecional condicionado em câmara de ozônio e ensaiado em cisalhamento interlaminar em temperatura elevada (82°C).

4.2 Compósitos reforçados com tecido *Plain Weave*

Esta etapa do trabalho apresenta a caracterização de compósitos reforçados com tecido estilo *Plain Weave*, submetidos a diferentes condicionamentos ambientais, via determinações de resistências à tração, compressão e cisalhamento interlaminar.

4.2.1 Absorção de umidade

Os conteúdos de umidade absorvidos pelas famílias de compósitos reforçados com tecido de fibras de carbono IM7, impregnadas com resina epóxi F8552, estão apresentados na Tabela 10, como resultado do ganho de massa médio obtido semanalmente nas amostras de acompanhamento, relativas a cada ensaio.

O cálculo da absorção de umidade em cada lote de compósito exposto ao condicionamento higrotérmico foi realizado de acordo com o procedimento B da norma ASTM D 5229-10, que é definido como a porcentagem do ganho médio de massa expressa pela Equação 3 (item 4.1.1). As Figuras 78, 79 e 80 mostram o comportamento do ganho de massa para os corpos de prova dos ensaios de tração transversal, cisalhamento interlaminar e compressão, respectivamente.

Comparando-se essas figuras observa-se, de maneira geral, que o material compósito ganha massa mais rapidamente até, aproximadamente, o 25º dia. Após esse período a difusão é mais lenta e a curva começa a se aproximar de um patamar. Esse comportamento é próximo do observado para os compósitos unidirecionais (Figuras 26 a 29).

Tabela 10 - Resultados de absorção de umidade nos compósitos reforçados com tecido, condicionados em câmaras de climatização e de névoa salina.

		Ganho de massa médio (%)								
		1ªsem.*	2ªsem.	3ªsem.	4ªsem.	5ªsem.	6ªsem.	7ªsem.	8ªsem.	9ªsem.
Tração transversal										
Câmara de climatização		0,40	0,52	0,72	0,68	0,68	0,68	0,68	0,70	0,68
Névoa salina		0,08	0,24	0,34	0,29	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30
Cisalhamento										
Câmara de climatização		0,66	0,84	1,02	1,01	0,95	0,97	0,97	0,97	0,97
Névoa salina		0,39	0,76	0,60	0,58	0,54	0,55	0,55	0,55	0,55
Compressão										
Câmara de climatização		0,41	0,56	0,81	0,73	0,74	0,76	0,75	0,74	0,75
Névoa salina		0,25	0,29	0,41	0,47	0,49	0,54	0,52	0,52	0,52

*sem. = semana

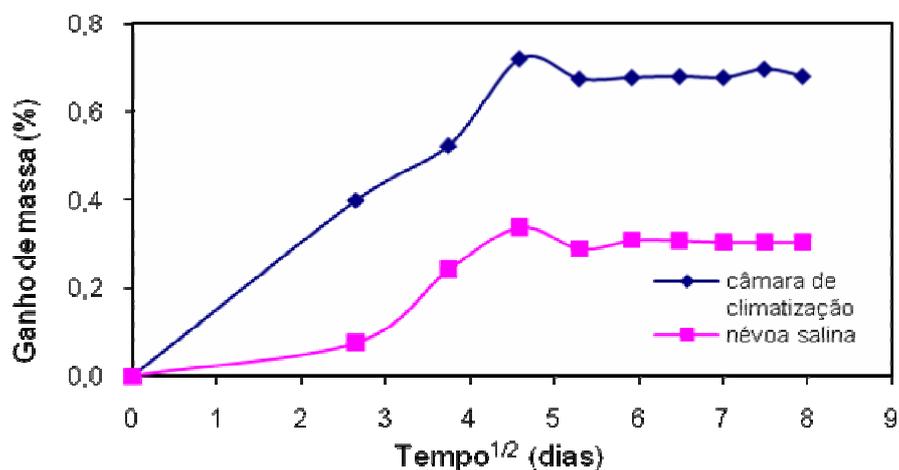


Figura 78 - Ganho de massa médio dos corpos de prova de tração transversal do compósito de tecido, condicionados em câmaras de climatização e de névoa salina.

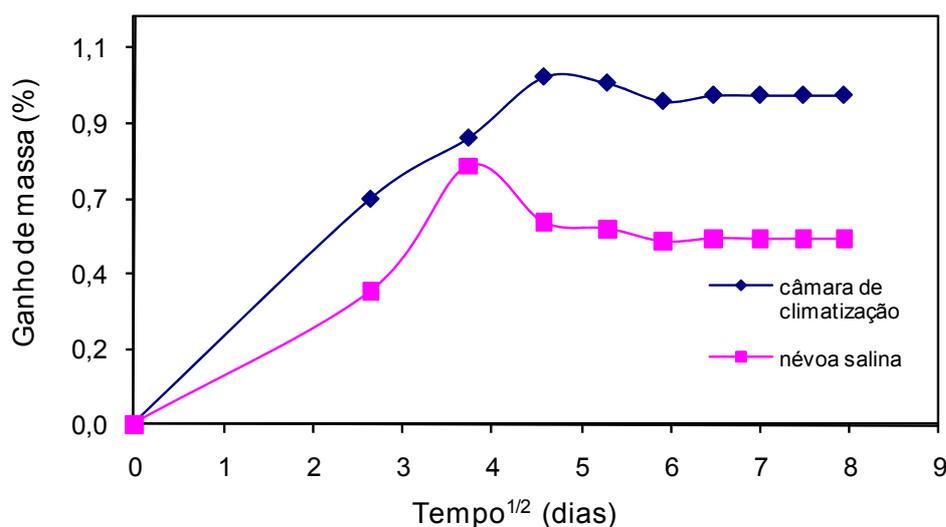


Figura 79 - Ganho de massa médio dos corpos de prova de cisalhamento interlaminar do compósito de tecido, condicionados em câmaras de climatização e de névoa salina.

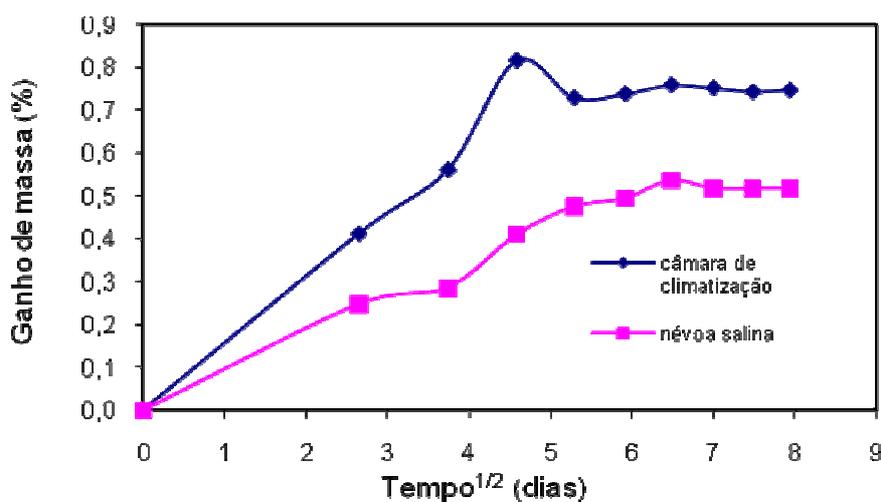


Figura 80 - Ganho de massa médio dos corpos de prova de compressão do compósito de tecido, condicionados em câmaras de climatização e de névoa salina.

Nos compósitos condicionados em câmara de climatização observa-se um ganho médio de massa entre 0,57% e 0,85%. A absorção de umidade para os compósitos condicionados em câmara de névoa salina é de, aproximadamente, 0,25% e 0,50%. Quando se compara o ganho de massa médio dos compósitos condicionados em câmara de climatização (0,57 - 0,85%), à temperatura de 80°C, com os submetidos em câmara de névoa salina

(0,25 - 0,50%), à temperatura de 35°C, observa-se que os primeiros apresentam um ganho de massa maior. Essa maior absorção de umidade por parte dos compósitos submetidos à câmara de climatização deve-se, de maneira similar ao já observado para os compósitos unidirecionais, ao fato da temperatura utilizada na câmara de climatização favorecer uma maior absorção de umidade pelos compósitos e, também, é explicado pela presença de sal (NaCl) na atmosfera da câmara de condicionamento salino, que atua como uma barreira ao processo de difusão da água, devido aos efeitos coligativos, que dificultam a absorção de umidade pela matriz polimérica (BEUMLER, 2004; VEAZIE; ROBINSON; SHIVAKUMAR, 2004; WOOD; BRADLEY, 1997).

Comparando-se os ganhos de massa dos cdps de tração transversal das Tabelas 5 (reforço unidirecional) e 10 (tecido), na 9ª semana, observa-se que os relativos aos compósitos com reforço unidirecional ganharam mais massa (0,93%) em relação aos reforçados com tecido (0,68%). Este comportamento é justificado pelo fato dos corpos de prova reforçados com tecido apresentarem menor área rica em resina exposta ao ambiente úmido. Sabendo-se que a difusão de água ocorre preferencialmente através da matriz e, também, pela interface reforço/polímero, quando esta apresenta descontinuidades ou é fraca.

4.2.2 - Comportamento em tração

As medidas das resistências à tração das famílias de compósitos de tecido sem condicionamento e condicionados em câmaras de climatização, de névoa salina, de ozônio e imersão, estão apresentadas na Tabela 11 e ilustradas nas Figuras 81 a 83. Os desvios padrão e os valores máximo e mínimo medidos também estão incluídos para caracterizar a dispersão de dados.

Tabela 11 - Resultados dos ensaios de resistência à tração dos compósitos com tecido, submetidos a diferentes condicionamentos.

Ensaio à temperatura ambiente (22°C)	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Média (MPa)
Sem condicionamento	1.011,0	967,8	992,1 ± 15,7
Câmara de climatização	914,7	773,0	846,4 ± 66,4
Câmara de névoa salina	918,9	706,7	839,1 ± 81,8
Imersão	835,0	662,6	732,8 ± 58,4
Câmara de ozônio	908,8	704,1	819,7 ± 70,9
Ensaio em temperatura elevada (82°C)	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Média (MPa)
Sem condicionamento	907,3	824,0	856,5 ± 31,7
Câmara de climatização	903,4	661,3	790,5 ± 80,7
Câmara de névoa salina	847,2	692,4	795,5 ± 62,1
Imersão	741,7	689,6	706,6 ± 21,3
Câmara de ozônio	839,8	753,8	799,1 ± 33,1

As resistências à tração dos corpos de prova (Tabela 11 e Figura 81), ensaiados na condição ambiente (22°C), mostram que os compósitos reforçados com tecido submetidos à câmara de climatização (846,4 ± 66,4) MPa, câmara de névoa salina (839,1 ± 81,8) MPa e câmara de ozônio (819,70 ± 70,9) MPa apresentam um decréscimo de, aproximadamente, 15% nesta propriedade, quando comparada com a resistência obtida para as amostras não condicionadas (992,1 ± 15,7) MPa. A análise estatística comprova que estes dados não podem ser considerados diferentes entre si com um nível de confiança de 95%.

As amostras submetidas ao condicionamento por imersão (732,8 ± 58,4) MPa apresentam uma redução na propriedade em torno de 26%, quando comparadas com os corpos de prova não condicionados (992,1 ± 15,7) MPa, mostrando que este condicionamento degrada a resistência à tração do compósito reforçado com tecido, de maneira similar ao já observado para os laminados unidirecionais.

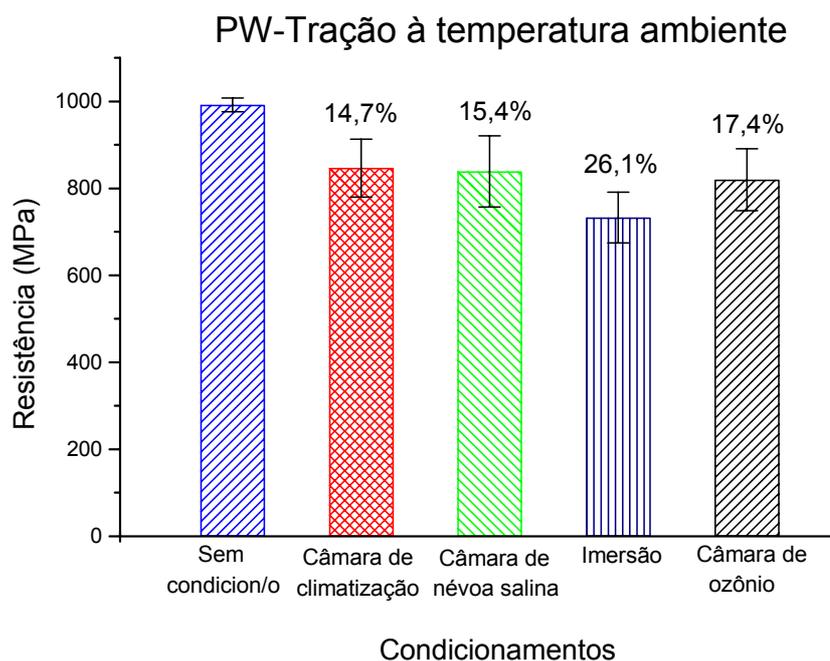


Figura 81 - Resistência à tração dos compósitos reforçados com tecido, ensaiados à temperatura ambiente (22°C).

Comportamento similar é observado nas resistências à tração medidas nos corpos de prova ensaiados em temperatura elevada (82°C) (Tabela 11 e Figura 82), que indica que os compósitos reforçados com tecido, submetidos aos condicionamentos em câmara de climatização ($790,5 \pm 80,7$) MPa, câmara de névoa salina ($795,5 \pm 62,1$) MPa e câmara de ozônio ($799,1 \pm 33,1$) MPa possuem comportamento semelhante (comprovado estatisticamente), com uma diminuição em torno de 7% na sua resistência à tração, em relação às amostras sem condicionamento ($856,5 \pm 31,7$) MPa.

As amostras submetidas ao condicionamento por imersão ($706,6 \pm 21,3$) MPa apresentam uma redução de, aproximadamente, 18%, quando comparadas com os corpos de prova não condicionados ($856,5 \pm 31,7$) MPa, mostrando que o condicionamento mais agressivo aos compósitos reforçados com tecido é o de imersão, tanto nos ensaiados à temperatura ambiente como nos avaliados à temperatura elevada.

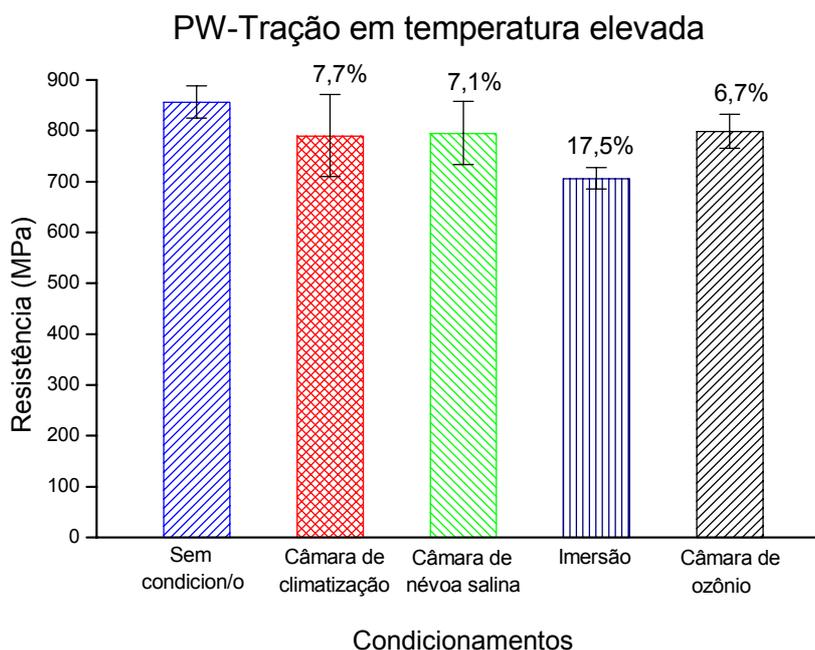


Figura 82 - Resistência à tração dos compósitos reforçados com tecido, ensaiados à temperatura elevada (82°C).

Comparando-se os resultados dos compósitos de tecido sem condicionamento, ensaiados em condição ambiente e em temperatura elevada (Tabela 11 e Figura 83), constata-se que as amostras não condicionadas e caracterizadas em temperatura elevada (856,5±31,7)MPa apresentam uma redução na resistência à tração em torno de 14%, em relação às não condicionadas e avaliadas à temperatura ambiente (992,1 ± 15,7) MPa, evidenciando mais uma vez que a temperatura tem influência danosa nas propriedades mecânicas dos compósitos.

Quando se comparam os resultados das amostras condicionadas em câmara de névoa salina e ensaiadas à temperatura ambiente com as testadas em temperatura elevada, observa-se que os compósitos caracterizados em temperatura elevada (795,5 ± 62,1) MPa apresentam uma perda de 5,2% na resistência à tração em relação aos ensaiados à temperatura ambiente (839,1 ± 81,8) MPa. De maneira similar, comparando-se as amostras condicionadas em câmara de ozônio, verifica-se que os compósitos ensaiados em temperatura elevada

(799,1±33,1) MPa reduzem em 2,5% a sua resistência em relação aos avaliados à temperatura ambiente (819,7 ± 70,9) MPa.

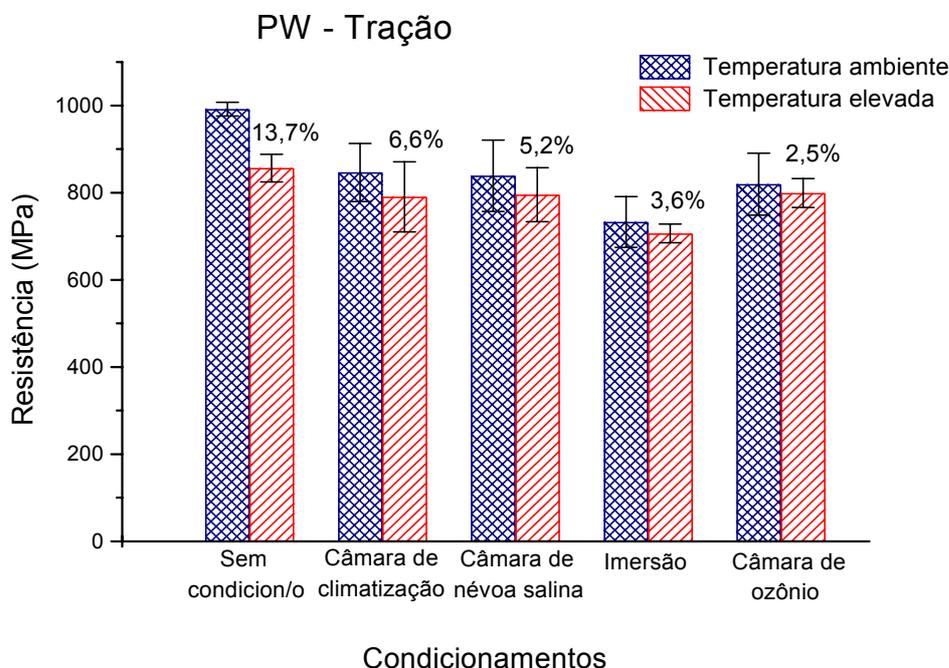


Figura 83 - Resistência à tração dos compósitos reforçados com tecido submetidos a diferentes condicionamentos e ensaiados às temperaturas ambiente (22°C) e elevada (82°C).

Analisando-se os resultados das amostras condicionadas em câmara de climatização, verifica-se que os compósitos ensaiados à temperatura ambiente (846,4 ± 66,4) MPa são em média 6,6% mais resistentes do que os compósitos avaliados a 82°C (790,5 ± 80,7) MPa. Da mesma forma, quando se comparam as amostras condicionadas por imersão em água, observa-se que os compósitos caracterizados em temperatura elevada (706,6 ± 21,3) MPa apresentam um decréscimo de, aproximadamente, 3,6% na sua resistência à tração em relação aos ensaios realizados à temperatura ambiente (732,8 ± 58,4) MPa.

Comparando-se a Figura 34, referente ao compósito unidirecional, com a Figura 83, que mostra o comportamento do compósito reforçado com tecido, verifica-se que o efeito da temperatura é bem menos acentuado no segundo caso (variação de 2,5 a 13,7%), que no

primeiro (variação de 20,2 a 48,9%), devido à influência do reforço disposto nas direções x e y .

A Figura 84 apresenta uma foto representativa dos corpos de prova dos compósitos reforçados com tecido de carbono ensaiados em tração. Observa-se que o cdp apresenta uma nítida ruptura transversal na direção de carregamento, que permite uma detalhada investigação morfológica da região fraturada.

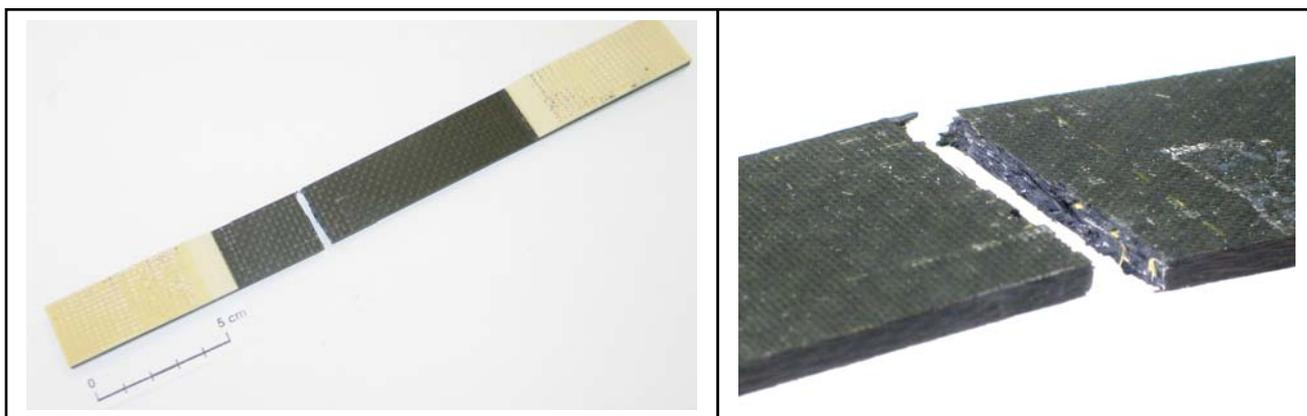


Figura 84 – Vista do corpo de prova de compósito reforçado com tecido após ensaio de tração.

Comparando-se as superfícies de fratura dos corpos de prova do compósito reforçado com tecido sem condicionamento, ensaiados às temperaturas ambiente (22°C) e elevada (82°C) (Figuras 85-88), observa-se que a superfície de fratura da amostra caracterizada à temperatura ambiente (Figura 85) mostra a presença de resina aderida à superfície das fibras (região superior à direita, com fibras transversais), apresentando uma região de ancoragem bem definida da matriz na fibra, com aspectos de cúspides. Esta figura apresenta ainda o arrancamento das fibras (*pull out*) (NAKAMURA, WE, 2000) na região que mostra as fibras de topo (região mediana à esquerda). Para finalizar, a região de cruzamento da trama com o urdume revela uma região rica em resina, que se rompeu durante o ensaio. Nessa região também é evidenciada a boa ancoragem da resina na fibra (parte inferior da imagem).

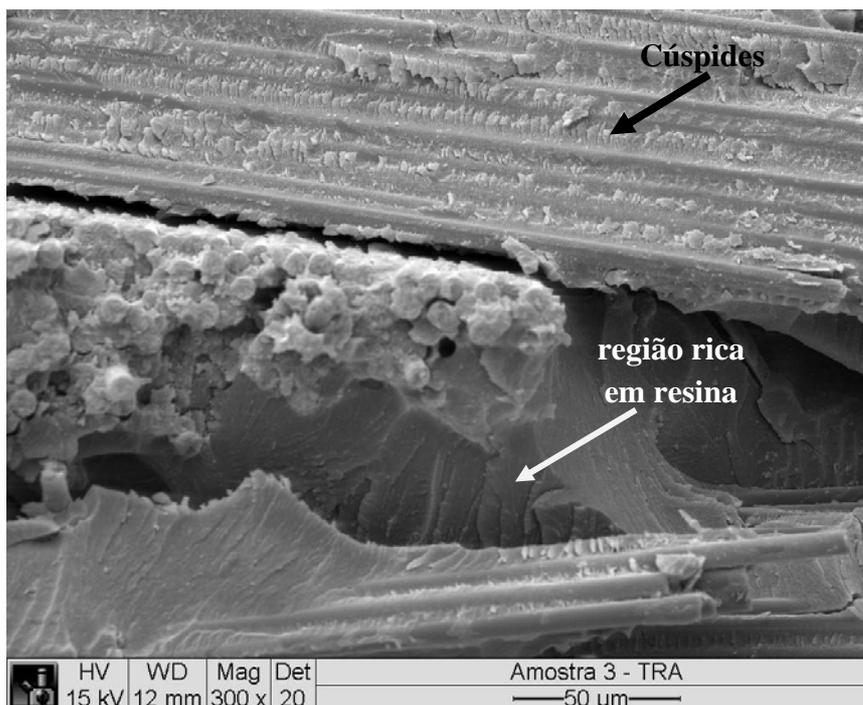


Figura 85 – Análise por MEV do compósito reforçado com tecido sem condicionamento e ensaiado em tração à temperatura ambiente (22°C).

As Figuras 86 e 87 referem-se aos laminados reforçados com tecido, sem condicionamento ambiental e ensaiados à temperatura de 82°C. Estas figuras mostram uma presença maior de arrancamento das fibras e descontinuidades mais extensas nas regiões de cruzamento da trama com o urdume. Com relação à interface fibra-resina não se observam diferenças significativas. Na Figura 87 verifica-se em maiores detalhes a superfície de fratura, com ênfase no aspecto de arrancamento das fibras e na presença de resíduos, provavelmente, oriundos da degradação da matriz de resina epóxi.

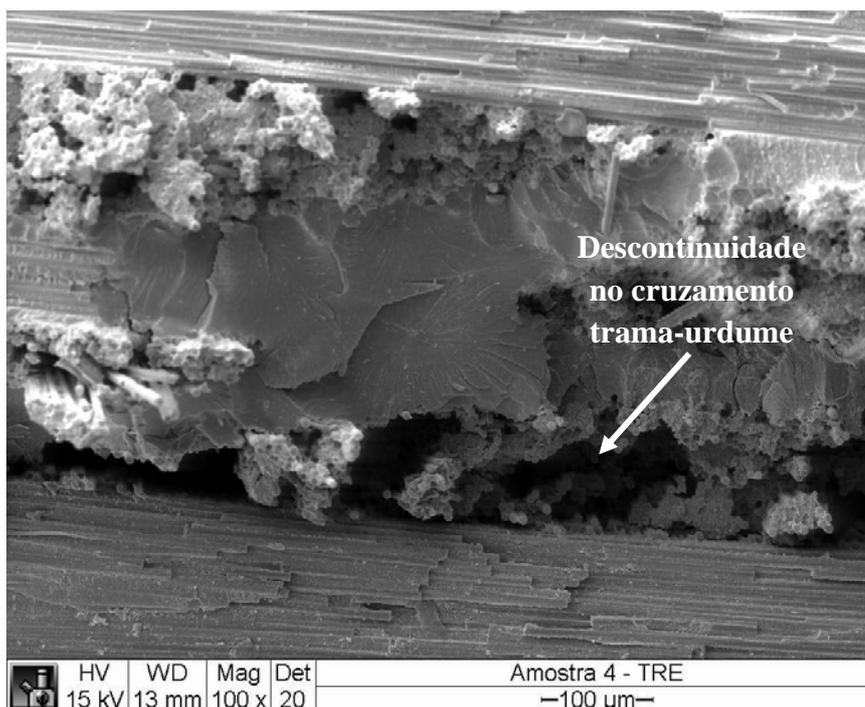


Figura 86 – Análise por MEV do compósito reforçado com tecido sem condicionamento e ensaiado em tração à temperatura de 82°C.



Figura 87 – Análise por MEV com detalhes da superfície de fratura do compósito reforçado com tecido, sem condicionamento, e ensaiado em tração a 82°C.

A Figura 88 mostra uma vista típica da superfície de fratura dos corpos de prova submetidos ao condicionamento por imersão em água, onde se observa a presença de descontinuidades mais acentuadas (seta branca) nas regiões com maior concentração de resina, que geralmente ocorrem no cruzamento da trama com o urdume. Essas descontinuidades provavelmente justificam a maior queda da resistência à tração desta família de laminados.

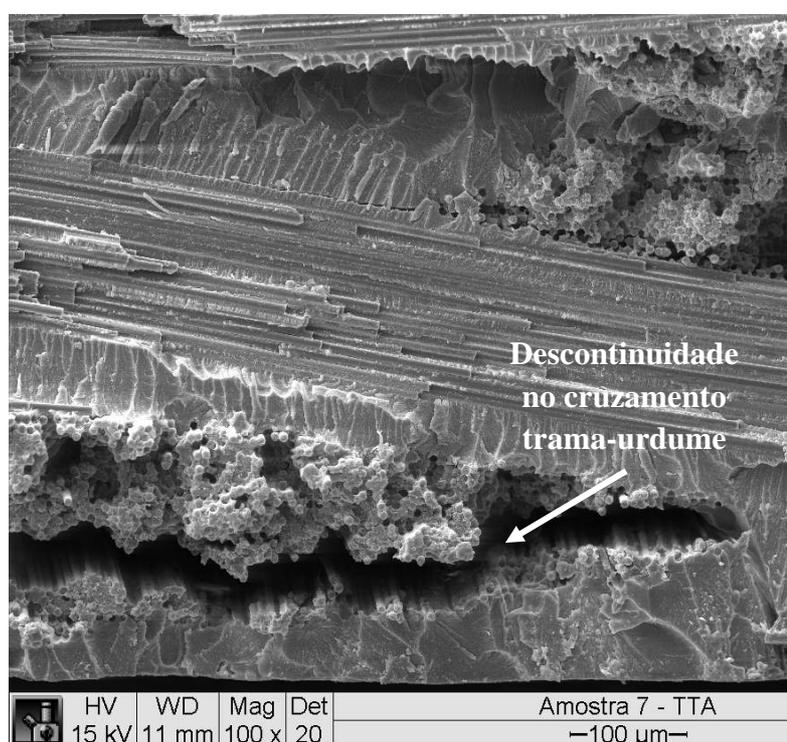


Figura 88 – Análise por MEV do compósito reforçado com tecido, condicionado por imersão em água e ensaiado em tração à temperatura de 22°C.

Com relação às amostras submetidas ao condicionamento em ambiente de ozônio, a análise da superfície de fratura (parte interna do corpo de prova) não mostra alterações significativas na textura da matriz de resina epóxi e nem na região de interface resina-fibra (Figura 89), como já observado nos compósitos unidirecionais. Estes aspectos sugerem que a queda da resistência à tração se dá pela influência dos danos que ocorreram na superfície externa do corpo de prova, decorrentes do severo ataque que as amostras sofreram durante o

condicionamento em ambiente de ozônio, como também observado para as amostras de compósitos unidirecionais (Figuras 30-32). Este comportamento foi observado para as amostras ensaiadas a 22°C como em temperatura elevada de 82°C.

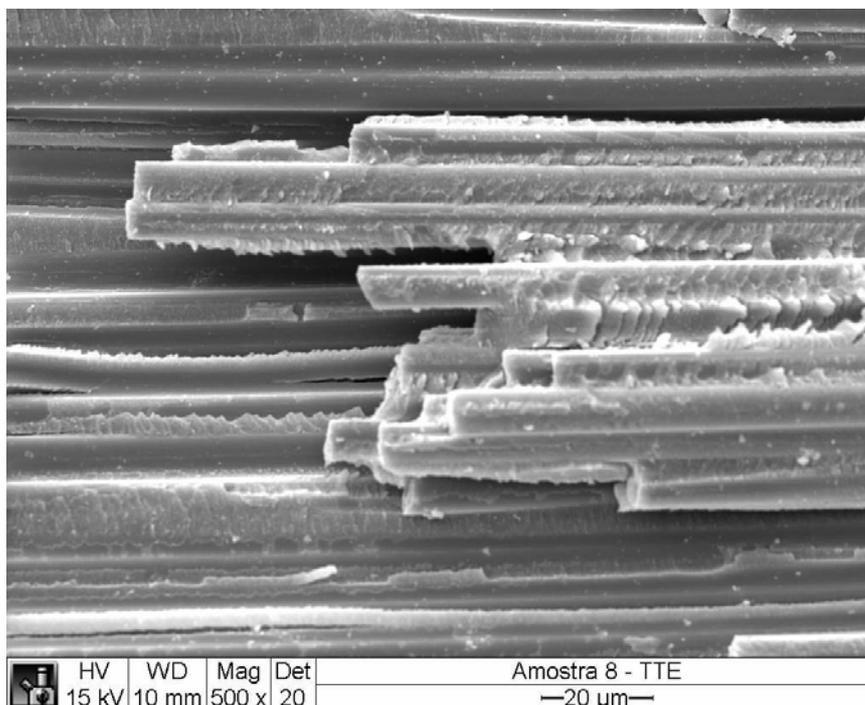


Figura 89 – Análise por MEV com detalhe do compósito reforçado com tecido, condicionado em câmara de ozônio e ensaiado em tração à temperatura de 82°C.

Com relação às superfícies de fratura das amostras submetidas aos condicionamentos higrotérmico e de névoa salina, ensaiadas em temperaturas ambiente e elevada, não são observados aspectos diferentes aos já apresentados nas Figuras 85 e 89.

4.2.3 Comportamento em compressão

A Tabela 12 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão dos compósitos de tecido submetidos aos condicionamentos em câmaras de climatização, de névoa salina, de ozônio e por imersão em água. Além desta tabela, são também mostrados

gráficos de barras comparando-se os resultados obtidos nos diferentes condicionamentos estudados. Os gráficos estão ilustrados nas Figuras 90 a 92. Os resultados experimentais obtidos na determinação da resistência à compressão dos corpos de prova foram também avaliados pelo teste de hipóteses de médias pelos métodos *One-way ANOVA* e *Two-Sample t*, que verificam a hipótese de que as médias de duas ou mais populações são iguais, com um nível de confiança (ou significância) de teste de 95%.

Tabela 12 - Resultados de ensaios de resistência à compressão de compósitos de tecido submetidos a diferentes condicionamentos ambientais.

Ensaio à temperatura ambiente	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Médio (MPa)
Sem condicionamento	579,4	504,0	546,7 ± 27,2
Câmara de climatização	468,1	361,9	418,7 ± 45,1
Câmara de névoa salina	647,5	387,2	539,9 ± 96,1
Imersão	428,6	408,8	418,9 ± 8,2
Câmara de ozônio	550,4	371,5	486,1 ± 65,5
Ensaio em temperatura elevada	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Médio (MPa)
Sem condicionamento	482,9	359,7	408,6 ± 49,8
Câmara de climatização	360,7	295,5	335,6 ± 23,4
Câmara de névoa salina	432,0	426,2	405,3 ± 38,0
Imersão	396,1	319,4	369,2 ± 31,2
Câmara de ozônio	426,2	367,8	390,5 ± 20,9

As resistências à compressão dos compósitos reforçados com tecido (*Plain Weave*), determinadas para os corpos de prova sem condicionamento e ensaiados na condição ambiente ($546,7 \pm 27,2$) MPa, não apresentam variação, quando comparadas com os valores obtidos para os cdps condicionados em câmara de névoa salina ($539,9 \pm 96,1$) MPa e em câmara de ozônio ($486,1 \pm 65,5$) MPa (Tabela 12 e Figura 90). Por outro lado, as amostras submetidas ao condicionamento em câmara de climatização ($418,7 \pm 45,1$) MPa e por imersão ($418,9 \pm 8,2$) MPa apresentam a redução de 23,4% nas suas resistências à compressão,

quando comparadas com as amostras não condicionadas. Esses comportamentos foram estatisticamente comprovados pela ferramenta de análise adotada neste estudo. Nesta análise observa-se que os efeitos dos condicionamentos em câmara climática e por imersão no comportamento em compressão dos compósitos são estatisticamente iguais.

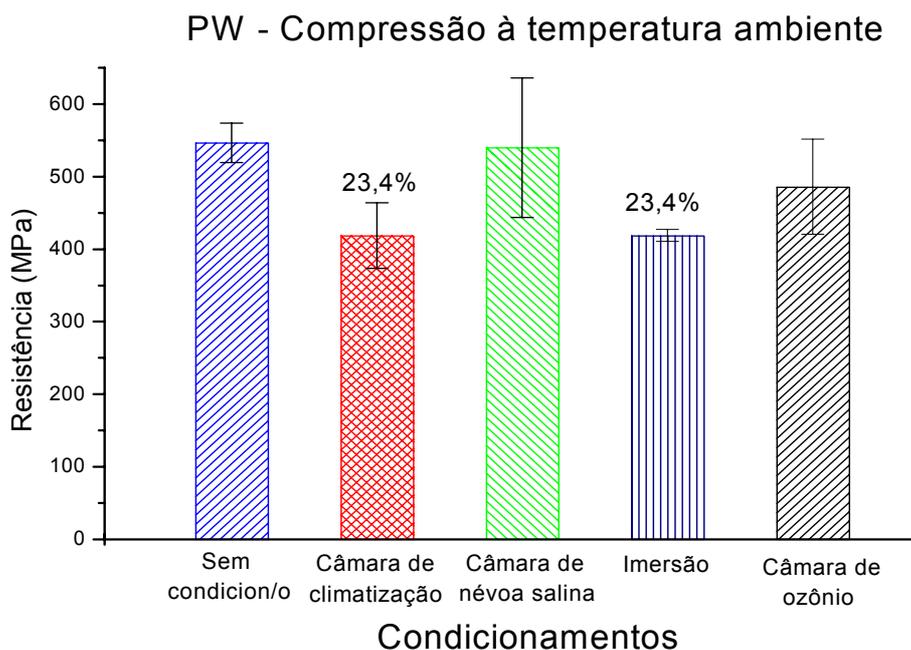


Figura 90 - Resistência à compressão dos compósitos de tecido submetidos a diferentes condicionamentos e ensaiados à temperatura ambiente (22°C).

Comparando-se a Figura 52, referente à resistência à compressão dos compósitos unidirecionais, com a Figura 90, que mostra o comportamento em compressão dos compósitos com tecido, verifica-se em ambos os casos, de maneira geral, que os cdps submetidos aos condicionamentos em câmara de climatização e imersão são os mais afetados. Observa-se ainda que os compósitos unidirecionais expostos ao condicionamento por imersão têm uma queda nesta propriedade de 30,7% (Figura 52) e os reforçados com tecido apresentam uma redução de 23,4% (Figura 90).

Os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova ensaiados em temperatura elevada (82°C) (Tabela 12 e Figura 91) apresentam um comportamento análogo ao observado para os cdps caracterizados à temperatura ambiente (Figura 90). Verifica-se que os compósitos condicionados em câmara de névoa salina (405,3 ± 38,0) MPa, por imersão (369,2 ± 31,2) MPa e em câmara de ozônio (390,5 ± 20,9) MPa não variam quando comparados com os sem condicionamento (408,6 ± 49,8) MPa, com um nível de confiança (ou significância) de teste de 95%.

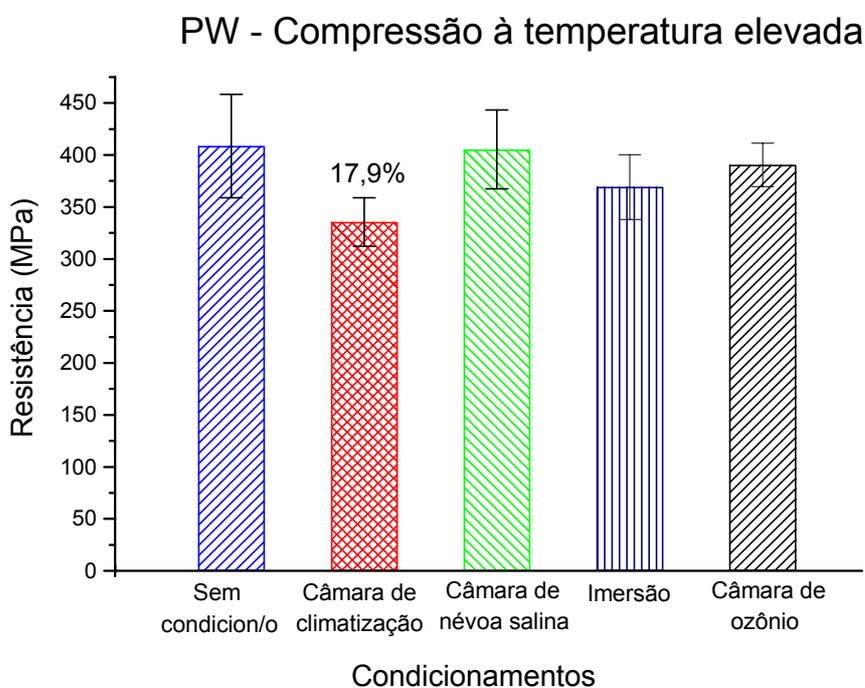


Figura 91 - Resistência à compressão dos compósitos de tecido submetidos a diferentes condicionamentos e ensaiados à temperatura elevada (82°C).

Já as amostras condicionadas em câmara de climatização (335,6 ± 23,4) MPa mostram o decréscimo da propriedade em compressão da ordem de 17,9%. A partir dos dados obtidos conclui-se que os ambientes salino, por imersão e de ozônio não afetam a resistência à compressão dos corpos de prova fabricados em compósitos de tecido de carbono e resina epóxi, quando comparados com os não condicionados (408,6 ± 49,8) MPa. Por outro lado, o

condicionamento em câmara de climatização influencia mais significativamente (17,9%) o comportamento das amostras de compósitos de tecido ensaiadas.

A comparação da Figura 53, referente à resistência à compressão dos compósitos de unidirecionais, com a Figura 91, que mostra o comportamento em compressão dos compósitos com tecido, verifica-se em ambos os casos que os cdps submetidos ao condicionamento em câmara de climatização são os mais afetados. Observa-se ainda que os compósitos unidirecionais submetidos a esse condicionamento mostram uma queda nesta propriedade de 25,7% (Figura 53). Os reforçados com tecido apresentam uma redução de 17,9% (Figura 91).

Verifica-se também para os ensaios às temperaturas ambiente e elevada, que os cdps reforçados com tecido são menos susceptíveis aos condicionamentos, graças à influência do arranjo das fibras do reforço no compósito.

A comparação dos resultados de compressão dos compósitos de tecido ensaiados à temperatura ambiente (22°C) com os avaliados em temperatura elevada (82°C), Tabela 12 e Figura 92, mostra que os compósitos não condicionados e caracterizados a 82°C ($408,6 \pm 49,8$)MPa apresentam um decréscimo de 25,3% em relação aos não condicionados e caracterizados a 22°C ($546,7 \pm 27,2$) MPa. Comportamento semelhante é observado para as amostras condicionadas em câmara de névoa salina à temperatura ambiente ($539,9 \pm 96,1$)MPa, quando comparadas com as avaliadas à temperatura elevada ($405,3 \pm 38,0$) MPa, onde calcula-se uma redução de 24,9% nesta propriedade, fica mais uma vez evidente que o condicionamento em câmara de névoa salina não influencia na resistência do material, sendo a temperatura o fator de redução das propriedades mecânicas dos compósitos.

Quando os resultados das amostras condicionadas em câmara de climatização e ensaiadas à temperatura ambiente ($418,7 \pm 45,1$) MPa são comparados com os valores obtidos a 82°C ($335,6 \pm 23,4$) MPa, observa-se que os compósitos ensaiados em temperatura elevada

mostram uma redução de 19,9% na resistência, semelhante redução (19,7%) é observada para os cdps condicionados em câmara de ozônio.

Já nos condicionados em câmara de condicionamento higrotérmico e por imersão são verificadas reduções de 19,9% e 11,9%, respectivamente (Figura 92), na comparação dos ensaios conduzidos a 82°C e 22°C. Apesar dessas reduções serem menores que as observadas para os outros condicionamentos deve-se considerar, nesta comparação, que esta propriedade já foi consideravelmente degradada nos relativos condicionamentos e o ensaio em temperatura elevada só veio acentuar esta degradação.

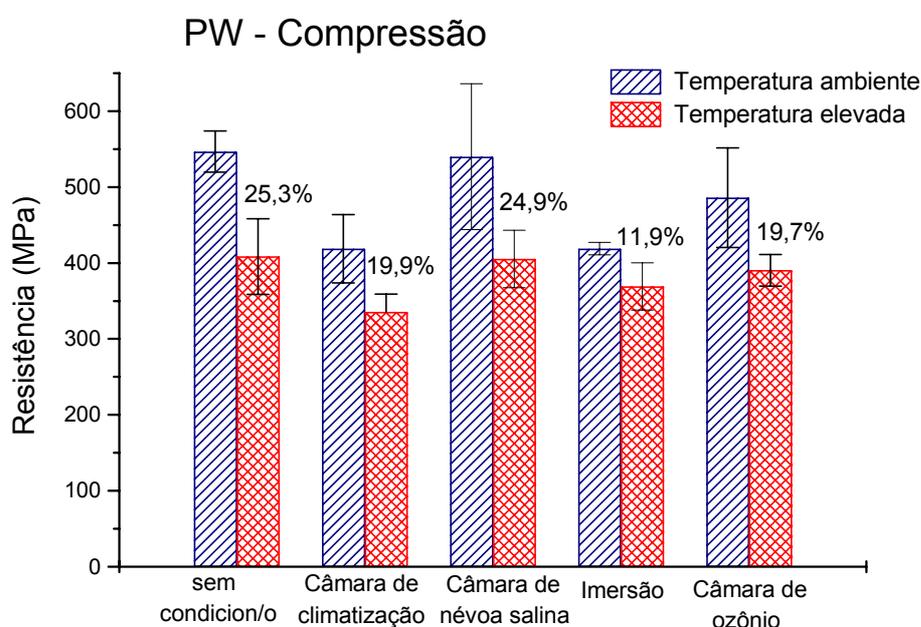


Figura 92 - Resistência à compressão dos compósitos de tecido submetidos a diferentes condicionamentos e ensaiados às temperaturas ambiente (22°C) e elevada (82°C).

A Figura 93 apresenta uma foto representativa das amostras de compósito reforçado com tecido, ensaiadas em compressão. Observa-se que o modo de falha obtido é do tipo separação axial (*axial splitting*), sendo considerado válido, de acordo com a literatura (CUNHA, 2006; SQUIRES; NETTING; CHAMBERS, 2007). Na comparação das superfícies de fratura obtidas, observa-se que os modos de falha resultantes de todas as

famílias de compósitos ensaiadas, considerando tipos de condicionamentos e temperaturas de ensaios, são semelhantes ao mostrado na Figura 93.

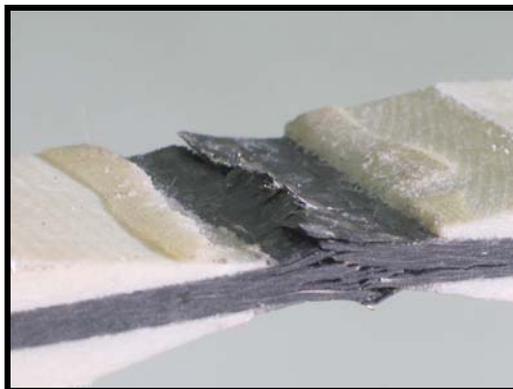


Figura 93 – Vista de um corpo de prova de compósito reforçado com tecido após o ensaio de compressão.

Inicialmente, deve-se mencionar que a análise fractográfica de amostras de compósitos reforçados com tecido é de difícil execução, devido à complexidade envolvida nesse tipo de falha, principalmente em ensaios de compressão. A presença de reforço em duas direções, as influências da matriz, da interface reforço/matriz polimérica e das próprias condições do ensaio imprimem à superfície resultante um conjunto de informações, que normalmente dificulta a análise fractográfica. Mesmo assim, algumas imagens mais elucidativas foram selecionadas para complementar a análise dos compósitos em estudo ensaiados em compressão.

A análise da seção transversal de uma amostra ensaiada mostra a ocorrência de regiões com esmagamentos (Figura 94) e a presença de fraturas dos tipos translaminar e interlaminar bem definidas. Verifica-se ainda que existe uma boa interface entre as lâminas de *prepregs*. A Figura 95 apresenta a superfície de fratura do compósito de tecido de fibras de carbono, onde se observam os filamentos do reforço na direção de topo e também filamentos deslocados da direção mais perpendicular.

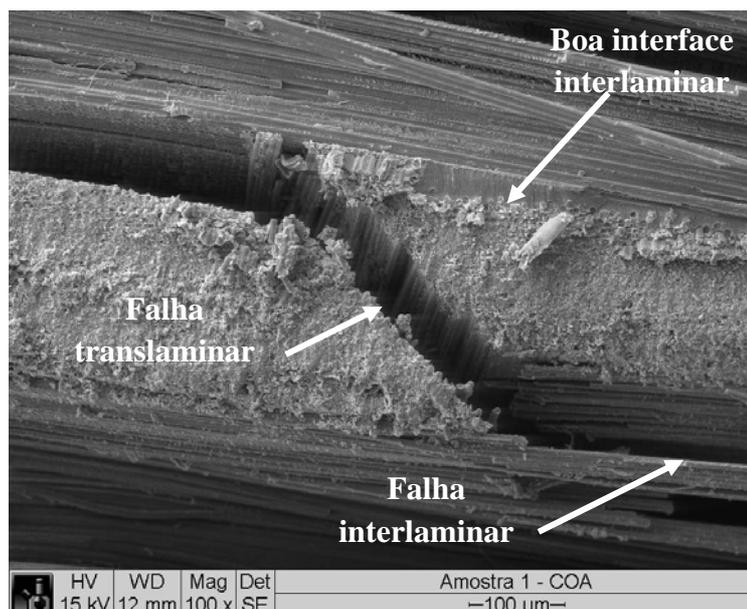


Figura 94 – Análise por MEV do compósito polimérico de tecido sem condicionamento e ensaiado em compressão à temperatura ambiente (22°C).

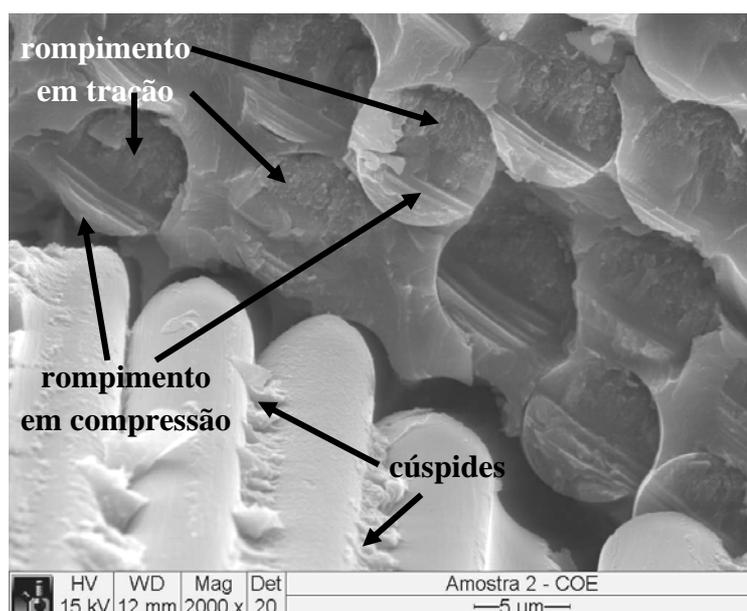


Figura 95 – Análise por MEV com detalhe de região de topo de compósito polimérico de tecido sem condicionamento ensaiado em compressão a 82° C.

Na região de topo observam-se nas pontas das fibras de carbono regiões de tração e compressão, aspectos típicos de ensaios de compressão de materiais rígidos (FRANCO, 2003), oriundos da sobrecarga por compressão, onde a fibra não se deforma plasticamente,

fraturando de maneira frágil. Nessa região de topo observa-se ainda uma boa interface entre a fibra e a resina e na região inferior esquerda a presença de aspectos de cúspides na matriz.

4.2.4 Comportamentos em cisalhamento interlaminar

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência ao cisalhamento interlaminar dos compósitos de tecido submetidos aos diferentes condicionamentos ambientais e dos mantidos na condição ambiente, sem condicionamento. Além da tabela, são também mostrados gráficos de barras comparando-se os resultados obtidos nos diferentes condicionamentos ambientais estudados. Os gráficos estão ilustrados nas Figuras 96 a 98. Para aprimorar as análises dos resultados foi elaborado um estudo estatístico pelo do teste de hipóteses de médias pelos métodos *One-way* ANOVA e *Two-Sample t*, com um nível de confiança de teste de 95%.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento interlaminar dos compósitos de tecido submetidos a diferentes condicionamentos ambientais.

Ensaio à temperatura ambiente	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Média (MPa)
Sem condicionamento	79,2	71,1	74,7 ± 2,8
Câmara de climatização	67,6	61,3	64,8 ± 2,4
Câmara de névoa salina	92,0	74,1	82,5 ± 6,1
Imersão	79,7	72,1	77,2 ± 2,8
Câmara de ozônio	78,0	70,4	75,7 ± 2,9
Ensaio em temperatura elevada	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Média (MPa)
Sem condicionamento	70,5	64,6	67,3 ± 2,1
Câmara de climatização	67,1	62,3	64,9 ± 2,2
Câmara de névoa salina	65,0	55,8	60,8 ± 3,6
Imersão	60,2	54,7	57,0 ± 2,1
Câmara de ozônio	70,7	56,9	63,6 ± 4,7

A comparação dos resultados de resistência ao cisalhamento interlaminar dos corpos de prova (Tabela 13 e Figura 96), na condição ambiente (22°C), mostra que os compósitos de tecido submetidos à câmara de climatização ($64,8 \pm 2,4$) MPa têm sua resistência reduzida em 13,3% na ILSS, quando comparada com as amostras não condicionadas ($74,7 \pm 2,8$) MPa. Verifica-se, ainda, que as amostras condicionadas por imersão ($77,2 \pm 2,8$) MPa e em câmara de ozônio ($75,7 \pm 2,9$) MPa não alteram sua resistência, quando se faz a mesma comparação, com uma probabilidade de 95% de acerto. Por outro lado, a comparação do desempenho das amostras condicionadas em câmara de névoa salina ($82,5 \pm 6,1$) MPa mostra o aumento na resistência ao cisalhamento interlaminar de 10,4%, quando comparada com as amostras não condicionadas. Este aumento na resistência do compósito indica que a água absorvida deve ter interagido com a matriz polimérica de maneira benéfica à propriedade avaliada. COSTA (2002) aborda este fenômeno, mostrando que as moléculas de água podem formar ligações com as resinas termorrígidas. Essas ligações ocorrem quando a água se difunde no interior da resina termorrígida quebrando algumas ligações de van der Waals, resultando em uma maior mobilidade da cadeia polimérica, plasticizando a matriz.

A comparação da Figura 62, referente à resistência ao cisalhamento interlaminar dos compósitos de unidirecionais, com a Figura 96, mostra este comportamento para os compósitos com tecido. Verifica-se, em ambos os casos, que os cdps submetidos ao condicionamento em câmara de climatização são os mais afetados. Observa-se também que os compósitos unidirecionais submetidos a este condicionamento mostram uma queda de 6,1% nesta propriedade (Figura 62) e os reforçados com tecido apresentam uma redução de 13,3% (Figura 96). No caso dos compósitos unidirecionais verifica-se ainda que as amostras submetidas ao condicionamento por imersão têm a sua propriedade diminuída em 5,4%, comportamento não observado para os compósitos com tecido.

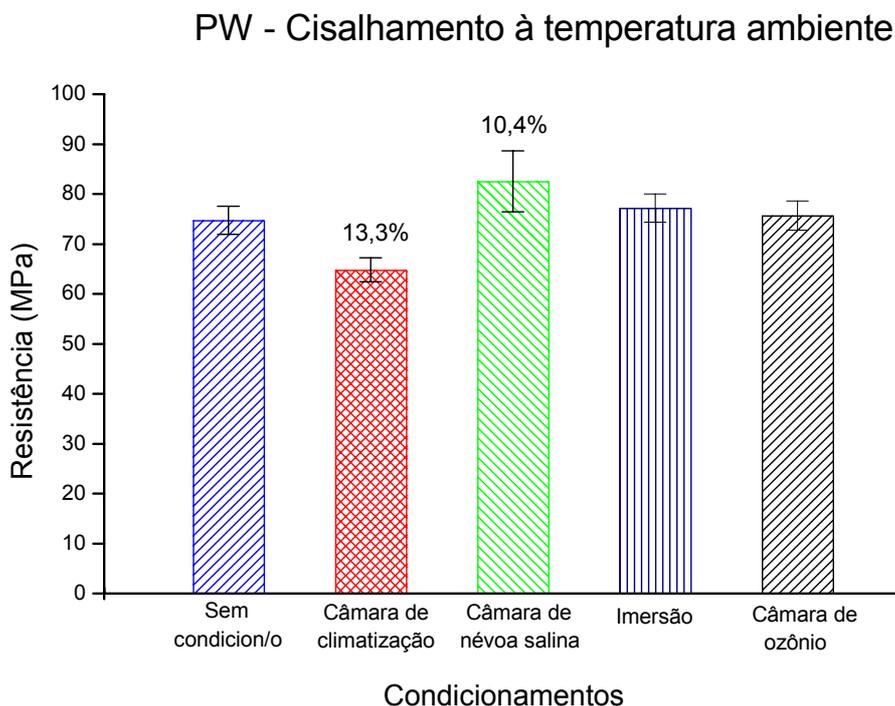


Figura 96 - Resistência ao cisalhamento interlaminar dos compósitos de tecido submetidos a diferentes condicionamentos e ensaiados à temperatura ambiente (22°C).

Comportamento diferenciado é observado nas resistências ao cisalhamento interlaminar dos corpos de prova ensaiados em temperatura elevada (82°C) (Tabela 13 e Figura 97). Nesta análise observa-se que os compósitos submetidos tanto ao condicionamento em câmara de climatização (64,9 ± 2,2) MPa, quanto os expostos ao condicionamento em câmara de ozônio (63,6 ± 4,7) MPa não alteraram a ILSS. Já as amostras condicionadas em câmara de névoa salina (60,8 ± 3,6) MPa apresentam um decréscimo da ordem de 9,7% na sua resistência e os corpos de prova condicionados por imersão (57,0 ± 2,1) MPa uma redução de 15,3%, quando comparados com os não condicionados (67,3 ± 2,1) MPa.

Comparando-se o comportamento dos compósitos unidirecionais (Figura 63), referente à resistência ao cisalhamento interlaminar, com o apresentado pelas amostras com reforço de tecido (Figura 97), ambas ensaiadas a 82°C, verifica-se que todas as famílias dos compósitos unidirecionais apresentam a queda desta propriedade quando ensaiadas em temperatura

elevada (cdps da câmara de climatização mostra a redução de 20,4%, os da câmara de névoa salina 12,8%, os de imersão 30,8% e os climatizados em atmosfera de ozônio 17,2%). Nesses casos, o fato do reforço estar posicionado em somente uma direção evidencia mais claramente a influência dos agentes externos (condicionamentos e temperatura de ensaio) na interface reforço/matriz e na própria matriz.

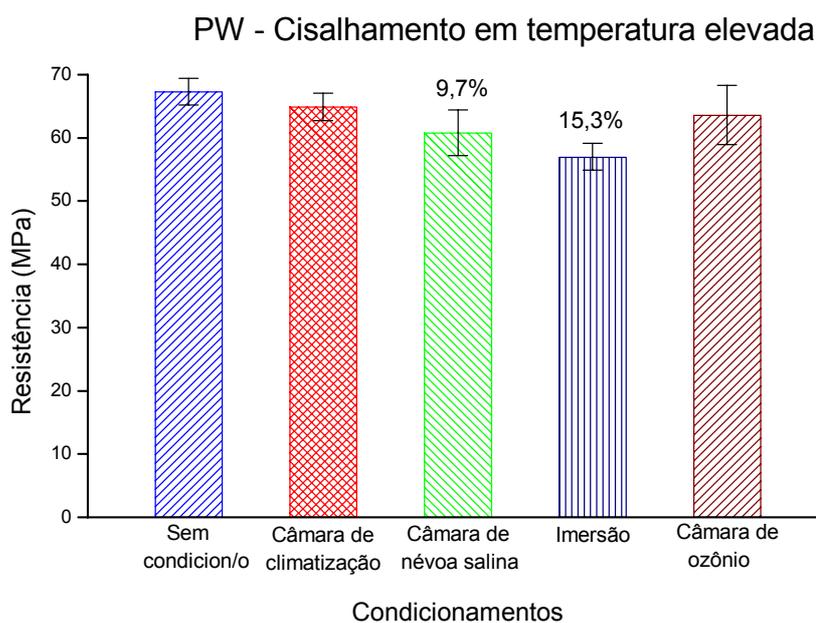


Figura 97 - Resistência ao cisalhamento interlaminar dos compósitos de tecido submetidos a diferentes condicionamentos e ensaiados à temperatura elevada (82°C).

Já as amostras reforçadas com tecido mostram o efeito preponderante da temperatura de ensaio nos cdps condicionados em câmara de névoa salina e imersão, de maneira contrária ao apresentado na Figura 93, onde o condicionamento não mostra influência deletéria nesta propriedade, quando o ensaio é realizado a 22°C. Nesses casos, inclusive, observa-se um melhor desempenho das amostras sujeitas ao condicionamento em câmara de névoa salina (aumento de 10,4% - Figura 96). Nessa condição, o condicionamento mais brando induziu provavelmente a plasticização da matriz de resina epóxi. Tanto neste caso, como no de

imersão, o aparente melhor desempenho em temperatura ambiente tornou-se deletério, quando a temperatura mais alta (82°C) do ensaio foi associada aos referidos condicionamentos.

Comparando-se os resultados dos compósitos ensaiados nas temperaturas ambiente (22°C) e elevada (82°C) (Tabela 13 e Figura 98), observa-se que as amostras não condicionadas e ensaiadas à temperatura ambiente ($74,7 \pm 2,8$) MPa são em média 9,9% mais resistentes do que os compósitos caracterizados em temperatura elevada ($67,3 \pm 2,1$) MPa. Quando os resultados dos cdps condicionados em câmara de névoa salina e avaliados a 22°C ($82,5 \pm 6,1$) MPa são comparados com os obtidos a 82°C ($60,8 \pm 3,6$) MPa constata-se uma perda de 26,3% na ILSS na temperatura de ensaio mais alta. Comportamento similar é verificado para as amostras condicionadas por imersão, onde há um decréscimo de 26,2% na ILSS na temperatura de ensaio de 82°C. Já nos corpos de prova condicionados em câmara de climatização não se constata alteração na sua resistência ao cisalhamento em função das duas diferentes temperaturas de ensaios.

Em resumo, uma temperatura de ensaio mais alta (82°C) mostra-se deletéria no ensaio de todas as famílias de compósitos de tecido estudadas (Figura 98), com exceção ao observado para as amostras submetidas ao condicionamento em câmara de climatização. O comportamento destas amostras é atribuído ao fato deste condicionamento, que já associa umidade e temperatura, induzir os seus efeitos deletérios durante o próprio condicionamento, tornando desprezível a influência da temperatura do ensaio.

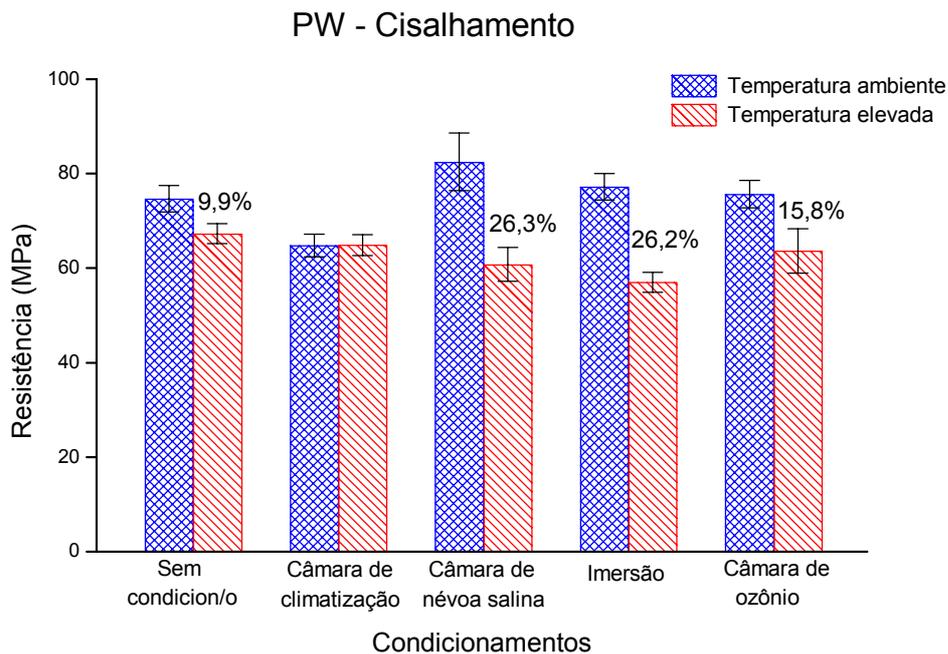


Figura 98 - Resistência ao cisalhamento interlaminar dos compósitos de tecido submetidos a diferentes condicionamentos e ensaios às temperaturas ambiente (22°C) e elevada (82°C).

A análise fractográfica dos corpos de prova de compósitos com tecido, ensaiados em cisalhamento interlaminar, mostra, de maneira geral, aspectos típicos de falhas semelhantes aos já discutidos neste trabalho, para os diferentes condicionamentos e ensaios realizados à temperatura ambiente e a 82°C.

A Figura 99 apresenta uma vista geral de uma amostra de compósito reforçada com tecido, sem condicionamento ambiental e ensaiada a 22°C, onde se observa a presença de reforço nas duas direções e aspectos de cúspides em abundância, que interliga fortemente uma fibra à outra, quando ocorre a separação final das superfícies de fratura. No entanto, não se verifica nenhuma descontinuidade que comprometa a qualidade do material ou do seu desempenho durante o ensaio.

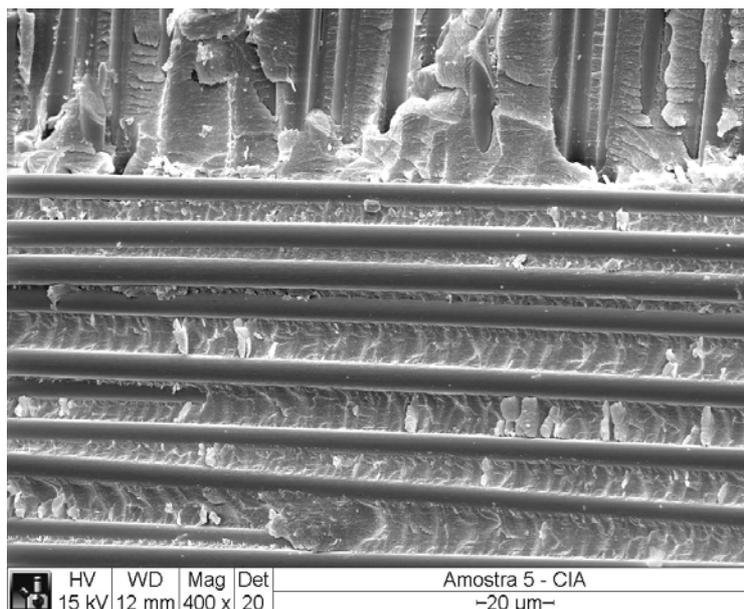


Figura 99 – Análise por MEV do compósito polimérico de tecido sem condicionamento e ensaiado em cisalhamento interlaminar à temperatura ambiente (22°C).

Porém, quando esta mesma amostra é ensaiada em temperatura elevada (82°C), a análise da superfície de fratura proveniente do ensaio de cisalhamento já mostra que a interface reforço/matriz polimérica foi comprometida e também que as superfícies das fibras mostram-se mais isentas de resina (Figura 100). Tais aspectos sugerem que a ruptura pode ter ocorrido preferencialmente na interface e não na matriz (falha coesiva).

As Figuras 101 e 102 são representativas da família de compósitos condicionada por imersão em água e ensaiada em temperatura elevada (82°C). A análise dessas imagens mostra que a interface fibra resina/resina está rompida e que as fibras não possuem resina recobrindo reforço, evidenciando o ataque drástico da água no condicionamento por imersão, acentuado pelo uso de temperatura durante o ensaio de cisalhamento interlaminar.

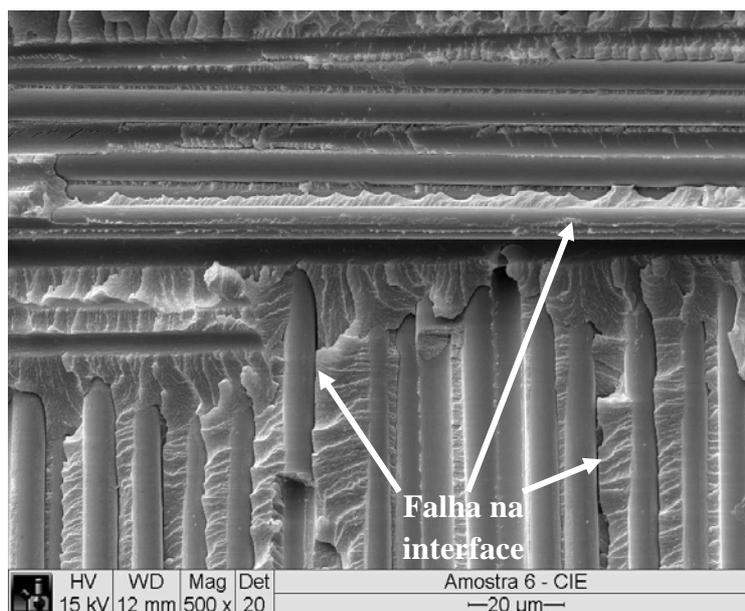


Figura 100 – Análise por MEV do compósito polimérico de tecido sem condicionamento e ensaiado em cisalhamento interlaminar a 82°C.

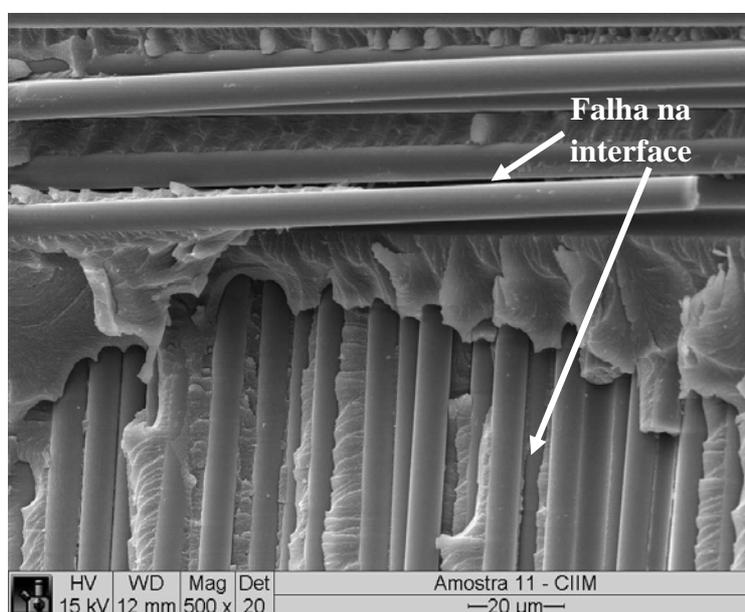


Figura 101 – Análise por MEV do compósito polimérico de tecido condicionamento por imersão e ensaiado em cisalhamento interlaminar a 82°C.

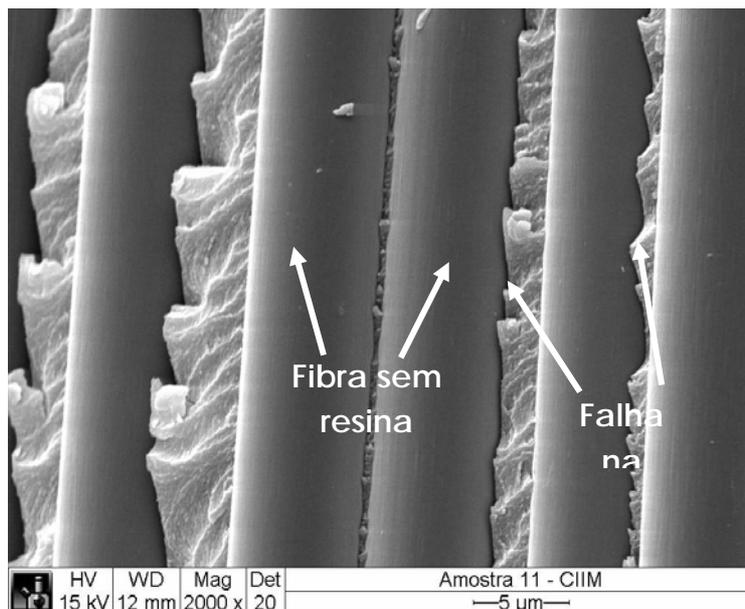


Figura 102 – Análise por MEV com detalhe da interface do compósito polimérico de tecido condicionado por imersão e ensaiado em cisalhamento interlaminar a 82°C.

4.3 Considerações finais

Este tópico apresenta a consolidação dos principais resultados obtidos na caracterização mecânica das duas famílias de compósitos de resina epóxi reforçada com fibra de carbono estudadas – unidirecional e reforçada com tecido.

4.3.1 Compósito unidirecional

- Absorção de umidade

Os compósitos unidirecionais condicionados em câmara de climatização obtiveram um ganho de massa maior do que os condicionados em câmara de névoa salina. Essa maior absorção de umidade por parte dos compósitos submetidos à câmara de climatização deve-se, inicialmente, ao fato da temperatura utilizada na câmara de climatização favorecer uma maior absorção de umidade pelos compósitos e, também, é explicado pela presença de sais minerais

na atmosfera da câmara de condicionamento salino, que atua como uma barreira ao processo de difusão da água, devido aos efeitos coligativos, que dificultam a absorção de umidade pela matriz polimérica. Com relação à orientação do reforço, a análise dos perfis das curvas apresentadas mostra que existe diferença no mecanismo de absorção de umidade nas direções paralelas e perpendiculares ao reforço das amostras. Nos cdps usados para tração transversal, a matriz polimérica fica mais exposta e, assim, favorece uma maior absorção de umidade. Já nos cdps usados para tração longitudinal, compressão e cisalhamento, a presença de fibras nas bordas dificulta a absorção e difusão de umidade no compósito, por isto, apresenta valores menores de ganho de massa.

- Resistência à tração transversal

Todos os condicionamentos a que foram expostos os corpos de prova unidirecionais favoreceram o decréscimo da resistência à tração transversal, tanto dos ensaiados à temperatura ambiente (22°C), quanto dos avaliados em temperatura elevada (82°C). A análise mostra ainda que o condicionamento em câmara de climatização apresenta um efeito deletério acentuado sobre a propriedade de resistência à tração transversal do compósito, com uma diminuição de ~41% da resistência, quando ensaiado a 22°C e de 51%, quando avaliado a 82°C. Observa-se, ainda, que os ensaios executados a 82°C apresentam um decréscimo de 49% para os compósitos condicionados por imersão e de 35% para os submetidos à câmara de climatização, em relação aos ensaios conduzidos a 22°C. Estes dados confirmam que a matriz polimérica, bem como a interface fibra/matriz, já se encontrava fragilizada pelo condicionamento ambiental a qual foi submetida, fazendo com que o ensaio em temperatura elevada afetasse ainda mais a resistência dos compósitos poliméricos, como evidenciam as observações obtidas por microscopia eletrônica de varredura.

- Resistência à tração longitudinal

Observa-se que as amostras submetidas ao condicionamento em câmara de névoa salina não apresentam redução da resistência à tração longitudinal, tanto aquelas ensaiadas a 22°C quanto a 82°C. Esse comportamento é atribuído à propriedade coligativa da solução salina e ao desfavorecimento da difusão da água de um meio mais concentrado em sal para um outro sem sal (compósito).

Verifica-se, ainda, que as amostras condicionadas em câmara de climatização e ensaiadas a 22°C praticamente não tem sua resistência reduzida, quando comparadas com as amostras sem condicionamento. No entanto, os resultados das amostras ensaiadas a 82°C são, em média, 26% menos resistentes do que as ensaiadas a 22°C. Assim, conclui-se que o efeito combinado da temperatura elevada de ensaio com o condicionamento em câmara de climatização reduz a resistência à tração longitudinal, devido à degradação da matriz polimérica e/ou da interface fibra/matriz. Neste caso, o efeito conjunto da temperatura do ensaio com o do condicionamento higrotérmico do corpo de prova é mais nítido e significativo sobre a resistência à tração longitudinal do material, sendo o mais severo dentre os cinco condicionamentos avaliados.

Porém, as amostras submetidas ao condicionamento por imersão tiveram sua resistência reduzida em, aproximadamente, 21%, tanto nos ensaios a 22°C como a 82°C, quando comparadas com as amostras não condicionadas.

Um fato interessante é observar que o condicionamento em câmara de ozônio afeta de maneira significativa a resistência à tração longitudinal dos compósitos poliméricos unidirecionais, tanto os ensaiados a 22°C, quanto os conduzidos a 82°C. Nesses casos, verifica-se uma redução de, aproximadamente, 30% nos valores de resistência, quando comparados com os das amostras sem condicionamento. A explicação para este fato é o severo ataque do ozônio na matriz de resina epóxi e no próprio reforço, levando ao

decréscimo desta propriedade, como evidenciam as imagens obtidas por MEV, que revelam a degradação do corpo de prova pela atmosfera de ozônio. Apesar desse ataque ocorrer da superfície externa do corpo de prova para o interior do material, os defeitos induzidos na superfície acabam degradando a resistência à tração longitudinal do material como um todo, e de maneira acentuada.

Comparando-se os resultados de resistência à tração longitudinal dos compósitos ensaiados, verifica-se que não ocorre alteração significativa no valor desta propriedade para as famílias de compósitos sem condicionamento e condicionadas em atmosfera de ozônio, quando ensaiadas a 22 e 82°C. Esse comportamento é atribuído ao fato desses ensaios serem prioritariamente dominados pela influência do reforço. Nesses casos, os resultados mostram que a temperatura do ensaio não afeta a matriz de resina, que por sua vez não influencia na resistência à tração longitudinal.

- Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão das amostras, realizados a 22°C, mostram que os compósitos unidirecionais têm sua resistência reduzida em ~8%, quando condicionados em câmara de névoa salina, indicando que a atmosfera salina é o condicionamento que menos afeta a matriz polimérica e a interface reforço/resina, pelo fato da difusão de umidade ser desfavorecida pela presença do sal, como já discutido.

Já as amostras submetidas ao condicionamento na câmara de climatização apresentam uma redução de ~16% na sua resistência à compressão, quando comparadas com as sem condicionamento. Verifica-se, ainda, que as amostras condicionadas por imersão apresentam uma redução bem maior, da ordem de 31%, quando comparadas com as não condicionadas. Esses dados mostram que o condicionamento por imersão é o que mais afeta a resistência à compressão dos compósitos unidirecionais estudados, podendo então ser considerada a pior

condição para a aplicação de compósitos poliméricos de resina epóxi. Isto se deve, provavelmente, à maior degradação da matriz polimérica e/ou da interface, em relação aos demais tipos de condicionamentos abordados no presente trabalho.

O comportamento em compressão das amostras ensaiadas a 82°C indica que os compósitos condicionados em câmara de climatização apresentam um decréscimo acentuado da ordem de 26% na resistência, quando comparados com os sem condicionamento. Já os compósitos submetidos ao condicionamento por imersão mostram um decréscimo de ~23% na sua resistência e os condicionados em câmara de névoa salina uma redução de ~18%, em comparação aos compósitos não condicionados e ensaiados a 82°C.

A comparação dos resultados de resistência à compressão dos compósitos unidirecionais ensaiados a 22°C, com os avaliados a 82°C, mostra que os compósitos não condicionados e ensaiados em temperatura elevada apresentam um decréscimo de ~16%, em relação aos não condicionados e ensaiados a 22°C, evidenciando a influência danosa da temperatura nas propriedades mecânicas dos compósitos.

Quando os resultados das amostras condicionadas em câmara de névoa salina e ensaiadas a 22°C são comparados com os valores obtidos para as amostras testadas a 82°C, observa-se que os compósitos avaliados em temperatura elevada mostram uma redução de ~26% na sua resistência. Os previamente condicionados em câmara de climatização higrotérmica apresentam um decréscimo de ~26%, quando caracterizados a 82°C.

Os resultados obtidos confirmam que a combinação de condicionamentos, principalmente em atmosferas úmidas, de compósitos poliméricos, com ensaios em temperatura elevada contribui para acentuar a degradação do comportamento mecânico dessa classe de material, principalmente quando a propriedade em avaliação é dominada pela influência da matriz polimérica e/ou da interface reforço/resina.

No caso dos corpos de prova submetidos ao condicionamento por imersão verifica-se que os resultados oriundos dos ensaios a 82°C são os que apresentam a menor queda (~7%), em relação às amostras testadas a 22°C. Este comportamento é atribuído à maior degradação do material durante o próprio condicionamento por imersão (31%), ou seja, a contribuição deletéria da temperatura do ensaio é minoritária, frente à degradação já imposta pelo condicionamento em água.

- Resistência ao cisalhamento interlaminar (ILSS)

Os ensaios de ILSS realizados nas amostras submetidas à câmara de climatização evidenciam que os compósitos apresentam uma redução de 6% nesta propriedade, quando comparadas com as não condicionadas. Comportamento semelhante é observado para as amostras condicionadas por imersão, que apresentam uma redução de ~5%. Por outro lado, as amostras condicionadas em câmaras de ozônio e de névoa salina não apresentam variação significativa nas resistências, quando comparadas com as amostras não condicionadas. Esse comportamento é explicado pelo fato deste ensaio envolver o cisalhamento da região média do corpo de prova, sugerindo que os efeitos destes condicionamentos não afetam esta região. No caso do condicionamento em atmosfera de ozônio este comportamento é explicado considerando que este tipo de ataque ocorre da superfície externa do corpo de prova. Como o cisalhamento ocorre na região transversal média do cdp, este ensaio não foi influenciado.

Agora, analisando a situação de exposição dos cdps em névoa salina, verifica-se que esta família de laminado apresenta uma absorção de umidade (0,73%) superior à apresentada pelos cdps submetidos ao condicionamento higrotérmico (0,62%). Considerando o bom desempenho mecânico em cisalhamento da família de laminados submetida ao condicionamento em névoa salina, supõe-se que o maior ganho de massa medido deve-se à

presença de sal na superfície do corpo de prova, e não, propriamente, à absorção de umidade pelo material.

Comportamento diferente é observado nos ensaios de ILSS das amostras avaliadas a 82°C, onde se verifica que os compósitos submetidos ao condicionamento por imersão apresentam uma redução de 31%, mostrando a sinergia da umidade e da temperatura influenciando de forma mais acentuada o comportamento mecânico do compósito. Já os condicionados em câmara de névoa salina têm uma redução de ~13%, quando comparados com os não condicionados, evidenciando que a temperatura influencia negativamente o comportamento mecânico do material compósito, em relação ao condicionamento utilizado.

Os compósitos unidirecionais condicionados em câmaras de climatização e de ozônio, quando comparados com os não condicionados, apresentam uma redução na ILSS em temperatura elevada de 20 e 17%, respectivamente, consideradas estatisticamente iguais.

Comparando-se os resultados dos compósitos ensaiados a 22 e 82°C observa-se que as amostras não condicionadas e ensaiadas à temperatura ambiente são, em média, 8,5% mais resistentes do que as avaliadas a 82°C, evidenciando que a temperatura diminui a ILSS. Quando são comparados resultados das amostras ensaiadas a 22 e 82°C, para os diferentes condicionamentos (câmara de climatização, câmara de névoa salina e câmara de ozônio), são comparados verifica-se que há um decréscimo médio de 24% na ILSS. Já no condicionamento por imersão esta redução é mais significativa (33%), reforçando que o efeito combinado da temperatura com a umidade potencializa os efeitos danosos nas propriedades de ILSS dos compósitos unidirecionais.

4.3.2 Compósitos de tecido

- Absorção de umidade

Nos compósitos condicionados em câmara de climatização observa-se um ganho médio de massa entre 0,57 e 0,85%. A absorção de umidade para os compósitos condicionados em câmara de névoa salina é de, aproximadamente, 0,25 e 0,50%. Quando se compara o ganho de massa médio dos compósitos condicionados em câmara de climatização (0,57 - 0,85%), a 82°C, com os submetidos em câmara de névoa salina (0,25 - 0,50%), a 35°C, observa-se que os primeiros apresentam um ganho de massa maior. Essa maior absorção de umidade por parte dos compósitos submetidos à câmara de climatização deve-se, de maneira similar, ao já observado para os compósitos unidirecionais, ao fato da temperatura utilizada na câmara de climatização favorecer uma maior absorção de umidade pelos compósitos e, também, é explicado pela presença de sal na atmosfera da câmara de condicionamento salino, que atua como uma barreira ao processo de difusão da água.

Comparando-se os ganhos de massa dos cdps de tração transversal com reforço unidirecional e tecido, para a 9ª semana, observa-se que os ganhos relativos ao reforço unidirecional ganharam mais massa (0,93%) em relação aos reforçados com tecido (0,68%). Este comportamento é justificado pelo fato dos corpos de prova reforçados com tecido apresentarem menos área com resina exposta ao ambiente úmido.

- Resistência à tração

As resistências à tração dos corpos de prova ensaiados a 22°C mostram que os compósitos reforçados com tecido submetidos à câmara de climatização, câmaras de névoa salina e de ozônio apresentam um decréscimo de, aproximadamente, 15% nesta propriedade, quando comparada com a resistência das amostras não condicionadas.

As amostras submetidas ao condicionamento por imersão apresentam uma redução na propriedade em torno de 26%, quando comparadas com os cdps não condicionados, mostrando que este condicionamento degrada a resistência à tração do compósito reforçado com tecido, de maneira similar ao já observado para os laminados unidirecionais.

Comportamento similar é observado nas resistências à tração medidas nos cdps ensaiados a 82°C, que indica que os compósitos reforçados com tecido, submetidos aos condicionamentos em câmara de climatização, câmara de névoa salina e câmara de ozônio possuem comportamento semelhante (comprovado estatisticamente), com uma diminuição em torno de 7% na sua resistência à tração, em relação às amostras sem condicionamento.

As amostras submetidas ao condicionamento por imersão apresentam uma redução de, aproximadamente, 18%, quando comparadas com os cdps não condicionados, mostrando que o condicionamento mais agressivo aos compósitos reforçados com tecido é o de imersão, tanto nos ensaiados à temperatura ambiente como nos avaliados a 82°C.

Comparando-se os resultados dos compósitos de tecido sem condicionamento, ensaiados a 22°C e 82°C constata-se que as amostras não condicionadas e ensaiadas em temperatura elevada apresentam uma redução na resistência à tração em torno de 14%, em relação às não condicionadas e ensaiadas à temperatura ambiente, evidenciando mais uma vez que a temperatura de ensaio tem influência danosa nas propriedades mecânicas dos compósitos.

Quando se comparam os resultados das amostras condicionadas em câmara de névoa salina e ensaiadas a 22°C com as avaliadas a 82°C, observa-se que os compósitos ensaiados a 82°C apresentam uma perda de 5,2% na resistência à tração em relação aos ensaiados a 22°C. De maneira similar, comparando-se as amostras condicionadas em câmara de ozônio, constata-se que os compósitos ensaiados em temperatura elevada reduzem em 2,5% a sua resistência em relação aos ensaiados a 22°C.

Os resultados das amostras condicionadas em câmara de climatização mostram que os compósitos ensaiados a 22°C são em média 7% mais resistentes do que os compósitos avaliados a 82°C. Da mesma forma, quando se comparam as amostras condicionadas por imersão em água, observa-se que os compósitos ensaiados a 82°C apresentam um decréscimo de, aproximadamente, 4% na sua resistência à tração em relação aos ensaios realizados à temperatura ambiente.

- Resistência à compressão

As resistências à compressão dos compósitos reforçados com tecido, sem condicionamento e ensaiados a 22°C, não apresentam variação, quando comparadas com os valores obtidos para os cdps condicionados em câmaras de névoa salina e de ozônio. Por outro lado, as amostras submetidas ao condicionamento em câmara de climatização e por imersão apresentam a redução de ~23% nas suas resistências à compressão, quando comparadas com as amostras não condicionadas. Nesta análise observa-se que os efeitos dos condicionamentos em câmara climática e por imersão no comportamento em compressão dos compósitos são estatisticamente iguais.

Comparando-se a resistência à compressão dos compósitos unidirecionais, com o comportamento em compressão dos compósitos com tecido, em ambos os casos verifica-se, de maneira geral, que os cdps submetidos aos condicionamentos em câmara de climatização e imersão são os mais afetados. Observa-se ainda que os compósitos unidirecionais submetidos ao condicionamento por imersão têm uma queda nesta propriedade de 31% e os reforçados com tecido uma redução de ~23%.

Os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova ensaiados em temperatura elevada (82°C) apresentam um comportamento análogo ao observado para os cdps ensaiados a 22°C. Verifica-se ainda que, os compósitos condicionados em câmara de

névoa salina, por imersão e em câmara de ozônio não variam quando comparados com os sem condicionamento. Já as amostras condicionadas em câmara de climatização mostram o decréscimo da propriedade em compressão da ordem de 18%. A partir dos dados obtidos conclui-se que os ambientes salino, por imersão e de ozônio não afetam a resistência à compressão dos corpos de prova fabricados em compósitos de tecido de carbono e resina epóxi, quando comparados com os não condicionados. Por outro lado, o condicionamento em câmara de climatização influencia mais significativamente (18%) o comportamento das amostras de compósitos de tecido ensaiadas.

A comparação da resistência à compressão dos compósitos unidirecionais, com o comportamento em compressão dos compósitos com tecido, mostra em ambos os casos que os cdps submetidos ao condicionamento em câmara de climatização são os mais afetados. Observa-se ainda que os compósitos unidirecionais submetidos a este condicionamento mostram uma queda de ~26% e os reforçados com tecido uma redução de 18%. Verifica-se também, para os ensaios a 22°C e 82°C, que os cdps reforçados com tecido são menos susceptíveis aos condicionamentos, graças à influência do arranjo das fibras do reforço no compósito.

A comparação dos resultados de compressão dos compósitos de tecido ensaiados a 22°C com os avaliados a 82°C mostra que os cdps não condicionados e ensaiados a 82°C apresentam um decréscimo de 25% em relação aos não condicionados e ensaiados a 22°C. Comportamento semelhante é observado para as amostras condicionadas em câmara de névoa salina à temperatura ambiente, quando comparadas com as ensaiadas a 82°C, onde se calcula uma redução de 25% nesta propriedade, ficando mais uma vez evidente que o condicionamento em câmara de névoa salina não influencia na resistência do material, sendo a temperatura o fator preponderante de redução da propriedade mecânica.

Quando os resultados das amostras condicionadas em câmara de climatização e ensaiadas a 22°C são comparados com os valores obtidos a 82°C, observa-se que os compósitos ensaiados em temperatura elevada mostram uma redução de ~20% na resistência. Redução semelhante, ~20%, é observada para os cdps condicionados em câmara de ozônio.

Já nos condicionados em câmara de condicionamento higrotérmico e por imersão são constatadas reduções de 20% e 12%, respectivamente, na comparação dos ensaios conduzidos a 82°C e 22°C. Apesar dessas reduções serem menores que as observadas para os outros condicionamentos deve-se considerar, nesta comparação, que esta propriedade já foi consideravelmente degradada nos condicionamentos relativos e o ensaio em temperatura elevada só veio acentuar esta degradação.

- Resistência ao cisalhamento interlaminar

A comparação dos resultados de ILSS dos corpos de prova, na condição ambiente, mostra que os compósitos de tecido submetidos à câmara de climatização têm sua resistência reduzida em 13%, quando comparada com as amostras não condicionadas. Verifica-se, ainda, que as amostras condicionadas por imersão e em câmara de ozônio não alteram sua resistência, quando a mesma comparação é feita. Por outro lado, verifica-se que o desempenho das amostras condicionadas em câmara de névoa salina mostra o aumento na ILSS de 10%, quando comparada com as amostras não condicionadas. Esse aumento na resistência indica que a água absorvida pelo compósito deve ter interagido com a matriz polimérica, formando ligações com a resina termorrígida (ligações de van der Waals), resultando em uma maior mobilidade da cadeia polimérica, plasticizando a matriz.

A comparação das resistências ao cisalhamento interlaminar dos compósitos unidirecionais, com a dos compósitos com tecido, mostra em ambos os casos que os cdps

submetidos ao condicionamento em câmara de climatização são os mais afetados. Observa-se também que os compósitos unidirecionais submetidos a este condicionamento mostram uma queda nesta propriedade de 6% e os reforçados com tecido apresentam uma redução de 13%. No caso dos compósitos unidirecionais verifica-se ainda que as amostras submetidas ao condicionamento por imersão têm a sua propriedade diminuída em ~5%, comportamento este não observado para os compósitos com tecido.

Comportamento diferenciado é observado nas resistências ao cisalhamento interlaminar dos corpos de prova ensaiados a 82°C. Nesta análise observa-se que os compósitos submetidos tanto ao condicionamento em câmara de climatização, quanto os expostos ao condicionamento em câmara de ozônio não alteraram a ILSS. Já as amostras condicionadas em câmara de névoa salina apresentam um decréscimo da ordem de 9,7% na sua resistência e os corpos de prova condicionados por imersão uma redução de 15%, quando comparados com os não condicionados.

Comparando-se o comportamento dos compósitos unidirecionais, referente à resistência ao cisalhamento interlaminar, com o apresentado pelas amostras com reforço de tecido, ambas ensaiadas a 82°C, verifica-se que todas as famílias dos compósitos unidirecionais apresentam a queda desta propriedade quando ensaiadas a 82°C (cdps da câmara de climatização apresenta a redução de 20%, os da câmara de névoa salina 13%, os de imersão 31% e os climatizados em atmosfera de ozônio 17%). Nesses casos, o fato do reforço estar posicionado em somente uma direção evidencia mais claramente a influência dos agentes externos (condicionamentos e temperatura de ensaio) na interface reforço/matriz e na própria matriz.

Já as amostras reforçadas com tecido mostram o efeito preponderante da temperatura de ensaio nos cdps condicionados em câmara de névoa salina e imersão. Nesses casos,

inclusive, observa-se um melhor desempenho das amostras sujeitas ao condicionamento em câmara de névoa salina (aumento de ~10%). Nessa condição, o condicionamento mais brando induziu provavelmente a plasticização da matriz de resina epóxi. Tanto neste caso, como no de imersão, o aparente melhor desempenho em temperatura ambiente tornou-se deletério, quando a temperatura mais alta do ensaio foi associada aos referidos condicionamentos.

Comparando-se os resultados dos compósitos ensaiados a 22°C e 82°C, observa-se que as amostras não condicionadas e ensaiadas à temperatura ambiente são em média 10% mais resistentes do que os compósitos ensaiados em temperatura elevada. Quando os resultados dos cdps condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados a 22°C são comparados com os obtidos a 82°C constata-se uma perda de 26% na ILSS na temperatura de ensaio mais alta. Comportamento similar é verificado para as amostras condicionadas por imersão, onde há um decréscimo de 26% na ILSS na temperatura de ensaio de 82°C. Já nos corpos de prova condicionados em câmara de climatização não se constata alteração na sua resistência ao cisalhamento em função das duas diferentes temperaturas de ensaios.

Em resumo, a temperatura de ensaio mais alta (82°C) mostra-se danoso no ensaio de todas as famílias de compósitos de tecido estudadas, com exceção ao observado para as amostras submetidas ao condicionamento em câmara de climatização. O comportamento dessas amostras é atribuído ao fato desse condicionamento, que já associa umidade e temperatura, induzir os seus efeitos deletérios durante o próprio condicionamento, tornando desprezível a influência da temperatura do ensaio.

5 Conclusões

A partir do trabalho realizado concluem-se, de maneira geral, que o comportamento mecânico (resistências à tração transversal e longitudinal, compressão e cisalhamento) de compósitos de resina epóxi (8552) reforçadas com fibras de carbono, unidirecionais e trançadas, é principalmente afetado pela exposição em ambientes úmidos, como condicionamentos em câmara higrotérmica e por imersão direta em água. Condicionamentos em ambiente de névoa salina e em ozônio mostram-se também prejudiciais ao comportamento mecânico do material, mas em menor intensidade, pelo fato da difusão de água no compósito não ser favorecida em ambiente salino e do ataque do ozônio ocorrer na superfície externa do material. Análises fractográficas das superfícies de fratura mostram que o decréscimo das referidas propriedades mecânicas é acompanhado da degradação da matriz polimérica, com a presença de delaminação e enfraquecimento da interface. Conclusões mais detalhadas são apresentadas:

- com relação aos compósitos unidirecionais

Os compósitos condicionados em câmara de climatização apresentam a tendência de ganhar mais massa que os expostos em câmara de névoa salina. Tal comportamento é atribuído ao fato da atmosfera com sal não favorecer a difusão de água no material compósito.

Com relação ao comportamento mecânico dos compósitos unidirecionais observa-se que a propriedade de resistência à tração transversal é fortemente influenciada pelos condicionamentos em câmara de condicionamento higrotérmico e por imersão em água, com quedas desta propriedade em temperatura ambiente (22°C) de, aproximadamente, 41 e 28%, respectivamente. Este decréscimo foi acentuado nos ensaios a temperatura elevada (82°C), cerca de 50%, para ambos os condicionamentos. Esses comportamentos são atribuídos aos efeitos deletérios da absorção de água e da temperatura de ensaio na matriz polimérica.

De maneira similar à tração transversal, verifica-se nos ensaios de resistência à compressão que os condicionamentos por imersão e em câmara de condicionamento higrotérmico, a 22°C, reduzem esta propriedade em torno de 16 e 31%, respectivamente. Essa tendência de redução é acentuada nos ensaios a 82°C. O material também apresenta o decréscimo desta propriedade (~26%) após o condicionamento em câmara de névoa salina e ensaio a 82°C.

A resistência ao cisalhamento interlaminar das amostras condicionadas em câmara de climatização e por imersão, ensaiadas a 22°C, diminui em, aproximadamente, 6 e 5%, respectivamente. Já os ensaios realizados a 82°C apresentam decréscimos nesta propriedade de ~23% para os compósitos condicionados na câmara de climatização e de 33% nos imersos em água, quando comparados com as amostras ensaiadas a 22°C.

Apesar da resistência à tração longitudinal ser dominada pelo reforço, os resultados obtidos nesta avaliação mostram que esta propriedade é também afetada pelos condicionamentos. No caso da imersão dos corpos de prova em água e de sua exposição em atmosfera de ozônio, verificam-se quedas em torno de 21 e 30%, respectivamente, em ensaios realizados a 22°C. Os efeitos do condicionamento em câmara de climatização do material ensaiado a 22°C são menos severos, com uma redução da propriedade de ~6%, porém, quando os testes são realizados a 82°C esta queda é de ~28%.

- com relação aos compósitos com tecido

Os compósitos reforçados com tecido, de maneira geral, ganharam menos massa nos condicionamentos úmidos que os unidirecionais. Este comportamento é justificado pelo fato dos corpos de prova reforçados com tecido terem menos área rica em resina exposta ao ambiente úmido.

Com relação ao comportamento mecânico, os compósitos condicionados em câmara de climatização e por imersão, ensaiados a 22°C, mostram uma maior redução (~23%) na resistência à compressão. Os ensaios em temperatura elevada também evidenciam a influência desse agente na degradação da propriedade do compósito, com redução de até 25%.

A resistência ao cisalhamento interlaminar mostra queda em torno de 13% para os compósitos climatizados em câmara de climatização de, aproximadamente, 26% para as amostras submetidas aos condicionamentos em névoa salina e imersão, ensaiadas a 82°C.

De maneira geral, a resistência à tração das amostras submetidas a todos os condicionamentos e ensaiadas a 22°C apresenta redução, sendo a mais significativa a referente ao material imerso em água (~26%). Ensaios realizados a 82°C mostram também o efeito deletério da temperatura no comportamento mecânico dos materiais estudados.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros são apresentados os seguintes temas de pesquisa:

- determinar as temperaturas de transição vítrea da matriz epóxi 8552, nas condições seca e úmida, via análises dinâmico-mecânicas, de modo a complementar as discussões dos resultados de propriedades mecânicas;
- avaliar as propriedades mecânicas das fibras de carbono, utilizando compósitos com resinas epóxi diferentes da utilizada neste estudo (8552);
- realizar análises fractográficas mais detalhadas das regiões de fratura obtidas neste trabalho;

- avaliar a degradação da interface dos compósitos submetidos ao condicionamento ambiental, via análises dinâmico-mecânicas, para melhor entender a contribuição deste parâmetro na degradação das propriedades mecânicas;
- complementar este estudo com condicionamento por ciclagem térmica dos compósitos poliméricos termorrígidos.

5.2 Produção técnico-científicos gerada

O desenvolvimento desta tese já gerou três trabalhos apresentados em congressos e dois publicados em periódicos.

- Congressos:

1. CUNHA, J. A. P.; COSTA, M. L.; REZENDE, M. C. Study of the hicrothermal effect on the compression strength of carbon tape/epoxy composites. XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM), Ouro Preto, MG, novembro, 2005.
2. CUNHA, J. A. P.; COSTA, M. L.; REZENDE, M. C. Estudo do efeito do condicionamento ambiental sobre a resistência à compressão dos compósitos de fibra de carbono, de aramida e vidro impregnados com resina epóxi. IX Congresso Brasileiro de Polímeros (CBPol), Campina Grande, PB, outubro, 2007.
3. CUNHA, J. A. P.; COSTA, M. L.; REZENDE, M. C. Influência de diferentes condicionamentos na resistência ao cisalhamento interlaminar de compósitos poliméricos unidirecionais In: XIX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMAT), Campos do Jordão, SP, novembro, (a ser apresentado) 2010.

- Periódicos:

1. CUNHA, J. A. P.; COSTA, M. L.; REZENDE, M. C. Influência de diferentes condições Higrotérmicas na resistência à tração de compósitos de fibra de carbono/epóxi modificada. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 16, nº3, p. 193-201, 2006.
2. CUNHA; J. A. P.; COSTA, M. L.; REZENDE, M. C. Study of the hygrothermal effects on the compression strength of carbon tape/epoxy composites. *Latin American Journal of Solids and Structures* ,www.lajss.org, v.5; p.157-170; 2008.

Referências

ABDO, J.; SHAMSELDEEN, E.; LAFDEE, K. Humidity effects on carbon–carbon composites (fiber pre-form + CVI). **Materials Science and Engineering A**, v. 472, n. 1-2, p. 2-14, Jan. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: referencias: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

ADAMCZAK, L. **Study of hygrothermal ageing of three glass fibre reinforced thermoplastic composites**. 1995. 200 f. Thesis (PhD in Eng. Materials Science) - Ecole Nationale Supérieure des Mines, Paris.

AFAGHI-KHATIBI, A.; MAI, Y.-W. Characterisation of fibre/matrix interfacial degradation under cyclic fatigue loading using dynamic mechanical analysis. **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v.33, n. 11, p. 1585-1592, Nov. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B117-03**: standard practice for operating salt spray (Fog) apparatus. Philadelphia, PA, 2002. v.0 3.02.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C562-00**: standard test method for moisture in a graphite sample. Philadelphia, PA, 2000. v. 15.01.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D570-05**: standard test method for water absorption of plasticsmoisture. West Consholocken, PA, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1149-07**: standard test method for rubber deterioration—cracking in an ozone controlled environment. West Consholocken, PA: ASTM, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 5023-99**: standard test method for measuring of dynamic mechanical of plastics using three point bending. West Consholocken, PA, 1999. v.8.02

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2344/D2344M-06**: standard test method for short-beam strength of polymer matrix composite materials and their laminates. Philadelphia, PA, 2000. v. 15.03.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3039/D3039M-08**: standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. West Conshohocken, PA, 2008. v. 15.03.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3410/D3410M-08**: standard test method for compressive properties of polymer matrix composite materials with unsupported gage section by shear loading. West Conshohocken, PA, 2008. v. 15.03.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5229/D5229M-04**: standard test method for moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials. Philadelphia, PA, 2004. v.15.03.

BAO, L-R.; YEE, A. F. Moisture diffusion and hygrothermal aging in bismaleimide matrix carbon fiber composites: part I: uni-weave composites. **Composites Science and Technology**, v. 62, n. 16, p. 2099-2110, Dec. 2002.

BARBOSA, S. C. **Comportamento mecânico e análise de danos de materiais compósitos obtidos pelo processo de pultrusão**. 1995. 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) – Instituto de Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 1995.

BEUMLER, T. **A contribution to aircraft certification issues on strength properties in non-damaged and fatigue damaged GLARE® structures**. 2004 488 f. Thesis (PhD) - Delft University of Technology, Delft, Netherlands.

BISMARCK, A.; HOFMEIER, M.; DÖRNER, G. Effect of hot water immersion on the performance of carbon reinforced unidirectional poly(ether ether ketone) (PEEK) composites: stress rupture under end-loaded bending. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n. 2, p. 407–426, 2007.

BOTELHO, E. C.; REZENDE, M. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v. 10, n. 2, p.E4-E10, Apr./Jun. 2000. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v10n2/3106.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2008.

BOTELHO, E. C.; PARDINI, L. C.; REZENDE, M. C. Evaluation of hygrothermal effects on the shear properties of Carall composites. **Materials Science and Engineering A**, v. 452/453, p. 292–301, Apr. 2007.

BOUKHOULDA, B. F.; ADDA-BEDIA, E.; MADANI, K. The effect of fiber orientation angle in composite materials on moisture absorption and material degradation after hygrothermal ageing. **Composite Structures**, v. 74, n.2., p. 406–418, 2006.

BRONDSTED, P.; LILHOLT, H.; LYSTRUP, A. Composite materials for wind power turbine blades. **Annual Review of Materials Research**, v.35, p. 505–538, Apr. 2005. Disponível em:< http://www.upwind.eu/Shared%20Documents/WP3%20%20rotor%20structure%20and%20material/309PU93_05_armr_br%C3%B8ndsted.pdf > . Acesso em 15 fev. 2008.

CÂNDIDO, G. M. **Influência do condicionamento ambiental na resistência a delaminação de borda livre em compósitos avançados**. 2001. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Curso de Engenharia Aeronáutica em Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CÂNDIDO, G. M. et al. Hygrothermal effects on quasi-isotropic carbon epoxy laminates with machined and molded edges. **Composites: Part B: engineering**, v. 39, n. 3, p. 490-496, Apr. 2007.

CAMPOS, M. S. **Desvendando o MINITAB**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2003.

CARLSSON, L. A.; PIPES, R. B. **Experimental characterization of advanced composite materials**. 2. ed. Lancaster, PA: Technomic, 1997.

CHOU, T-W. Thermoelastic behavior of laminated composites. In: _____. **Microstructural design of fiber composites**. Cambridge, MA: University Press, 1992. cap. 2 , p. 29-56.

COSTA, M. L. **Efeito do conteúdo de vazios no comportamento mecânico de compósitos avançados carbono/epóxi e carbono/bismaleimida**. 2002. 175 f. Tese (Doutorado em Física e Química de Materiais Aeroespaciais) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2002.

COSTA, M. L. et al. Structural carbon/epoxy prepreg properties comparison by thermal and rheological analyses. **Polymer: Plastics Technology and Engineering**, v.45, n.10, p.1143-1153, Oct. 2006.

CHAWLA, K. K. **Composite Materials: Science and Engineering**. New York: Springer, p.292, 1987.

CUNHA, J. A. P. **Estudo do comportamento mecânico de compósitos poliméricos termorrígidos em diferentes ambientes**. 2004. 117 f. Dissertação (Mestrado em Física e Química dos Materiais Aeroespaciais) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2004.

CUNHA, J. A. P.; COSTA, M. L.; REZENDE, M. C. Influência de diferentes condições higrotérmicas na resistência à tração de compósitos de fibra de carbono/epóxi modificada. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v. 16, n. 3, p. 193-201, 2006. Disponível em: <<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/470/47016307.pdf>> .Acesso em 02 fev. 2007.

CUNHA; J. A. P.; COSTA, M. L.; REZENDE, M. C. Study of the hygrothermal effects on the compression strength of carbon tape/epoxy composites. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v.5, n.2, p.157-170, 2008. Disponível em:<<http://www.lajss.org/index.php/LAJSS/article/viewFile/152/144>>. Acesso em 30 jun. 2007.

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering Mechanics of Composite Materials**. Oxford: Oxford University Press, 1994. 395p.

FOULC, M. P. et al. Study of hygrothermal ageing of glass fibre reinforced PET composites. **Polymer Degradation and Stability**, v. 89, n.3, p. 461-470, Sept. 2005.

FRANCO, A. L. **Fadiga e análise fractográfica de compósitos termoplásticos sob condicionamento**. 2008. 212 f. Tese (Doutorado em Física e Química dos Materiais Aeroespaciais) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

FRANCO, L. A. L. **Análise fractográfica de compósitos poliméricos estruturais**. 2003. 168 f. Dissertação (Mestrado em Física e Química dos Materiais Aeroespaciais) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

FROST, S. et al. **MMS 13 Project: assessment & criticality of defects & damage in materials systems, task 1 review**, AEA Technology. Teddington, Middlesex: National Physical Laboratory, 2002. 60 p. (MMS13 IAG)

GIBSON, R. F. **Principles of composite material mechanics**. New York: McGraw Hill, 1994.

GIGLIOTTI, M.; JACQUEMIN, F.; VAUTRIN, A. On the maximum curvatures of 0/90 plates under thermal stress. **Composite Structures**, v. 68, n. 2, p. 177–184, Apr. 2005.

GOERTZEN, W. K.; KESSLER, M. R. Creep behavior of carbon fiber/epoxy matrix composites. **Materials Science and Engineering A**, v. 421, n. 1-2, p. 217–225, Apr. 2006.

GREENHALGH, E.; HILEY, M.; SINGH, S. **Introduction to fractographic analysis IF composites**. Farnborough Hants: Structural Materials Centre, DERA, Oct. 1997. Course Notes

HAMADA, H. et al. Damage mechanics of hydrothermal-aged fiber-reinforced plastics. In: DEO, R.; SAFF, C. R. (Ed.) **ASTM Special Technical Publication 1274**. West Conshohocken: ASTM International, 1996. p.88-102. (Composite Materials: Testing and Design, v. 12).

HEXCEL COMPOSITES. **RexTow IM7 carbon fiber**. Hexcel Composites, 2009. Disponível em: <[http:// www.hexcel.com/Products/Downloads/Carbon%20Fiber%20Data%20Sheets/](http://www.hexcel.com/Products/Downloads/Carbon%20Fiber%20Data%20Sheets/)> . Acesso em: 02 mar. 2010.

HEXCEL COMPOSITES. **Rexplay 8552 epoxy matrix**. Hexcel Composites, 2007. Disponível em: <<http://www.hexcel.com/Products/Downloads/Prepreg%20Data%20Sheets.>>. Acesso em: 02 mar. 2010.

HOSUR, M.V; ALEXANDER, J.; VAIDYA, U. K. High strain rate compression response of carbon/epoxy laminate composites. **Composites structures**, v. 52, n. 3-4, p. 405-417, May-June 2001.

HULL, D. **An introduction to composite materials**. 3.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1987. p. 246, 1987.

IDICULA, M. et al. Dynamic mechanical analysis of randomly oriented intimately mixed short banana/sisal hybrid fibre reinforced polyester composites. **Composites Science and Technology**, v. 65, n. 7-8, p. 1077-1087, June 2005.

IMIELINSKA, K.; GUILLAUMAT, L. The effect of water immersion ageing on low-velocity impact behaviour of woven aramid–glass fibre/epoxy composites. **Composites Science and Technology**, v.64, n. 13-14, p. 2271–2278, Oct. 2004.

IONASHIRO, M.; GIOLITO, I. Nomenclatura, padrões e apresentação dos resultados em análise térmica. **Cerâmica**, v. 26, p. 54-75, out. nov. 1980.

KANG, K.-W; LIM, D.-M.; KIM, J.-K. Probabilistic analysis for the fatigue life of carbon/epoxy laminates. **Composite Structures**, v. 85, n.3, p. 258–264, Oct. 2008.

KAW, A. K. **Mechanics of composite materials**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1997. (Advanced topics in mechanical engineering series).

KIM, W.C.; DHARAN, C. K. H. Analysis of Five-point bending for determination of the interlaminar shear strength of unidirectional composite materials. **Composite Structures**, v. 30, p.241-251, 1995.

KOLLÁR, L. P.; SPRINGER G. S. **Mechanics of composite structures**. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. p.1, 10, 411-412.

KUMOSA, L. et al. Moisture absorption properties of unidirectional glass/polymer composites used in composite (non-ceramic) insulators. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v.35, n.9, p. 1049–1063, Sept. 2004.

LUZ, S. M. **Estudo das propriedades mecânicas, interface e morfologia de compósitos de polipropileno reforçados com fibras de bagaço e palha de cana**. 2007. 153f. Tese (Doutorado em Biotecnologia Industrial.) – Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, Lorena.

MADHUKAR, M.S.; DRZAL, L.T. Fiber–matrix adhesion and its affects on mechanical properties. II. Longitudinal and transverse tensile and flexure behavior of graphite/epoxy composites. **Journal Composite Materials**; v.25, n. 8, p.958–991, Aug.1991.

MAJIDI, A. P. Fibers and whiskers. In: CHOU, T. W. (Ed). **Materials science and technology**. New York, NY: VCH, 1993, v. 13, cap. 2.

MAYER, S. **Influência do condicionamento ambiental na resistência à tração de laminados de compósitos poliméricos reparados**. 2003. 218 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

MENARD, K. P. **Dynamic mechanical analysis: a practical introduction**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999, p. 208.

MENDONÇA, P. T. R. Tipos de compostos, fibras e matrizes. In: _____ **Materiais compostos e estruturas-sanduiche**. Barueri: Manole, 2005. cap.1, p. 3.

MURAYAMA, T. **Dynamic mechanical analysis of polymeric material**. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing, p. 231, 1978.

NAKAMURA, T.; SINGH, R. P.; VADDADI, P. Effects of environmental degradation on flexural failure strength of fiber reinforced composites. **Society for Experimental Mechanics**, v.46, n. 2, p. 257–268, Apr. 2006.

ORTIZ, Edmundo Cabral. **Avaliação do comportamento dinâmico-mecânico de compósito carbono/epóxi/termoplástico em espectro amplo de frequência**. 2008. 173 f. Dissertação (Mestrado em Física e Química dos Materiais Aeroespaciais) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

OZONTECHNIK DO BRASIL. **Website**, 2003. Disponível em : <<http://www.ozonio.com.br>>. Acesso em: 02 dez. 2009.

PARDINI, L. C. **Introdução a compósitos**. Disciplina FQ 225, 2003. Notas das aulas.

PARDINI, L. C.; PERES, R. J. C. Tecnologia de fabricação de pré-impregnados para compósitos estruturais utilizados na indústria aeronáutica. **Polímeros: ciência e tecnologia**, v. 2, p. 32-42, abr./jun. 1996. Disponível em: <<http://www.revistapolimeros.org.br/PDF/v6n2a02.pdf13>> . Acesso em: novembro 2009.

PAVLIDOU, S.; PAPASPYRIDES, C. D. The effect of hygrothermal history on water sorption and interlaminar shear strength of glass/polyester composites with different interfacial strength. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 34, n. 11, p. 1117–1124, Nov. 2003.

PURSLOW, D. Matrix fractography of fibre-reinforced epoxy composites. **Composites**, v. 17, n. 4, p. 289-303, Oct. 1986.

RAY, B. C. Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 298, n. 1, p. 111–117, June 2006.

SCHULTHEISZ, C. R.; WAAS, A. M. Compressive failure of composites, part I: testing and micromechanical theories. **Progress in Aerospace Science**, v. 32, p. 24-32, 1996.

SCIDA, D.; ABOURA, Z.; BENZEGGAGH, M. L. The effect of ageing on the damage events in woven-fibre composite materials under different loading conditions. **Composites Science and Technology** , v. 62, n. 4, p. 551–7, Mar. 2002.

SHARMA, M.; RAO, I. M.; BIJWE, J. Influence of orientation of long fibers in carbon fiber–polyetherimide composites on mechanical and tribological properties. **Wear**, v. 267, n. 5-8, p. 839–845, Mar. 2009.

SHORT, S. R. Characterization of interlaminar shear failures of graphite/epoxy composite materials. **Composites**, v.26, p. 431-449, 1995.

SMITH, B.W. Fractography for continuous fiber composites. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL. **Composites**. Metals Park: ASM International, 1987. Chap. 11, p. 786-793. (Engineered materials handbook; v. 1).

SOUTIS, C. Fibre reinforced composites in aircraft construction. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 41, n. 2, p. 143–151, Feb. 2005.

SQUIRES, C. A.; NETTING, K. H.; CHAMBERS, A. R. Understanding the factors affecting the compressive testing of unidirectional carbon fibre composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 38, n. 4, p. 481–487, June 2007.

STRONG, A. B. **Fundamentals of composite manufacturing**: materials, methods and applications. Michigan: Society of Manufacturing Engineers, 1989.

SU, F. H. et al. Tribological and mechanical properties of the composites made of carbon fabrics modified with various methods. **Composites Part A: Applied Science And Manufacturing**, v. 36, n.12, p. 1601–1607, Dec. 2005.

SUDARISMAN; DAVIES, I. J.; HAMADA, H. Compressive failure of unidirectional hybrid fibre-reinforced epoxy composites containing carbon and silicon carbide fibres **Composites Part A: applied science and manufacturing**, v. 38, n. 3, p. 1070–1074, 2007. Disponível em: <<http://mech-eng.curtin.edu.au/staff/davies/pdf/papers/Compressive%20failure%20of%20unidirectional%20hybrid%20fibre-reinforced%20epoxy%20composites.pdf>>. Acesso em: 07 fev. 2009.

TANG, J. M.; SPRINGER, G. S. Effects of moisture and temperature on the compressive and short beam shear properties of fiberite of fiberite T300/976 fabric. In: FINLAYSON, K. M. (Ed.) **Carbon reinforced epoxy systems**. Lancaster, PA: Technomic, 1989. Part VII, p. 216-231.

TEWARI, U. S. et al. Solid particle erosion of carbon fibre and glass fibre–epoxy composites. **Composites Science and Technology**, v. 63, n. 3-4, p. 549–557, Feb./Mar. 2003.

TONG, T.; MOURITZ, A.P.; BANNISTER, M. K. **3D fibre reinforced polymer composites**. Amsterdam: Elsevier, 2002.

UNITED STATES. Department of Defense. **MIL-HDBK-17-1F**: composite materials handbook: polymer matrix composites guidelines for characterization of structural materials. Washington: Department of Defense, 2002. v. 1.

VEAZIE, D. R., ROBINSON, K. R., SHIVAKUMAR, K. Effects of the marine environment on the interfacial fracture toughness of PVC core sandwich composites. **Composites Part B: Engineering**, v. 38, p. 461-466, 2004.

WHITCOMB, J. D. **Composite materials testing and design**. Philadelphia, PA: ASTM, 1988.

WIKIPEDIA. **Minitab**. 2005 Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Minitab>>. Acesso em: 01 mar. 2010.

WOOD, C. A., BRADLEY, W. L. Determination of the effect of seawater on the interfacial strength of an interlayer E-Glass/Graphite/Epoxy composite by in situ observation of transverse cracking in an environmental SEM. **Composite Science and Technology**, v. 42, p. 1003-1043, 1997.

XIE, M.; ADAMS, D. F. Study of three- and four-point shear testing of unidirectional composite materials. **Composites**, v. 26, n. 9, p. 653-659, Sept. 1995.

XU, Z. et al. Influence of rare earth treatment on interfacial properties of carbon fiber/epoxy composites. **Materials Science and Engineering A**, v. 444, n. 1-2, p. 170-177, Jan. 2007.

ZHANG, H.; ZHANG, Z.; BREIDT, C. Comparison of short carbon fibre surface treatments. **Composites Science and Technology**, v. 64, n. 13-14, p. 2021-2029, Oct. 2004.

ZHANG, X. P. et al. Environment effect of natural sisal fibre reinforced epoxy composites manufactured by resin transfer molding. In: YE, L.; MAI, Y.-W.; SU, Z. **Composites technologies for 2020**. Cambridge: Woodhead Pub., 2007. p. 88-93.

ZHOU, J.; LUCAS, J. P. Hicrothermal effects of epoxy resin. Part II: variations of glass transition temperature. **Polymer**, v. 40, p. 5513-5522, 1999.

ZHOU, X. H.; SUN Y. S.; WANG, W. S. Influences of carbon fabric/epoxy composites fabrication process on its friction and wear properties. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 9, p. 4553–4557, May 2009.

ZWEBEN, C.; HAHN, H. T.; CHOU, T-W. **Mechanical behavior and properties of composite materials**. Lancaster, PA: Technomic Publishing, 1989.

APÊNDICE A

Registro das tensões

A.1-Tração transversal – *Tape*

Tabela A.1.1 – Sem condicionamento ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação TPTRTSCTA	Resistência à tração(MPa)
1	62,3
2	60,9
3	61,8
4	59,8
5	64,5
6	59,3
Média	61,4
DP	1,9

Tabela A.1.2 - Sem condicionamento ensaiados em temperatura elevada.

Identificação TPTRTSCTE	Resistência à tração(MPa)
1	50,6
2	43,7
3	48,5
4	43,6
5	52,4
6	46,5
Média	47,6
DP	3,6

Tabela A.1.3 - Condicionados em câmara de climatização ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação TPTRTCCTA	Resistência à tração(MPa)
1	38,8
2	33,6
3	34,7
4	34,1
5	36,0
6	38,5
Média	36,0
DP	2,2

Tabela A.1.4 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação TPTRTCCTE	Resistência à tração(MPa)
1	25,9
2	21,1
3	25,1
4	22,5
5	22,5
6	23,1
Média	23,4
DP	1,8

Tabela A.1.5 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação TPTRTSSTA	Resistência à tração(MPa)
1	59,6
2	48,3
3	51,7
4	53,9
5	52,8
6	52,1
Média	53,1
DP	3,7

Tabela A.1.6 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação TPTRTSSTE	Resistência à tração(MPa)
1	43,2
2	39,0
3	41,6
4	42,9
5	45,1
6	42,8
Média	42,4
DP	2,0

Tabela A.1.7 - Condicionados por imersão e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação TPTRTIMTA	Resistência à tração(MPa)
1	53,1
2	42,1
3	49,8
4	40,7
5	41,6
6	38,6
Média	44,3
DP	5,8

Tabela A.1.8 - Condicionados por imersão e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação TPTRTIMTE	Resistência à tração(MPa)
1	21,4
2	26,9
3	21,5
4	16,2
5	23,5
6	26,0
Média	22,6
DP	3,8

Tabela A.1.9 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação TPTRTCOTA	Resistência à tração(MPa)
1	46,0
2	48,1
3	42,3
4	42,4
5	46,1
6	44,5
Média	44,9
DP	2,3

Tabela A.1.10 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação TPTRTCOTE	Resistência à tração(MPa)
1	45,3
2	43,0
3	32,0
4	30,0
5	31,3
6	30,7
Média	35,4
DP	6,9

A.2 - Tração longitudinal – *Tape*

Tabela A.2.1 - Sem condicionamento e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação TPTRLSCOTA	Resistência à tração(MPa)
1	2.606,5
2	2.808,8
3	2.462,4
4	2.676,6
5	2.560,0
6	2.648,1
Média	2.627,0
DP	116,6

Tabela A.2.2 - Sem condicionamento e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação TPTRLSCOTE	Resistência à tração(MPa)
1	2.591,5
2	2.519,0
3	2.513,1
4	2.476,6
5	2.525,3
6	2.563,2
Média	2.531,5
DP	40,4

Tabela A.2.3 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação TPTRLCCTA	Resistência à tração(MPa)
1	2.551,1
2	2.458,8
3	2.454,1
4	2.495,4
5	2.462,8
6	2.446,8
Média	2.478,2
DP	39,5

Tabela A.2.4 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação TPTRLCCTE	Resistência à tração(MPa)
1	1.831,6
2	1.923,1
3	1.950,1
4	1.713,7
5	1.825,4
6	1.752,3
Média	1.832,7
DP	92,3

Tabela A.2.5 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação TPTRLSSTA	Resistência à tração(MPa)
1	2.739,1
2	2.670,0
3	2.653,0
4	2.560,6
5	2.533,4
6	2.535,2
Média	2.615,2
DP	84,7

Tabela A.2.6 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação TPTRLSSTE	Resistência à tração(MPa)
1	2.544,4
2	2.515,4
3	2.563,5
4	2.354,0
5	2.597,0
6	2.315,5
Média	2.481,6
DP	117,5

Tabela A.2.7 - Condicionados por imersão e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação TPTRLIMTA	Resistência à tração(MPa)
1	2.055,0
2	2.042,8
3	2.055,0
4	2.124,3
5	2.064,3
6	2.133,0
Média	2.079,1
DP	39,1

Tabela A.2.8 - Condicionados por imersão e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação TPTRLIMTE	Resistência à tração(MPa)
1	2.027,2
2	1.947,1
3	1.970,6
4	2.053,0
5	2.030,7
6	2.042,4
Média	2.011,8
DP	42,7

Tabela A.2.9 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação TPTRLCOTA	Resistência à tração(MPa)
1	1.816,4
2	1.913,0
3	1.722,0
4	1.835,0
5	1.886,0
6	1.856,0
Média	1.838,1
DP	66,6

Tabela A.2.10 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação TPTRLCOTE	Resistência à tração(MPa)
1	1.606,7
2	1.888,5
3	1.652,7
4	1.896,1
5	1.937,0
6	1.890,9
Média	1.812,0
DP	143,0

A.3 – Cisalhamento – *Tape*

Tabela A.3.1 - Sem condicionamento e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação TPCISSCTA	τ_{rup}^* (MPa)
1	97,8
2	99,5
3	101,0
4	102,4
5	102,2
6	99,6
Média	100,4
DP	1,8

Tabela A.3.2 - Sem condicionamento e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação TPCISSCTE	τ_{rup} (MPa)
1	95,1
2	90,3
3	91,1
4	93,9
5	90,5
6	90,5
Média	91,9
DP	2,1

* τ_{rup} = tensão de ruptura

Tabela A.3.3 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação TPCISCCTA	τ_{rup} (MPa)
1	96,4
2	96,4
3	93,4
4	91,5
5	97,8
6	90,5
Média	94,3
DP	3,0

Tabela A.3.4 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação TPCISCCTE	τ_{rup} (MPa)
1	71,4
2	75,1
3	74,7
4	70,3
5	77,1
6	70,4
Média	73,2
DP	2,8

Tabela A.3.5 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação TPCISSTA	τ_{rup} (MPa)
1	107,3
2	104,0
3	101,5
4	101,1
5	103,5
6	97,3
Média	102,5
DP	3,4

Tabela A.3.7 - Condicionados por imersão e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação TPCISIMTA	τ_{rup} (MPa)
1	95,6
2	94,6
3	95,5
4	96,7
5	93,3
6	94,5
Média	95,0
DP	1,2

Tabela A.3.9 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação TPCISCOTA	τ_{rup} (MPa)
1	109,1
2	103,0
3	101,6
4	89,1
5	100,4
6	105,1
Média	101,4
DP	6,2

Tabela A.3.6 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação TPCISSTE	τ_{rup} (MPa)
1	83,8
2	77,6
3	78,3
4	81,6
5	77,4
6	81,7
Média	80,1
DP	2,7

Tabela A.3.8 - Condicionados por imersão e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação TPCISIMTE	τ_{rup} (MPa)
1	66,9
2	63,3
3	61,2
4	62,5
5	64,2
6	63,8
Média	63,6
DP	1,9

Tabela A.3.10 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação TPCISCOTE	τ_{rup} (MPa)
1	76,5
2	79,3
3	80,3
4	73,2
5	73,9
6	73,5
Média	76,1
DP	3,1

A.4 – Compressão – Tape

Tabela A.4.1 - Sem condicionamento e ensaiado à temperatura ambiente.

Identificação TPCOMSCTA	Resistência à compressão (MPa)
1	1.819,3
2	1.836,8
3	1.778,4
4	1.770,0
5	1.827,2
6	1.841,7
Média	1.812,2
DP	30,6

Tabela. A.4.3 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação TPCOMCCTA	Resistência à compressão(MPa)
1	1.704,4
2	1.376,1
3	1.509,1
4	1.703,8
5	1.312,0
6	1.562,3
Média	1.528,0
DP	163,3

Tabela A.4.5 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação TPCOMSSTA	Resistência à compressão (MPa)
1	1.850,4
2	1.764,4
3	1.654,2
4	1.612,4
5	1.538,7
6	1.586,9
Média	1.667,8
DP	107,3

Tabela A.4.2 - sem condicionamento e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação TPCOMSCTE	Resistência à compressão(MPa)
1	1.485,8
2	1.512,1
3	1.461,7
4	1.587,5
5	1.487,6
6	1.580,0
Média	1.519,1
DP	52,6

Tabela A.4.4 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação TPCOMCCTE	Resistência à compressão (MPa)
1	1.159,9
2	1.118,9
3	1.152,7
4	1.072,6
5	1.120,6
6	1.149,1
Média	1.129,0
DP	32,5

Tabela A.4.6 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação TPCOMSSTE	Resistência à compressão (MPa)
1	1.304,1
2	1.218,6
3	1.242,0
4	1.244,0
5	1.179,9
6	1.238,1
Média	1.237,8
DP	36,9

Tabela A.4.7 - Condicionados por imersão e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação TPCOMIMTA	Resistência à compressão (MPa)
1	1.233,8
2	1.287,2
3	1.225,6
4	1.209,9
5	1.286,2
6	1.295,0
Média	1.256,3
DP	37,3

Tabela A.4.8 - Condicionados por imersão e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação TPCOMIMTE	Resistência à compressão (MPa)
1	1.111,0
2	1.155,9
3	1.225,6
4	1.209,9
5	1.163,7
6	1.172,3
Média	1.173,1
DP	40,9

A.5-Tração transversal - *Plain Weave*

Tabela A.5.1 – Sem condicionamento ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação PWTRTSCTA	Resistência à compressão (MPa)
1	994,0
2	967,8
3	979,7
4	1002,0
5	998,0
6	1011,0
Média	992,1
DP	15,7

Tabela A.5.2 – Sem condicionamento ensaiados em temperatura elevada.

Identificação PWTRTSCTE	Resistência à compressão (MPa)
1	831,4
2	869,8
3	869,8
4	836,6
5	824,0
6	907,3
Média	856,5
DP	31,7

Tabela A.5.3 – Condicionados em câmara de climatização e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação PWTRTCCTA	Resistência à compressão (MPa)
1	773,0
2	914,7
3	816,0
4	884,6
5	914,2
6	775,7
Média	846,4
DP	66,4

Tabela A.5.4 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação PWTRTCCTE	Resistência à compressão (MPa)
1	814,5
2	661,3
3	903,4
4	828,0
5	760,3
6	775,6
Média	790,5
DP	80,7

Tabela A.5.5 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação PWTRTSSSTA	Resistência à compressão (MPa)
1	814,4
2	706,7
3	892,7
4	904,6
5	918,9
6	797,2
Média	839,1
DP	81,8

Tabela A.5.7 - Condicionados por imersão e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação PWTRTIMTA	Resistência à compressão (MPa)
1	662,6
2	757,7
3	678,7
4	825,0
5	730,7
6	742,1
Média	732,8
DP	58,4

Tabela A.5.9 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação PWTRTCOTA	Resistência à compressão (MPa)
1	864,8
2	817,1
3	704,1
4	840,2
5	908,8
6	783,1
Média	819,7
DP	70,9

Tabela A.5.6 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação PWTRTSSTE	Resistência à compressão (MPa)
1	745,7
2	837,4
3	825,4
4	692,4
5	825,1
6	847,2
Média	795,5
DP	62,1

Tabela A.5.8 - Condicionados por imersão e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação PWTRTIMTE	Resistência à compressão (MPa)
1	689,6
2	695,2
3	741,7
4	724,1
5	692,9
6	695,9
Média	706,6
DP	21,3

Tabela A.5.10 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação PWTRTCOTE	Resistência à compressão (MPa)
1	805,6
2	775,1
3	831,5
4	788,7
5	753,8
6	839,8
Média	799,1
DP	33,1

A.6 - Cisalhamento - *Plain Weave*

Tabela A.6.1 - Sem condicionamento e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação PWCISSCTA	Resistência à compressão (MPa)
1	72,4
2	75,8
3	74,9
4	71,1
5	74,9
6	79,2
Média	74,7
DP	2,8

Tabela A.6.2 - Sem condicionamento e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação PWCISSCTE	Resistência à compressão (MPa)
1	70,5
2	68,1
3	66,8
4	65,6
5	68,3
6	64,6
Média	67,3
DP	2,1

Tabela A.6.3 – Condicionados em câmara de climatização e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação PWCISCCTA	Resistência à compressão (MPa)
1	67,6
2	66,5
3	62,3
4	65,3
5	61,3
6	65,6
Média	64,8
DP	2,4

Tabela A.6.4 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação PWCISCCTE	Resistência à compressão (MPa)
1	66,9
2	67,1
3	65,9
4	64,5
5	62,3
6	62,4
Média	64,9
DP	2,2

Tabela A.6.5 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação PWCISSSTA	Resistência à compressão (MPa)
1	74,1
2	79,1
3	83,4
4	80,5
5	85,7
6	92,0
Média	82,5
DP	6,1

Tabela A.6.6 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação PWCISSSTE	Resistência à compressão (MPa)
1	65,0
2	64,2
3	60,8
4	55,8
5	57,7
6	61,6
Média	60,8
DP	3,6

Tabela A.6.7 - Condicionados por imersão e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação PWCISIMTA	Resistência à compressão (MPa)
1	78,7
2	77,2
3	76,3
4	72,1
5	79,2
6	79,7
Média	77,2
DP	2,8

Tabela A.6.8 - Condicionados por imersão e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação P PWCISIMTE	Resistência à compressão (MPa)
1	60,2
2	58,5
3	56,1
4	54,7
5	55,1
6	57,4
Média	57,0
DP	2,1

Tabela A.6.9 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação PWCISCOTA	Resistência à compressão (MPa)
1	70,4
2	76,4
3	77,0
4	74,6
5	77,9
6	78,0
Média	75,7
DP	2,9

Tabela A.6.10 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação PWCISCOTE	Resistência à compressão (MPa)
1	62,8
2	61,3
3	56,9
4	63,5
5	70,7
6	66,6
Média	63,6
DP	4,7

A.7 – Compressão – *Plain Weave*

Tabela A.7.1 - Sem condicionamento e ensaiado à temperatura ambiente.

Identificação PWCOMSCTA	Resistência à compressão (MPa)
1	553,8
2	555,7
3	579,4
4	525,8
5	504,0
6	561,7
Média	546,71
DP	27,2

Tabela A.7.2 - sem condicionamento e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação PWCOMSCTE	Resistência à compressão (MPa)
1	376,9
2	367,9
3	359,7
4	451,0
5	482,9
6	412,9
Média	408,6
DP	49,8

Tabela A.7.3 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação PWCOMCCTA	Resistência à compressão(MPa)
1	466,2
2	468,1
3	426,5
4	361,9
5	372,3
6	417,3
Média	418,7
DP	45,1

Tabela A.7.4 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação PWCOMCCTE	Resistência à compressão (MPa)
1	356,4
2	337,3
3	335,9
4	360,7
5	295,5
6	327,5
Média	335,6
DP	23,4

Tabela A.7.5 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação PWCOMSSTA	Resistência à compressão (MPa)
1	387,2
2	494,9
3	647,5
4	612,5
5	504,7
6	592,7
Média	539,9
DP	96,1

Tabela A.7.6 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação PWCOMSSTE	Resistência à compressão (MPa)
1	427,7
2	372,6
3	430,2
4	343,1
5	432,0
6	426,2
Média	405,3
DP	38,0

Tabela A.7.7 - Condicionados por imersão e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação PWCOMIMTA	Resistência à compressão (MPa)
1	425,0
2	412,4
3	424,7
4	413,7
5	428,6
6	408,8
Média	418,9
DP	8,2

Tabela A.7.8 - Condicionados por imersão e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação PWCOMIMTA	Resistência à compressão (MPa)
1	319,4
2	372,3
3	396,1
4	344,1
5	395,1
6	388,2
Média	369,2
DP	31,2

Tabela A.7.9 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados à temperatura ambiente.

Identificação PWCOMCOTA	Resistência à compressão (MPa)
1	550,4
2	456,7
3	371,5
4	540,7
5	504,2
6	492,9
Média	486,1
DP	65,5

Tabela A.7.10 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados em temperatura elevada.

Identificação PWCOMCOTE	Resistência à compressão (MPa)
1	390,0
2	401,1
3	367,8
4	381,1
5	376,5
6	426,2
Média	390,5
DP	20,9

APÊNDICE B

Teste de Normalidade

B.1-Tração transversal *Tape*

Tabela B.1.1 - Sem condicionamento e ensaiado à temperatura ambiente.

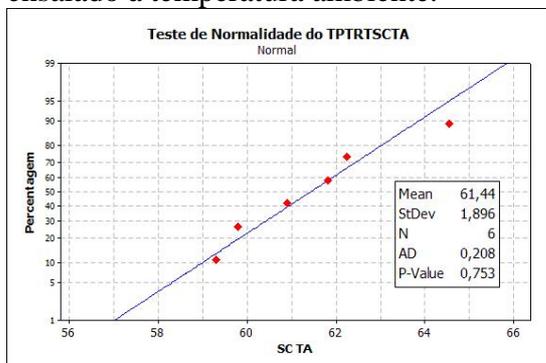


Tabela B.1.2 - sem condicionamento e ensaiado em temperatura elevada.

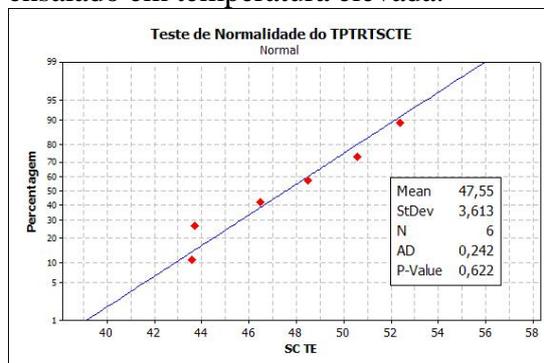


Tabela B.1.3 - Condicionado em câmara de climatização e ensaiado à temperatura ambiente.

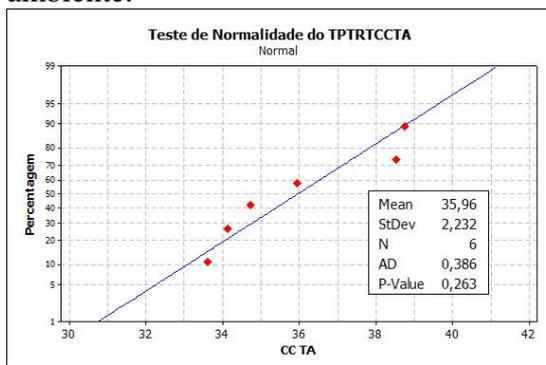


Tabela B.1.4 - Condicionado em câmara de climatização e ensaiado em temperatura elevada.

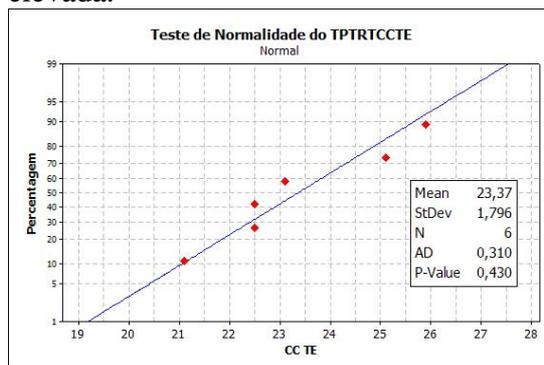


Tabela B.1.5 - Condicionado câmara de névoa salina e ensaiado à temperatura ambiente.

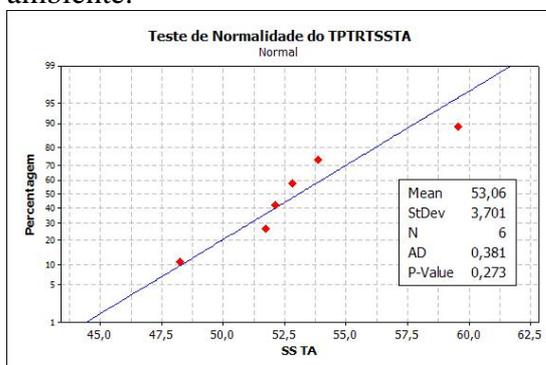


Tabela B.1.6 - Condicionado câmara de névoa salina e ensaiado em temperatura elevada.

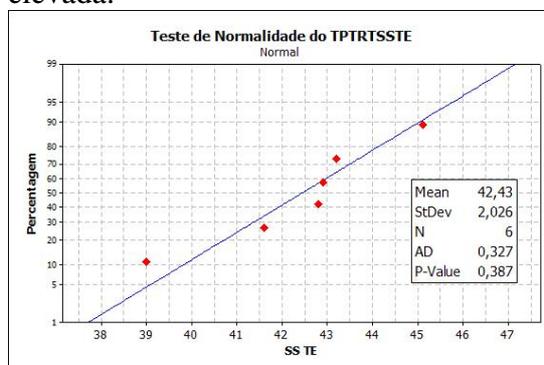


Tabela B.1.7 - Condicionado por imersão e ensaiado à temperatura ambiente.

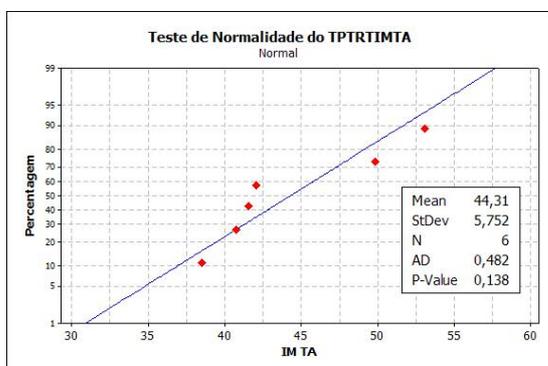


Tabela B.1.8 - Condicionado por imersão e ensaiado em temperatura elevada.

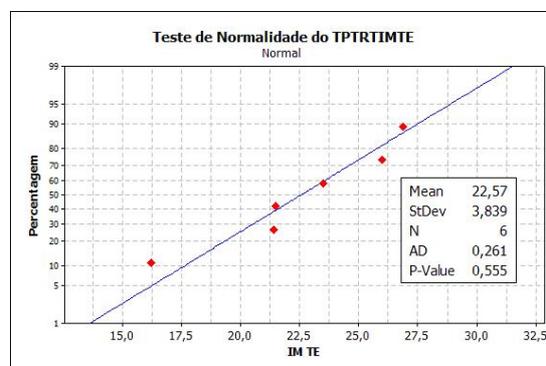


Tabela B.1.9 - Condicionado em câmara de ozônio e ensaiado à temperatura ambiente.

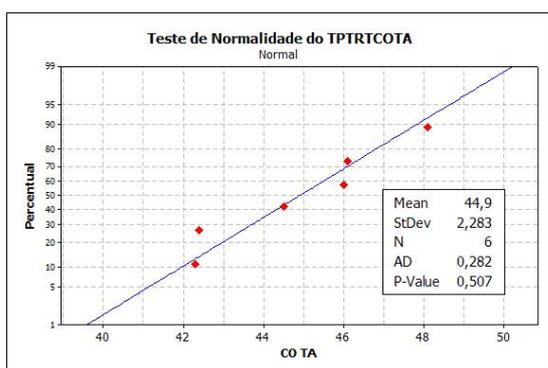
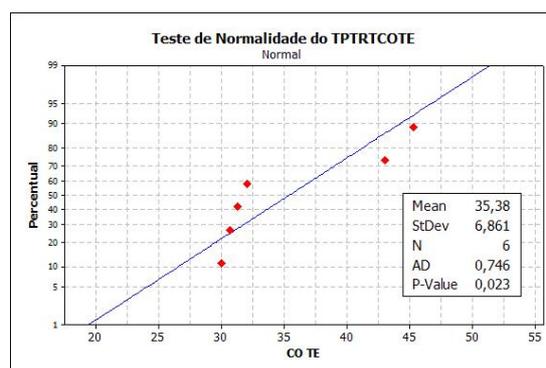


Tabela B.1.10 - Condicionado em câmara de ozônio e ensaiado em temperatura elevada.



B.2 - Tração longitudinal *Tape*

Tabela B.2.1 - Sem condicionamento e ensaiados à temperatura ambiente.

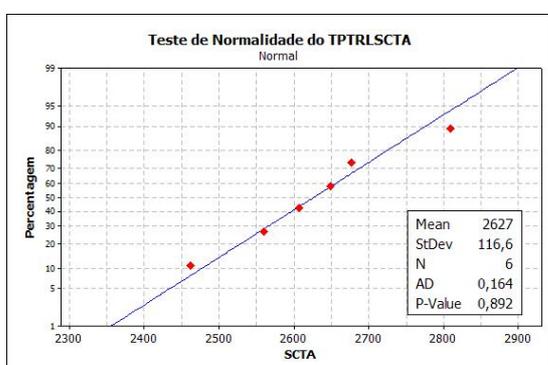


Tabela B.2.2 - Sem condicionamento e ensaiados em temperatura elevada.

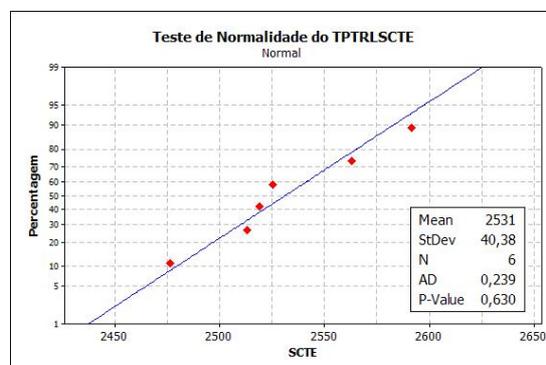


Tabela B.2.3 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados à temperatura ambiente.

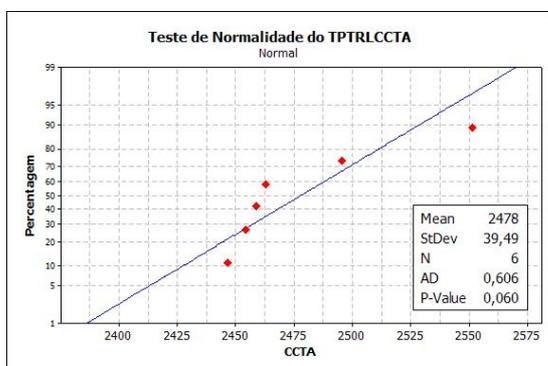


Tabela B.2.4 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados em temperatura elevada.

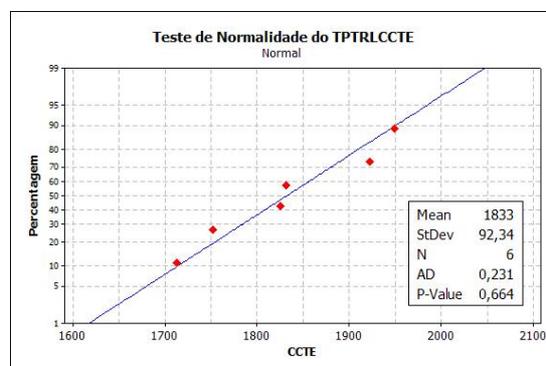


Tabela B.2.5 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados à temperatura ambiente.

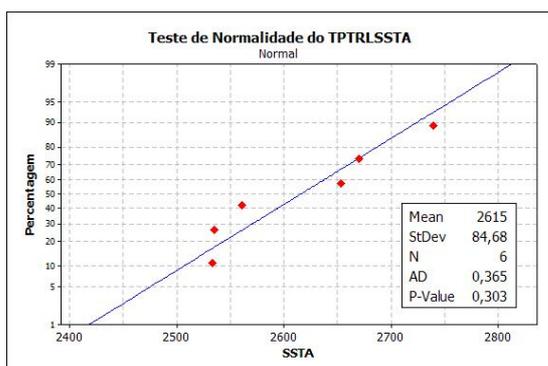


Tabela B.2.6 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados em temperatura elevada.

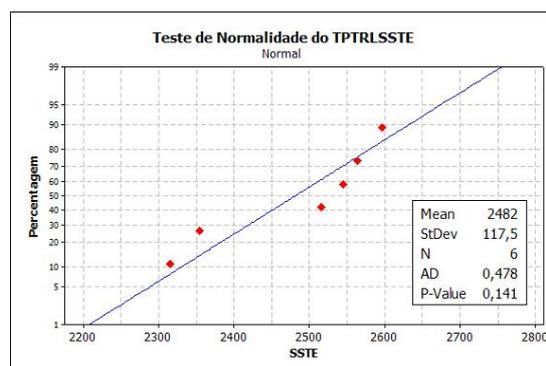


Tabela B.2.7 - Condicionados por imersão e ensaiados à temperatura ambiente.

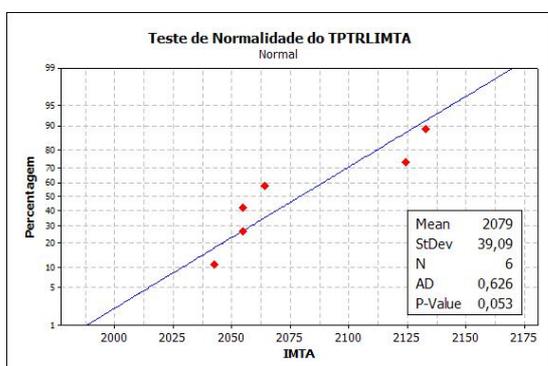


Tabela B.2.8 - Condicionados por imersão e ensaiados à temperatura elevada.

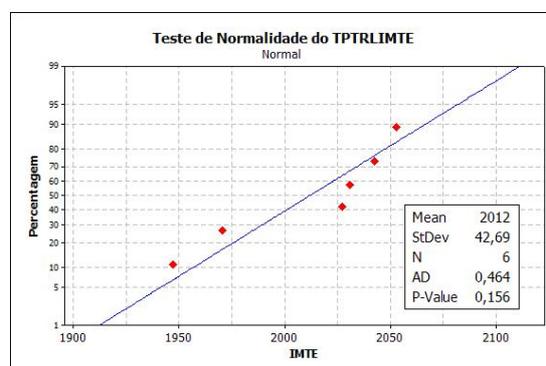


Tabela B.2.9 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados à temperatura ambiente.

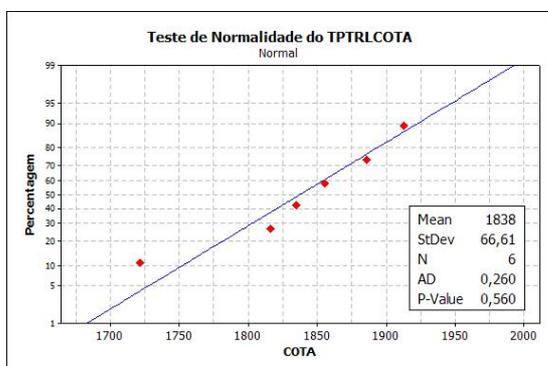
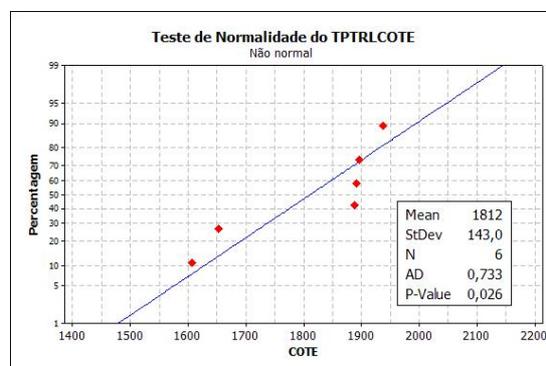


Tabela B.2.10 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados à temperatura elevada.



B.3 – Cisalhamento - Tape

Tabela B.3.1 - Sem condicionamento e ensaiados à temperatura ambiente.

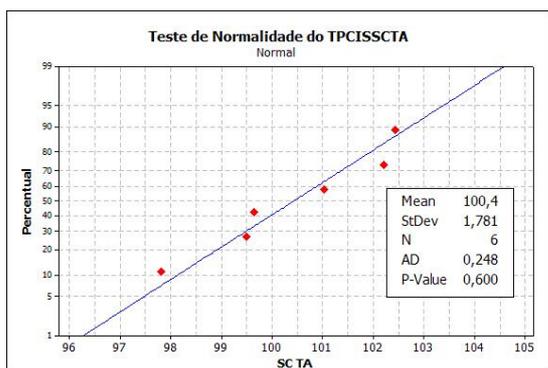


Tabela B.3.2 - Sem condicionamento e ensaiados em temperatura elevada.

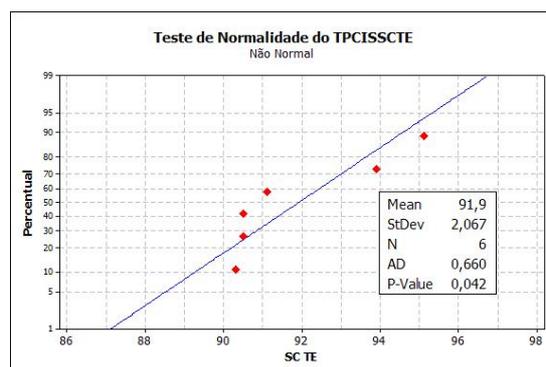


Tabela B.3.3 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados à temperatura ambiente.

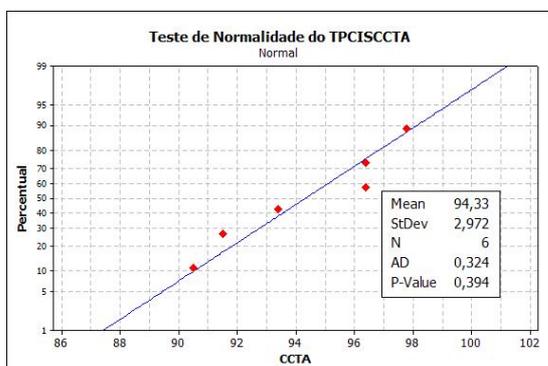


Tabela B.3.4 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados em temperatura elevada.

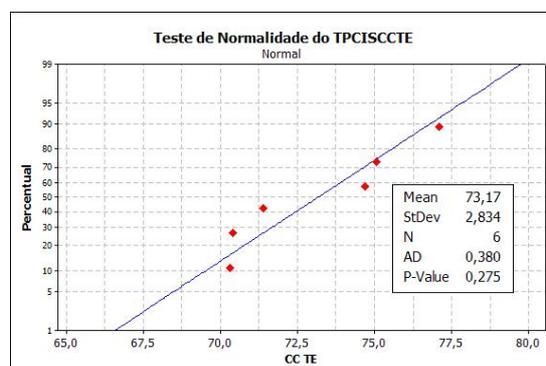


Tabela B.3.5 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados à temperatura ambiente.

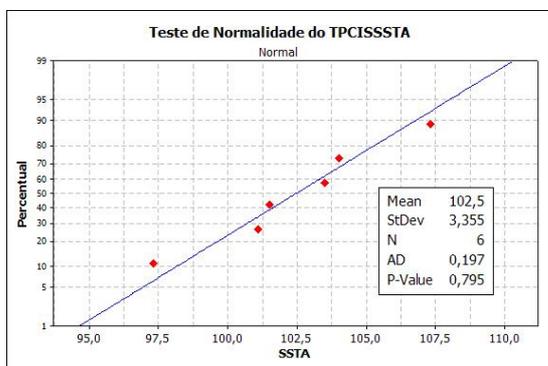


Tabela B.3.6 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados em temperatura elevada.

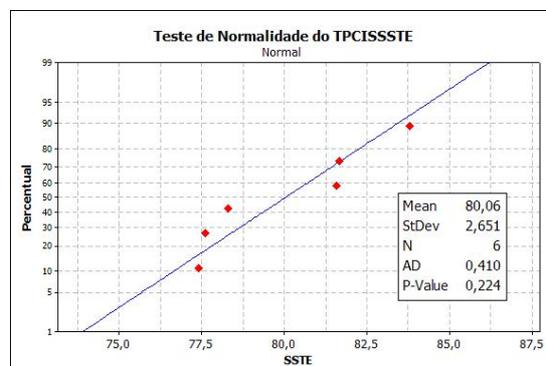


Tabela B.3.7 - Condicionados por imersão e ensaiados à temperatura ambiente.

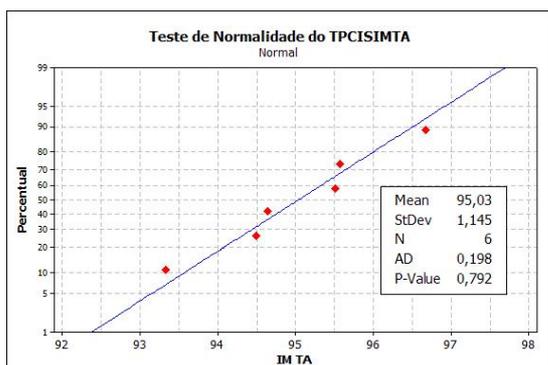


Tabela B.3.8 - Condicionados por imersão e ensaiados em temperatura elevada.

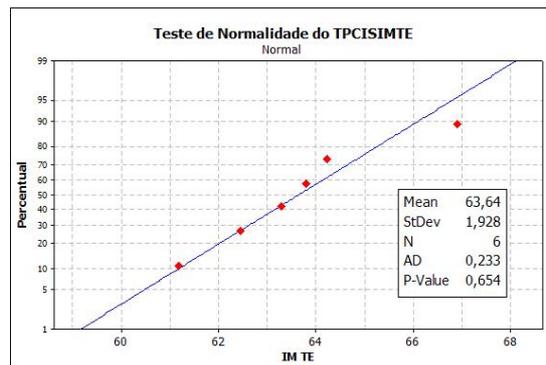


Tabela B.3.9 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados à temperatura ambiente.

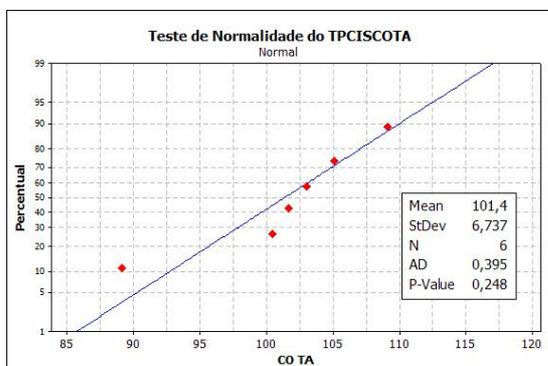
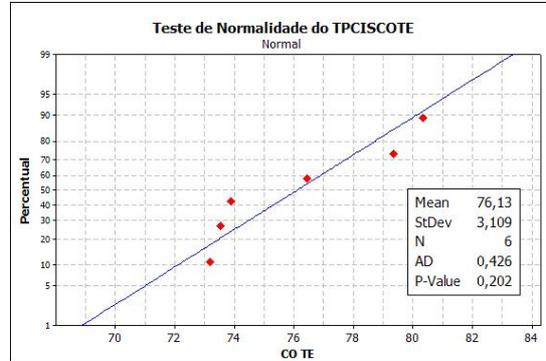


Tabela B.3.10 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados em temperatura elevada.



B.4 – Compressão - *Tape*

Tabela B.4.1 - Sem condicionamento e ensaiados à temperatura ambiente.

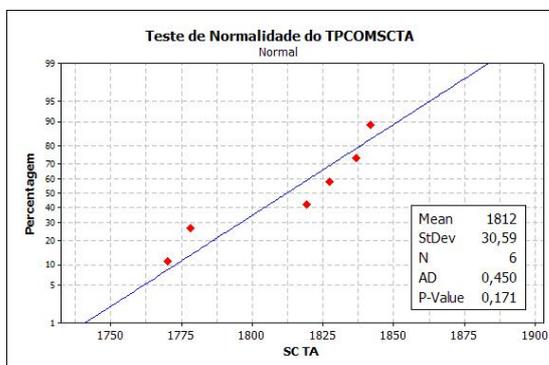


Tabela B.4.2 - Sem condicionamento e ensaiados em temperatura elevada.

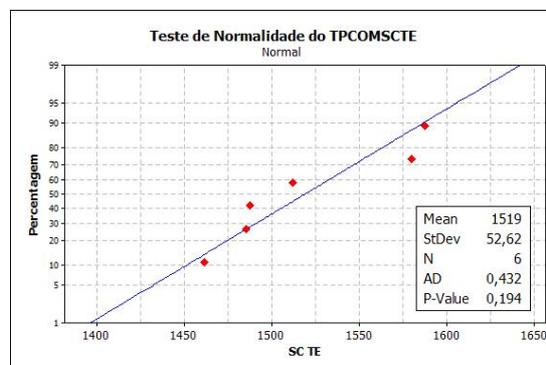


Tabela B.4.3 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados à temperatura ambiente.

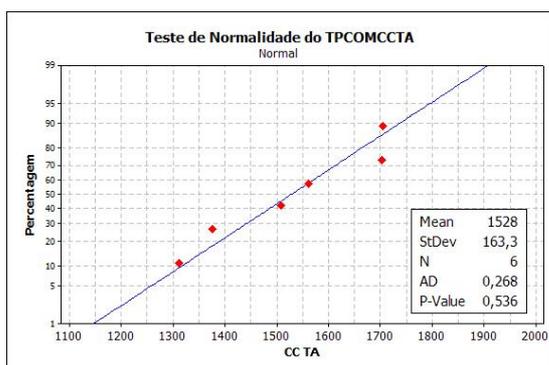


Tabela B.4.4 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados em temperatura elevada.

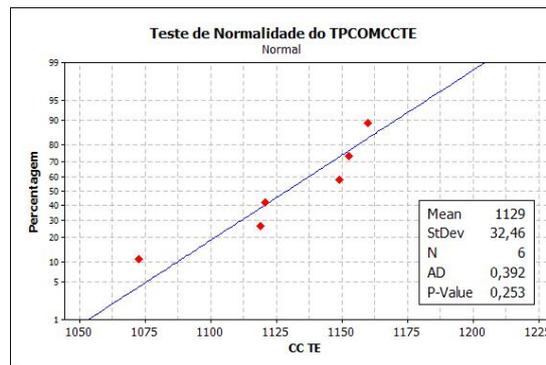


Tabela B.4.5 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados à temperatura ambiente.

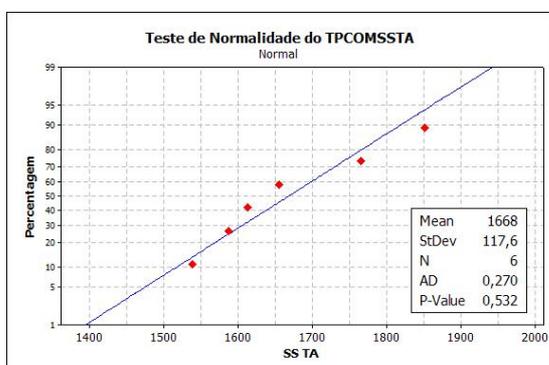


Tabela B.4.6 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados em temperatura elevada.

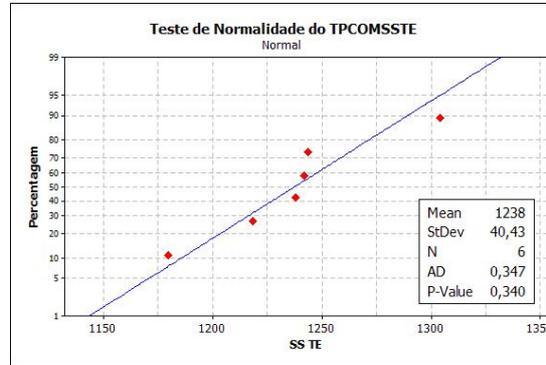


Tabela B.4.7 - Condicionados por imersão e ensaiados à temperatura ambiente.

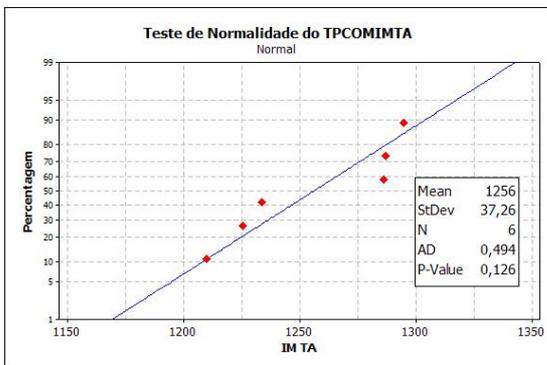
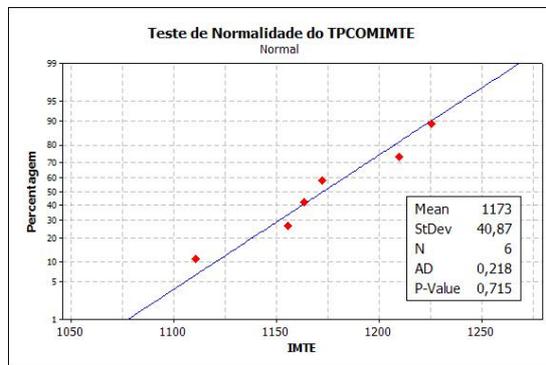


Tabela B.4.8 - Condicionados por imersão e ensaiados à temperatura elevada.



B.5-Tração - Plain weave

Tabela B.5.1 - Sem condicionamento e ensaiados à temperatura ambiente.

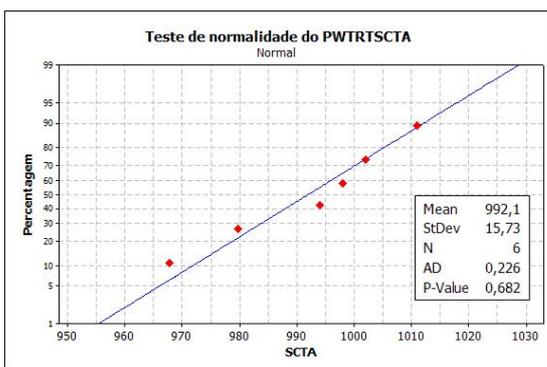


Tabela B.5.2 - Sem condicionamento e ensaiados em temperatura elevada.

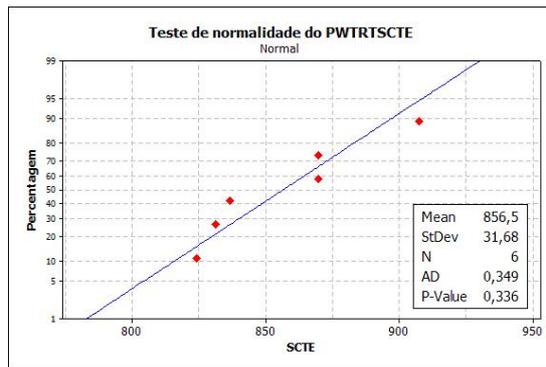


Tabela B.5.3 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados à temperatura ambiente.

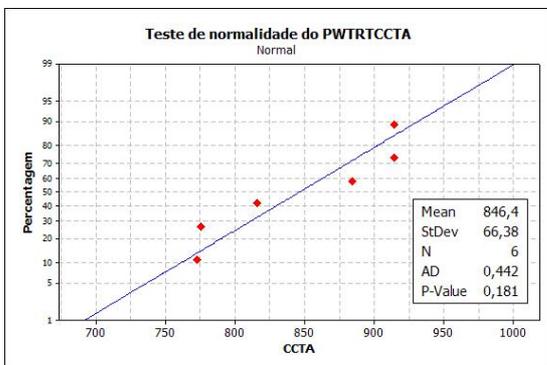


Tabela B.5.4 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados em temperatura elevada.

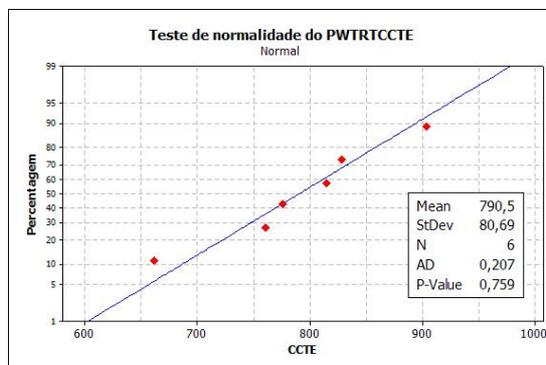


Tabela B.5.5 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados à temperatura ambiente.

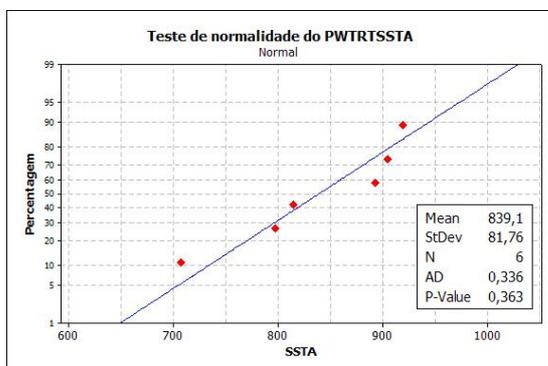


Tabela B.5.6 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados em temperatura elevada.

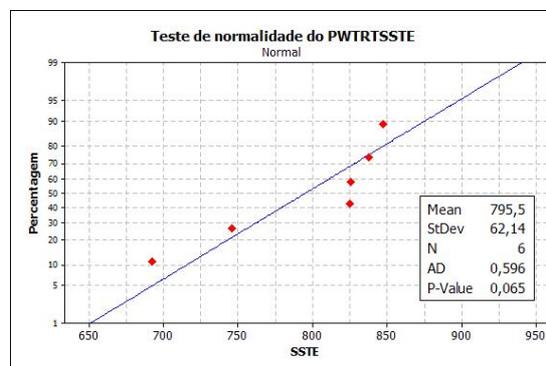


Tabela B.5.7 - Condicionados por imersão e ensaiados à temperatura ambiente.

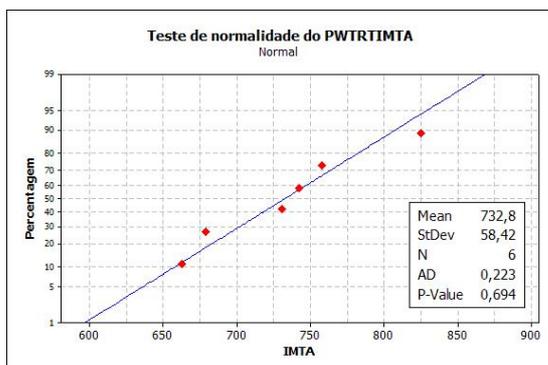


Tabela B.5.8 - Condicionados por imersão e ensaiados em temperatura elevada.

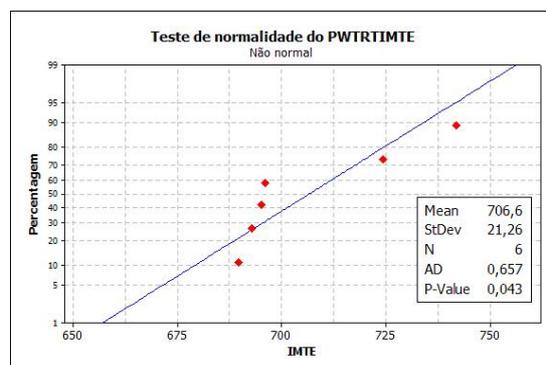


Tabela B.5.9 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados à temperatura ambiente.

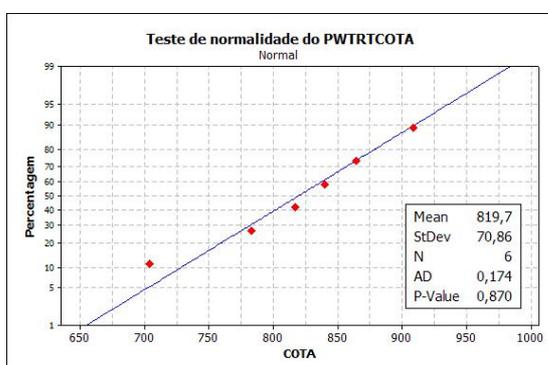
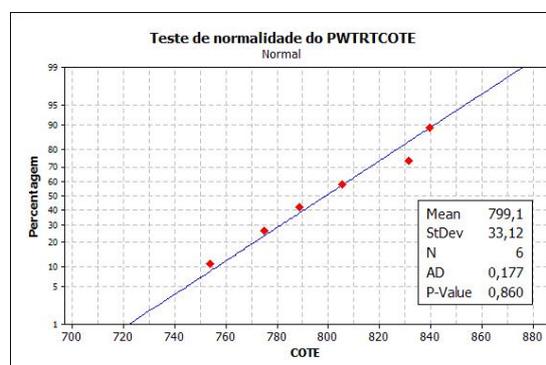


Tabela B.5.10 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados em temperatura elevada.



B.6 – Cisalhamento - *Plain weave*

Tabela B.6.1 - Sem condicionamento e ensaiados à temperatura ambiente.

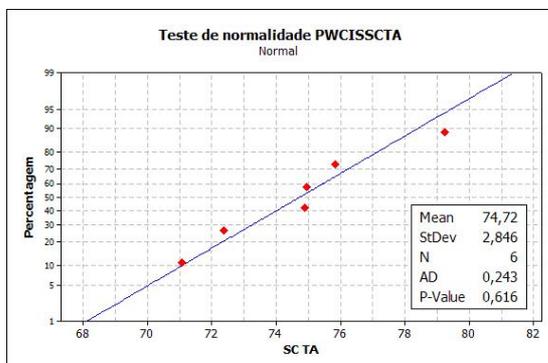


Tabela B.6.2 - Sem condicionamento e ensaiados em temperatura elevada.

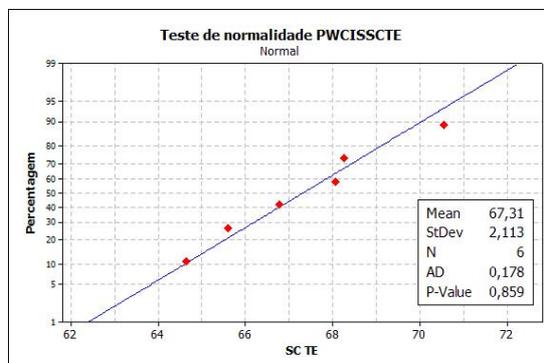


Tabela B.6.3 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados à temperatura ambiente.

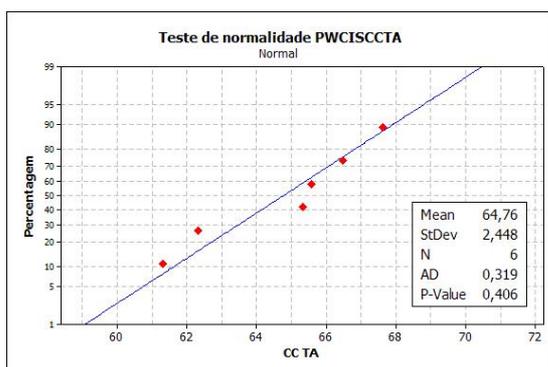


Tabela B.6.4 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados em temperatura elevada.

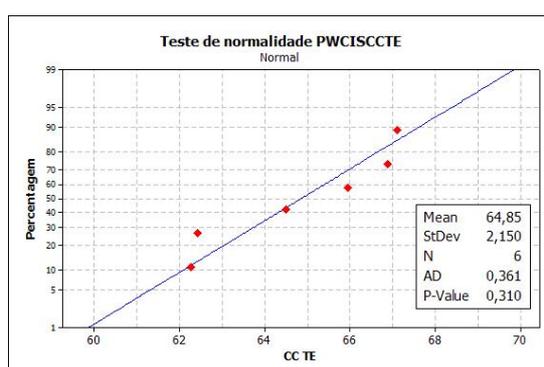


Tabela B.6.5 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados à temperatura ambiente.

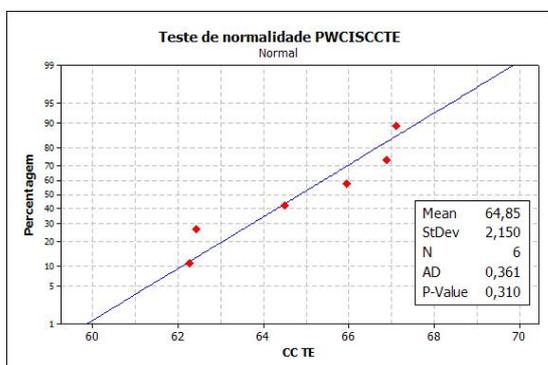


Tabela B.6.6 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados em temperatura elevada.

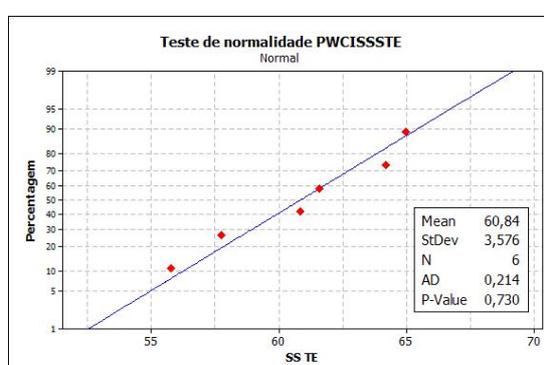


Tabela B.6.7 - Condicionados por imersão e ensaiados à temperatura ambiente.

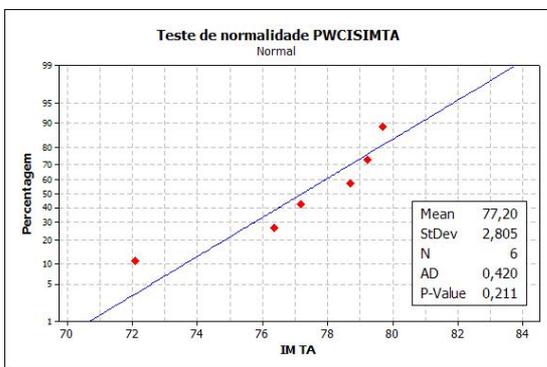


Tabela B.6.8 - Condicionados por imersão e ensaiados em temperatura elevada.

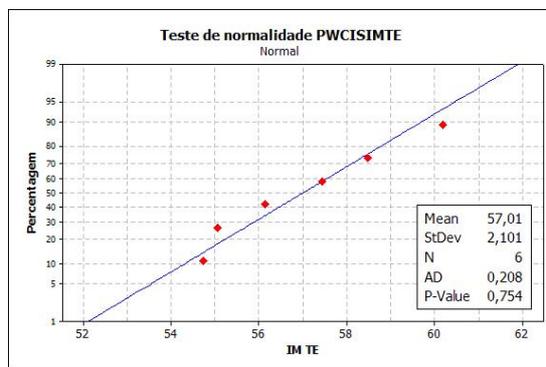


Tabela B.6.9 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados à temperatura ambiente.

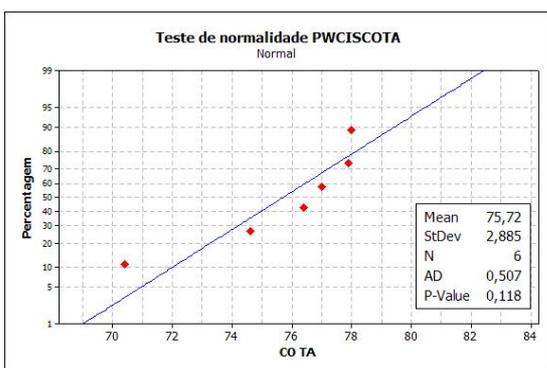
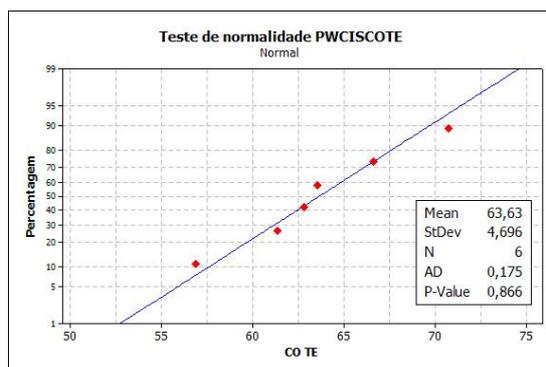


Tabela B.6.10 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados em temperatura elevada.



B.7 – Compressão - Plain weave

Tabela B.7.1 - Sem condicionamento e ensaiados à temperatura ambiente.

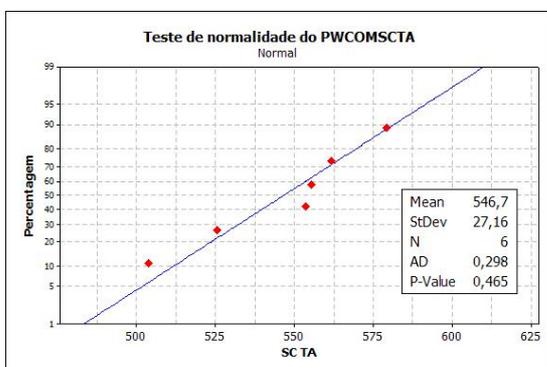


Tabela B.7.2 - Sem condicionamento e ensaiados em temperatura elevada.

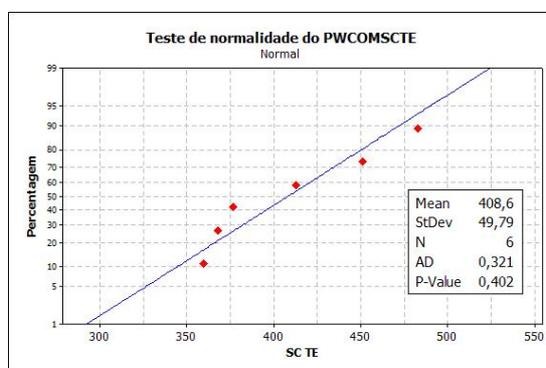


Tabela B.7.3 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados à temperatura ambiente.

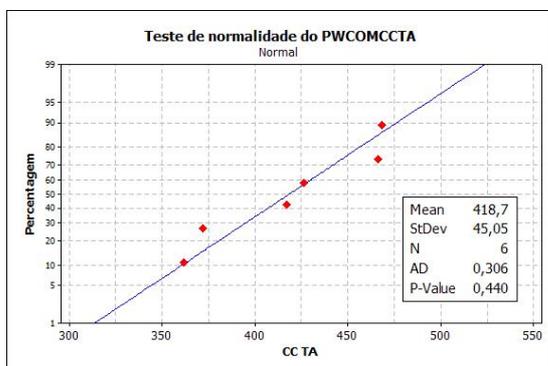


Tabela B.7.4 - Condicionados em câmara de climatização e ensaiados em temperatura elevada.

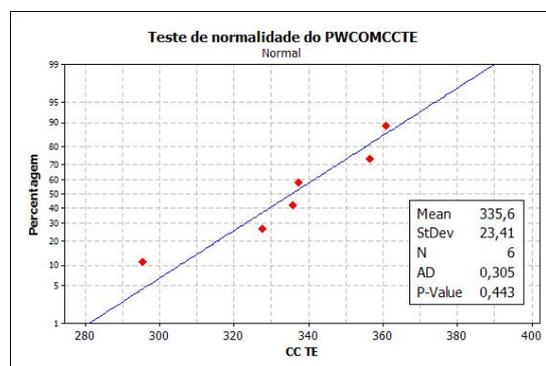


Tabela B.7.5 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados à temperatura ambiente.

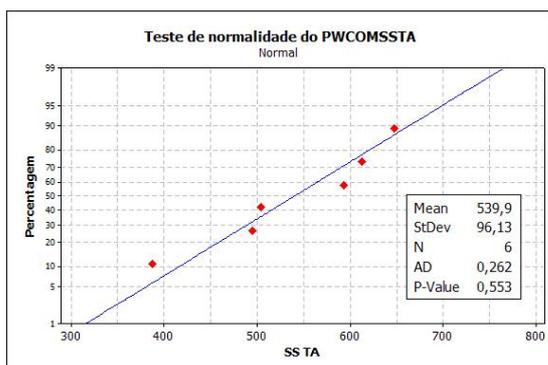


Tabela B.7.6 - Condicionados em câmara de névoa salina e ensaiados em temperatura elevada.

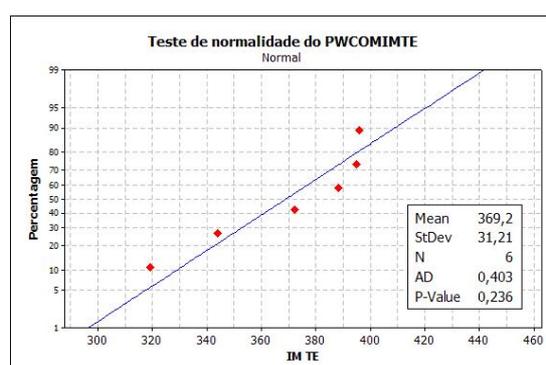


Tabela B.7.7 - Condicionados por imersão e ensaiados à temperatura ambiente.

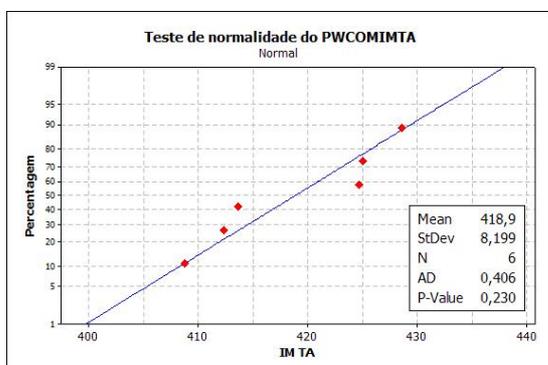


Tabela B.7.8 - Condicionados por imersão e ensaiados à temperatura elevada.

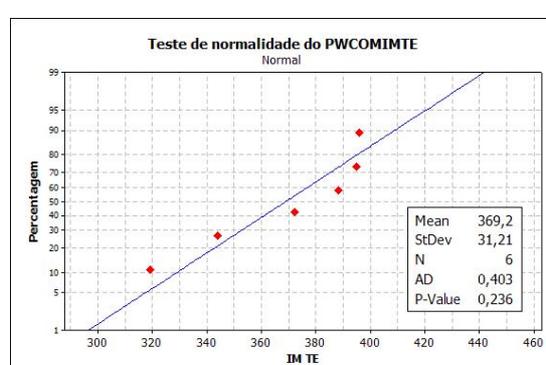


Tabela B.7.9 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados à temperatura ambiente.

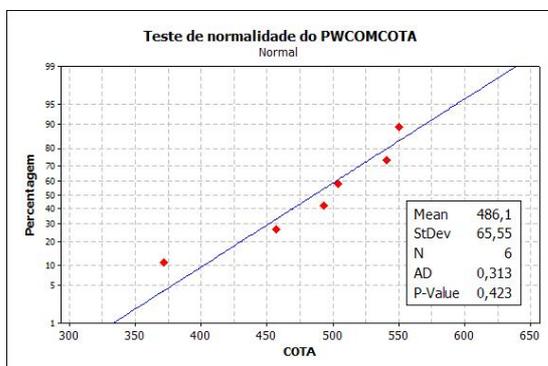
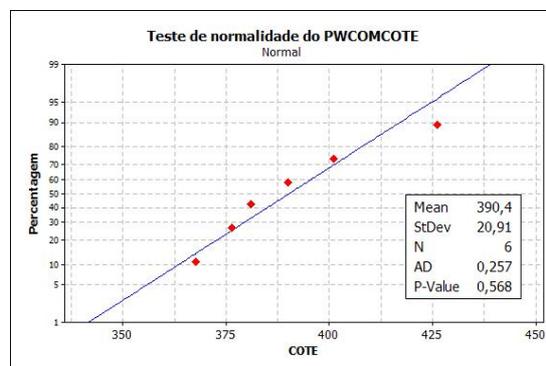


Tabela B.7.10 - Condicionados em câmara de ozônio e ensaiados em temperatura elevada.



APÊNDICE C

Teste de Igualdade de Variâncias

C.1-Tração transversal -Tape

Tabela C.1.1 - Igualdade de variâncias - Temperatura ambiente.

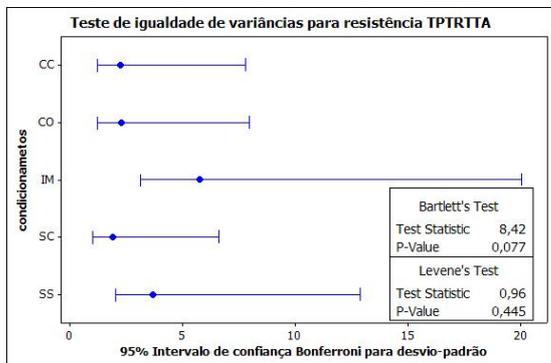
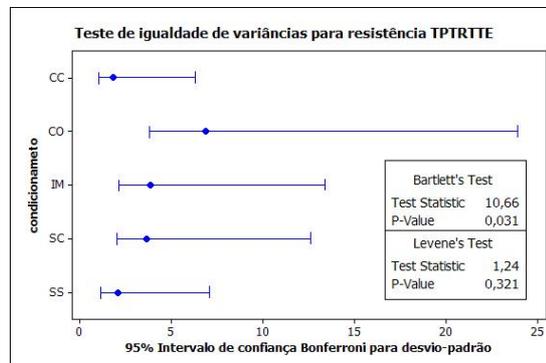


Tabela C.1.2 - Igualdade de variâncias - Temperatura elevada.



C.2 -Tração longitudinal - Tape

Tabela C.2.1 - Igualdade de variâncias - Temperatura ambiente.

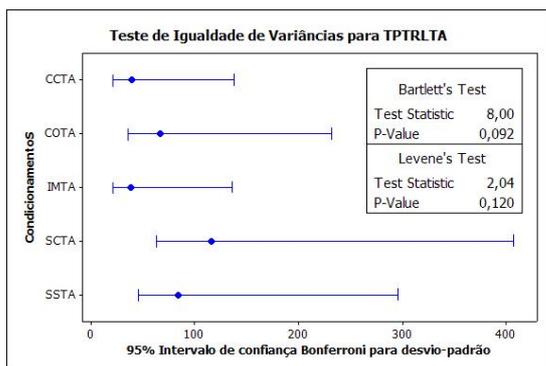
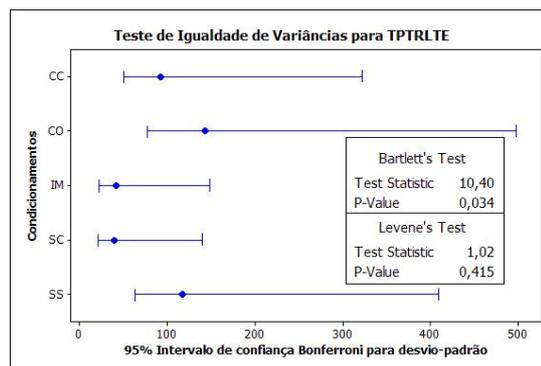


Tabela C.2.2 - Igualdade de variâncias - Temperatura elevada.



C.3 - Cisalhamento - Tape

Tabela C.3.1 - Igualdade de variâncias - Temperatura ambiente.

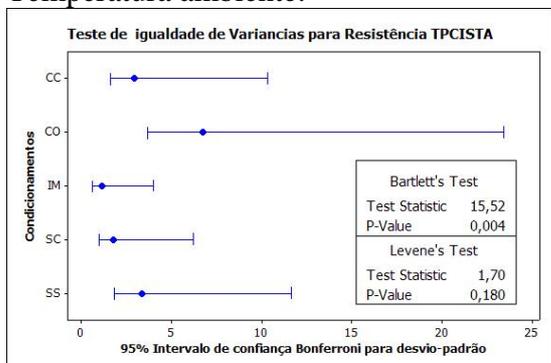
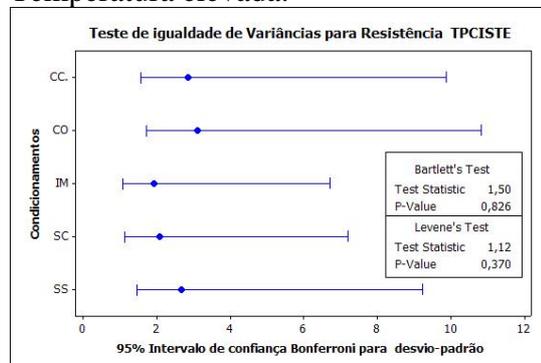


Tabela C.3.2 - Igualdade de variâncias - Temperatura elevada.



C.4 – Compressão - Tape

Tabela C.4.1 – Igualdade de variâncias - Temperatura ambiente.

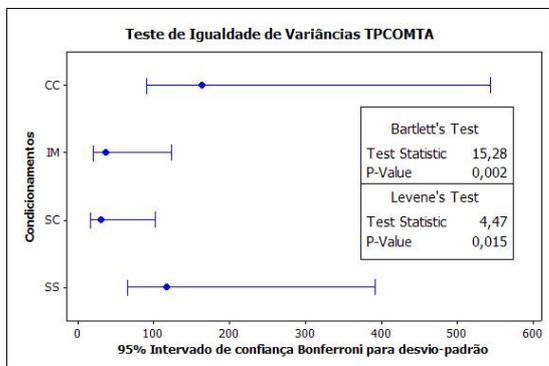
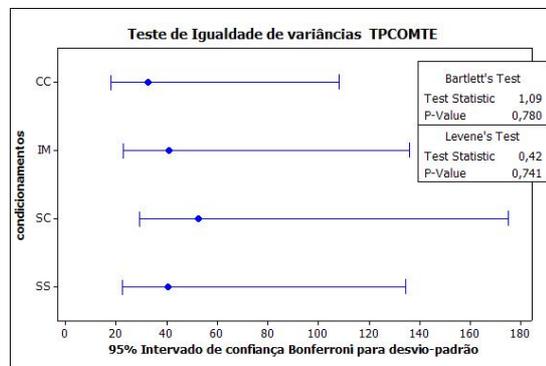


Tabela C.4.2 - Igualdade de variâncias - Temperatura elevada.



C.5-Tração – Plain weave

Tabela C.5.1 - Igualdade de variâncias - Temperatura ambiente.

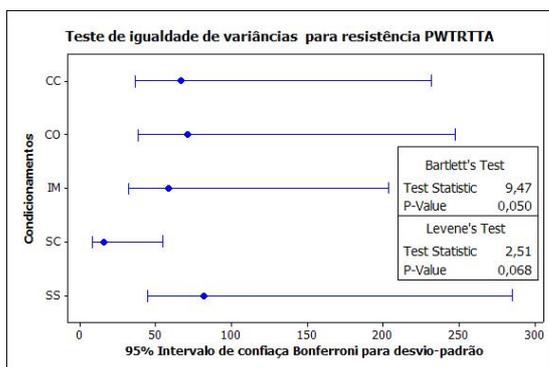
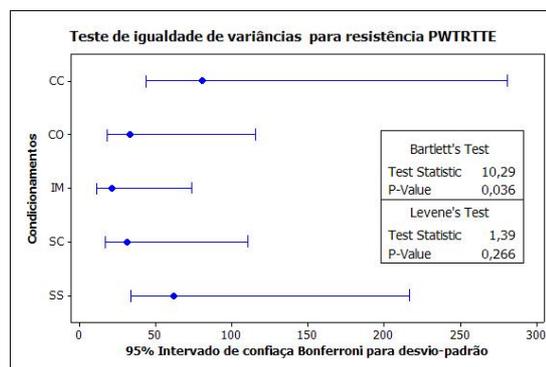


Tabela C.5.2 - Igualdade de variâncias - Temperatura elevada.



C.6 – Cisalhamento - Plain weave

Tabela C.6.1 - Igualdade de variâncias - Temperatura ambiente.

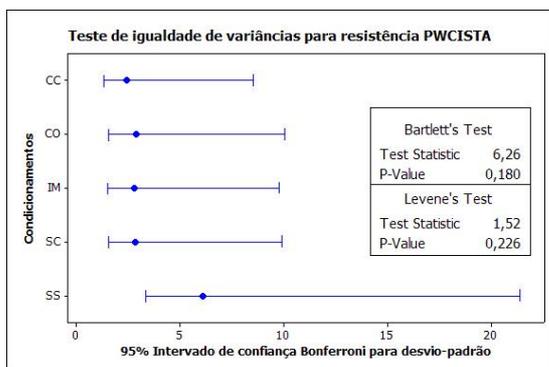
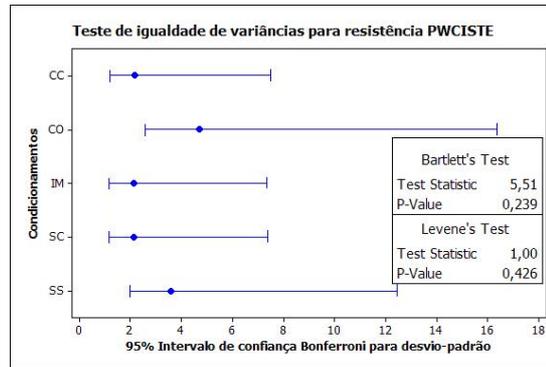


Tabela C.6.2 – Igualdade de variâncias - Temperatura elevada.



C.7 – Compressão - *Plain weave*

Tabela C.7.1 – Igualdade de variâncias - Temperatura ambiente.

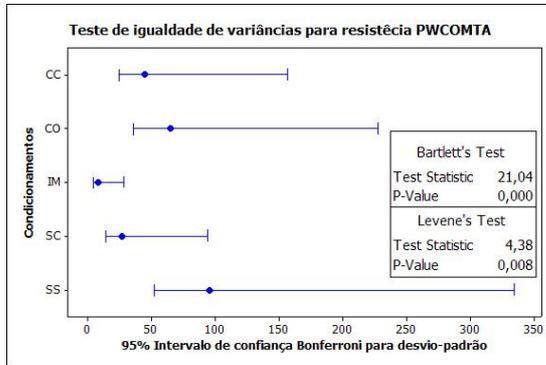
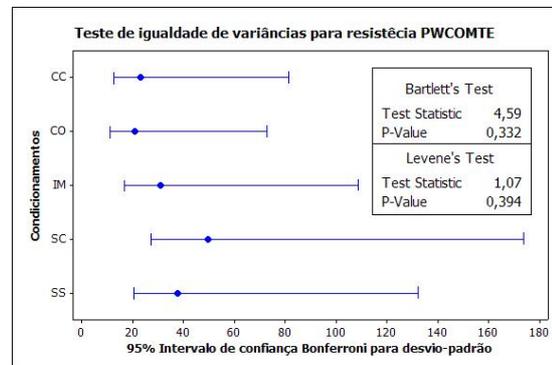


Tabela C.7.2 - Igualdade de variâncias - Temperatura elevada.



APÊNDICE D

Teste de Hipóteses de médias

D.1-Tração transversal - *Tape*

D.1.1- Teste de hipóteses de igualdade de Médias para tração transversal do *tape* à temperatura ambiente.

One-way ANOVA: TPTRTSCTA; TPTRTCCTA

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	1947,90	1947,90	454,31	0,000
Error	10	42,88	4,29		
Total	11	1990,77			

S = 2,071 R-Sq = 97,85% R-Sq(adj) = 97,63%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TA	6	61,439	1,896
CC TA	6	35,958	2,232

40,0 48,0 56,0 64,0

Pooled StDev = 2,071

Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPTRTSCTA; TPTRTSSTA

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	210,72	210,72	24,38	0,001
Error	10	86,45	8,64		
Total	11	297,17			

S = 2,940 R-Sq = 70,91% R-Sq(adj) = 68,00%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TA	6	61,439	1,896
SS TA	6	53,059	3,701

52,5 56,0 59,5 63,0

Pooled StDev = 2,940

Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPTRTSCTA; TPTRTIMTA

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	880,7	880,7	48,01	0,000
Error	10	183,4	18,3		
Total	11	1064,1			

S = 4,283 R-Sq = 82,76% R-Sq(adj) = 81,04%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TA	6	61,439	1,896
IM TA	6	44,306	5,752

42,0 49,0 56,0 63,0

Pooled StDev = 4,283

Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPTRTSCTA; TPTRTCOTA

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	820,67	820,67	186,36	0,000
Error	10	44,04	4,40		
Total	11	864,70			

S = 2,098 R-Sq = 94,91% R-Sq(adj) = 94,40%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TA	6	61,439	1,896
CO TA	6	44,900	2,283

48,0 54,0 60,0 66,0

Pooled StDev = 2,098

Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPTRTIMTA; TPTRTCOTA

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	1,1	1,1	0,06	0,819
Error	10	191,5	19,2		
Total	11	192,6			

S = 4,376 R-Sq = 0,55% R-Sq(adj) = 0,00%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
IM TA	6	44,306	5,752
CO TA	6	44,900	2,283

-----+-----+-----+-----+-----+
 (-----*-----)
 (-----*-----)
 -----+-----+-----+-----+-----+
 42,5 45,0 47,5 50,0

Pooled StDev = 4,376
 Há 95% de probabilidade de serem valores iguais.

D.1.2- Teste de hipóteses de igualdade de Médias para tração transversal do *tape* em temperatura elevada.

One-way ANOVA: TPTRTSCTE; TPTRTCCTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	1754,50	1754,50	215,57	0,000
Error	10	81,39	8,14		
Total	11	1835,89			

S = 2,853 R-Sq = 95,57% R-Sq(adj) = 95,12%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TE	6	47,550	3,613
CC TE	6	23,367	1,796

-----+-----+-----+-----+-----+
 (---*---)
 (---*---)
 -----+-----+-----+-----+-----+
 24,0 32,0 40,0 48,0

Pooled StDev = 2,853
 Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPTRTSCTE; TPTRTSSTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	78,54	78,54	9,16	0,013
Error	10	85,79	8,58		
Total	11	164,33			

S = 2,929 R-Sq = 47,79% R-Sq(adj) = 42,57%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TE	6	47,550	3,613
SS TE	6	42,433	2,026

-----+-----+-----+-----+-----+
 (-----*-----)
 (-----*-----)
 -----+-----+-----+-----+-----+
 42,0 45,0 48,0 51,0

Pooled StDev = 2,929
 Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPTRTSCTE; TPTRTIMTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	1871,3	1871,3	134,69	0,000
Error	10	138,9	13,9		
Total	11	2010,3			

S = 3,727 R-Sq = 93,09% R-Sq(adj) = 92,40%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TE	6	47,550	3,613
IM TE	6	22,575	3,839

-----+-----+-----+-----+-----+
 (---*---)
 (---*---)
 -----+-----+-----+-----+-----+
 24,0 32,0 40,0 48,0

Pooled StDev = 3,727
 Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPTRTSCTE; TPTRTCOTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	444,1	444,1	14,77	0,003
Error	10	300,6	30,1		
Total	11	744,7			

S = 5,483 R-Sq = 59,63% R-Sq(adj) = 55,59%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TE	6	47,550	3,613
CO TE	6	35,383	6,861

-----+-----+-----+-----+-----+
 (-----*-----)
 (-----*-----)
 -----+-----+-----+-----+-----+

36,0 42,0 48,0 54,0
 Pooled StDev = 5,483
 Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPTRTCCTE; TPTRTIMTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	1,88	1,88	0,21	0,657
Error	10	89,82	8,98		
Total	11	91,70			

S = 2,997 R-Sq = 2,05% R-Sq(adj) = 0,00%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
CC TE	6	23,367	1,796
IM TE	6	22,575	3,839

20,8 22,4 24,0 25,6

Pooled StDev = 2,997
 Há 95% de probabilidade de serem valores iguais.

D.1.3- Teste de hipóteses de igualdade de Médias para tração transversal do *tape* à temperatura ambiente e elevada.

One-way ANOVA: TPTRTSCTA; TPTRTSCTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	578,75	578,75	69,54	0,000
Error	10	83,23	8,32		
Total	11	661,99			

S = 2,885 R-Sq = 87,43% R-Sq(adj) = 86,17%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TA	6	61,439	1,896
SC TE	6	47,550	3,613

45,0 50,0 55,0 60,0

Pooled StDev = 2,885
 Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPTRTCCTA; TPTRTCCTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	475,64	475,64	115,91	0,000
Error	10	41,03	4,10		
Total	11	516,67			

S = 2,026 R-Sq = 92,06% R-Sq(adj) = 91,26%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
CC TA	6	35,958	2,232
CC TE	6	23,367	1,796

25,0 30,0 35,0 40,0

Pooled StDev = 2,026
 Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPTRTSSTA; TPTRTSSTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	338,68	338,68	38,05	0,000
Error	10	89,01	8,90		
Total	11	427,69			

S = 2,983 R-Sq = 79,19% R-Sq(adj) = 77,11%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SS TA	6	53,059	3,701
SS TE	6	42,433	2,026

40,0 45,0 50,0 55,0

Pooled StDev = 2,983
 Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPTRTIMTA; TPTRTIMTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	1416,7	1416,7	59,24	0,000
Error	10	239,1	23,9		
Total	11	1655,9			

S = 4,890 R-Sq = 85,56% R-Sq(adj) = 84,11%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
IM TA	6	44,306	5,752
IM TE	6	22,575	3,839

Pooled StDev = 4,890
Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPTRTCOTA; TPTRTCOTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	271,7	271,7	10,39	0,009
Error	10	261,4	26,1		
Total	11	533,1			

S = 5,113 R-Sq = 50,96% R-Sq(adj) = 46,06%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
CO TA	6	44,900	2,283
CO TE	6	35,383	6,861

Pooled StDev = 5,113
Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

D.2 -Tração longitudinal - Tape

D.2.1- Teste de hipóteses de igualdade de médias para tração longitudinal do tape à temperatura ambiente

One-way ANOVA: TPTRLSCTA; TPTRLCCTA

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	66501	66501	8,78	0,014
Error	10	75761	7576		
Total	11	142262			

S = 87,04 R-Sq = 46,75% R-Sq(adj) = 41,42%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SCTA	6	2627,0	116,6
CCTA	6	2478,2	39,5

Pooled StDev = 87,0
Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPTRLSCTA; TPTRLSSTA

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	420	420	0,04	0,845
Error	10	103816	10382		
Total	11	104236			

S = 101,9 R-Sq = 0,40% R-Sq(adj) = 0,00%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SCTA	6	2627,0	116,6
SSTA	6	2615,2	84,7

Pooled StDev = 101,9
Há 95% de probabilidade de serem valores iguais.

One-way ANOVA: TPTRLSCTA; TPTRLIMTA

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	900838	900838	119,15	0,000
Error	10	75606	7561		
Total	11	976444			

S = 86,95 R-Sq = 92,26% R-Sq(adj) = 91,48%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SCTA	6	2627,0	116,6
IMTA	6	2079,1	39,1

Pooled StDev = 87,0

Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes.

One-way ANOVA: TPTRLSCTA; TPTRLCOTA

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	1867466	1867466	207,15	0,000
Error	10	90151	9015		
Total	11	1957617			

S = 94,95 R-Sq = 95,39% R-Sq(adj) = 94,93%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SCTA	6	2627,0	116,6
COTA	6	1838,1	66,6

1750 2000 2250 2500

Pooled StDev = 94,9
Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes.

D.2.2- Teste de hipóteses de igualdade de Médias para tração longitudinal do *tape* em temperatura elevada.

One-way ANOVA: TPTRLSCTE; TPTRLCCTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	1464755	1464755	288,41	0,000
Error	10	50787	5079		
Total	11	1515541			

S = 71,26 R-Sq = 96,65% R-Sq(adj) = 96,31%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SCTE	6	2531,4	40,4
CCTE	6	1832,7	92,3

2000 2250 2500 2750

Pooled StDev = 71,3
Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPTRLSCTE; TPTRLSSTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	7445	7445	0,97	0,349
Error	10	77134	7713		
Total	11	84579			

S = 87,83 R-Sq = 8,80% R-Sq(adj) = 0,00%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SCTE	6	2531,4	40,4
SSTE	6	2481,6	117,5

2400 2460 2520 2580

Pooled StDev = 87,8
Há 95% de probabilidade de serem valores iguais.

One-way ANOVA: TPTRLSCTE; TPTRLIMTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	810004	810004	469,19	0,000
Error	10	17264	1726		
Total	11	827268			

S = 41,55 R-Sq = 97,91% R-Sq(adj) = 97,70%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SCTE	6	2531,4	40,4
IMTE	6	2011,8	42,7

2100 2250 2400 2550

Pooled StDev = 41,5
Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPTRLSCTE; TPTRLCOTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	1552897	1552897	140,59	0,000
Error	10	110452	11045		
Total	11	1663349			

S = 105,1 R-Sq = 93,36% R-Sq(adj) = 92,70%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SCTE	6	2531,4	40,4
IMTE	6	2011,8	42,7


```

Error    10  16752  1675
Total    11  30313
S = 40,93  R-Sq = 44,74%  R-Sq(adj) = 39,21%
                                Individual 95% CIs For Mean Based on
                                Pooled StDev
Level   N    Mean  StDev  -----+-----+-----+-----+----
IMTA    6  2079,1  39,1   (-----*-----)
IMTE    6  2011,8  42,7   (-----*-----)
-----+-----+-----+-----+----
                                2000    2040    2080    2120

Pooled StDev = 40,9
Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

```

One-way ANOVA: TPTRLCOTA; TPTRLCOTE

```

Source  DF    SS    MS    F    P
Factor   1    2041  2041  0,16  0,694
Error   10 124485 12448
Total   11 126526
S = 111,6  R-Sq = 1,61%  R-Sq(adj) = 0,00%
                                Individual 95% CIs For Mean Based on
                                Pooled StDev
Level   N    Mean  StDev  -----+-----+-----+-----+----
COTA    6  1838,1  66,6   (-----*-----)
COTE    6  1812,0 143,0   (-----*-----)
-----+-----+-----+-----+----
                                1740    1800    1860    1920

Pooled StDev = 111,6
Há 95% de probabilidade de serem valores iguais

```

D.3 – Cisalhamento - *Tape*

D.3.1- Teste de hipóteses de igualdade de médias para cisalhamento do *tape* à temperatura ambiente

Two-Sample T-Test and CI: TPCISSCTA; TPCISCCTA

```

      N    Mean  StDev  SE Mean
SC TA  6  100,43  1,78    0,73
CC TA  6   94,33  2,97    1,2
Difference = mu (SC TA) - mu (CCTA)
Estimate for difference: 6,09
95% CI for difference: (2,83; 9,35)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 4,31  P-Value = 0,003  DF = 8
Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

```

Two-Sample T-Test and CI: TPCISSCTA; TPCISSSTA

```

      N    Mean  StDev  SE Mean
SC TA  6  100,43  1,78    0,73
SS TA  6  102,45  3,35    1,4
Difference = mu (SC TA) - mu (SSTA)
Estimate for difference: -2,02
95% CI for difference: (-5,69; 1,64)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -1,30  P-Value = 0,233  DF = 7
Há 95% de probabilidade de serem valores iguais.

```

Two-Sample T-Test and CI: TPCISSCTA; TPCISIMTA

```

      N    Mean  StDev  SE Mean
SC TA  6  100,43  1,78    0,73
IM TA  6   95,03  1,15    0,47
Difference = mu (SC TA) - mu (IM TA)
Estimate for difference: 5,392
95% CI for difference: (3,399; 7,386)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 6,24  P-Value = 0,000  DF = 8
Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes.

```

Two-Sample T-Test and CI: TPCISSCTA; TPCISCOTA

```

      N    Mean  StDev  SE Mean
SC TA  6  100,43  1,78    0,73
CO TA  6  101,38  6,74    2,8
Difference = mu (SC TA) - mu (CO TA)
Estimate for difference: -0,96
95% CI for difference: (-8,27; 6,36)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -0,34  P-Value = 0,750  DF = 5
Há 95% de probabilidade de serem valores iguais.

```

Two-Sample T-Test and CI: TPCISCCTA; TPCISCOTA

	N	Mean	StDev	SE Mean
CCTA	6	94,33	2,97	1,2
CO TA	6	101,38	6,74	2,8

Difference = mu (CCTA) - mu (CO TA)
 Estimate for difference: -7,05
 95% CI for difference: (-14,41; 0,31)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -2,35 P-Value = 0,057 DF = 6
 Há 95% de probabilidade de serem valores iguais.

D.3.2- Teste de hipóteses de igualdade de médias para cisalhamento do *tape* em temperatura elevada.

One-way ANOVA: TPCISSCTE; TPCISCCTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	1052,92	1052,92	171,13	0,000
Error	10	61,53	6,15		
Total	11	1114,44			

S = 2,480 R-Sq = 94,48% R-Sq(adj) = 93,93%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TE	6	91,900	2,067
CC TE	6	73,166	2,834

72,0 78,0 84,0 90,0

Pooled StDev = 2,480
 Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPCISSCTE; TPCISSSTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	420,55	420,55	74,43	0,000
Error	10	56,50	5,65		
Total	11	477,06			

S = 2,377 R-Sq = 88,16% R-Sq(adj) = 86,97%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TE	6	91,900	2,067
SSTE	6	80,060	2,651

80,0 85,0 90,0 95,0

Pooled StDev = 2,377
 Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPCISSCTE; TPCISIMTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	2395,65	2395,65	599,67	0,000
Error	10	39,95	3,99		
Total	11	2435,60			

S = 1,999 R-Sq = 98,36% R-Sq(adj) = 98,20%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TE	6	91,900	2,067
CI TE	6	63,641	1,928

64,0 72,0 80,0 88,0

Pooled StDev = 1,999
 Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPCISSCTE; TPCISCOTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	746,26	746,26	107,08	0,000
Error	10	69,69	6,97		
Total	11	815,95			

S = 2,640 R-Sq = 91,46% R-Sq(adj) = 90,60%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TE	6	91,900	2,067
CO TE	6	76,128	3,109

78,0 84,0 90,0 96,0

Pooled StDev = 2,640
 Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPCISCCTE; TPCISCOTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	26,33	26,33	2,97	0,115
Error	10	88,50	8,85		
Total	11	114,83			

S = 2,975 R-Sq = 22,93% R-Sq(adj) = 15,22%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
CO TE	6	76,128	3,109
CC TE	6	73,166	2,834

72,5 75,0 77,5 80,0

Pooled StDev = 2,975
Há 95% de probabilidade de serem valores iguais.

D.3.3- Teste de hipóteses de igualdade de Médias para cisalhamento do *tape* entre a temperatura ambiente e elevada.

One-way ANOVA: TPCISSCTA; TPCISSCTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	218,12	218,12	58,61	0,000
Error	10	37,22	3,72		
Total	11	255,33			

S = 1,929 R-Sq = 85,42% R-Sq(adj) = 83,97%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TA	6	100,43	1,78
SC TE	6	91,90	2,07

91,0 94,5 98,0 101,5

Pooled StDev = 1,93
Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPCISCCTA; TPCISCCTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	1344,20	1344,20	159,42	0,000
Error	10	84,32	8,43		
Total	11	1428,52			

S = 2,904 R-Sq = 94,10% R-Sq(adj) = 93,51%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
CC TE	6	73,166	2,834
CCTA	6	94,333	2,972

77,0 84,0 91,0 98,0

Pooled StDev = 2,904
Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPCISSSTE; TPCISSSTA

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	1503,93	1503,93	164,51	0,000
Error	10	91,42	9,14		
Total	11	1595,35			

S = 3,024 R-Sq = 94,27% R-Sq(adj) = 93,70%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SSTE	6	80,06	2,65
SSTA	6	102,45	3,35

77,0 84,0 91,0 98,0

Pooled StDev = 3,02
Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPCISIMTA; TPCISIMTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	2956,56	2956,56	1175,79	0,000
Error	10	25,15	2,51		
Total	11	2981,71			

S = 1,586 R-Sq = 99,16% R-Sq(adj) = 99,07%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
-------	---	------	-------

```

CI TE 6 63,641 1,928 (-*)
CI TA 6 95,034 1,145 (*)
-----+-----+-----+-----+-----+
              70      80      90      100

```

Pooled StDev = 1,586
Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPCISCOTA; TPCISCOTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	1913,5	1913,5	69,52	0,000
Error	10	275,2	27,5		
Total	11	2188,7			

S = 5,246 R-Sq = 87,42% R-Sq(adj) = 86,17%

Individual 95% CIs For Mean Based on
Pooled StDev

```

Level N Mean StDev -----+-----+-----+-----+
CO TA 6 101,38 6,74 -----+-----+-----+
CO TE 6 76,13 3,11 (----*----)
              80      90      100      110

```

Pooled StDev = 5,25
Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

D.4 – Compressão – *Tape*

D.4.1- Teste de hipóteses de igualdade de médias para compressão do *tape* à temperatura ambiente

Two-Sample T-Test and CI: TPCOMSCTA; TPCOMCCTA

	N	Mean	StDev	SE Mean
SC TA	6	1812,2	30,6	12
CC TA	6	1528	163	67

Difference = mu (SC TA) - mu (CC TA)

Estimate for difference: 284,3

95% CI for difference: (109,9; 458,6)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 4,19 P-Value = 0,009 DF = 5

Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

Two-Sample T-Test and CI: TPCOMSCTA; TPCOMSSTA

	N	Mean	StDev	SE Mean
SC TA	6	1812,2	30,6	12
SS TA	6	1668	118	48

Difference = mu (SC TA) - mu (SS TA)

Estimate for difference: 144,4

95% CI for difference: (16,9; 271,9)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 2,91 P-Value = 0,033 DF = 5

Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

Two-Sample T-Test and CI: TPCOMSCTA; TPCOMIMTA

	N	Mean	StDev	SE Mean
SC TA	6	1812,2	30,6	12
IM TA	6	1256,3	37,3	15

Difference = mu (SC TA) - mu (IM TA)

Estimate for difference: 556,0

95% CI for difference: (511,4; 600,5)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 28,25 P-Value = 0,000 DF = 9

Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

D.4.2- Teste de hipóteses de igualdade de médias para compressão do *tape* em temperatura elevada.

One-way ANOVA: TPCOMSCTE; TPCOMCCTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	456624	456624	238,88	0,000
Error	10	19115	1912		
Total	11	475739			

S = 43,72 R-Sq = 95,98% R-Sq(adj) = 95,58%

Individual 95% CIs For Mean Based on
Pooled StDev

```

Level N Mean StDev -----+-----+-----+-----+
SC TE 6 1519,1 52,6 -----+-----+-----+
CC TE 6 1129,0 32,5 (---*---)
              1200      1320      1440      1560

```

Pooled StDev = 43,7
Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPCOMSCTE; TPCOMSSTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	237409	237409	107,82	0,000
Error	10	22019	2202		
Total	11	259428			

S = 46,92 R-Sq = 91,51% R-Sq(adj) = 90,66%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TE	6	1519,1	52,6
SS TE	6	1237,8	40,4

1200 1300 1400 1500

Pooled StDev = 46,9
Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPCOMSCTE; TPCOMIMTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	359231	359231	161,83	0,000
Error	10	22197	2220		
Total	11	381429			

S = 47,11 R-Sq = 94,18% R-Sq(adj) = 93,60%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TE	6	1519,1	52,6
IMTE	6	1173,1	40,9

1200 1320 1440 1560

Pooled StDev = 47,1
Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

D.4.3- Teste de hipóteses de igualdade de Médias para compressão do *tape* entre a temperatura ambiente e elevada.

One-way ANOVA: TPCOMSCTA; TPCOMSCTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	257778	257778	139,16	0,000
Error	10	18524	1852		
Total	11	276301			

S = 43,04 R-Sq = 93,30% R-Sq(adj) = 92,63%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TA	6	1812,2	30,6
SC TE	6	1519,1	52,6

1500 1600 1700 1800

Pooled StDev = 43,0
Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes

One-way ANOVA: TPCOMCCTA; TPCOMCCTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	477577	477577	34,46	0,000
Error	10	138575	13857		
Total	11	616152			

S = 117,7 R-Sq = 77,51% R-Sq(adj) = 75,26%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
CC TA	6	1528,0	163,3
CC TE	6	1129,0	32,5

1120 1280 1440 1600

Pooled StDev = 117,7
Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes.

One-way ANOVA: TPCOMSSTA; TPCOMSSTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	554804	554804	71,78	0,000
Error	10	77295	7729		
Total	11	632099			

S = 87,92 R-Sq = 87,77% R-Sq(adj) = 86,55%
 Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SS TA	6	1667,8	117,6
SS TE	6	1237,8	40,4

Pooled StDev = 87,9
 Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes.

One-way ANOVA: TPCOMIMTA; TPCOMIMTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	20777	20777	13,58	0,004
Error	10	15295	1530		
Total	11	36072			

S = 39,11 R-Sq = 57,60% R-Sq(adj) = 53,36%
 Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
IM TA	6	1256,3	37,3
IMTE	6	1173,1	40,9

Pooled StDev = 39,1
 Há 95% de probabilidade de serem valores diferentes.

D.5-Tração – Plain weave

D.5.1- Teste de hipóteses de igualdade de Médias para tração do plain weave à temperatura ambiente.

Two-Sample T-Test and CI: PWTRTSCTA; PWTRTCCTA

N	Mean	StDev	SE Mean
SCTA	6	992,1	15,7
CCTA	6	846,4	66,4

Difference = mu (SCTA) - mu (CCTA)
 Estimate for difference: 145,7
 95% CI for difference: (74,1; 217,3)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 5,23 P-Value = 0,003 DF = 5

Two-Sample T-Test and CI: PWTRTSCTA; PWTRTSSTA

N	Mean	StDev	SE Mean
SCTA	6	992,1	15,7
SSTA	6	839,1	81,8

Difference = mu (SCTA) - mu (SSTA)
 Estimate for difference: 153,0
 95% CI for difference: (65,6; 240,4)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 4,50 P-Value = 0,006 DF = 5

Two-Sample T-Test and CI: PWTRTSCTA; PWTRTIMTA

N	Mean	StDev	SE Mean
SCTA	6	992,1	15,7
IMTA	6	732,8	58,4

Difference = mu (SCTA) - mu (IMTA)
 Estimate for difference: 259,3
 95% CI for difference: (195,8; 322,8)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 10,50 P-Value = 0,000 DF = 5

Two-Sample T-Test and CI: PWTRTSCTA; PWTRTCOTA

N	Mean	StDev	SE Mean
SCTA	6	992,1	15,7
COTA	6	819,7	70,9

Difference = mu (SCTA) - mu (COTA)
 Estimate for difference: 172,4
 95% CI for difference: (96,2; 248,6)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 5,82 P-Value = 0,002 DF = 5

Two-Sample T-Test and CI: PWTRTCCTA; PWTRTSSTA

N	Mean	StDev	SE Mean
CCTA	6	846,4	66,4
SSTA	6	839,1	81,8

Difference = mu (CCTA) - mu (SSTA)
 Estimate for difference: 7,3
 95% CI for difference: (-90,0; 104,5)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0,17 P-Value = **0,869** DF = 9

Two-Sample T-Test and CI: PWTRTCCTA; PWTRTCOTA

	N	Mean	StDev	SE Mean
CCTA	6	846,4	66,4	27
COTA	6	819,7	70,9	29

Difference = mu (CCTA) - mu (COTA)
 Estimate for difference: 26,7
 95% CI for difference: (-63,0; 116,3)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0,67 P-Value = **0,518** DF = 9

D.5.2- Teste de hipóteses de igualdade de Médias para tração do *plain weave* em temperatura elevada.

One-way ANOVA: PWTRTSCTE; PWTRTCCTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	13055	13055	3,47	0,092
Error	10	37572	3757		
Total	11	50627			

S = 61,30 R-Sq = 25,79% R-Sq(adj) = 18,36%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SCTE	6	856,48	31,68
CCTE	6	790,52	80,69

Pooled StDev = 61,30

One-way ANOVA: PWTRTSCTE; PWTRTSSTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	11145	11145	4,58	0,058
Error	10	24325	2433		
Total	11	35470			

S = 49,32 R-Sq = 31,42% R-Sq(adj) = 24,56%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SCTE	6	856,48	31,68
SSTE	6	795,53	62,14

Pooled StDev = 49,32

One-way ANOVA: PWTRTSCTE; PWTRTIMTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	67425	67425	92,67	0,000
Error	10	7276	728		
Total	11	74701			

S = 26,97 R-Sq = 90,26% R-Sq(adj) = 89,29%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SCTE	6	856,48	31,68
IMTE	6	706,57	21,26

Pooled StDev = 26,97

One-way ANOVA: PWTRTSCTE; PWTRTCOTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	9884	9884	9,41	0,012
Error	10	10501	1050		
Total	11	20386			

S = 32,41 R-Sq = 48,49% R-Sq(adj) = 43,33%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SCTE	6	856,48	31,68
COTE	6	799,08	33,12

Pooled StDev = 32,41

One-way ANOVA: PWTRTCCTE; PWTRTSSTE; PWTRTCOTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	2	222	111	0,03	0,971
Error	15	57348	3823		
Total	17	57571			

S = 61,83 R-Sq = 0,39% R-Sq(adj) = 0,00%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
CCTE	6	790,52	80,69
SSTE	6	795,53	62,14
COTE	6	799,08	33,12

Pooled StDev = 61,83

D.5.3- Teste de hipóteses de igualdade de Médias para tração do *plain weave* à temperatura ambiente e elevada.

One-way ANOVA: PWTRTSCTA; PWTRTSCTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	55162	55162	88,19	0,000
Error	10	6255	625		
Total	11	61417			

S = 25,01 R-Sq = 89,82% R-Sq(adj) = 88,80%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SCTA	6	992,1	15,7
SCTE	6	856,5	31,7

Pooled StDev = 25,0

One-way ANOVA: PWTRTCCTA; PWTRTCCTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	9358	9358	1,71	0,220
Error	10	54587	5459		
Total	11	63944			

S = 73,88 R-Sq = 14,63% R-Sq(adj) = 6,10%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
CCTA	6	846,37	66,38
CCTE	6	790,52	80,69

Pooled StDev = 73,88

One-way ANOVA: PWTRTSSTA; PWTRTSSTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	5690	5690	1,08	0,323
Error	10	52735	5274		
Total	11	58425			

S = 72,62 R-Sq = 9,74% R-Sq(adj) = 0,71%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SSTA	6	839,08	81,76
SSTE	6	795,53	62,14

Pooled StDev = 72,62

One-way ANOVA: PWTRTIMTA; PWTRTIMTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	2065	2065	1,07	0,326
Error	10	19326	1933		
Total	11	21391			

S = 43,96 R-Sq = 9,65% R-Sq(adj) = 0,62%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
IMTA	6	732,80	58,42
IMTE	6	706,57	21,26

Total 11 85,07
 S = 2,866 R-Sq = 3,47% R-Sq(adj) = 0,00%
 Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TA	6	74,725	2,846
CO TA	6	75,717	2,885

Pooled StDev = 2,866

D.6.2- Teste de hipóteses de igualdade de médias para cisalhamento do *plain weave* em temperatura elevada.

One-way ANOVA: PWCISSTCTE; PWCISCCTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	18,19	18,19	4,00	0,073
Error	10	45,43	4,54		
Total	11	63,62			

S = 2,131 R-Sq = 28,59% R-Sq(adj) = 21,45%
 Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TE	6	67,313	2,113
CC TE	6	64,851	2,150

Pooled StDev = 2,131

One-way ANOVA: PWCISSTCTE; PWCISSTTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	125,62	125,62	14,57	0,003
Error	10	86,24	8,62		
Total	11	211,86			

S = 2,937 R-Sq = 59,29% R-Sq(adj) = 55,22%
 Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TE	6	67,313	2,113
SS TE	6	60,842	3,576

Pooled StDev = 2,937

One-way ANOVA: PWCISSTCTE; PWCISIMTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	318,64	318,64	71,77	0,000
Error	10	44,40	4,44		
Total	11	363,04			

S = 2,107 R-Sq = 87,77% R-Sq(adj) = 86,55%
 Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TE	6	67,313	2,113
IM TE	6	57,007	2,101

Pooled StDev = 2,107

One-way ANOVA: PWCISSTCTE; PWCISCOTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	40,6	40,6	3,07	0,111
Error	10	132,6	13,3		
Total	11	173,2			

S = 3,641 R-Sq = 23,46% R-Sq(adj) = 15,81%
 Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TE	6	67,313	2,113
CO TE	6	63,633	4,696

Pooled StDev = 3,641

D.6.3- Teste de hipóteses de igualdade de Médias para cisalhamento do *tape* entre a temperatura ambiente e elevada.

One-way ANOVA: PWCISSTTA; PWCISSTTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	164,79	164,79	26,23	0,000
Error	10	62,82	6,28		
Total	11	227,61			

S = 2,506 R-Sq = 72,40% R-Sq(adj) = 69,64%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TA	6	74,725	2,846
SC TE	6	67,313	2,113

66,0 69,0 72,0 75,0

Pooled StDev = 2,506

One-way ANOVA: PWCISCCTA; PWCISCCTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	0,02	0,02	0,00	0,948
Error	10	53,08	5,31		
Total	11	53,11			

S = 2,304 R-Sq = 0,04% R-Sq(adj) = 0,00%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
CC TA	6	64,763	2,448
CC TE	6	64,851	2,150

63,6 64,8 66,0 67,2

Pooled StDev = 2,304

One-way ANOVA: PWCISSTTA; PWCISSTTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	1402,2	1402,2	55,59	0,000
Error	10	252,2	25,2		
Total	11	1654,4			

S = 5,022 R-Sq = 84,75% R-Sq(adj) = 83,23%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SS TA	6	82,462	6,136
SS TE	6	60,842	3,576

56,0 64,0 72,0 80,0

Pooled StDev = 5,022

One-way ANOVA: PWCISIMTA; PWCISIMTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	1222,96	1222,96	199,16	0,000
Error	10	61,41	6,14		
Total	11	1284,37			

S = 2,478 R-Sq = 95,22% R-Sq(adj) = 94,74%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
IM TA	6	77,198	2,805
IM TE	6	57,007	2,101

56,0 63,0 70,0 77,0

Pooled StDev = 2,478

One-way ANOVA: PWCISCOTA; PWCISCOTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	438,1	438,1	28,84	0,000
Error	10	151,9	15,2		
Total	11	589,9			

S = 3,897 R-Sq = 74,26% R-Sq(adj) = 71,68%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
CO TA	6	75,717	2,885
CO TE	6	63,633	4,696

60,0 65,0 70,0 75,0

Pooled StDev = 3,897

D.7 – Compressão – *Plain weave*

D.7.1- Teste de hipóteses de igualdade de médias para compressão do *plain weave* à temperatura ambiente

Two-Sample T-Test and CI: PWCOMSCTA; PWCOMCCTA

	N	Mean	StDev	SE Mean
SC TA	6	546,7	27,2	11
CC TA	6	418,7	45,1	18

Difference = mu (SC TA) - mu (CC TA)
 Estimate for difference: 128,0
 95% CI for difference: (78,5; 177,5)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 5,96 P-Value = 0,000 DF = 8

Two-Sample T-Test and CI: PWCOMSCTA; PWCOMSSTA

	N	Mean	StDev	SE Mean
SC TA	6	546,7	27,2	11
SS TA	6	539,9	96,1	39

Difference = mu (SC TA) - mu (SS TA)
 Estimate for difference: 6,8
 95% CI for difference: (-98,0; 111,6)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0,17 P-Value = 0,874 DF = 5

Two-Sample T-Test and CI: PWCOMSCTA; PWCOMIMTA

	N	Mean	StDev	SE Mean
SC TA	6	546,7	27,2	11
IM TA	6	418,86	8,20	3,3

Difference = mu (SC TA) - mu (IM TA)
 Estimate for difference: 127,9
 95% CI for difference: (98,1; 157,6)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 11,04 P-Value = 0,000 DF = 5

Two-Sample T-Test and CI: PWCOMSCTA; PWCOMCOTA

	N	Mean	StDev	SE Mean
SC TA	6	546,7	27,2	11
COTA	6	486,1	65,6	27

Difference = mu (SC TA) - mu (COTA)
 Estimate for difference: 60,6
 95% CI for difference: (-10,2; 131,5)
 T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 2,09 P-Value = 0,081 DF = 6

D.7.2- Teste de hipóteses de igualdade de médias para compressão do *plain weave* em temperatura elevada.

One-way ANOVA: PWCOMSCTE; PWCOMCCTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	15989	15989	10,56	0,009
Error	10	15138	1514		
Total	11	31127			

S = 38,91 R-Sq = 51,37% R-Sq(adj) = 46,50%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TE	6	408,56	49,79
CC TE	6	335,56	23,41

Pooled StDev = 38,91

One-way ANOVA: PWCOMSCTE; PWCOMSSTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	32	32	0,02	0,902
Error	10	19602	1960		
Total	11	19634			

S = 44,27 R-Sq = 0,16% R-Sq(adj) = 0,00%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TE	6	408,56	49,79
SS TE	6	405,32	37,96

Pooled StDev = 44,27

One-way ANOVA: PWCOMSCTE; PWCOMIMTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	4649	4649	2,69	0,132
Error	10	17267	1727		
Total	11	21916			

S = 41,55 R-Sq = 21,21% R-Sq(adj) = 13,33%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TE	6	408,56	49,79
IM TE	6	369,19	31,21

Pooled StDev = 41,55

One-way ANOVA: PWCOMSCTE; PWCOMCOTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	984	984	0,67	0,431
Error	10	14583	1458		
Total	11	15567			

S = 38,19 R-Sq = 6,32% R-Sq(adj) = 0,00%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TE	6	408,56	49,79
COTE	6	390,45	20,91

Pooled StDev = 38,19

D.7.3- Teste de hipóteses de igualdade de Médias para compressão do *plain weave* entre a temperatura ambiente e elevada.

One-way ANOVA: PWCOMSCTA; PWCOMSCTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	57259	57259	35,60	0,000
Error	10	16084	1608		
Total	11	73343			

S = 40,11 R-Sq = 78,07% R-Sq(adj) = 75,88%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SC TA	6	546,71	27,16
SC TE	6	408,56	49,79

Pooled StDev = 40,11

One-way ANOVA: PWCOMCCTA; PWCOMCCTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	20743	20743	16,09	0,002
Error	10	12889	1289		
Total	11	33632			

S = 35,90 R-Sq = 61,68% R-Sq(adj) = 57,84%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
CC TA	6	418,71	45,05
CC TE	6	335,56	23,41

Pooled StDev = 35,90

One-way ANOVA: PWCOMSSTA; PWCOMSSTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	54356	54356	10,18	0,010
Error	10	53411	5341		
Total	11	107767			

S = 73,08 R-Sq = 50,44% R-Sq(adj) = 45,48%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev
SS TA	6	539,92	96,13
SS TE	6	405,32	37,96

Pooled StDev = 73,08 350 420 490 560

One-way ANOVA: PWCOMIMTA; PWCOMIMTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	7399	7399	14,21	0,004
Error	10	5206	521		
Total	11	12606			

S = 22,82 R-Sq = 58,70% R-Sq(adj) = 54,57%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----	
IM TA	6	418,86	8,20		(-----*-----)
IM TE	6	369,19	31,21	(-----*-----)	
				-----+-----+-----	
				350 375 400 425	

Pooled StDev = 22,82

One-way ANOVA: PWCOMCOTA; PWCOMCOTE

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	1	27428	27428	11,59	0,007
Error	10	23674	2367		
Total	11	51101			

S = 48,66 R-Sq = 53,67% R-Sq(adj) = 49,04%

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----	
COTA	6	486,07	65,55		(-----*-----)
COTE	6	390,45	20,91	(-----*-----)	
				-----+-----+-----	
				350 400 450 500	

Pooled StDev = 48,66

ANEXO A

Resina Epóxi 8552



HexPly® 8552 Epoxy Matrix
Mid-Toughened, High Strength,
Damage-Resistant, Structural Epoxy Matrix

Product Data

Description

HexPly® 8552 is an amine cured, toughened epoxy resin system supplied with unidirectional or woven carbon or glass fibers. HexPly® 8552 is recommended for structural applications requiring high strength, stiffness, and damage tolerance. HexPly® 8552 was developed as a low flow system to operate in environments of up to 200°F.

Features

- Service Temperature up to 200°F
- Impact Tolerant
- Low Flow

Net Resin Properties

Density	0.0470 lb/in ³
T _g dry - RDS 7700	302°F
T _g wet - RDS 7700	309°F
Tensile strength	17.5 ksi
Tensile modulus	0.577 msi
Tensile strain	1.7%
Fracture toughness, K _{IC}	1.475 ksi√in
Strain energy release rate, G _{IC}	3.88 inlb/in ²
Gel time at 200°F	13 minutes

Physical Properties

Prepreg	Material Description	Carbon Tapes	Carbon Fabrics
	% Resin content	34-38	35-43
% Flow	10-22	8-22	
% Volatiles	1.0 max	1.5 max	
Gel (min)	12-22	12-22	
Laminate	% Fiber volume	50	58



HexPly® 8552 Epoxy Matrix *Product Data*

Mechanical Properties

Property	Temp °F	Condition	A54	IM7	A193-PW	A280-5H	SGP19C-PW	SGP370-8H
0° Tensile strength, ksi	-67	Dry	276	373	111	120	142	140
0° Tensile modulus, msi	-67	Dry	19.4	23.7	9.8	10.2	12.3	12.6
0° Tensile strength, ksi	77	Dry	310	398	120	127	158	147
0° Tensile modulus, msi	77	Dry	19.6	23.8	9.8	9.7	12.3	12.4
0° Tensile elongation, %	77	Dry	1.83%	1.62%	-	-	-	-
0° Tensile strength, ksi	195	Dry	293	368*	116	131	-	-
0° Tensile modulus, msi	195	Dry	19.1	23.7*	9.6	10	-	-
90° Tensile strength, ksi	-67	Dry	-	26.3	103.0	109	126	131
90° Tensile modulus, msi	-67	Dry	-	2.8	9.6	9.7	11.6	11.7
90° Tensile strength, ksi	77	Dry	11.7	16.1	116.0	116	137	139
90° Tensile modulus, msi	77	Dry	1.39	1.7	9.6	9.6	11.6	11.7
90° Tensile strength, ksi	200	Dry	10.9	13.3*	111.0	112	142*	130*
90° Tensile modulus, msi	200	Dry	1.32	1.6*	9.8	9.4	11.6*	11.6*
± 45 Inplane shear	77	Dry	16.6	17.4	-	16.9	18.3	14.6
± 45 Inplane shear	200	Dry	16.2	16.4*	-	-	16.6*	13.1*
0° Compression strength, ksi	-67	Dry	230	-	139.0	-	-	-
0° Compression modulus, msi	-67	Dry	18	-	8.7	-	-	-
0° Compression strength, ksi	77	Dry	222	246	128.0	134	-	-
0° Compression modulus, msi	77	Dry	18.6	21.7	8.7	9.3	-	-
0° Compression strength, ksi	195	Dry	184	216	110.0	109	-	-
0° Compression modulus, msi	195	Dry	17.7	23.6	8.8	9.7	-	-
0° Compression strength, ksi	160	Wet	203	-	102.0	-	-	-
0° Compression modulus, msi	160	Wet	17.0	-	8.6	-	-	-
0° Compression strength, ksi	195	Wet	184	-	85.0	74	-	-
0° Compression modulus, msi	195	Wet	16.1	-	-	9.9	-	-
Fill compression strength, ksi	-67	Dry	-	-	127.0	150	124	132
Fill compression modulus, msi	-67	Dry	-	-	8.7	9.2	-	-
Fill compression strength, ksi	77	Dry	-	44.2	127.0	129	116	121
Fill compression modulus, msi	77	Dry	-	1.82	9.0	9.1	10.4	10.5
Fill compression strength, ksi	195	Dry	-	32.8*	114.0	-	103*	96*
Fill compression modulus, msi	195	Dry	-	1.57*	8.9	-	10.6*	10.5*
Fill compression strength, ksi	77	Wet	-	34.2	116.0	-	96	94
Fill compression strength, ksi	160	Wet	-	24.6**	101.0	-	81**	88**
Fill compression strength, ksi	195	Wet	-	-	87.0	-	87*	-
Compression after impact, ksi								
after 800 in-in-lb/in impact	77	Dry	80	-	-	-	-	-
after 1,000 in-in-lb/in impact	77	Dry	32	34	-	-	-	-
after 2,000 in-in-lb/in impact	77	Dry	28	-	-	-	-	-
after 2,500 in-in-lb/in impact	77	Dry	27	-	-	-	-	-

Bold - 200° Bold* - 220° Bold** - 180°

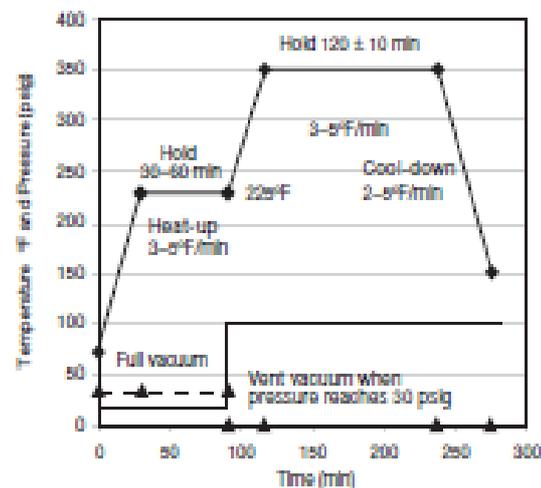
Mid-Toughened, High Strength, Damage-Resistant, Structural Epoxy Matrix

Mechanical Properties

Property	Temp °F	Condition	AS4	IM7	A193-PW	A280-6H	SGP195-PW	SGP370-8H
0° Short beam shear, ksi	-67	Dry	238	-	14.6	-	-	-
0° Short beam shear, ksi	77	Dry	18.5	19.9	12.2	11.4	12.7	13
0° Short beam shear, ksi	195	Dry	14.7	13.6*	10.2	6.9	10*	10.6*
0° Short beam shear, ksi	77	Wet	16.9	16.7	10.9	10	11.5	12.1
0° Short beam shear, ksi	160	Wet	12.2	11.6**	10.4	-	8.8**	9.1**
0° Short beam shear, ksi	195	Wet	11.3	-	8.5	-	-	-
Fill short beam shear, ksi	-67	Dry	-	-	10.8	13.7	-	-
Fill short beam shear, ksi	77	Dry	-	-	11.8	11.7	-	-
Fill short beam shear, ksi	195	Dry	-	-	10.2	-	-	-
Fill short beam shear, ksi	77	Wet	-	-	11.4	-	-	-
Fill short beam shear, ksi	195	Wet	-	-	8.5	-	-	-
0° Flexural strength, ksi	77	Dry	274	270	-	190	165	164
0° Flexural modulus, msi	77	Dry	184	22	-	8.5	11.1	10.8
Quasi-Isotropic 25/50/25								
Tensile strength, ksi	77	Dry	107	-	-	-	-	-
QHT strength, ksi	77	Dry	635	62.1	-	51	55.7	58.3
QHC strength, ksi	78	Dry	-	48.8	-	53.7	52.1	49.2
CAI strength, ksi	77	Dry	34.5	31	-	40.8	42.5	40
CEI strength, ksi	77	Dry	91.2	-	-	75.3	-	-

BoH - 20° BoL* - 22° BoL** - 180°

Cure Cycle



Alternative cure cycles available upon request.

Handling and Safety Precautions

Hexcel recommends that customers observe established precautions for handling resins and fine fibrous materials. Operators working with this product should wear clean, impervious gloves to reduce the possibility of skin contact and to prevent contamination of the material.

Material Safety Data Sheets (MSDS) have been prepared for all Hexcel products and are available to company safety officers on request from the nearest Hexcel Sales Office.

Cure Procedure

Autoclave

1. Apply full vacuum and 15 psig pressure.
2. Heat at 3-5°F/minute to 225°F.
3. Hold at 225°F for 30-60 minutes.
4. Raise pressure to 85-100 psig; vent vacuum when pressure reaches 30 psig.
5. Raise temperature to 350°F at 3-5°F/minute.
6. Hold at 350°F for 120 ± 10 minutes.
7. Cool at 2-5°F to 150°F and vent pressure.



HexPly® 8552 Epoxy Matrix *Product Data*

Storage

HexPly® 8552 prepreg should be sealed in a polyethylene bag and refrigerated, preferably below 32°F. Following removal from refrigerated source, allow the prepreg to reach room temperature before opening the polyethylene bag to prevent moisture condensation.

Shelf Life

12 months at 0°F
10 days at 70°F

Shipping

Prepreg is generally shipped in a sealed polyethylene in refrigerated transportation or in containers with dry ice.

Disposal of Scrap

Disposal of this material should be in a secure landfill in accordance with state and federal regulations.

Important

Hexcel Corporation believes, in good faith, that the technical data and other information provided herein is materially accurate as of the date this document is prepared. Hexcel reserves the right to modify such information at any time. The performance values in this data sheet are considered representative but do not and should not constitute specification minima. The only obligations of Hexcel, including warranties, if any, will be set forth in a contract signed by Hexcel or in Hexcel's then current standard Terms and Conditions of Sale as set forth on the back of Hexcel's Order Acknowledgment.

For more information

Hexcel is a leading worldwide supplier of composite materials to aerospace and other demanding industries. Our comprehensive product range includes:

- Carbon Fiber
- RTM Materials
- Honeycomb Cores
- Continuous Fiber Reinforced Thermoplastics
- Carbon, Glass, Aramid and Hybrid Prepregs
- Structural Film Adhesives
- Honeycomb Sandwich Panels
- Engineered Core
- Reinforced Fabrics

For US quotes, orders and product information call toll-free 1-800-688-7734. For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list please click here: <http://www.hexcel.com/contact/salesoffices>.

ANEXO B

Fibra de carbono IM 7



HexTow® IM7 carbon fiber is a continuous, high performance, intermediate modulus, PAN based fiber available in 12,000 (12K) filament count tows. This fiber has been surface treated and can be sized to improve its interlaminar shear properties, handling characteristics, and structural properties. It is suggested for use in weaving, prepregging, filament winding, braiding, and pultrusion.

The unique properties of HexTow® IM7 fiber, such as higher tensile strength and modulus, as well as good shear strength, allow structural designers to achieve both higher safety margins for both stiffness and strength critical applications.

Typical Fiber Properties	U.S. Units	SI Units
Tensile Strength 6K 12K	770 ksi 822 ksi	5,310 MPa 5,670 MPa
Tensile Modulus (Chord 6000-1000)	40.0 Msi	276 GPa
Ultimate Elongation at Failure 6k 12K	1.8% 1.9%	1.8% 1.9%
Density	0.0643 lb/in ³	1.78 g/cm ³
Weight/Length 6K 12K	12.5 x 10 ⁻⁶ lb/in 25.0 x 10 ⁻⁶ lb/in	0.223 g/m 0.446 g/m
Approximate Yield 6K 12K	6,674 N/b 9,937 N/b	4.48 m ² /g 2.24 m ² /g
Tow Cross-Sectional Area 6K 12K	1.94 x 10 ⁻⁴ in ² 9.89 x 10 ⁻⁴ in ²	0.19 mm ² 0.25 mm ²
Filament Diameter	0.203 mil	5.2 microns
Carbon Content	95.0%	95.0%
Twist	Never Twisted	Never Twisted

Typical 350°F Epoxy Composite Properties (at Room Temperature)	U.S. Units	SI Units
0° Tensile Strength	306 ksi	2,123 MPa
0° Tensile Modulus	23.8 ksi	164 GPa
0° Tensile Strain	1.62%	1.62%
0° Flexural Strength	270 ksi	1,880 MPa
0° Flexural Modulus	22.0 Msi	152 GPa
0° Short Beam Shear Strength	19.9 ksi	137 MPa
0° Compressive Strength	245 ksi	1,680 MPa
0° Compressive Modulus	21.7 Msi	150 GPa
90° Tensile Strength	16.1 ksi	111 MPa
Fiber volume	60%	60%

*Hex Tow, Hexcel and the Hexcel logo are registered trademarks of Hexcel Corporation, Stamford, Connecticut.





HexTow® IM7

Product Data

Yarn/Tow Characteristics	U.S. Units	SI Units
Electrical Resistivity	5.2×10^4 ohm-ft	1.6×10^9 ohm-cm
Coefficient of Thermal Expansion	-0.22 ppm/°F	-0.40 ppm/°C
Thermal Conductivity	2.99 Btu/hr-ft-°F	5.17 W/m-°K

Carbon Fiber Certification

This carbon fiber is manufactured to Hexcel aerospace specification HS-CP-5000. A copy of this specification is available upon request. A Certification of Analysis will be provided with each shipment.

Available Sizing

Sizing compatible with various resin systems, based on application are available to improve handling characteristics and structural properties. Please see additional information on available sizes on our website or contact our technical team for additional information.

Packaging

Standard packaging of HexTow® IM7 is as follows:

Filament Count	Nominal Weight		Nominal Length	
	(lb)	(kg)	(ft)	(m)
6K	2.0	0.9	13,950	4,070
12K	4.0	1.8	13,950	4,070

Other package sizes may be available on request. The fiber is wound on a 3-inch ID by 11-inch long cardboard tube and overwrapped with plastic film.

Safety Information

Obtain, read, and understand the Material Safety Data Sheet (MSDS) before use of this product.

Important

Hexcel Corporation believes, in good faith, that the technical data and other information provided herein is materially accurate as of the date this document is prepared. Hexcel reserves the right to modify such information at any time. The performance values in this data sheet are considered representative but do not and should not constitute specification minima. The only obligations of Hexcel, including warranties, if any, will be set forth in a contract signed by Hexcel or in Hexcel's then current standard Terms and Conditions of Sale as set forth on the back of Hexcel's Order Acknowledgement.

For more information

Hexcel is a leading worldwide supplier of composite materials to aerospace and other demanding industries. Our comprehensive product range includes:

- Carbon Fiber
- RTM Materials
- Honeycomb Cores
- Carbon, Glass, Aramid and Hybrid Prepregs
- Structural Film Adhesives
- Honeycomb Sandwich Panels
- Special Process Honeycombs
- Reinforced Fabrics

For US quotes, orders and product information call toll-free 1-866-556-2662 and 1-800-987-0658. For other worldwide sales office telephone numbers and a full address list, please click here: <http://www.hexcel.com/contact/salesoffice>

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

1. CLASSIFICAÇÃO/TIPO TD	2. DATA 03 de setembro de 2010	3. REGISTRO N° DCTA/ITA/TD-010/2010	4. N° DE PÁGINAS 239
5. TÍTULO E SUBTÍTULO: Estudo da influência de diferentes tipos de condicionamentos ambientais nas propriedades mecânicas de compósitos de fibras de carbono/epóxi.			
6. AUTOR(ES): José Antônio Peixoto Cunha			
INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA			
8. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Compósitos carbono/epóxi, Condicionamento ambiental, Comportamento mecânico.			
9. PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Compósitos de matrizes poliméricas; Fibras de carbono; Resinas epóxicas; Efeitos ambientais; Propriedades mecânicas; Ensaios de materiais; Materiais compósitos; Engenharia de materiais			
10. APRESENTAÇÃO: <div style="text-align: right;">X Nacional Internacional</div> ITA, São José dos Campos. Curso de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aeronáutica e Mecânica dos Materiais. Área de Física e Química dos Materiais Aeronáuticos. Orientadora(es): Mirabel Cerqueira Rezende; Defesa em 10/08/2010. Publicada em 2010.			
11. RESUMO: O aumento da aplicação de compósitos poliméricos estruturais, principalmente nos setores aeronáutico e naval, resulta no inevitável contato desses materiais com líquidos e vapores, que podem afetar o desempenho mecânico dos componentes produzidos. Dadas estas observações, o presente trabalho objetiva contribuir no entendimento dos efeitos de diferentes condicionamentos ambientais no comportamento mecânico de compósitos de fibra de carbono/resina epóxi 8552. São avaliados cinco diferentes tipos de condicionamentos: ambiente, higrotérmico (80°C e 90% de umidade relativa), névoa salina, ozônio e imersão em água. Foram realizados ensaios de resistências à compressão, cisalhamento interlaminar e de tração longitudinal e transversal foram realizados às temperaturas ambiente (22°C) e elevada (82°C). Os resultados obtidos mostram que o comportamento mecânico dos compósitos estudados é principalmente afetado pela exposição em ambientes úmidos, como condicionamentos em câmara higrotérmica e por imersão em água. Condicionamentos em ambiente de névoa salina e em ozônio mostram-se também deletérios ao comportamento mecânico do material, mas em menor intensidade, pelo fato da difusão de água no compósito não ser favorecida em ambiente salino e do ataque do ozônio ocorrer preferencialmente na superfície externa do material. Análises fractográficas das superfícies de fratura mostram que o decréscimo das referidas propriedades mecânicas é acompanhado da degradação da matriz polimérica, com a presença de delaminação e enfraquecimento da interface.			
12. GRAU DE SIGILO: (X) OSTENSIVO () RESERVADO () CONFIDENCIAL () SECRETO			

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)