

UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais

Ricardo Pedroso Ricci

DESENVOLVIMENTO DE CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE ADESIVOS
UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS

SOROCABA

2012

DESENVOLVIMENTO DE CRITÉRIOS PARA SELEÇÃO DE ADESIVOS
UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS

Dissertação apresentada como requisito à obtenção
do título de Mestre à Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho” – Programa de Pós-Graduação
em Ciência e Tecnologia de Materiais, área de concentração
de Materiais Poliméricos, sob a orientação do professor
Dr. Sandro D. Mancini

SOROCABA

2012

Ricci, Ricardo Pedroso.

Desenvolvimento de critérios para seleção de adesivos utilizados na fabricação de pás de turbinas eólicas / Ricardo Pedroso Ricci, 2012
129 f.

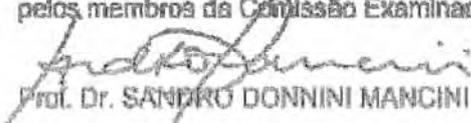
Orientador: Sandro Donnini Mancini

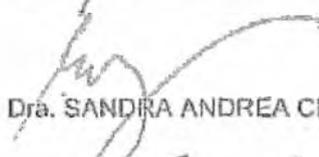
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru, 2012

1. Adesão. 2. Tratamentos superficiais. 3. Pás eólicas. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE RICARDO PEDROSO RICCI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DO(A) FACULDADE DE CIÊNCIAS DE BAURU.

Aos 23 dias do mês de julho do ano de 2012, às 14:00 horas, no(a) Auditório do Campus Experimental da UNESP em Sorocaba, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI do(a) Campus Experimental / UNESP / Sorocaba, Profa. Dra. SANDRA ANDREA CRUZ do(a) Centro de Engenharia / Universidade Federal do Abc, Prof. Dr. ROGERIO SCATENA BISCARO do(a) TECSIS - Tecnologia e Sistemas Avançados / Sorocaba, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de RICARDO PEDROSO RICCI, intitulado "DESENVOLVIMENTO DE CRITERIOS PARA SELEÇÃO DE ADESIVOS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS". Após a exposição, o discente foi argüido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. SANDRO DONNINI MANCINI


Profa. Dra. SANDRA ANDREA CRUZ


Prof. Dr. ROGERIO SCATENA BISCARO

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Richard e Lia, por sempre incentivarem a continuação de meus estudos.

Ao Prof. Dr. Sandro Donnini Mancini, pela compreensão, paciência e ensinamentos.

À equipe do Laboratório de Qualidade da Tectis, pelo apoio nos ensaios mecânicos.

Ao colega de trabalho Dr. Rogério Scatena Biscaro, pelas discussões técnicas.

Não chores, meu filho;
Não chores, que a vida
É luta renhida:
Viver é lutar.
A vida é combate,
Que os fracos abate,
Que os fortes, os bravos,
Só pode exaltar.

Gonçalves Dias

RESUMO

O processo de fabricação das pás de turbinas eólicas envolve a colagem de estruturas fabricadas em plásticos reforçados com fibra de vidro. Neste trabalho foram analisados os três principais tipos de adesivos estruturais utilizados pelos fabricantes de pás (epóxi, poliuretano e metil-metacrilato), com o objetivo de desenvolver critérios que auxiliem na seleção de adesivos e de tratamentos superficiais aplicados às estruturas a serem coladas. A caracterização dos adesivos envolveu dois tipos de ensaios mecânicos: o cisalhamento de juntas de sobreposição simples e a clivagem de juntas adesivas. Dois tipos de tratamento das superfícies dos aderentes foram utilizados: camada de sacrifício removível (*peel-ply*) e abrasão. Também foi realizada a análise dos modos de falha das juntas ensaiadas como auxílio ao estudo de compatibilidade entre adesivo e substrato. Os resultados mostram que o tratamento via *peel-ply* foi o mais eficiente para as juntas coladas com epóxi e testadas em cisalhamento, ao apresentar um aumento de 28% na resistência em relação às superfícies sem tratamento. Imagens de microscopia eletrônica de varredura sugerem que esse tratamento gerou uma área maior de contato em relação à superfície não tratada e que causou menos danos à superfície do aderente do que o método abrasivo. Os grupos colados com adesivo metil metacrilato, independentemente do tipo de tratamento, obtiveram os maiores valores nos ensaios de clivagem, cerca de 170% superiores aos demais grupos. Para estruturas de pás corretamente projetadas para evitar cargas de *peeling* em suas juntas adesivas, este trabalho mostra que a melhor opção são aderentes tratados com *peel-ply* e colados com epóxi. Contudo, um plano de testes deve ser elaborado sempre que houver a necessidade do emprego de um novo adesivo ou método de preparação superficial.

Palavras Chave: Adesão, tratamentos superficiais, pás eólicas, cisalhamento, clivagem, PRFV

ABSTRACT

The manufacturing process of wind turbine blades involves the bonding of structures made of glass reinforced plastic. This work analyzes the three main types of structural adhesives used by blades manufacturers (epoxy, polyurethane and methyl methacrylate), with the goal of developing criteria to assist in the selection of adhesives and surface treatments applied to the structures to be bonded. The characterization of the adhesives involved two types of mechanical tests: single lap shear joints and cleavage of adhesive joints. Two types of surface treatment of the adherents were used: removable sacrificial layer (*peel-ply*) and abrasion. The joint failure mode analysis was also carried out as an aid to the study of compatibility between adhesive and substrate. The results show that treatment via *peel-ply* was the most efficient for epoxy bonded substrates tested in shear, by presenting a 28% increase in strength compared to untreated surfaces. Images of scanning electron microscopy suggest that this treatment led to a larger area of contact relative to untreated surfaces and caused less damage to the substrate's surface than the abrasive method. The groups bonded with methyl methacrylate, regardless the type of treatment, had the highest values in the cleavage test, approximately 170% higher than other groups. For properly designed blades, that avoid peeling loads in their adhesive joints, this work shows that the best option are substrates treated with *peel-ply* and bonded with epoxy. However, a test plan should be prepared whenever there is the necessity of using a new adhesive or method of surface preparation.

Keywords: Adhesion, surface treatments, wind blades, shear, cleavage, GRP

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Acréscimo anual de potência eólica instalada. (GWEC, 2010)	24
Figura 2: Capacidade global de geração de energia eólica. (GWEC, 2010)	24
Figura 3: Modelo medieval de moinho de vento de eixo horizontal. (arquivo pessoal do autor)	27
Figura 4: Turbina Gedser. (TU Delft)	28
Figura 5: Turbinas de 2 MW em parque eólico cearense. (arquivo pessoal do autor)	29
Figura 6: Turbina de eixo vertical (a) e horizontal (b) com respectivos planos de rotação e direção do vento. (adaptado de Tong, 2010)	30
Figura 7: Configuração de uma turbina eólica de eixo horizontal. (adaptado de Tong, 2010)	30
Figura 8: Evolução do diâmetro de rotores de turbinas eólicas. (adaptado de EWEA, 2009) .	32
Figura 9: Aerofólio MEL18M31. (adaptado de Tong, 2010).....	34
Figura 10: Nomenclatura, sistemas de coordenada e partes estruturais de uma pá de turbina eólica. (adaptado de Tong, 2010)	35
Figura 11: Estrutura interna de uma pá de turbina eólica. Viga no conceito <i>spar-box</i> (a) e conceito mesa-alma (b). (adaptado de Burton <i>et al</i> , 2001).....	36
Figura 12: Tecidos de fibra de vidro dispostos sobre um molde de casca. A mesa da viga pré- fabricada encontra-se no meio da casca e parte do núcleo está posicionado à direita da mesa. (Tecsis)	37

Figura 13: Processo de infusão da casca aerodinâmica. (Tecsis)	38
Figura 14: Almas coladas à casca aerodinâmica. (Tecsis)	39
Figura 15: Molde se fechando para colagem das cascas. (Tecsis)	39
Figura 16: Pá pintada e embalada sendo transportada. (Tecsis).....	40
Figura 17: Classificação de compósitos de acordo com o tipo de reforço. (adaptado de Neto, 2006).....	41
Figura 18: Formação de um tecido multiaxial. (Shengzhen Sailong Fiberglass Company Ltd)	45
Figura 19: Grupo oxirano ou epóxi.	45
Figura 20: Estrutura química de uma resina epóxi diglicidil éter do bisfenol-A.	46
Figura 21: Perfil de temperatura durante a cura de resina epóxi. (Tecsis)	47
Figura 22: Processo convencional HLU. (PPG Fiber Glass).....	49
Figura 23: Esquema de produção por RTM. (Netcomposites).....	49
Figura 24: Esquema de produção por VARTM. (Netcomposites)	50
Figura 25: Teorias clássicas da adesão. (Brockmann, 2009).....	53
Figura 26: Grupo funcional uretano.	56
Figura 27: Grupo metil metacrilato.	57
Figura 28: Metodologia de escolha de adesivos e tratamentos superficiais para pás eólicas...	61

Figura 29: Esquema de fabricação via VARTM de um painel de fibra de vidro.....	63
Figura 30: Geometria dos aderentes do ensaio de cisalhamento, dimensões em mm.....	64
Figura 31: Geometria dos aderentes do ensaio de clivagem, dimensões em mm.	65
Figura 32: Aplicação da camada de nylon sobre o tecido de fibra de vidro.....	66
Figura 33: Micrografia dos aderentes tratados com <i>peel-ply</i> , mostrando a rugosidade impressa pelo <i>peel-ply</i> na superfície dos aderentes.	67
Figura 34: Abrasão da superfície do painel de compósito.....	68
Figura 35: Micrografia da superfície dos aderentes lixados, mostrando fibras expostas e partículas arrancadas da matriz polimérica que formam uma camada de pó sobre o aderente.	69
Figura 36: Micrografia da superfície dos aderentes sem tratamento superficial.....	70
Figura 37: Cartuchos, contendo os componentes do adesivo, acoplados a um misturador estático.....	72
Figura 38: Pistola aplicadora carregada com os cartuchos.....	72
Figura 39: Adesivo PU aplicado sobre substrato do ensaio de clivagem. As arruelas de 0,75mm controlam a espessura de colagem.	73
Figura 40: Pesos mantendo a geometria de uma junta de cisalhamento colada com MMA. ...	74
Figura 41: Fita desmoldante delimitando área de colagem nos substratos do ensaio de clivagem.	74

Figura 42: Junta de clivagem após o ensaio, mostrando a área de colagem (a) e a fita desmoldante remanescente em um dos substratos da junta (b).	75
Figura 43: Junta de sobreposição simples.	77
Figura 44: Deformação da junta provocada pelo desalinhamento das forças de tração aplicadas no corpo de prova.	77
Figura 45: Desenho de cdp's de junta de sobreposição simples com calços para minimizar o momento causado pelo carregamento assimétrico.	78
Figura 46: Corpo de prova em ensaio de cisalhamento.	78
Figura 47: Clivagem de uma junta adesiva provocado pelo avanço de uma cunha.	79
Figura 48: Concentração de tensão em uma junta adesiva sujeita à clivagem.	80
Figura 49: Cunha utilizada no teste de clivagem e geometria da cunha especificada pela norma ASTM D5041.	80
Figura 50: Ensaio de clivagem.	81
Figura 51: Modo de falha adesivo (a) esquematizado e (b) real ocorrido nos corpos de prova do grupo 7.	82
Figura 52: Modo de falha coesivo (a) esquematizado e (b) real ocorrido nos corpos de prova do grupo 4.	83
Figura 53: Modo de falha coesivo próximo à interface (a) esquematizado e (b) real ocorrido nos corpos de prova do grupo 2.	84

Figura 54: Modo de falha do tipo rompimento de fibra (a) esquematizado e (b) real ocorrido nos corpos de prova do grupo 9. As setas em (b) mostram algumas das fibras arrancadas do substrato superior e que permanecerem aderidas ao adesivo do substrato inferior.....	85
Figura 55: Rompimento leve de fibra (a) esquematizado e (b) real ocorrido nos corpos de prova do grupo 18. Nota-se em (b) que o adesivo permaneceu no substrato superior juntamente com poucas fibras arrancadas do substrato inferior.....	86
Figura 56: Modo de falha do tipo quebra do substrato.....	87
Figura 57: Modo de falha misto ocorrido nos corpos de prova do grupo 11. A grade é utilizada para calcular a proporção dos modos de falha.....	87
Figura 58: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 1 ensaiado em cisalhamento.....	89
Figura 59: Modo de falha com 100% de rompimento de fibra, encontrado nos corpos de prova do grupo 1 ensaiado em cisalhamento.....	90
Figura 60: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 1 ensaiado em clivagem.	90
Figura 61: Modo de falha do tipo coesiva próxima à interface, encontrado nos corpos de prova do grupo 1 ensaiado em clivagem.	91
Figura 62: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 2 ensaiado em cisalhamento.....	92
Figura 63: Modo de falha do tipo rompimento de fibra, encontrado nos corpos de prova do grupo 2 ensaiado em cisalhamento.....	93
Figura 64: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 2 ensaiado em clivagem.	94
Figura 65: Modo de falha do tipo coesiva, encontrado nos corpos de prova do grupo 2 ensaiado em clivagem.....	94

Figura 66: Micrografia MEV da superfície de um corpo de prova do grupo 2 ensaiado em clivagem após falha coesiva do adesivo.	95
Figura 67: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 3 ensaiado em cisalhamento.	96
Figura 68: Modo de falha do tipo rompimento de fibra, encontrado nos corpos de prova do grupo 3 ensaiado em cisalhamento.	97
Figura 69: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 3 ensaiado em clivagem.	97
Figura 70: Excesso de adesivo que não se descolou completamente do filme desmoldante com a passagem da cunha.	98
Figura 71: Modo de falha do tipo coesivo, encontrado nos corpos de prova do grupo 3 ensaiado em clivagem.	99
Figura 72: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 4 ensaiado em cisalhamento.	99
Figura 73: Modo de falha do tipo adesiva, encontrado nos corpos de prova do grupo 4 ensaiado em cisalhamento.	100
Figura 74: Micrografia MEV da superfície de um corpo de prova do grupo 4 ensaiado em cisalhamento após falha do tipo adesiva. Superfície sem presença de adesivo (a) e adesivo presente na superfície de um dos aderentes (b).	101
Figura 75: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 4 ensaiado em clivagem.	102
Figura 76: Modo de falha misto (20% adesivo e 80% coesivo), encontrado nos corpos de prova do grupo 4 ensaiado em clivagem.	103
Figura 77: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 5 ensaiado em cisalhamento.	104

Figura 78: Modo de falha do tipo rompimento de fibra, encontrado nos corpos de prova do grupo 5 ensaiado em cisalhamento.....	105
Figura 79: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 5 ensaiado em clivagem.	106
Figura 80: Modo de falha misto (50% coesivo e 50% rompimento leve de fibras), encontrado nos corpos de prova do grupo 5 ensaiado em clivagem.	107
Figura 81: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 6 ensaiado em cisalhamento.....	108
Figura 82: Modo de falha misto (30% coesivo e 70% rompimento de fibras), encontrado nos corpos de prova do grupo 6 ensaiado em cisalhamento.	109
Figura 83: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 6 ensaiado em clivagem.	110
Figura 84: Modo de falha misto (50% coesivo e 50% coesivo próximo à interface), encontrado nos corpos de prova do grupo 6 ensaiado em clivagem.	111
Figura 85: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 7 ensaiado em cisalhamento.....	111
Figura 86: Modo de falha misto (90% rompimento de fibra e 10% adesiva), encontrado nos corpos de prova do grupo 7 ensaiado em cisalhamento.	112
Figura 87: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 7 ensaiado em clivagem.	113
Figura 88: Modo de falha misto (20% rompimento leve de fibra e 80% coesiva próxima à interface), encontrado nos corpos de prova do grupo 7 ensaiado em clivagem.	114
Figura 89: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 8 ensaiado em cisalhamento.....	115
Figura 90: Modo de falha do tipo rompimento de fibra, encontrado nos corpos de prova do grupo 8 ensaiado em cisalhamento.....	115

Figura 91: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 8 ensaiado em clivagem.	116
Figura 92: Modo de falha misto (10% rompimento de fibras e 90% coesiva), encontrado nos corpos de prova do grupo 8 ensaiado em clivagem.	117
Figura 93: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 9 ensaiado em cisalhamento.	118
Figura 94: Modo de falha do tipo rompimento de fibra, encontrado nos corpos de prova do grupo 9 ensaiado em cisalhamento.	118
Figura 95: Micrografia MEV da superfície de aderentes do grupo 9 após falha do tipo rompimento de fibra no ensaio de cisalhamento.	119
Figura 96: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 9 ensaiado em clivagem.	119
Figura 97: Modo de falha misto (85% rompimento de fibras e 15% coesiva), encontrado nos corpos de prova do grupo 9 ensaiado em clivagem.	120
Figura 98: Resistência média e desvio padrão dos grupos testados em cisalhamento.	122
Figura 99: Energia média de iniciação de trinca e desvio padrão dos grupos testados em clivagem.	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Capacidade brasileira de geração de energia eólica. (GWEC, 2010).....	25
Tabela 2: Principais fabricantes em 2007 e respectivas turbinas. (adaptado de EWEA, 2009).....	33
Tabela 3: Propriedades de diversas fibras. (adaptado de Callister, 2001).....	42
Tabela 4: Composição de fibras de vidro utilizadas em compósitos. (adaptado de Neto, 2006).....	43
Tabela 5: Propriedade de fibras de vidro utilizadas como reforço em compósitos. (adaptado de Neto, 2006)	43
Tabela 6: Propriedades de fibras de carbono comerciais derivadas de PAN. (Neto <i>et al</i> , 2006).....	44
Tabela 7: Características de juntas adesivas. (Brockmann, 2009)	52
Tabela 8: Composição típica de um sistema de adesivo epóxi bi-componente. (Brockmann, 2009) ...	56
Tabela 9: Configuração dos corpos de prova. PU e MMA referem-se aos adesivos poliuretano e metil metacrilato respectivamente.....	62
Tabela 10: Valores de tensão de cisalhamento e clivagem dos ensaios e modos de falha.....	121

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1. Energia eólica	23
2.2. Energia eólica no Brasil.....	25
2.3. Turbinas eólicas	26
2.4. Pás eólicas	33
2.5. Materiais e fabricação das pás eólicas.....	37
2.6. Materiais compósitos.....	40
2.6.1. Fibras	43
2.6.2. Matrizes	45
2.6.3. Processamento de compósitos.....	48
2.7. Adesão	51
2.7.1. Teorias da adesão.....	53
2.7.2. Principais adesivos da indústria de pás eólicas.....	55
2.7.2.1. Adesivo epóxi.....	55
2.7.2.2. Adesivo poliuretano	56
2.7.2.3. Adesivo metil metacrilato	57
3. METODOLOGIA	59
3.1. Seleção de adesivos e tratamentos superficiais	59
3.2. Materiais	61

3.2.1.	Corpos de prova	61
3.2.2.	Fabricação dos aderentes	62
3.2.3.	Tratamento superficial dos aderentes.....	65
3.2.4.	Colagem dos aderentes	71
3.3.	Método.....	76
3.3.1.	Ensaio mecânico	76
3.3.1.1.	Cisalhamento.....	76
3.3.1.2.	Clivagem	79
3.4.	Modos de falha	81
3.4.1.	Falha adesiva.....	82
3.4.2.	Falha coesiva.....	83
3.4.3.	Falha coesiva próxima à interface	83
3.4.4.	Rompimento de fibra	84
3.4.5.	Rompimento leve de fibra.....	85
3.4.6.	Quebra do substrato	86
3.4.7.	Falhas mistas.....	87
4.	RESULTADOS	88
4.1.	GRUPO 1 (Adesivo Epóxi, sem tratamento superficial).....	88
4.2.	GRUPO 2 (Adesivo Epóxi, abrasão).....	92
4.3.	GRUPO 3 (Adesivo Epóxi, peel-ply).....	96
4.4.	GRUPO 4 (PU, sem tratamento superficial)	99
4.5.	GRUPO 5 (PU, abrasão).....	103

4.6.	GRUPO 6 (PU, peel-ply).....	107
4.7.	GRUPO 7 (MMA, sem tratamento superficial)	111
4.8.	GRUPO 8 (MMA, abrasão).....	114
4.9.	GRUPO 9 (MMA, peel-ply).....	117
5.	DISCUSSÕES.....	121
6.	CONCLUSÕES.....	125
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	127

1. INTRODUÇÃO

Junto com a crescente demanda de energia no Século XXI e do reconhecimento crescente do aquecimento global e poluição ambiental, o fornecimento de energia se tornou um fator essencial da economia de muitos países. Para responder aos desafios do clima e atender a demanda energética, muitos países têm priorizado as fontes de energia renováveis e sustentáveis, como a eólica, solar, hídrica, biomassa e geotérmica como substitutas da energia proveniente dos combustíveis fósseis (TONG, 2010).

A energia eólica é uma fonte de energia oriunda do aproveitamento da força dos ventos. O aquecimento desigual da superfície da Terra pelo Sol é a maior responsável pelo surgimento dos ventos (TONG, 2010), pode-se afirmar então que a energia eólica é renovável e virtualmente inesgotável. Atualmente, a energia mecânica dos ventos é convertida em energia elétrica através de turbinas eólicas. Essas máquinas convertem a força do vento através de pás que fazem girar um eixo acoplado a um gerador elétrico.

As pás eólicas são um dos maiores e mais complexos componentes da turbina. Uma das formas de fabricação é a união de várias estruturas feitas em compósitos. Essa união se dá na forma de juntas adesivas, um método que apresenta muitas vantagens, tais como a uniformização da distribuição de tensões, a alta resistência dinâmica e a possibilidade de se unir grandes superfícies, como as encontradas na fabricação de pás (BROCKMANN *et al*, 2009).

Por outro lado, as juntas adesivas apresentam desvantagens como a necessidade do cumprimento de requisitos específicos de produção e a quase obrigatoriedade do tratamento superficial dos aderentes (BROCKMANN *et al*, 2009), tornando-as uma das causas mais comuns de falhas estruturais de pás.

O objetivo deste trabalho é desenvolver critérios que auxiliem a escolha de diferentes tipos de adesivos estruturais e o tipo de preparação superficial dos aderentes utilizados na fabricação de pás eólicas.

Esse trabalho auxiliará a compreensão dos fatores que influenciam a resistência das juntas adesivas entre aderentes fabricados em compósitos, flexibilizando a escolha dos adesivos utilizados pela indústria de pás e tornando mais robusto o processo de fabricação dessas juntas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Energia eólica

Dados de 2010 revelam que o consumo energético do planeta foi cerca de 12,8 bilhões de toneladas de óleo equivalente, um aumento de 5,5% em relação ao ano anterior e que apenas 13% desse total tem origem em fontes renováveis. (ENERDATA, 2010).

A crescente preocupação com a poluição do meio ambiente, aquecimento global e o desenvolvimento de economias sustentáveis alavancou o desenvolvimento de tecnologias de geração de energia a partir de fontes renováveis, tais como eólica, solar, biomassa e hidroelétrica.

Estima-se que a potência eólica global seja de aproximadamente $1,26 \cdot 10^9$ MW (NELSON, 2009). Esse valor representa cerca de 20 vezes o consumo mundial de energia, portanto, a energia eólica poderia, teoricamente, suprir todas as necessidades energéticas do mundo (TONG, 2010).

Nas últimas três décadas, houve um enorme aumento na instalação e consumo de energia eólica (GWEC, 2010). Somente em 2010, a capacidade de geração mundial de energia eólica cresceu 35 GW (Figura 1), o que elevou a capacidade global de geração para 194 GW (Figura 2).

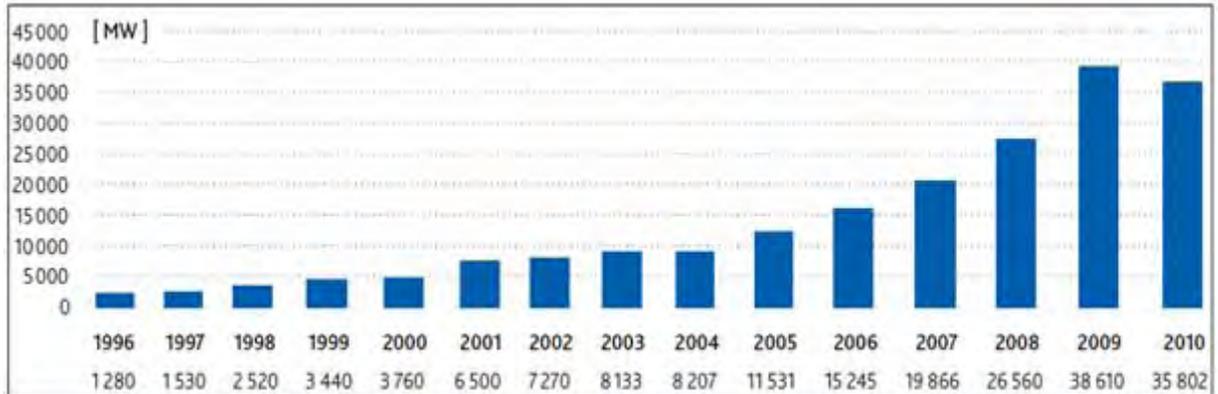


Figura 1: Acréscimo anual de potência eólica instalada. (GWEC, 2010)



Figura 2: Capacidade global de geração de energia eólica. (GWEC, 2010)

Comparada a outras fontes energéticas tradicionais, as principais vantagens da energia eólica são:

- Contribuição ambiental através da emissão nula de poluentes tais como CO₂, SO₂, NO_x e outros poluentes comuns à queima de combustíveis fósseis, bem como a utilização nula de água na geração de energia;
- Contribuição econômica pela diversificação do suprimento de energia, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis sujeitos à instabilidade de preço e disponibilidade.

Por estas características e pelo fato do vento ser inexaurível, gratuito e disponível em grandes quantidades ao redor do mundo, a energia eólica tornou-se a fonte energética mais promissora e terá um papel importante no suprimento energético global do Século XXI (TONG, 2010).

2.2. Energia eólica no Brasil

O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (APEB, 2001), concluído no ano de 2001, revela que o país possui um potencial de 143 GW de geração de energia pela força dos ventos. Desse total, apenas 931MW são utilizados, o que representa 0,8% da capacidade instalada das centrais de geração elétrica (MME, 2010).

No entanto, a utilização de energia eólica no país vem crescendo notavelmente nos últimos anos (Tabela 1), movida principalmente pelo programa de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica (PROINFA).

Tabela 1: Capacidade brasileira de geração de energia eólica. (GWEC, 2010)

Ano	2005	2006	2007	2008	2009	2010
MW	29	237	247	341	606	931

As vantagens da geração eólica para o país são inúmeras:

- O potencial eólico é capaz de suprir a demanda brasileira de energia, que alcançou 113,4 GW em 2010;

- Novas medições feitas em 2008 e 2009 indicam que o potencial eólico brasileiro pode ultrapassar 350 GW (GWEC, 2010);
- Os locais de maior potencial eólico encontram-se perto da rede de distribuição elétrica e de centros consumidores (GWEC, 2010);
- Existe uma complementaridade sazonal entre o potencial eólico e hídrico, com a estação chuvosa e de ventos fortes alternando-se (APEB, 2001);
- O preço da energia eólica atingiu R\$ 123/MWh nos últimos leilões de 2010 (GWEC, 2010), o que a torna competitiva em relação aos R\$ 141/MWh da energia hidroelétrica (ANEEL, 2010).

O país conta hoje com várias empresas ligadas ao setor eólico, que abrangem, desde indústrias de máquinas e componentes às distribuidoras e geradoras de energia. Destacam-se as fabricantes de pás para turbinas eólicas Tectis e Wobben, ambas instaladas na cidade de Sorocaba no interior de São Paulo. Outros grandes nomes do setor já possuem ou iniciaram a construção de unidades no país, tais como Alstom, Gamesa, GE, Impsa, Suzlon e Vestas.

A previsão para o Brasil é de crescimento do potencial eólico instalado, seguindo a tendência dos últimos leilões, o que transformará a energia eólica num importante setor da economia e diversificará a matriz energética nacional.

2.3. Turbinas eólicas

O uso da energia eólica teve início há milhares de anos. Seu emprego foi desde barcos à vela até fornos para derretimento de metais.

Pinturas em tumbas da dinastia chinesa Han (25-220 DC), encontradas na cidade de Liaoyang, mostram imagens de moinhos de vento, evidenciando o seu uso há pelo menos 1800 anos (TONG, 2010).

Os primeiros moinhos de vento de eixo vertical (plano do rotor paralelo ao vento) foram construídos em Sistan, leste da antiga Pérsia, com o objetivo de moer grãos e bombear água (HASSANM, 1986).

Os moinhos de eixo horizontal (plano do rotor perpendicular ao vento) foram inventados no noroeste da Europa por volta dos anos 1180 (DRACHMANN, 1961). Os primeiros modelos tinham 4 pás que eram montadas centralizadas em uma base (Figura 3).



Figura 3: Modelo medieval de moinho de vento de eixo horizontal. (arquivo pessoal do autor)

O moinho de vento de eixo horizontal tornou-se dominante na Europa e na América do Norte por muitos séculos, devido a sua maior eficiência e vantagens técnicas sobre moinhos de eixo vertical (TONG, 2010).

Ao contrário dos moinhos, que utilizavam a força dos ventos diretamente para realizar apenas trabalhos mecânicos, como por exemplo, a moagem de grãos, as turbinas eólicas utilizam a força dos ventos para mover um gerador elétrico e assim gerar eletricidade.

Em meados de 1950, Juul construiu a famosa turbina Gedser (Figura 4), introduzindo o chamado conceito dinamarquês de turbina eólica (HANSEN, 2008).



Figura 4: Turbina Gedser. (TU Delft)

Grande parte das turbinas modernas ainda utilizam o conceito de Juul, tendo tipicamente 3 pás e operando em velocidades de vento relativamente altas para geração da ordem de megawatts (TONG, 2010). A Figura 5 ilustra uma turbina moderna.



Figura 5: Turbinas de 2 MW em parque eólico cearense. (arquivo pessoal do autor)

Turbinas eólicas podem ser classificadas de acordo com alguns fatores, tais como (TONG, 2010):

- a posição do plano de rotação em relação ao vento (eixo horizontal e vertical);
- a capacidade de geração (alguns KW a turbinas multi-megawatt);
- o tipo de acoplamento entre o gerador e o eixo do rotor (acoplamento direto ou engrenagens);
- localização da turbina (em terra, “*onshore*” ou em mar, “*offshore*”).

A Figura 6 ilustra a diferença entre turbinas de eixo vertical e horizontal.

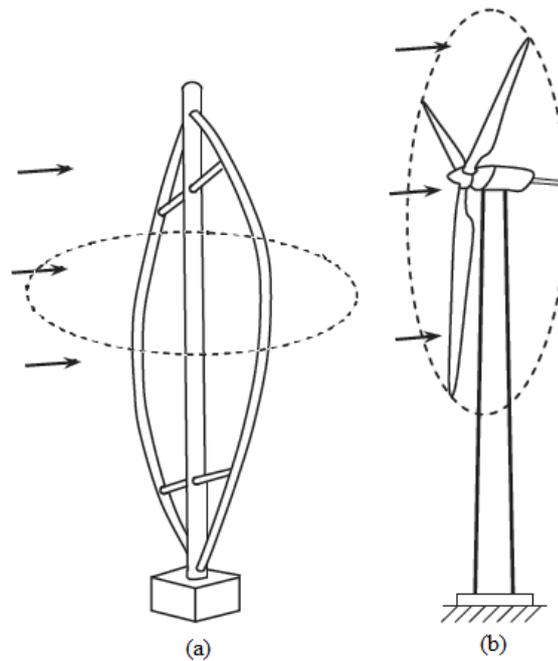


Figura 6: Turbina de eixo vertical (a) e horizontal (b) com respectivos planos de rotação e direção do vento. (adaptado de Tong, 2010)

Seguindo o conceito de Juul, as turbinas modernas de grande capacidade de geração são do tipo eixo horizontal com 3 pás, como ilustrado, sem as pás, na Figura 7.

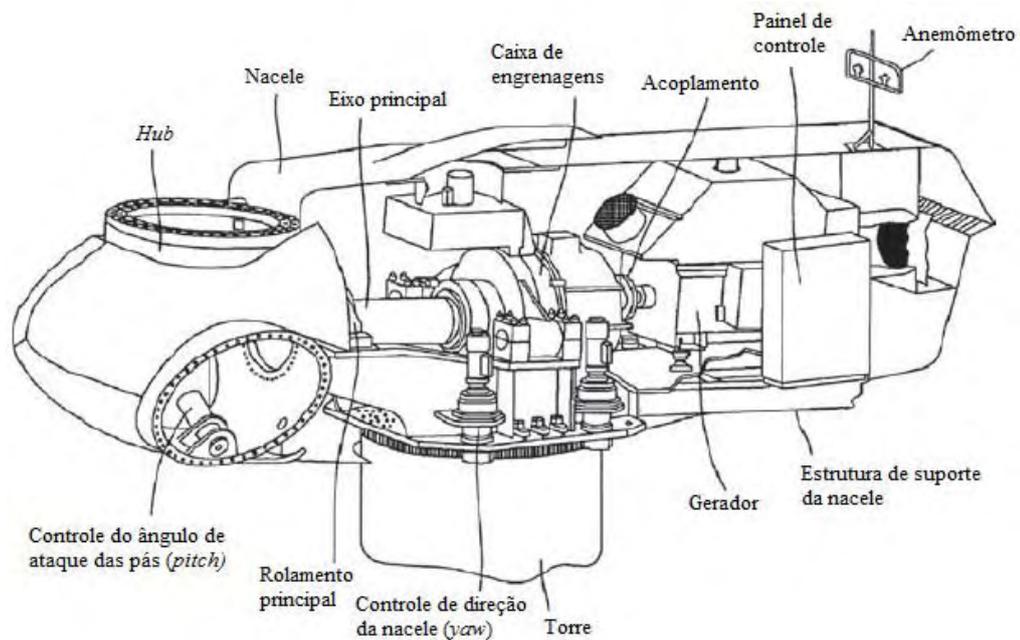


Figura 7: Configuração de uma turbina eólica de eixo horizontal. (adaptado de Tong, 2010)

Este tipo de turbina é composta por uma nacele posicionada sobre uma torre. A nacele guarda todos os principais componentes da turbina. As pás são montadas em uma estrutura metálica chamada de *Hub*, formando, assim, o rotor. Este é ligado ao gerador por um eixo. A velocidade do eixo é aumentada por uma caixa de engrenagens para melhor se adaptar ao regime de funcionamento do gerador.

Cada pá pode ser girada em relação ao *Hub* por um controle de ângulo de ataque, dessa forma é possível otimizar a captura de energia em diferentes velocidades de vento, bem como desacelerar o eixo em condições de vento acima do limite da turbina (TONG, 2010).

Ao identificar mudanças na direção e velocidade do vento, o anemômetro informa o controle de direção da nacele que reposicione a turbina, aproveitando ao máximo a potência dos ventos.

A relação entre a velocidade do vento e a potência de uma turbina eólica é dada pela Equação 1 (BURTON *et al*, 2001):

$$P = \frac{1}{2} C_P \rho A U^3, \quad (1)$$

onde C_P é o coeficiente de potência, ρ é a densidade do ar, A é a área varrida pelas pás e U a velocidade do vento.

A baixa densidade do ar, em relação à água, é a razão do grande tamanho de uma turbina eólica em comparação a uma turbina hidroelétrica. O coeficiente de potência descreve a fração da potência do vento que pode ser convertida pela turbina em trabalho mecânico (BURTON *et al*, 2001). O seu valor teórico máximo é de 0,593, conhecido como limite de Betz.

Duas variáveis importantes da Equação 1 são a área varrida pelas pás e a velocidade do vento.

A potência da turbina é quadruplicada ao se dobrar o diâmetro do rotor, isso levou ao desenvolvimento de pás cada vez maiores, como mostra a Figura 8 (EWEA, 2009).

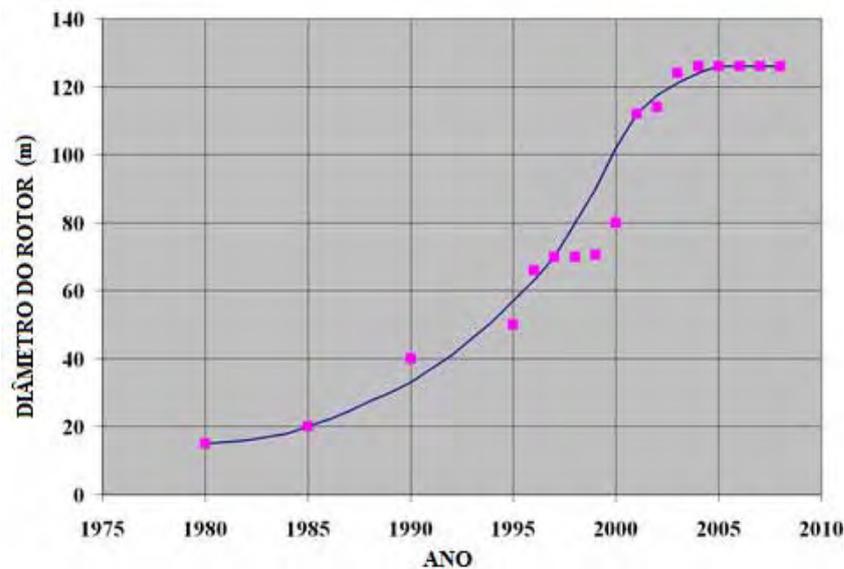


Figura 8: Evolução do diâmetro de rotores de turbinas eólicas. (adaptado de EWEA, 2009)

Já um aumento de duas vezes na velocidade do vento eleva em oito vezes a potência de uma turbina eólica. Esse é um dos principais fatores de escolha do local de instalação das turbinas (parque eólico).

O período de recuperação de energia, em um bom parque eólico, é de menos de 1 ano, ou seja, toda a energia utilizada na fabricação e instalação da turbina é recuperada no primeiro ano de seu funcionamento (MARTINEZ *et al*, 2009).

A Tabela 2 mostra os 10 maiores fabricantes de turbinas em 2007 e seus principais produtos (EWEA, 2009).

Tabela 2: Principais fabricantes em 2007 e respectivas turbinas. (adaptado de EWEA, 2009)

	Parcela do mercado (%)	Modelo	Potência (MW)	Diâmetro (m)
Vestas	22,8	V90	3	90
GE	16,6	2.5 XL	2,5	100
Gamesa	15,4	G90	2	90
Enercon	14	E82	2	82
Suzlon	10,5	S88	2,1	88
Siemens	7,1	3.6 SWT	3,6	107
Acciona	4,4	AW 119/3000	3	116
Goldwind	4,2	Repower 750	0,75	48
Nordex	3,4	N100	2,5	99,8
Sinovel	3,4	1500 (Windtec)	1,5	70

2.4. Pás eólicas

As pás de uma turbina eólica moderna são os maiores componentes em rotação da turbina e são projetadas para uma vida útil de 20 anos, o que corresponde a um número de rotações na ordem de 10^8 a 10^9 (SØRENSEN *et al*, 2010). Esse elevado número de ciclos torna a fadiga uma das variáveis de maior relevância no projeto estrutural e escolha de materiais da pá.

Além da resistência à fadiga, o projeto de uma pá deve satisfazer uma série de requisitos por vezes conflitantes (BURTON *et al*, 2001):

- maximizar a produção anual de energia para o regime local de vento;
- resistir a cargas extremas como rajadas de vento e parada de emergência;
- restringir o deslocamento da ponta para evitar colisões com a torre;
- evitar ressonâncias;
- minimizar peso e custo.

O primeiro requisito é satisfeito durante o projeto aerodinâmico da pá, onde a geometria externa da pá será definida. A Figura 9 mostra um possível perfil aerodinâmico (aerofólio) utilizado para definir a seção transversal externa de uma pá.

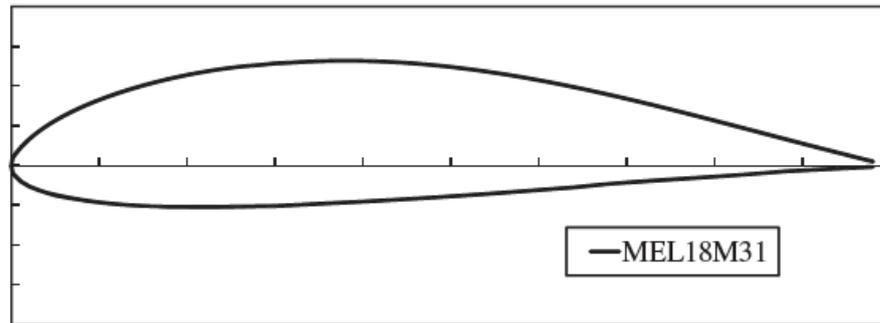


Figura 9: Aerofólio MEL18M31. (adaptado de Tong, 2010)

Os quatro requisitos restantes são satisfeitos durante o projeto estrutural da pá. Nesta fase é feita a escolha dos materiais e a definição da seção transversal estrutural delimitada externamente pelo aerofólio. Dessa forma, ocorre um processo iterativo entre características aerodinâmicas e estruturais da pá.

A escolha dos materiais de uma pá de turbina eólica é governada pelos requisitos de peso, rigidez e principalmente fadiga. No passado, materiais como aço, alumínio, madeira, plásticos reforçados com fibra de vidro (PRFV) e plásticos reforçados com fibra de carbono (PRFC) foram utilizados. Atualmente, a maioria das pás é construída em compósitos de PRFV (HANSEN, 2008). O detalhamento dos materiais compósitos será realizado no item 2.5.

A Figura 10 ilustra a estrutura típica da seção transversal de uma pá de turbina eólica moderna com seu sistema de coordenadas e nomenclaturas.

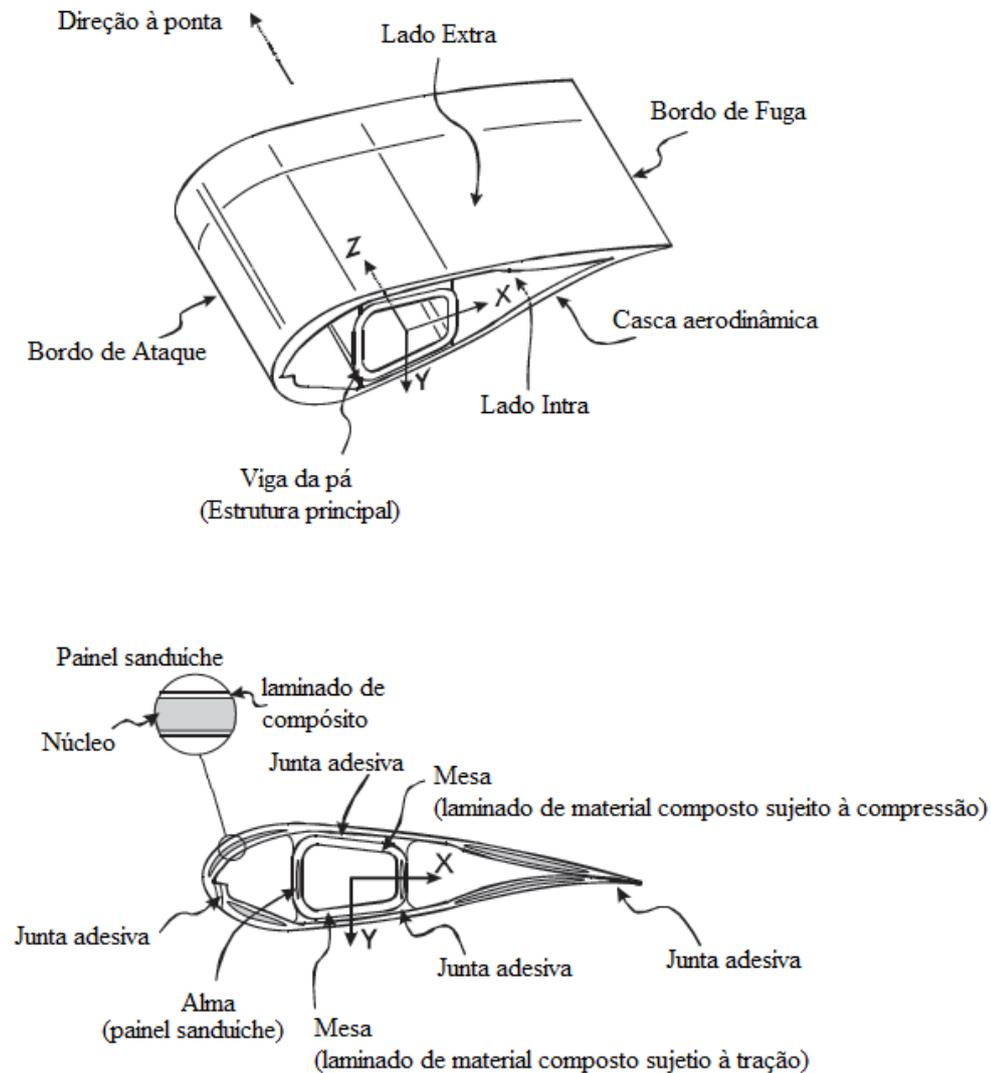


Figura 10: Nomenclatura, sistemas de coordenada e partes estruturais de uma pá de turbina eólica. (adaptado de Tong, 2010)

Ao passar ao redor da casca aerodinâmica, indo do bordo de ataque ao bordo de fuga, o ar cria um gradiente de pressão entre os lados intra e extra da pá. Essa diferença de pressão gera a força que fará girar as pás.

A casca aerodinâmica mantém sua rigidez e leveza graças ao painel sanduíche em que é construída. Unida à casca, encontra-se a viga da pá, responsável por transmitir as forças aerodinâmicas ao *hub* da turbina. A viga pode ser fabricada no formato de uma caixa, também

denominada *spar-box* (Figura 11a) ou ser dividida em uma mesa integrada à casca e suportada por almas (Figura 11b). Em ambos os conceitos juntas adesivas unem essas estruturas ao restante da pá.

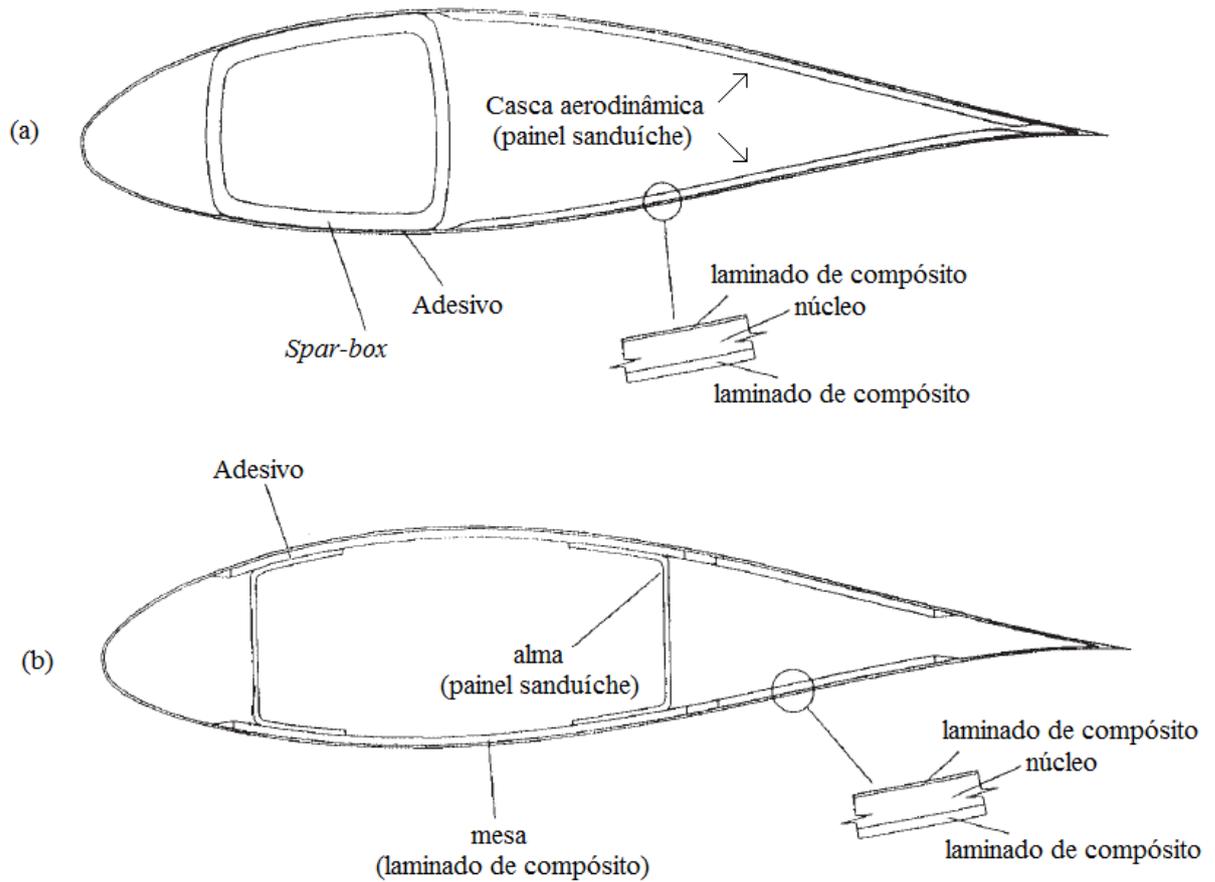


Figura 11: Estrutura interna de uma pá de turbina eólica. Viga no conceito *spar-box* (a) e conceito mesa-alma (b). (adaptado de Burton *et al*, 2001)

2.5. Materiais e fabricação das pás eólicas

Os materiais utilizados nas pás devem possuir baixa densidade, alta resistência, resistir à fadiga e ser tolerantes a danos (SØRENSEN *et al*, 2010). Como mencionado no item 2.4, compósitos são os materiais de escolha para pás de turbinas eólicas modernas.

A maioria das grandes pás utiliza fibra de vidro tipo E ou fibras de carbono como reforços. As matrizes mais comuns são polímeros de poliéster, epóxi ou vinil-éster. Madeira balsa ou espuma PVC são utilizadas como núcleo dos painéis sanduíche (SØRENSEN *et al*, 2010).

O processo de fabricação predominante de pás eólicas é a infusão assistida a vácuo. Em uma primeira etapa (Figura 12), os reforços na forma de tecidos são acomodados em moldes com a geometria das cascas intra e extra. Para pás com configuração mesa/alma, as mesas pré-fabricadas são posicionadas ainda nesta etapa, juntamente com os núcleos de balsa ou PVC.



Figura 12: Tecidos de fibra de vidro dispostos sobre um molde de casca. A mesa da viga pré-fabricada encontra-se no meio da casca e parte do núcleo está posicionado à direita da mesa. (Tecsis)

Na segunda etapa (Figura 13), um filme plástico cobre os reforços vedando os moldes e o ar de dentro do saco é retirado com o auxílio de bombas de vácuo. A matriz polimérica, na forma de resina líquida, é então succionada para dentro do molde, impregnando as fibras dos reforços, processo conhecido por infusão assistida a vácuo.



Figura 13: Processo de infusão da casca aerodinâmica. (Tecsis)

A terceira etapa (Figura 14) ocorre após a infusão, quando a resina encontra-se curada (o processo de cura será detalhado no item 2.6.2). Nessa etapa as almas (ou o *spar-box*) são coladas em uma das cascas com o uso de adesivos estruturais.



Figura 14: Almas coladas à casca aerodinâmica. (Tecsis)

Na quarta etapa (Figura 15) é aplicado adesivo estrutural ao redor das cascas e os moldes se fecham, colando a casca intra na extra.



Figura 15: Molde se fechando para colagem das cascas. (Tecsis)

Após a cura do adesivo estrutural, a pá é retirada do molde e segue para os processos de pós-cura em forno, acabamento, pintura e embalagem (Figura16).



Figura 16: Pá pintada e embalada sendo transportada. (Tecsis)

O processo de pós-cura é um complemento ao processo de cura realizada na quarta etapa. Ele reduz as tensões térmicas remanescentes na pá e eleva a temperatura de transição vítrea (T_g) da matriz polimérica, aumentando o seu grau de cura.

A pintura tem o objetivo de proteger os materiais da pá contra a ação dos raios UV do Sol, e de intempéries ambientais, como chuva e erosão provocada por partículas sólidas no ar e água.

2.6. Materiais compósitos

Compósitos são materiais que combinam, a nível macroscópico, pelo menos duas fases distintas, denominadas matriz e reforço (NETO *et al*, 2006). O resultado é um material que conjuga as melhores características dos seus constituintes.

Uma das funções do reforço é melhorar as propriedades mecânicas da matriz, enquanto a matriz distribui as cargas mecânicas entre os reforços e os protege contra agentes externos (NETO *et al*, 2006).

Uma das formas de classificação de compósitos considera o tipo de reforço empregado, como mostra a Figura 17.

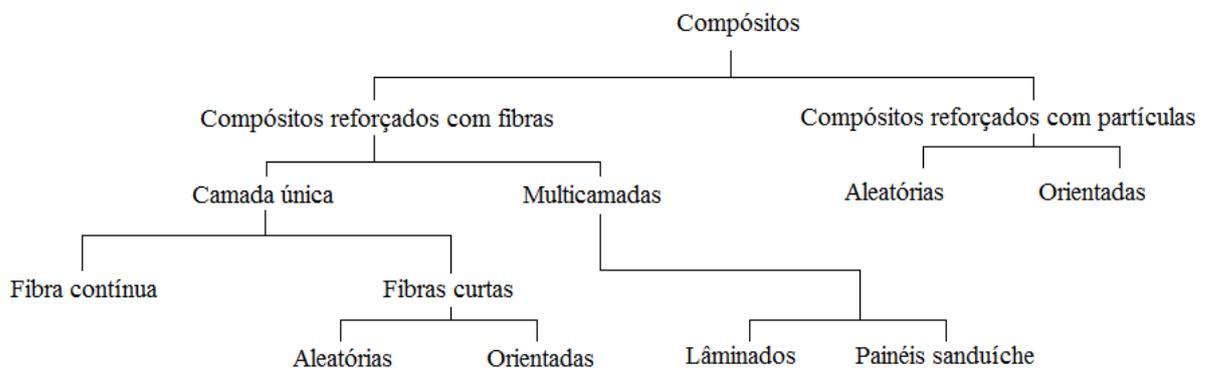


Figura 17: Classificação de compósitos de acordo com o tipo de reforço. (adaptado de Neto, 2006)

Compósitos reforçados com fibras oferecem propriedades mecânicas superiores. Quase todos materiais altamente resistentes e rígidos falham por causa da propagação de defeitos. A fibra destes materiais é uma forma intrinsecamente mais forte, pois o tamanho do defeito está limitado ao pequeno diâmetro da fibra. Um volume do material no formato de fibras é mais resistente do que o mesmo volume do material na forma contínua, pois se um defeito provocar a falha de uma fibra essa falha não irá se propagar, ao contrário do que ocorre na forma contínua do material (REINHART, 1987).

As propriedades das fibras podem ser aproveitadas em aplicações práticas quando são incorporadas em uma matriz que as unem, transferem esforços para e entre as fibras e as

protegem das intempéries do ambiente. As matrizes poliméricas são as mais empregadas quando peso é um fator crítico, juntamente com o custo e ciclo do processo.

Compósitos reforçados com fibras contínuas são altamente adequados a situações de carregamentos anisotrópicos onde peso é crítico (REINHART, 1987). Isso significa que os reforços podem ser empregados na direção de maior carregamento de uma estrutura, com pouca perda de material em direções desnecessárias.

A estrutura de pás eólicas, ilustrada no item 2.4, faz uso dessa característica dos compósitos, ao utilizar vigas formadas por camadas de fibras contínuas alinhadas na direção do carregamento principal da pá. Já a casca aerodinâmica é feita de painéis sanduíches que suportam cargas aerodinâmicas transversais ao plano do painel.

A Tabela 3 compara diversos tipos de fibras usadas como reforços de compósitos. Os valores mostram que a resistência e rigidez específica das fibras são várias vezes superiores a dos fios metálicos.

Tabela 3: Propriedades de diversas fibras. (adaptado de Callister, 2001)

Fibras	Densidade (g/cm ³)	Resistência a Tração (GPa)	Resistência Específica	Módulo de Elasticidade (GPa)	Módulo Específico
Óxido de alumínio	3.95	1.38	0.35	379	96
Aramida (Kevlar 49)	1.44	3.6–4.1	2.5–2.85	131	91
Carbono	1.78–2.15	1.5–4.8	0.70–2.70	228–724	106–407
Vidro-E	2.58	3.45	1.34	72.5	28.1
Boro	2.57	3.6	1.40	400	156
Carbeto de silício	3.0	3.9	1.30	400	133
PEAD (Spectra 900)	0.97	2.6	2.68	117	121
Fios metálicos					
Aço alta-resistência	7.9	2.39	0.30	210	26.6
Molibdênio	10.2	2.2	0.22	324	31.8
Tungstênio	19.3	2.89	0.15	407	21.1

2.6.1. Fibras

O tipo de fibra mais utilizado em compósitos com matriz polimérica é a de vidro, devido principalmente ao seu baixo custo, alta resistência à tração e grande inércia química. As desvantagens dessa fibra são relacionadas ao relativo baixo módulo de elasticidade, a auto abrasividade e à baixa resistência à fadiga quando agregada a compósitos (NETO *et al*, 2006).

A fibra de vidro mais utilizada é o tipo vidro-E, que possui um bom balanço entre propriedades mecânicas, químicas e elétricas a um preço moderado (REINHART, 1987).

Fibras de vidro do tipo S possuem melhores propriedades mecânicas, porém a um custo maior. A Tabela 4 sumariza a composição das fibras de vidro tipo E e S, enquanto a Tabela 5 resume suas principais propriedades.

Tabela 4: Composição de fibras de vidro utilizadas em compósitos. (adaptado de Neto, 2006)

Constituintes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O
Vidro E	55,2	14,8	7,3	3,3	18,7	-
Vidro S	65	25	-	10	-	-

Tabela 5: Propriedade de fibras de vidro utilizadas como reforço em compósitos. (adaptado de Neto, 2006)

Fibras	Vidro E	Vidro S
Massa específica (g/cm ³)	2,54	2,55
Módulo de elasticidade (GPa)	70	86
Resistência à tração (GPa)	3,45	4,6
Preço (US\$/kg tecido)	10-20	20-40

As fibras de carbono são fabricadas pela pirólise controlada de materiais percussores orgânicos em forma de fibras. Atualmente fibras de poliacrilonitrila (PAN) são o tipo de percussor mais utilizado (NETO *et al*, 2006).

A resistência final da fibra de carbono é função da qualidade e composição do precursor e das condições do processo de fabricação. A Tabela 6 apresenta as propriedades de fibras de carbono derivadas de PAN disponíveis comercialmente.

Tabela 6: Propriedades de fibras de carbono comerciais derivadas de PAN. (Neto *et al*, 2006)

	Resistência à tração (GPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
T300 (Toray)	2,80	230
AS-4 (Hercules)	3,70	250
T800 (Toray)	4,90	290
T-1000 (Toray)	7,05	290
Celion G 40-700 (BASF)	5,00	300
M-40 (Toray)	2,74	390
M-50 (Toray)	2,45	490
Celion G 50-300 (BASF)	2,50	360
Celion GY-80 (BASF)	1,86	570

Por apresentar maior resistência, rigidez e menor massa específica as fibras de carbono substituem as fibras de vidro na fabricação das vigas de algumas pás eólicas. O resultado são pás mais leves, porém mais caras, uma vez que o tecido de carbono é de cinco a dez vezes mais caro do que o tecido de vidro.

As fibras de reforço, tanto de vidro como carbono, são normalmente costuradas ou trançadas de maneira a formarem tecidos, cuja configuração varia de acordo com as solicitações de carregamento do compósito. A Figura 18 mostra um tecido formado por feixes de fibra dispostos em várias direções.

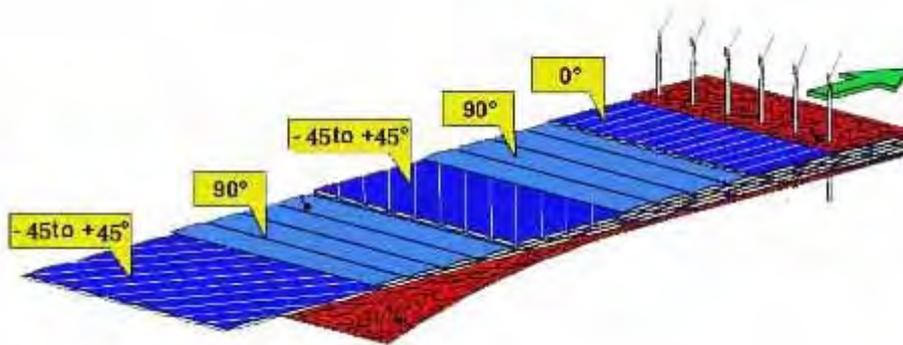


Figura 18: Formação de um tecido multiaxial. (Shengzhen Sailong Fiberglass Company Ltd)

2.6.2. Matrizes

Resinas epóxis são as matrizes mais versáteis disponíveis comercialmente. Poliésteres podem custar menos e poliamidas terem melhor desempenho em altas temperaturas, mas resinas epóxi possuem um largo espectro de propriedades físicas, mecânicas e de processamento que as tornam incomparáveis (MAY, 1987).

Epóxis são polímeros que contêm pelo menos dois grupos epóxis terminais, conhecidos também como grupos oxirano ou etoxilina, por molécula (NETO, 2006). A Figura 19 ilustra o grupo funcional epóxi.

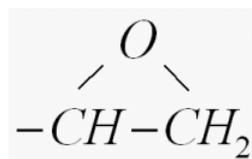


Figura 19: Grupo oxirano ou epóxi.

As resinas epóxis mais utilizadas têm como base o diglicidil éter do bisfenol A (DGEBA), mostrado na Figura 20, que é sintetizado a partir de uma reação entre a epícloridrina e o bisfenol-A (ELLIS, 1993).

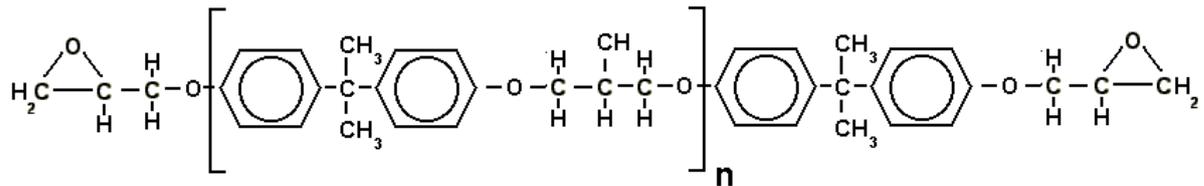


Figura 20: Estrutura química de uma resina epóxi diglicidil éter do bisfenol-A.

Resinas epóxis do tipo DGEBA são misturas de monômeros, cujas unidades de repetição (n) podem variar de 0 a 25, podendo ser obtidas resinas líquidas de baixa viscosidade ($0 < n < 1$), até resinas sólidas ($n > 1$) (BAUER, 1989). Essa característica possibilita o processamento de compósitos de epóxi por métodos como a infusão assistida à vácuo.

Como as unidades de repetição (n), que podem ser incorporadas a estrutura da molécula de DGEBA, variam, as resinas epóxis podem apresentar diversas propriedades, tornando-se, assim, muito versáteis.

As resinas epóxis são transformadas irreversivelmente em polímeros termorrígidos com ligações cruzadas entre suas cadeias através de uma reação química chamada de cura. A cura pode ser realizada pela adição de agentes de cura (os mais comuns sendo as aminas), com ou sem aquecimento e pressão (REINHART, 1987).

O tipo de agente de cura (endurecedor) utilizado influencia a cinética de cura e o ciclo de processamento (viscosidade em função do tempo) que irão afetar as propriedades do material curado (NETO, 2006).

A estequiometria da mistura resina epóxi/endurecedor é fundamental para propriedades como transição vítrea, módulo de elasticidade e resistência mecânica do material curado. Em princípio, não deve haver nenhum grupo epóxi ou agente de cura não reagido após o final do processo de cura (NETO, 2006).

A Figura 21 mostra a evolução da temperatura durante o processo de cura da resina epóxi. Esse gráfico apresenta dois pontos de grande importância para o processamento de compósitos: a gelificação e o pico exotérmico.

A gelificação é um processo irreversível caracterizado pelo aumento brusco e acentuado da viscosidade da resina. No processamento de compósitos, é primordial para a qualidade final das peças que a impregnação do reforço pela resina termine antes de ocorrer a gelificação da mesma.

O pico exotérmico é a maior temperatura atingida durante a reação de cura. O seu controle é importante, pois picos muito altos podem causar a degradação térmica do polímero.

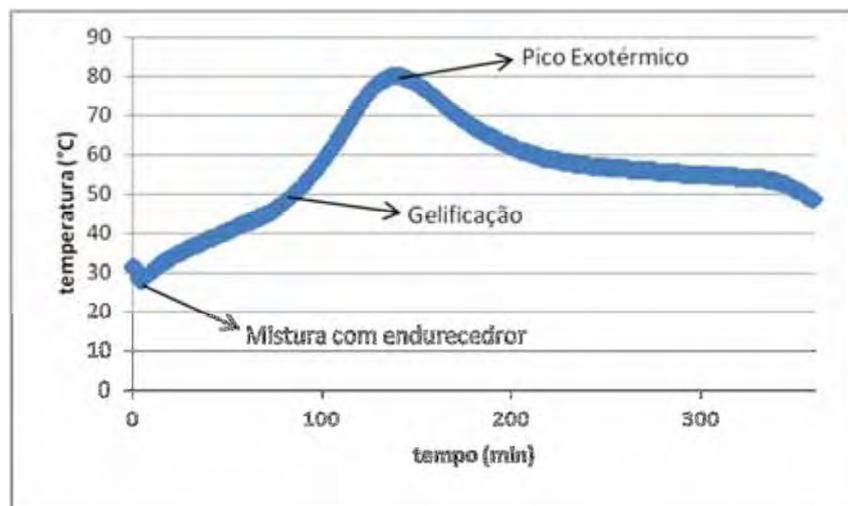


Figura 21: Perfil de temperatura durante a cura de resina epóxi. (Tecsis)

2.6.3. Processamento de compósitos

A produção de compósitos reforçados por fibras consiste basicamente em se misturar a matriz ao reforço. Parâmetros como fração entre reforço/matriz, velocidade do processo e disposição das fibras influenciam a qualidade final do produto.

Os métodos mais comuns de fabricação são a laminação manual (*hand lay up* - HLU), modelagem por transferência de resina (*resin transfer moulding* - RTM) e infusão assistida a vácuo (*vacuum assisted resin transfer moulding* - VARTM).

O meio de fabricação mais simples de compósitos é o HLU. O método se baseia em misturar manualmente o reforço com a matriz polimérica (resina). O reforço é acomodado em um molde enquanto a resina, em processo de cura, é espalhada de modo a envolver as fibras. O molde pode ser aquecido para acelerar o processo de polimerização da matriz.

Neste processo utilizam-se espátulas e rolos para acomodar as camadas no molde (Figura 22), permitir uma melhor adesão da resina nas fibras e retirar parte das bolhas de ar que surgem no material. O processo se repete a cada nova camada de tecido adicionada.

O processo HLU dá origem à compósitos sem compromisso estrutural e que apresentam uma fração volumétrica de reforço menor que 40% (NETO, 2006). O acabamento final do produto também é pobre, necessitando frequentemente de retrabalhos.



Figura 22: Processo convencional HLU. (PPG Fiber Glass)

Uma opção ao processo HLU é o RTM: processo mais elaborado e complexo. Nesse método o reforço de fibra é acomodado entre um molde e um contramolde como esquematizado na Figura 23. Após o conjunto ser fechado, uma quantidade pré-estabelecida de resina é injetada em pontos estratégicos. Como o volume entre os moldes é determinado, assim como a quantidade de resina, pode-se controlar a proporção entre fibra e resina, garantindo um laminado de melhor qualidade. Os moldes podem ser aquecidos para facilitar o escoamento da resina e acelerar sua cura.

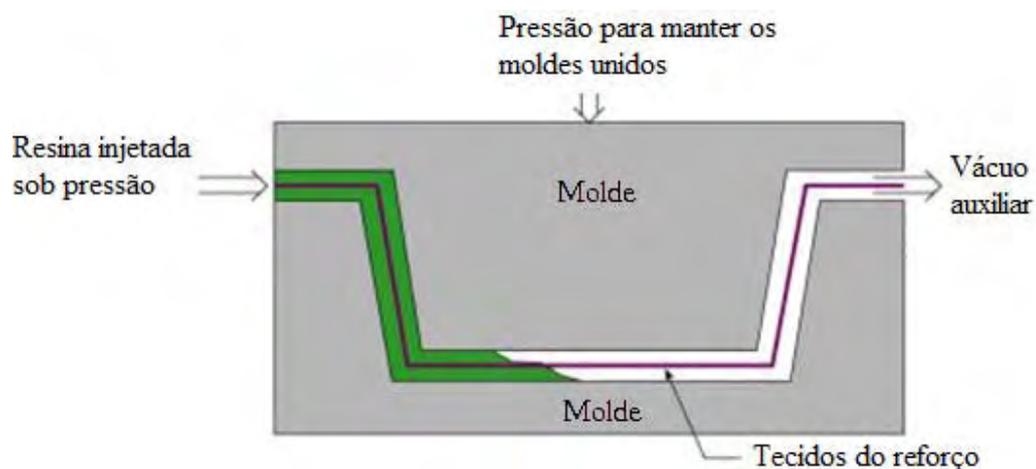


Figura 23: Esquema de produção por RTM. (Netcomposites)

Por possuir dois moldes que precisam se encaixar com precisão o custo do ferramental exigido pelo RTM torna-se alto.

Uma variante do RTM é o VARTM, um dos métodos mais utilizados na produção de pás de turbinas eólicas.

Nesse processo as camadas de reforço são posicionadas em um molde e cobertas por uma série de materiais auxiliares, sendo o último deles um filme plástico ou um contramolde flexível que é selado nas bordas do molde. Vácuo é aplicado ao conjunto e quando certa pressão é atingida e os vazamentos vedados, a resina é absorvida para o espaço entre o molde e a cobertura, impregnando-se, assim, aos reforços de fibra (Figura 24).

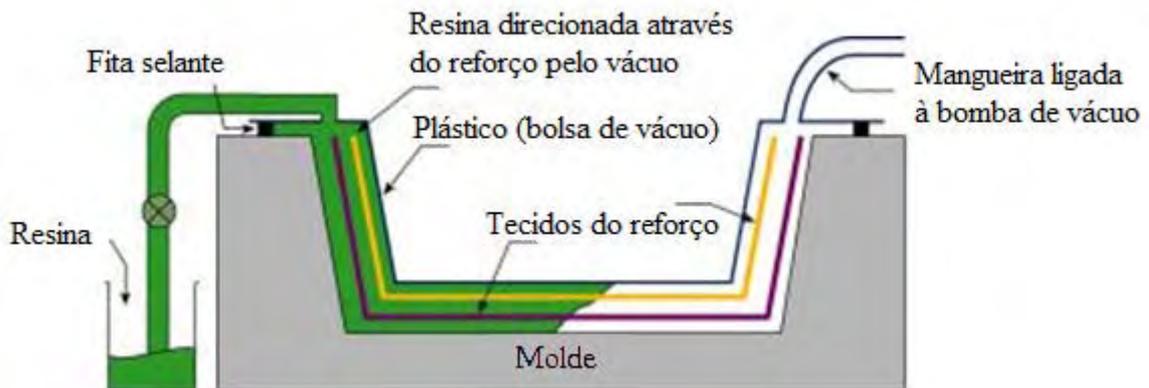


Figura 24: Esquema de produção por VARTM. (Netcomposites)

O escoamento da resina ao redor dos reforços é chamado de infusão. Esse processo é regido pelas diferenças de pressão entre a resina e as camadas de tecido do reforço. A lei de Darcy descreve esse mecanismo através da Equação 2.

$$Q = \frac{-kA}{\mu} \frac{(P_b - P_a)}{L}, \quad (2)$$

onde Q é a vazão da resina, κ é a permeabilidade do meio (reforços), A é a área da seção por onde a resina escoar, $P_b - P_a$ é o gradiente de pressão provocado pela retirada parcial de ar, L é a distância onde a queda de pressão ocorre e μ é a viscosidade dinâmica da resina.

Tanto o RTM, como o VARTM, garantem uma fração volumétrica de reforço próximo de até 50%, proporcionando melhores propriedades mecânicas ao compósito quando comparado ao processo HLU (NETO, 2006).

2.7. Adesão

Adesão é a união entre as superfícies de dois materiais, similares ou não, utilizando uma substância que se adere às superfícies de ambos aderentes a serem unidos, transferindo forças de um aderente para outro (BROCKMANN, 2009).

Segundo a normatização DIN EN 923, adesivo é uma substância não metálica capaz de unir materiais através de ligação superficial e com tal ligação possuindo resistência interna adequada (coesão).

A Tabela 7 sumariza as vantagens e desvantagens das juntas adesivas comparadas a outras técnicas de união.

Tabela 7: Características de juntas adesivas. (Brockmann, 2009)

Vantagens	Desvantagens
Aderentes metálicos não são afetados por calor nos casos de juntas soldadas.	Estabilidade térmica limitada
Distribuição uniforme de tensões	Utilização a longo prazo pode alterar as propriedades da união
Possibilidade de se unir grandes superfícies	Limpeza e preparação superficial dos aderentes é necessária em muitos casos
Possibilidade de se unir materiais diferentes	Requisitos específicos de produção precisam ser seguidos
Possibilidade de se unir aderentes muito finos	Dispositivos de fixação da junta adesiva são normalmente necessários
Juntas adesivas são estanques	Testes de inspeção não destrutivos são limitados
Não há corrosão de fresta	
Não há corrosão de contato	
Não é necessário encaixes precisos entre aderentes	
Boas propriedades de amortecimento	
Alta resistência dinâmica	

Juntas adesivas estruturais de alto desempenho, como aquelas utilizadas na fabricação de pás de turbinas eólicas, apresentam desvantagens como a necessidade do cumprimento de requisitos específicos de produção e, dependendo do tipo de adesivo, a quase obrigatoriedade do tratamento superficial dos aderentes (BROCKMANN, 2009).

Reis *et al* (2005), mencionam que a falha prematura de juntas adesivas em baixo carregamento é quase sempre devido à má preparação superficial. Já para Reinhart (1987), o tratamento de superfícies para colagem de compósitos ainda não é completamente conhecido e não há um consentimento geral na indústria sobre o melhor tratamento para uma aplicação específica.

2.7.1. Teorias da adesão

Inúmeras teorias foram propostas para explicar o fenômeno da adesão. As mais significativas são apresentadas na Figura 25, cada uma explicando parcialmente o comportamento da união adesiva.

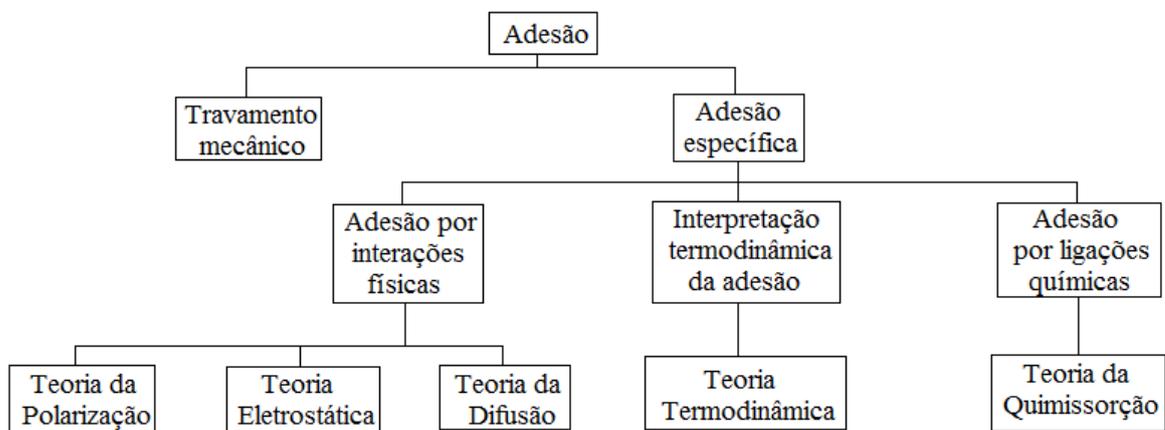


Figura 25: Teorias clássicas da adesão. (Brockmann, 2009)

Segundo Brockman *et al* (2009) a teoria do travamento mecânico não tem expressão na colagem da maioria dos materiais não-porosos utilizados tecnicamente, embora essa teoria possa ser útil na união entre madeira, papel e materiais porosos expansíveis.

A teoria da polarização e eletrostática baseiam-se na força criada entre cargas elétricas e são interações de menor energia quando comparadas às ligações químicas (BROCKMANN, 2009).

Bruyne (1957) explica sua teoria da polarização através de interações intermoleculares oriundas de dipolos permanentes em moléculas polares e dipolos induzidos em moléculas apolares.

A teoria eletrostática baseia-se no fato de que todos os materiais possuem configurações eletrônicas distintas e que quando postos em contato uma bicamada elétrica é formada, originando a força adesiva entre os materiais (BROCKMANN, 2009). Embora esse fenômeno exista, ele pouco contribui para a adesão na maioria dos casos.

Voyutskii (1963) explicou um caso específico de adesão que ocorre entre polímeros, especialmente os que apresentam poucas ou nenhuma ligação cruzada. Esses polímeros não seriam estruturas estáticas e uma intensa movimentação das cadeias moleculares, especialmente acima da temperatura de transição vítrea, permitiria que parte de moléculas deixassem a superfície original, difundindo para dentro do polímero adjacente.

A teoria termodinâmica baseia-se no fato de que as superfícies mais energéticas são as mais instáveis, então se o contato entre duas superfícies gerar uma interface de menor energia e, portanto, mais estável que as superfícies originais, as superfícies tendem a permanecer em contato. Segundo Brockman (2009), quando a energia da interface entre o aderente e o adesivo for menor que suas energias superficiais, cria-se uma interface mais estável que tende a manter aderente e adesivo em contato, originando o fenômeno da adesão.

Por fim, a teoria da quimissorção baseia-se na formação de ligações covalentes entre o adesivo e o aderente para criação de adesão. Essas ligações, quando presentes, são as mais fortes interações presentes na interface adesivo/aderente (BROCKMAN *et al* 2009).

Como os mecanismos de adesão ainda não são inteiramente compreendidos, não foi possível desenvolver modelos para prever o comportamento das juntas adesivas. Embora isto possa ser considerado como uma desvantagem para a adesão, os valores empíricos

obtidos do ensaio de juntas adesivas tornaram possível conceber estruturas coladas seguras e confiáveis (BROCKMANN, 2009).

2.7.2. Principais adesivos da indústria de pás eólicas

Sørensen *et al* (2010) cita que os três tipos de adesivos mais utilizados na fabricação de pás eólicas são os epóxis, metacrilatos e poliuretanos.

2.7.2.1. Adesivo epóxi

Os adesivos epóxis são os mais utilizados na colagem de estruturas em compósito. Sistemas de adesivos mono ou bi-componentes (sem ou com agentes de cura) estão disponíveis em uma grande variedade de formulações (WILLIAMS, 1987).

As vantagens do adesivo epóxi incluem a formação de juntas adesivas de alta resistência, inclusive a ambientes hostis e boa retenção das propriedades por longos períodos sob a ação contínua ou cíclica de esforços (WILLIAMS, 1987).

As maiores desvantagens são a sensibilidade aos tratamentos superficiais e a necessidade de uma mistura precisa entre resina e agentes de cura nos sistemas bi-componentes (WILLIAMS, 1987).

Os adesivos epóxis são formulados de forma a permitir o seu correto processamento. Adesivos mono-componente curam somente em temperaturas elevadas de 130

a 150°C. Já adesivos bi-componentes podem curar a temperatura ambiente, embora aquecimento seja necessário para se atingir as propriedades mecânicas máximas.

Sistemas epóxis podem conter dez ou mais aditivos em sua formulação para gerar adesivos de alto desempenho. Esses aditivos devem ser cuidadosamente ajustados entre si por causa de interações mútuas (BROCKMANN, 2009).

Um sistema típico de adesivo epóxi bi-componente modificado para aumentar sua tenacidade é apresentado na Tabela 8.

Tabela 8: Composição típica de um sistema de adesivo epóxi bi-componente. (Brockmann, 2009)

Parte A	Parte B
48% resina epóxi	49% endurecedor
13% agente diluidor reativo	8,5% catalisador
9% aditivo para melhorar resistência ao impacto	16% flexibilizador
1,5% promotor de adesão	23% material de preenchimento
0,5% aditivo reológico	3% aditivo reológico
1,5% esferas de vidro	
17,5% material de preenchimento	
7,8% esferas ocas de vidro	
1,2% pigmento	

2.7.2.2. Adesivo poliuretano

O grupo funcional dessa classe de polímeros é o uretano (Figura 26).

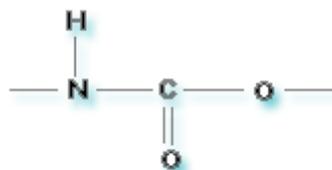


Figura 26: Grupo funcional uretano.

Os adesivos poliuretanos (PU) podem ser formulados como mono ou bi-componentes. Sistemas mono-componente tipicamente reagem com a umidade do ar, enquanto bi-componentes podem ter a cura acelerada com aplicação de calor.

Adesivos PU exibem uma boa relação entre resistência ao cisalhamento e clivagem. Uma grande variedade de propriedades do adesivo curado pode ser obtida com a adição de modificadores aos pré-polímeros (WILLIAMS, 1987).

A adição de materiais de preenchimento e aditivos reológicos é condição necessária na formulação de adesivos PU. Para redução de custos, carbonatos e silicatos como talco e argila são adicionados até 60% da massa total. Um máximo de 20% de sílica pirogênica pode ser adicionado para melhora das propriedades mecânicas e até 30% de plastificantes para controle da viscosidade final (BROCKMANN, 2009).

2.7.2.3. Adesivo metil metacrilato

Adesivos metacrilatos (MMA) são encontrados em diversas formulações: mono ou bi-componentes, cura anaeróbica e cura através de raios UV. A Figura 27 ilustra o grupo funcional típico deste grupo de adesivos, o metil metacrilato.

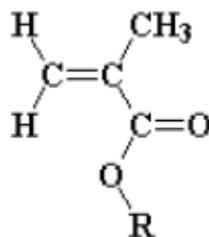


Figura 27: Grupo metil metacrilato.

O MMA possui boa aderência em metal e vidro e consegue atacar a superfície de materiais plásticos, criando excelente adesão por difusão. O MMA possui excelentes propriedades mecânicas e são muito duráveis, no entanto, para diminuir sua fragilidade, elastômeros são adicionados em sua formulação (BROCKMANN, 2009).

3. METODOLOGIA

3.1. Seleção de adesivos e tratamentos superficiais

Não existe uma metodologia única para a escolha de adesivos e tratamentos superficiais. De uma forma geral, os usuários procuram selecionar, dentre os materiais disponíveis comercialmente, aquele que melhor satisfaça os requisitos do produto para um determinado processo de fabricação.

A metodologia empregada neste trabalho assemelha-se à norma ASTM D6465 (2005), cujas etapas são:

1ª Etapa: Definição dos requisitos da aplicação visando condições de segurança, saúde e meio ambiente, bem como das propriedades físico-químicas desejáveis ao projeto.

2ª Etapa: Definição dos requisitos de desempenho. Nesta etapa as solicitações de tensões sobre a junta adesiva devem ser calculadas.

3ª Etapa: Definição dos materiais aderentes e requisitos de compatibilidade. Nesta fase é possível selecionar o conjunto de adesivos e aderentes que atendem os requisitos de tensão calculados na etapa anterior. Uma série de testes padrões apresentados pela normalização avalia a compatibilidade adesivo/aderente e o desempenho de diversos tipos de juntas em várias condições de carregamento. Dois testes padrões foram utilizados neste trabalho e serão discutidos na seção 3.2, relativa a ensaios mecânicos.

4ª Etapa: Definição do processo de preparação superficial. A quase obrigatoriedade do tratamento superficial dos aderentes torna essa etapa fundamental para qualidade das juntas adesivas. Os tratamentos superficiais utilizados neste trabalho (*peel-ply* e

abrasão) são os mais utilizados na indústria de pás eólicas e sua aplicação será discutida na seção 3.3, relativa aos corpos de prova.

5ª Etapa: Seleção final. Nesta etapa outras considerações como comerciais e negociais podem ser levadas em conta na escolha final de um adesivo. Se, depois de realizados todos os passos de seleção, não houver nenhum adesivo que preencha os requisitos de projeto, o primeiro passo deve ser refeito de forma que uma amostragem maior de adesivos possa ser testada.

Como mencionado no item 2.7.2, os três tipos de adesivos mais utilizados na fabricação de pás eólicas são os epóxis, metacrilatos e poliuretanos. Estes adesivos atendem os requisitos da primeira etapa, uma vez que são formulados destinando-se a aplicações industriais como as encontradas na fabricação de pás. Por esse motivo foram selecionados como objeto de estudo deste trabalho.

Os requisitos da segunda etapa variam com o modelo estrutural da pá, que define as tensões que os adesivos devem suportar. Como dito anteriormente, os adesivos selecionados são destinados a aplicações estruturais, apresentando, segundo seus fabricantes, tensões máximas compatíveis com as que são normalmente definidas na segunda etapa.

A terceira etapa dirá se os adesivos realmente suportam as tensões definidas na etapa anterior e se eles são compatíveis com os materiais aderentes utilizados na fabricação das pás.

A quarta etapa define qual a melhor preparação superficial dos aderentes, neste ponto ocorre uma iteração com a etapa anterior até que se encontre a combinação mais eficiente entre adesivo, aderente e o método de preparação superficial.

A última etapa não foi utilizada neste trabalho, nela ocorre um refinamento do processo de seleção caso nenhum ou muitos adesivos tenham passado pelas quatro etapas anteriores.

A Figura 28 esquematiza a metodologia empregada neste trabalho.

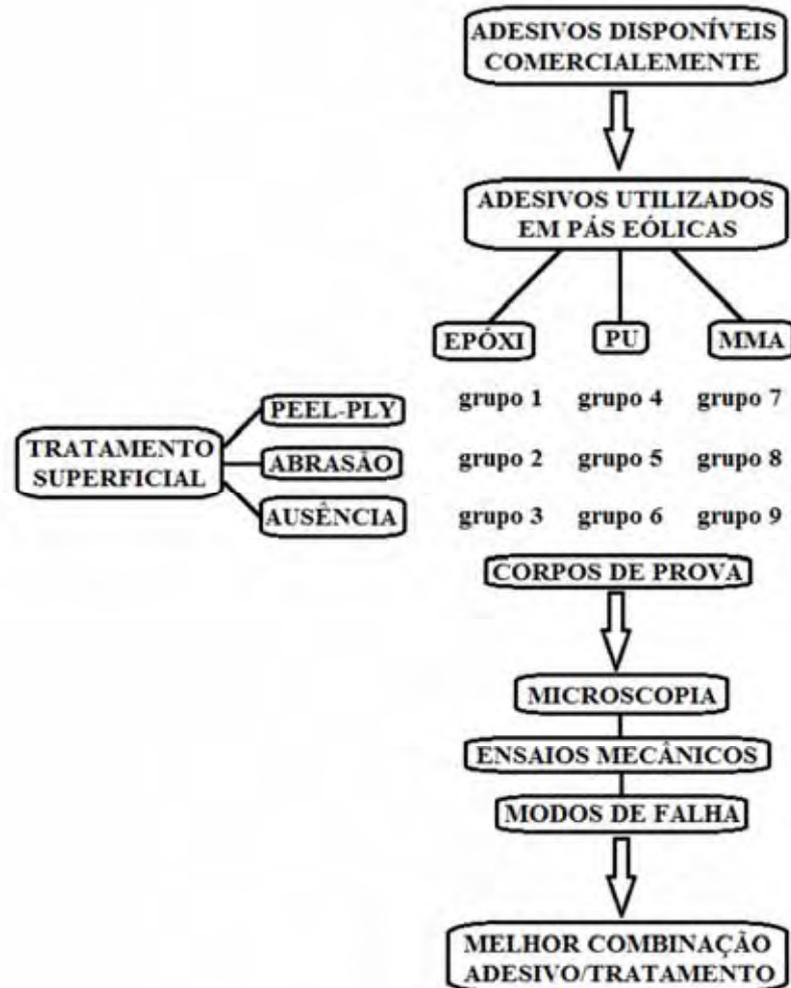


Figura 28: Metodologia de escolha de adesivos e tratamentos superficiais para pás eólicas.

3.2. Materiais

3.2.1. Corpos de prova

Os aderentes destinados tanto ao teste de cisalhamento quanto ao de clivagem foram fabricados pelo mesmo processo e utilizando os mesmos materiais, tal como descrito na

seção 3.2.2. Para formação dos corpos de prova, os aderentes foram usinados e colados seguindo a geometria necessária em cada ensaio mecânico.

Foram fabricado no total 144 corpos de prova, divididos igualmente em 9 grupos e cada um representando uma combinação diferente de adesivo (seção 3.2.4) e tratamento superficial (seção 3.2.3). Posteriormente, todos os grupos foram ensaiados mecanicamente. A Tabela 9 sumariza a combinação de cada um dos grupos, identificando-os de 1 a 9.

Tabela 9: Configuração dos corpos de prova. PU e MMA referem-se aos adesivos poliuretano e metil metacrilato respectivamente.

Grupo	Adesivo	Tratamento Superficial
1	EPÓXI	-
2	EPÓXI	abrasão
3	EPÓXI	peel-ply
4	PU	-
5	PU	abrasão
6	PU	peel-ply
7	MMA	-
8	MMA	abrasão
9	MMA	peel-ply

Observa-se na Tabela 9 que três grupos de aderentes não passaram por tratamento superficial e serviram como grupos de referência.

3.2.2. Fabricação dos aderentes

Os aderentes foram construídos em compósitos usando-se 6 camadas de tecido unidirecional de fibra de vidro (950g/m^2) fornecido pela Saertex e resina epóxi Epikote MGS

RIM 135 fornecida pela Hexion. O painel de compósito com 3 mm de espessura foi produzido via infusão assistida à vácuo (Figura 29) e submetido a uma cura de 4 horas a 70°C de forma a atingir uma cura similar à encontrada na fabricação das pás.

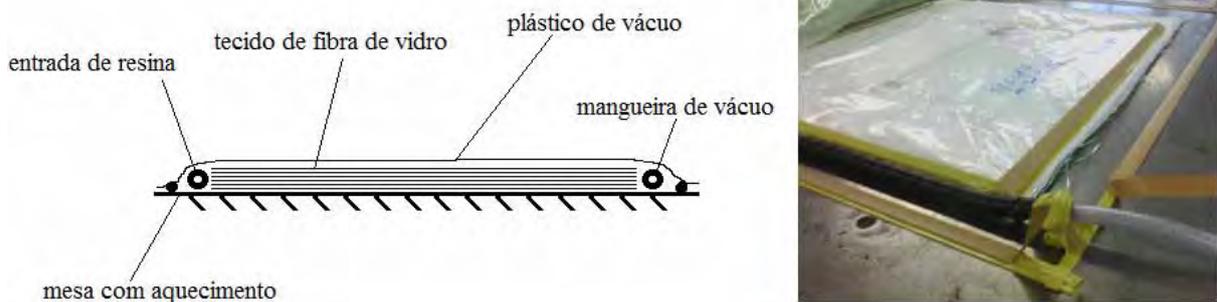


Figura 29: Esquema de fabricação via VARTM de um painel de fibra de vidro.

A fração em peso de fibra encontrada no laminado foi de 69%, obtida pela calcinação das amostras seguindo a norma ASTM D2584 (2011). Componentes, métodos de fabricação e composição final são típicos da indústria de pás eólicas.

Os aderentes para o teste de cisalhamento foram cortados do painel com as dimensões da Figura 30.

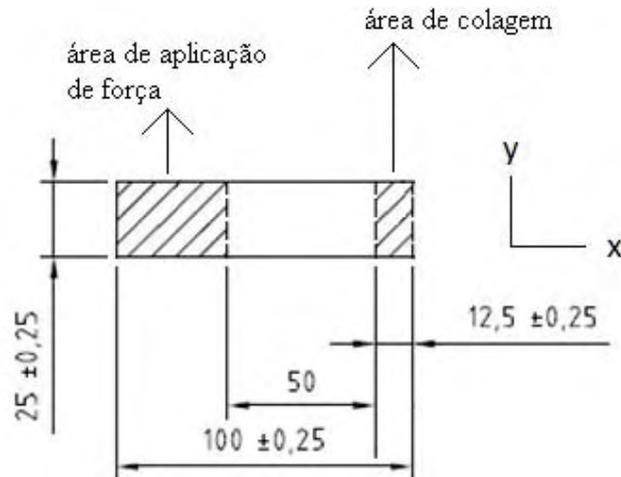


Figura 30: Geometria dos aderentes do ensaio de cisalhamento, dimensões em mm.

Tal como exposto na seção 3.3.1.1, o comprimento de sobreposição da junta adesiva foi diminuído em relação ao especificado pela norma ASTM D5868 (2001) para limitar a flexão dos corpos de prova e diminuir a influência da concentração de tensão nas extremidades da área de colagem. Ainda com o mesmo objetivo, as fibras de vidro do tecido unidirecional foram alinhadas com o carregamento, direção x da Figura 38, aumentando a rigidez dos aderentes.

Os aderentes para o teste de clivagem foram cortados do painel seguindo a geometria da Figura 31. Essa geometria difere da determinada pela norma ASTM D5041 (2004), sendo similar à utilizada nos ensaios de cisalhamento, possibilitando, assim, a fabricação rápida de um grande número de corpos de prova para ambos os ensaios.

Essa mudança de geometria não afeta o resultado final dos ensaios devido ao caráter comparativo dos mesmos.

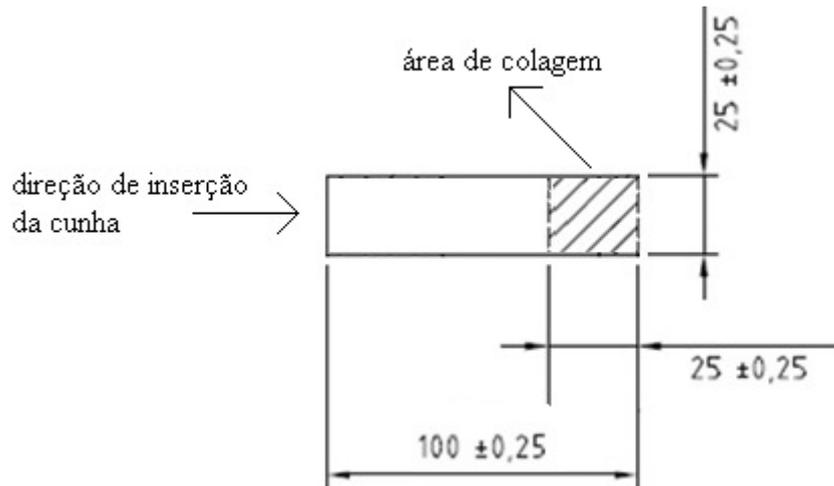


Figura 31: Geometria dos aderentes do ensaio de clivagem, dimensões em mm.

3.2.3. Tratamento superficial dos aderentes

Para os grupos com tratamento superficial, as superfícies de colagem foram preparadas de duas formas. Durante a laminação de um dos painéis de aderentes, uma camada de tecido de nylon Richmond VP 204 com gramatura de 81g/m^2 , foi depositada sobre a última camada de tecido de fibra de vidro (Figura 32). Após o processo de infusão e cura, essa camada, denominada de *peel-ply*, foi removida, deixando a superfície do painel com uma rugosidade impressa pela trama e urdume do tecido de nylon utilizado.



Figura 32: Aplicação da camada de nylon sobre o tecido de fibra de vidro.

Acredita-se que, ao ser removido, o *peel-ply* fratura a camada superficial da matriz do compósito e secciona as cadeias poliméricas, criando assim, grupos reativos na superfície do material (BROCKMANN *et al*, 2010). Esses grupos reativos são responsáveis pelo aumento das forças de adesão, tornando o *peel-ply* uma das melhores opções de preparação de componentes estruturais da pá que serão unidos por juntas adesivas.

A Figura 33 mostra uma sequencia de imagens do aderente após a remoção do *peel-ply*. As fotos foram obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) Inspect modelo S50 do laboratório de caracterização estrutural (LEC) da Universidade de São Carlos.

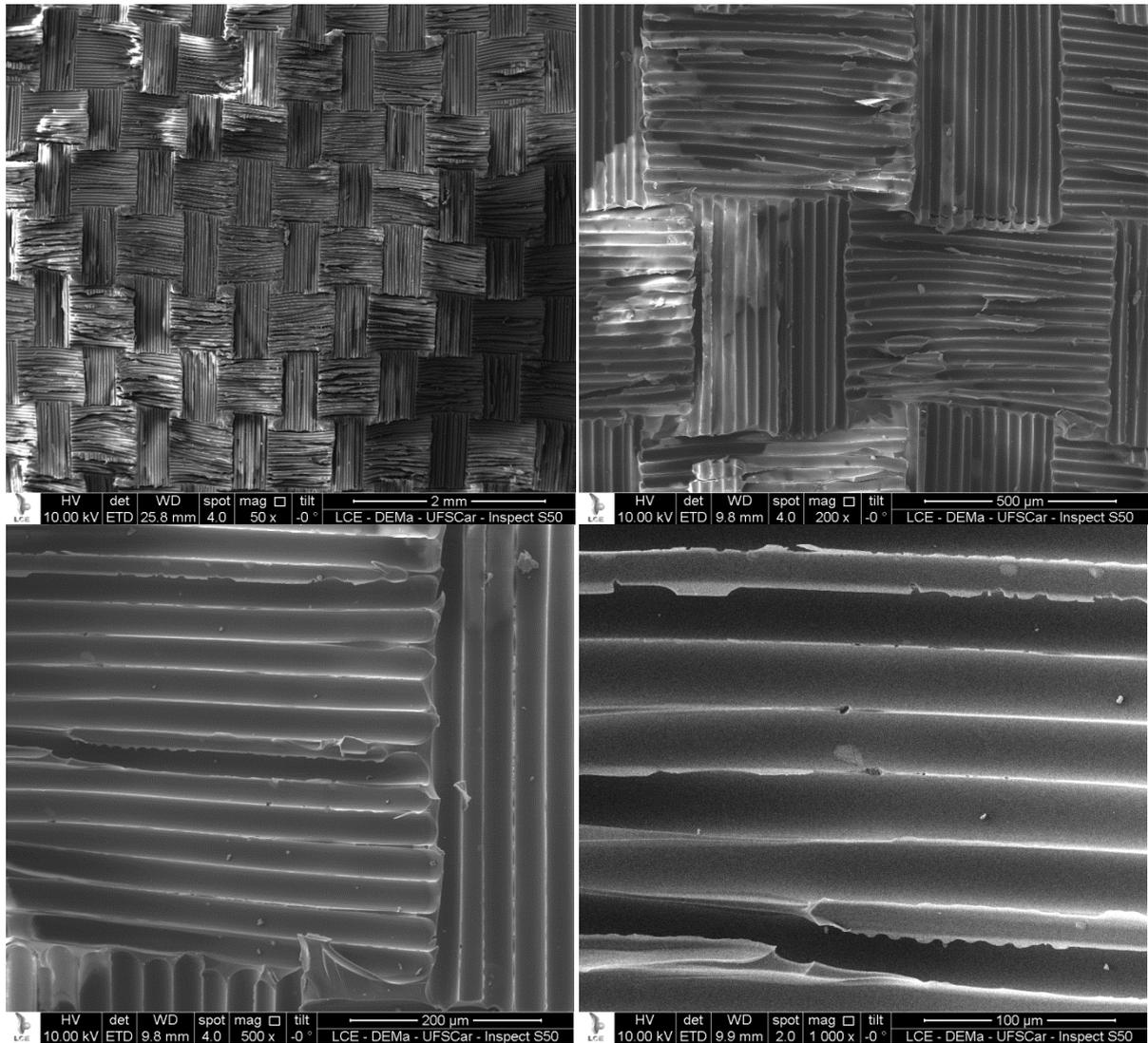


Figura 33: Micrografia dos aderentes tratados com *peel-ply*, mostrando a rugosidade impressa pelo *peel-ply* na superfície dos aderentes.

Na segunda forma de preparação, a superfície dos painéis de aderentes foi abrasada manualmente com lixas de óxido de alumínio de gramatura 80 por aproximadamente 5 minutos (Figura 34).



Figura 34: Abrasão da superfície do painel de compósito.

Esse processo é similar ao realizado nos reparos de pás que se encontram fora da linha de produção, por ser rápido e de fácil execução.

Uma das desvantagens da abrasão é a falta de controle da forma e quantidade de material que é extraído pelas lixas. Os grãos do abrasivo riscam a superfície do laminado, deixando uma rugosidade não uniforme, expondo e fraturando algumas das fibras do reforço (Figura 35).

O processo de abrasão também forma uma camada de pó sobre o aderente ao arrancar partículas da matriz polimérica. Esse pó precisa ser removido antes da colagem definitiva dos aderentes para não comprometer a resistência da junta adesiva.

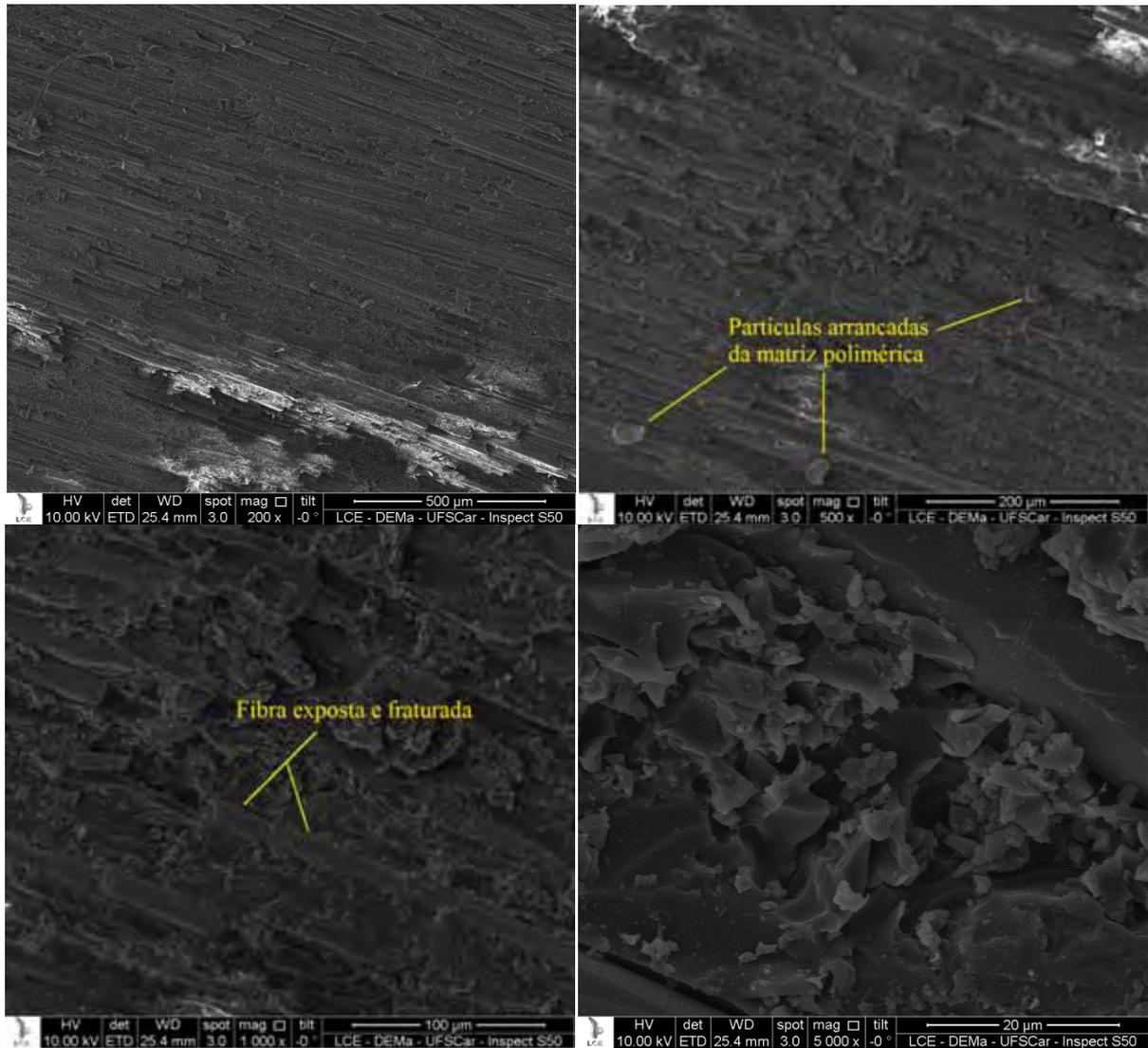


Figura 35: Micrografia da superfície dos aderentes lixados, mostrando fibras expostas e partículas arrancadas da matriz polimérica que formam uma camada de pó sobre o aderente.

Um dos painéis de aderentes não teve a superfície de colagem tratada e serviu como grupo de referência. Neste grupo de aderentes a rugosidade superficial é a mesma da placa de vidro utilizada como contramolde no processo de infusão (Figura 36).

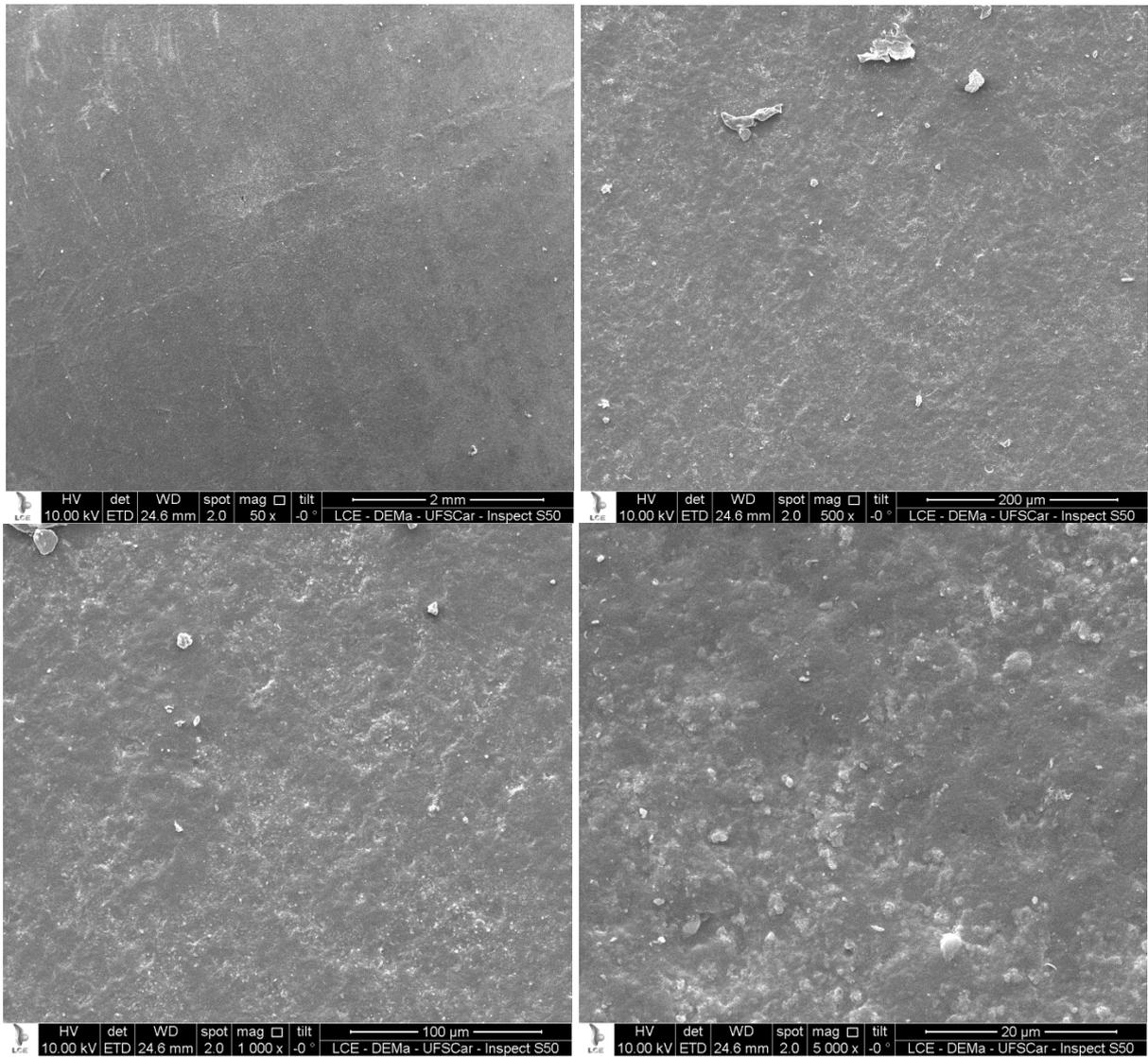


Figura 36: Micrografia da superfície dos aderentes sem tratamento superficial.

Todas as superfícies de colagem foram posteriormente lavadas manualmente com acetona por cerca de 3 min para retirada de possíveis contaminantes.

3.2.4. Colagem dos aderentes

Para montagem dos corpos de prova foram utilizados três tipos de adesivos estruturais disponíveis no mercado para fabricação de pás eólicas:

- Epóxi EPIKOTE™ MGS 135/G, fornecido pela Momentive – adesivo epóxi bi-componente, apresenta-se na forma de uma pasta viscosa. É reforçado com fibras de vidro picadas, pode curar a temperatura ambiente, mas somente atinge as propriedades mecânicas finais com aplicação de calor.

- Metil Metacrilato MA 300, fornecido pela Plexus™ – adesivo bi-componente compatível com diversos metais e plásticos. Formulado como um gel viscoso e de cura a temperatura ambiente.

- Poliuretano Macroplast UK 1351 B25, fornecido pela Henkel – adesivo bi-componente, apresentado na forma de pasta viscosa e com cura a temperatura ambiente.

Todos os adesivos foram fornecidos em cartuchos, cada um contendo um dos componentes já dosados na proporção correta. A mistura dos componentes foi realizada por um misturador estático do tipo hélice de Kenics (Figura 37) acoplado aos cartuchos.



Figura 37: Cartuchos, contendo os componentes do adesivo, acoplados a um misturador estático.

O conjunto cartucho/misturador foi então montado em uma pistola aplicadora SULZER MIXPAC (Figura 38).



Figura 38: Pistola aplicadora carregada com os cartuchos.

Cartuchos e misturadores são dispositivos essenciais no processo de aplicação de adesivos bi-componentes, pois suas propriedades mecânicas são altamente sensíveis à mistura e dosagem de seus componentes (BROCKMANN, 2009).

Os adesivos foram aplicados em uma área delimitada dos substratos (Figura 39), para atender a geometria de colagem das Figuras 30 e 31. Logo em seguida, foram unidos e mantidos na posição com o auxílio de pesos de cerca de 3 kg (Figura 40). Todos os adesivos utilizados neste trabalho apresentam alta viscosidade, o que evita o escorrimento após a aplicação. Essa característica é muito importante para o processo de colagem de pás eólicas, devido à grande quantidade de adesivo utilizado que precisa permanecer nos limites das áreas de colagem durante todo o processo de formação da junta adesiva.

Arruelas de 0,75mm de espessura foram utilizadas para controlar a espessura do adesivo, seguindo as recomendações das normas dos ensaios. A temperatura de colagem de todos os substratos manteve-se em $26\pm 2^{\circ}\text{C}$.

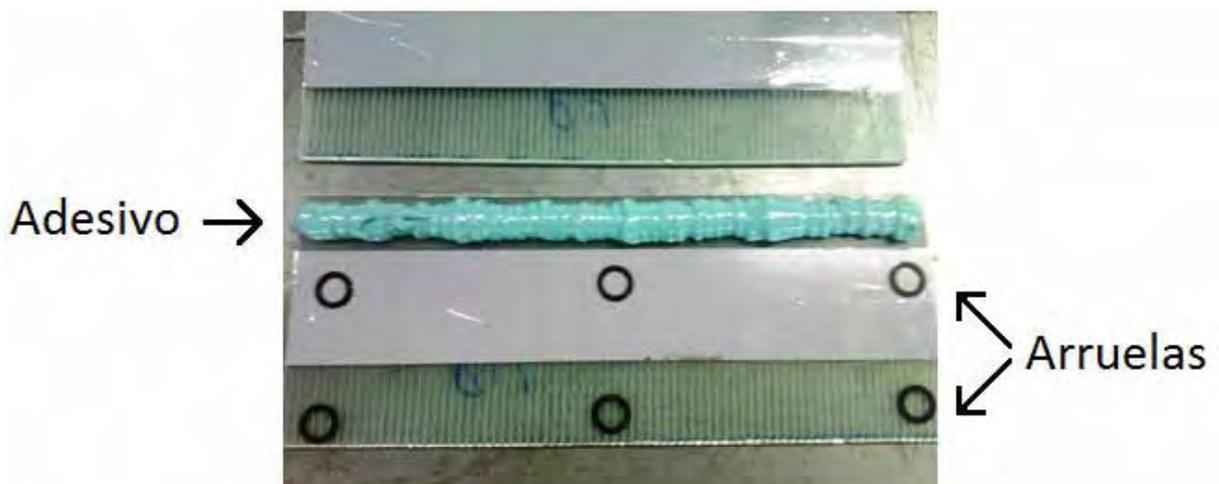


Figura 39: Adesivo PU aplicado sobre substrato do ensaio de clivagem. As arruelas de 0,75mm controlam a espessura de colagem.



Figura 40: Pesos mantendo a geometria de uma junta de cisalhamento colada com MMA.

Nos substratos do ensaio de clivagem foi aplicada uma fita desmoldante, conforme indicado na Figura 41. Sua função era manter a área de colagem constante, uma vez que a geometria da junta impede a limpeza do excesso de adesivo que se espalha entre os substratos durante sua colagem.



Figura 41: Fita desmoldante delimitando área de colagem nos substratos do ensaio de clivagem.

A eficácia da fita desmoldante pôde ser verificada após os ensaios de clivagem. A Figura 42 mostra uma junta aberta após ser testada e a área de colagem nas dimensões especificadas. A fita não induz o início da falha por estar fora da área útil de colagem.

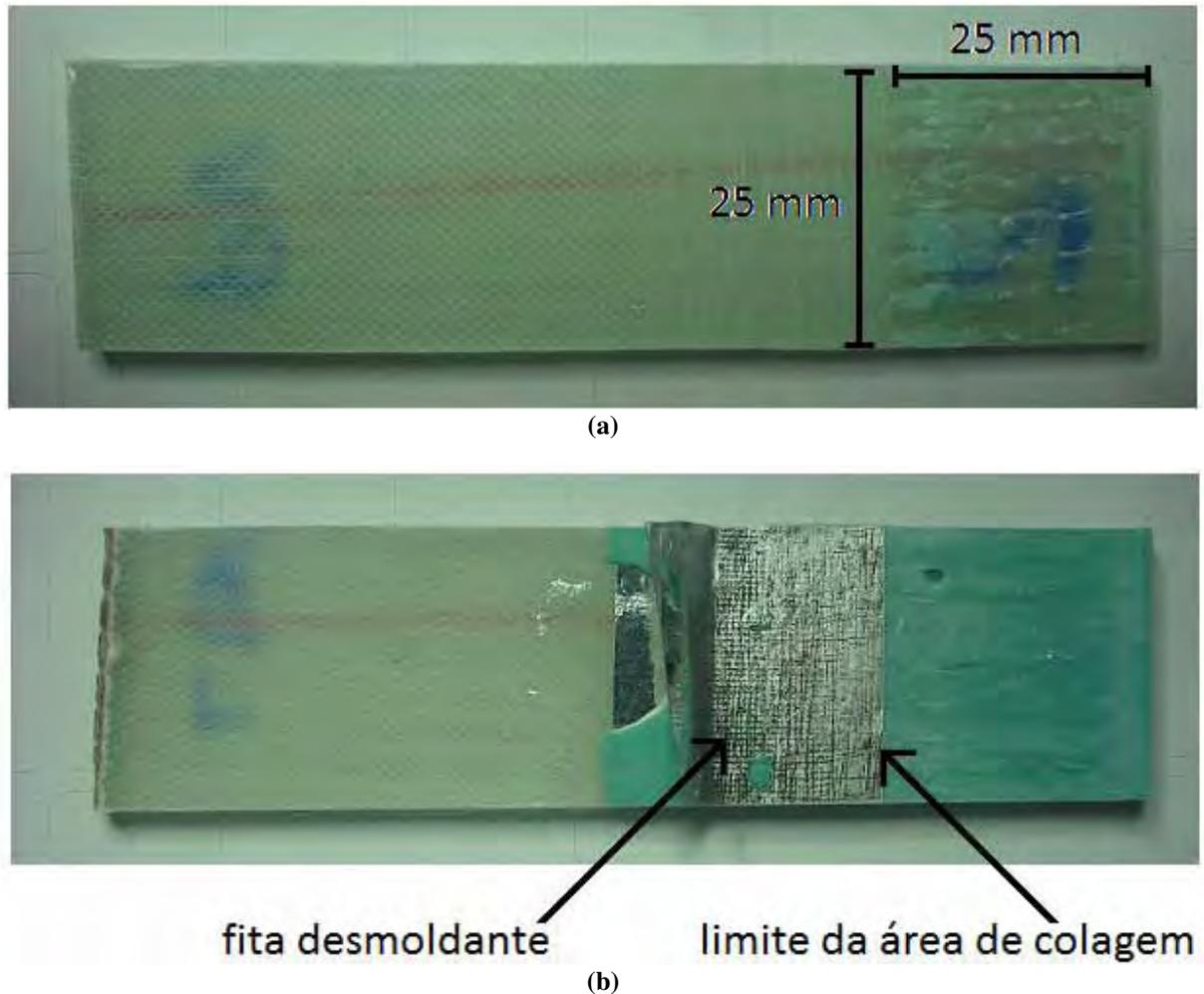


Figura 42: Junta de clivagem após o ensaio, mostrando a área de colagem (a) e a fita desmoldante remanescente em um dos substratos da junta (b).

Embora os adesivos MMA e PU, segundo seus fabricantes, não necessitem de cura em temperaturas superiores à ambiente, passadas 24 horas da colagem, todos os corpos de prova foram submetidos a um ciclo de aquecimento de 70°C por 4h.

Tem-se assim, a finalização da polimerização dos adesivos e das ligações entre suas cadeias poliméricas e a superfície dos aderentes, o que garante as propriedades mecânicas finais das juntas adesivas.

3.3. Método

3.3.1. Ensaios mecânicos

Um dos ensaios mecânicos utilizados neste trabalho foi o cisalhamento em juntas de sobreposição simples fabricadas em PRF, segundo a norma ASTM D5868 (2001).

A fratura em clivagem de juntas adesivas, seguindo a normalização ASTM D5041 (2004), também foi utilizada, uma vez que, o ensaio de cisalhamento sozinho, não é capaz de diferenciar alguns adesivos, conforme exposto pela normalização ASTM 5041.

Os ensaios mecânicos foram realizados numa máquina universal de ensaios, Emic modelo DL10000.

3.3.1.1. Cisalhamento

O cisalhamento de juntas de sobreposição simples é um método comumente utilizado por fabricantes de adesivos para avaliar a compatibilidade de seu produto com diversos tipos de aderentes, por ser de rápida e fácil realização.

A Figura 43 mostra a geometria básica de uma junta de sobreposição simples com a direção das forças aplicadas durante o ensaio.



Figura 43: Junta de sobreposição simples.

Este método simula o modo de carregamento mais frequente que ocorre em uma junta adesiva, embora Brockmann (2009) afirme que o cisalhamento puro não possa ser medido desta forma, devido às concentrações de tensão nas bordas da junta derivadas da rotação e flexão dos corpos de prova, como mostra a Figura 44.



Figura 44: Deformação da junta provocada pelo desalinhamento das forças de tração aplicadas no corpo de prova.

A rotação dos corpos de prova ocorre devido ao desalinhamento das forças aplicadas na junta adesiva, gerando um momento fletor na mesma.

Uma forma de se diminuir as concentrações de tensão no teste de cisalhamento de juntas de sobreposição simples é o uso de calços nas áreas de aplicação das forças de tração, conforme exemplificado na Figura 45. Os calços diminuem a distância entre as linhas de aplicação das forças, conseqüentemente diminuindo o momento fletor e a deformação sobre a junta.

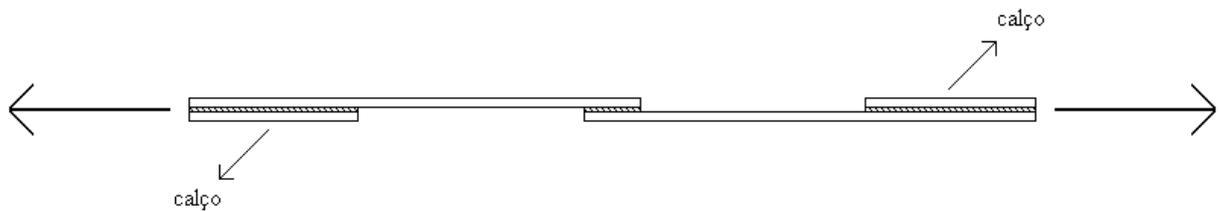


Figura 45: Desenho de cdp's de junta de sobreposição simples com calços para minimizar o momento causado pelo carregamento assimétrico.

Segundo os estudos de Goland e Reissner (1944), a concentração de tensão nas juntas de sobreposição simples também pode ser minimizada (i) aumentando a rigidez dos aderentes e (ii) diminuindo o comprimento da sobreposição enquanto aumenta-se a espessura do adesivo e aderentes. Por esse motivo os corpos de prova sofreram alterações em relação ao especificado pela norma ASTM D5868 (2001). Tais alterações são detalhadas na seção 3.3.1.

A Figura 46 mostra um corpo de prova sendo ensaiado. Ainda é possível notar uma leve rotação da junta no sentido anti-horário, mesmo após as modificações realizadas para minimizá-la.



Figura 46: Corpo de prova em ensaio de cisalhamento.

O teste de cisalhamento resultou em dados que foram apresentados na seção 4 na forma de gráficos de tensão por deslocamento. Esses dados permitem determinar a tensão de ruptura das juntas adesivas, tornando possível a comparação das diferentes configurações de juntas apresentadas na tabela 9 da seção 3.2.1.

3.3.1.2. Clivagem

O teste de clivagem é um ensaio típico utilizado para avaliar a qualidade de diferentes tratamentos superficiais (BROCKMANN, 2009). Esse método simula uma condição de carregamento indesejável na junta adesiva ao aplicar uma força na extremidade da área de colagem, como ilustrado na Figura 47.

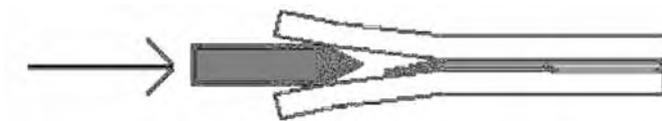


Figura 47: Clivagem de uma junta adesiva provocado pelo avanço de uma cunha.

A clivagem cria nas extremidades da junta adesiva uma concentração de tensões transversais ao plano de cisalhamento (Figura 48) o que, por sua vez, pode levar à falha prematura da junta.

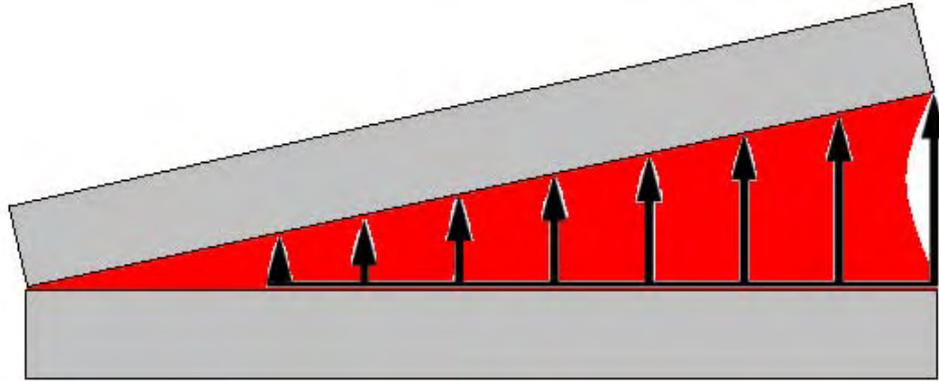


Figura 48: Concentração de tensão em uma junta adesiva sujeita à clivagem.

Embora a norma ASTM D5041 (2004) apresente uma geometria e material da cunha a ser utilizada, esta sofreu alterações que permitiram sua fabricação de forma mais rápida e menos custosa, porém, sem detrimento dos resultados. Isso se deve ao fato dos ensaios visarem à comparação entre aderentes colados com adesivos e tratamentos superficiais distintos. Uma vez que os ensaios têm caráter comparativo, a mesma cunha (Figura 49) foi empregada em todos os testes.

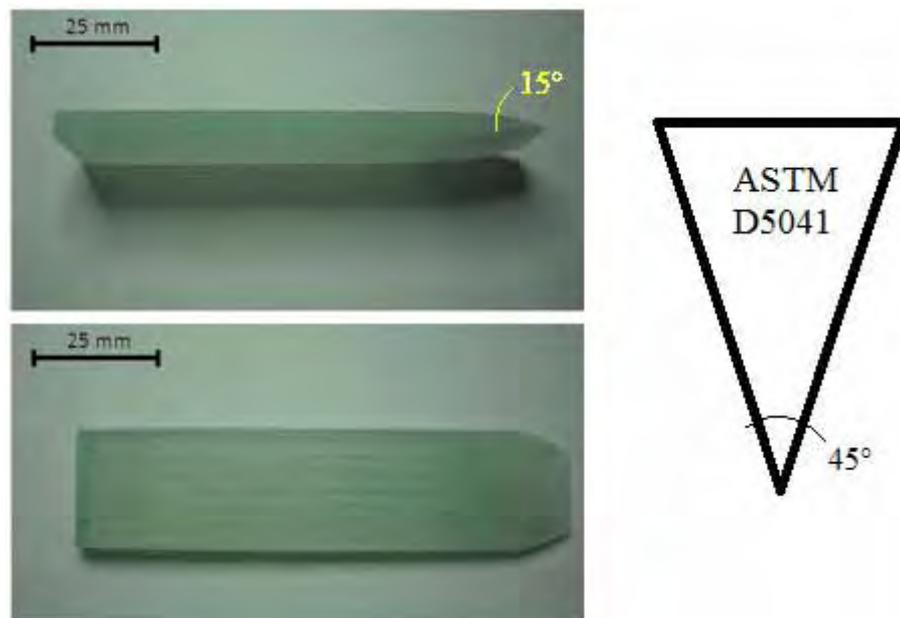


Figura 49: Cunha utilizada no teste de clivagem e geometria da cunha especificada pela norma ASTM D5041.

A Figura 50 mostra o andamento de um ensaio de clivagem, com a cunha na posição inicial e momentos antes da junta adesiva falhar.



Figura 50: Ensaio de clivagem.

Os dados do ensaio de clivagem são apresentados na seção 4 na forma de gráficos de tensão por deslocamento, porém, ao contrário do ensaio de cisalhamento, o resultado procurado não é a tensão de falha da junta, mas sim a energia necessária para que a falha ocorra. Essa energia é calculada integrando-se a curva de tensão até o deslocamento em que ocorre a falha da junta.

3.4. Modos de falha

O modo de falha das juntas adesivas foi classificado de acordo com a norma ASTM D5573(1999), que apresenta sete possíveis modos de falha para juntas adesivas

formadas por substratos construídos em material compósito. Embora os esquemas a seguir ilustrem falhas em juntas de sobreposição simples, esse método permite a caracterização de qualquer geometria de junta adesiva, uma vez que o objeto de estudo são as interfaces entre adesivo e aderente.

A análise dos modos de falha é visual e essencialmente qualitativa. O intuito é avaliar a compatibilidade entre adesivo e substrato, tornando possível a escolha do melhor adesivo e do tratamento superficial mais apropriado.

3.4.1. Falha adesiva

Essa falha ocorre na interface entre o adesivo e substrato. A face de um dos substratos permanece com a superfície sem danos aparentes, apresentando apenas um aspecto brilhante. A Figura 51 ilustra uma falha adesiva típica, onde não ocorreu transferência de adesivo nem fibras entre os aderentes.

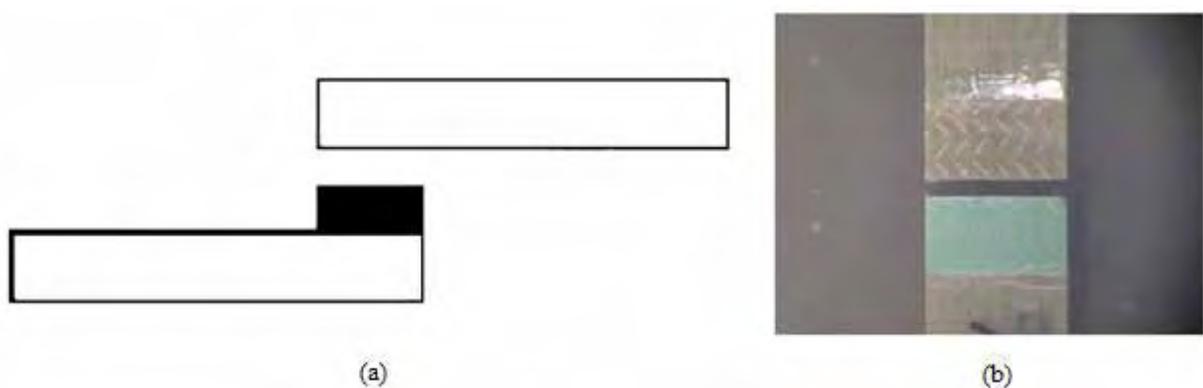


Figura 51: Modo de falha adesivo (a) esquematizado e (b) real ocorrido nos corpos de prova do grupo 7.

Falhas adesivas são as menos desejáveis no projeto de uma junta, pois indicam que o substrato ou o tratamento superficial utilizado não são compatíveis com o adesivo.

3.4.2. Falha coesiva

Surge quando a falha ocorre inteiramente dentro do adesivo (Figura 52). Esse modo indica uma boa compatibilidade entre o aderente e o adesivo, mas sugere que a escolha de um adesivo com melhores propriedades mecânicas aumente a resistência da junta.

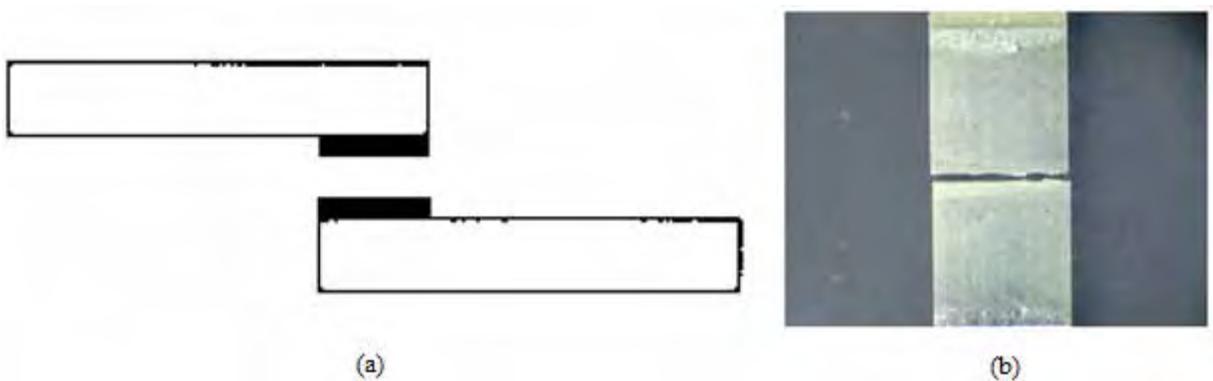


Figura 52: Modo de falha coesivo (a) esquematizado e (b) real ocorrido nos corpos de prova do grupo 4.

3.4.3. Falha coesiva próxima à interface

Similar à falha coesiva, porém, neste caso, a falha ocorre muito próxima à superfície de um dos substratos, como mostra a Figura 53.

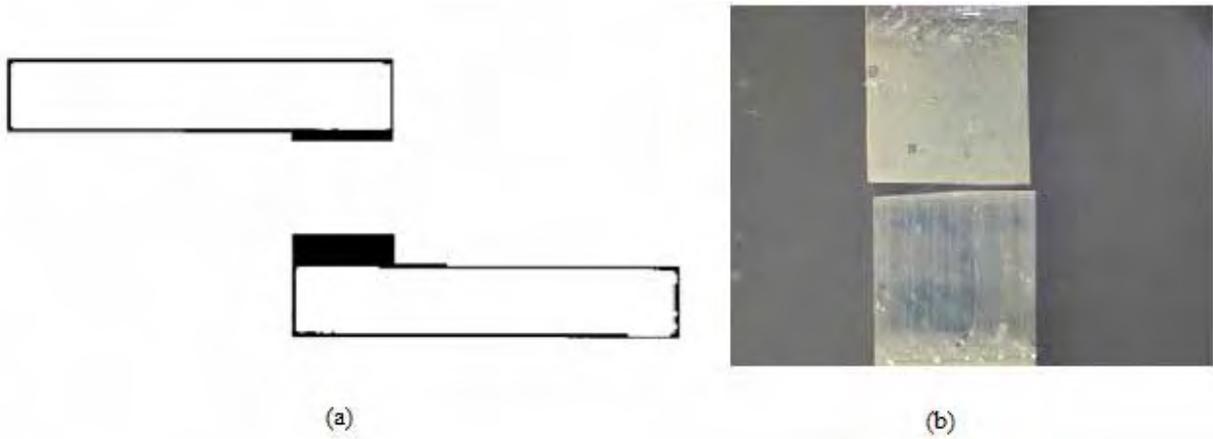


Figura 53: Modo de falha coesivo próximo à interface (a) esquematizado e (b) real ocorrido nos corpos de prova do grupo 2.

3.4.4. Rompimento de fibra

Neste modo de falha as fibras de reforço de um dos substratos rompem-se e ficam aderidas ao adesivo, de forma que é possível visualizar as fibras em ambos os substratos (Figura 54).

Falhas deste tipo normalmente indicam uma boa compatibilidade entre o adesivo e o aderente, uma vez que a força de adesão entre estes dois materiais é superior às forças de adesão entre a matriz do substrato e as fibras de reforço.

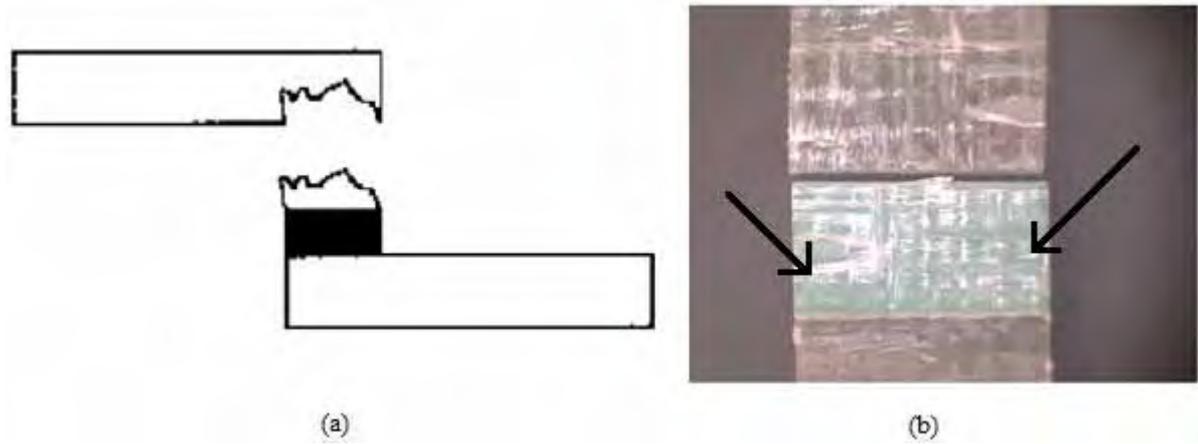


Figura 54: Modo de falha do tipo rompimento de fibra (a) esquematizado e (b) real ocorrido nos corpos de prova do grupo 9. As setas em (b) mostram algumas das fibras arrancadas do substrato superior e que permanecerem aderidas ao adesivo do substrato inferior.

3.4.5. Rompimento leve de fibra

Esse modo de falha é similar ao rompimento de fibra, porém a falha ocorre próxima à superfície do substrato com o rompimento de poucas ou nenhuma fibra de reforço como ilustrado na Figura 55.

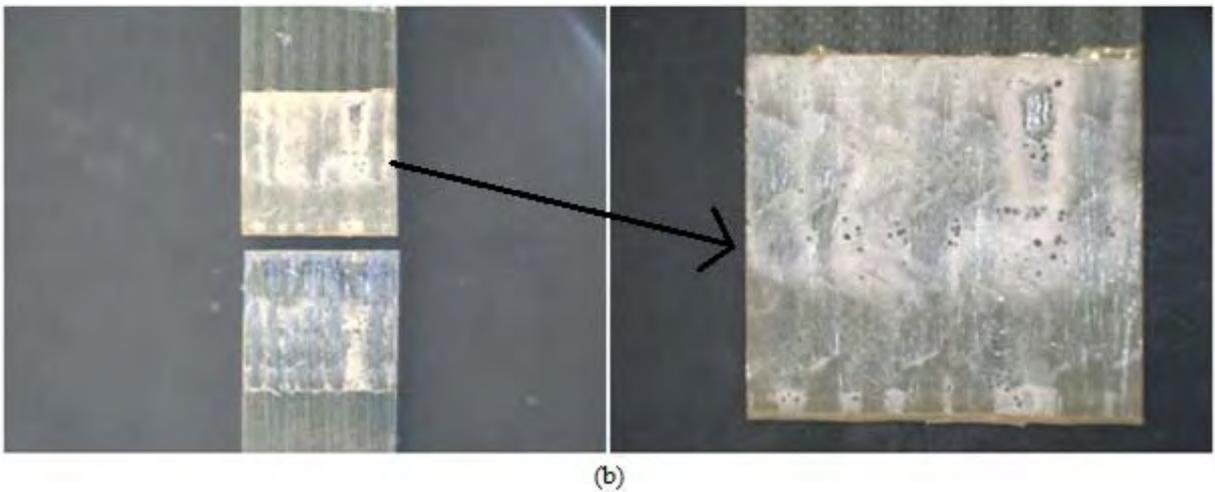
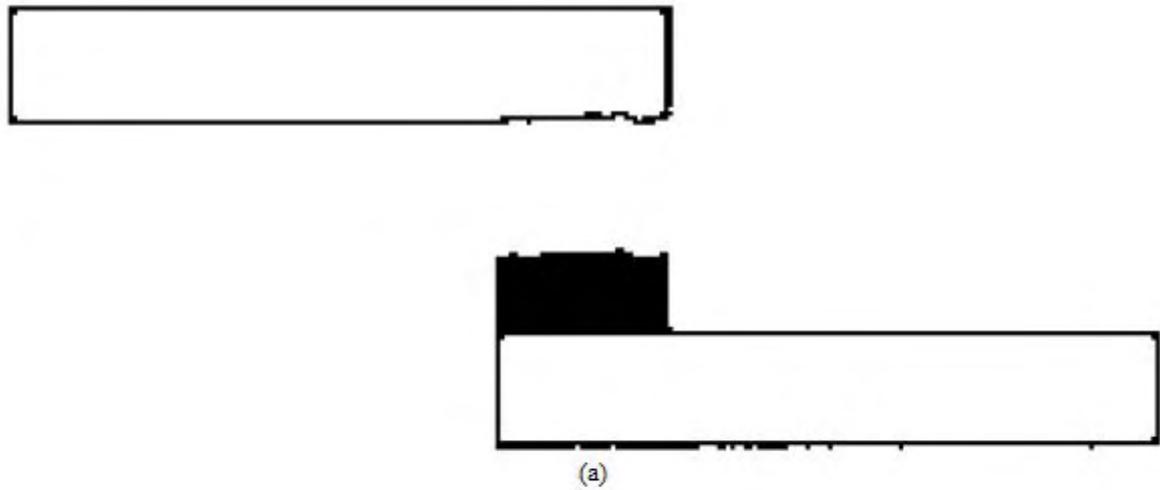


Figura 55: Rompimento leve de fibra (a) esquematizado e (b) real ocorrido nos corpos de prova do grupo 18. Nota-se em (b) que o adesivo permaneceu no substrato superior juntamente com poucas fibras arrancadas do substrato inferior.

3.4.6. Quebra do substrato

Falha caracterizada pelo rompimento do substrato fora da região de colagem (Figura 56). Esse modo de falha não foi encontrado nos ensaios de cisalhamento ou clivagem utilizados neste trabalho.

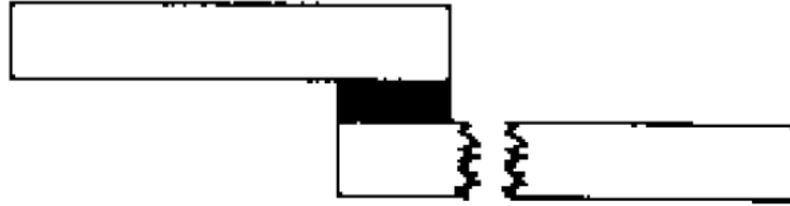


Figura 56: Modo de falha do tipo quebra do substrato.

3.4.7. Falhas mistas

Ocorrem como uma combinação das demais falhas e são as mais frequentemente encontradas. A Figura 56 mostra um modo misto com 30% de falha coesiva e 70% de rompimento de fibras.

Essa proporção é calculada através da razão da área de cada modo de falha pela área total de colagem. Para isso utilizou-se uma grade sobreposta às imagens das juntas testadas, conforme ilustrado na Figura 57.



Figura 57: Modo de falha misto ocorrido nos corpos de prova do grupo 11. A grade é utilizada para calcular a proporção dos modos de falha.

4. RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de cisalhamento são apresentados na forma de curvas de tensão por deslocamento da garra acoplada a um dos aderentes. Os valores médios de tensão máxima também são apresentados conforme sugerido pela normalização ASTM D5868 (2001).

Os ensaios de clivagem são apresentados em curvas de tensão por deslocamento da cunha, de forma a possibilitar o cálculo da energia de iniciação da trinca da junta adesiva, conforme a normalização ASTM D5041 (2004).

As curvas de cisalhamento de cada corpo de prova não possuem a mesma origem, de forma a facilitar sua análise. Pelo mesmo motivo as curvas de clivagem possuem deslocamentos iniciais de 30 mm ou 50 mm.

As fotos dos corpos de prova ensaiados são apresentadas para a identificação do modo de falha de cada grupo. Os modos de falha, apresentados no item 3.4, foram classificadas de acordo com a norma ASTM D5573 (1999).

Os resultados dos grupos foram ordenados seguindo a Tabela 9 da seção 3.3.

4.1. GRUPO 1 (Adesivo Epóxi, sem tratamento superficial)

A Figura 58 mostra as curvas tensão/deslocamento para os aderentes sem tratamento superficial, unidos pelo adesivo epóxi e ensaiados em cisalhamento.

A tensão de ruptura média de cisalhamento do grupo 1 é de 17,46 MPa ($\sigma = 3,11$), um valor considerado alto para aderentes sem tratamento, pois, para o mesmo tipo de ensaio, o fabricante do adesivo obteve resultados variando de 15 a 20 MPa.

O fato dos corpos de prova serem fabricados em resina epóxi explica a boa compatibilidade com o adesivo epóxi (BANEIA *et al*, 2008).

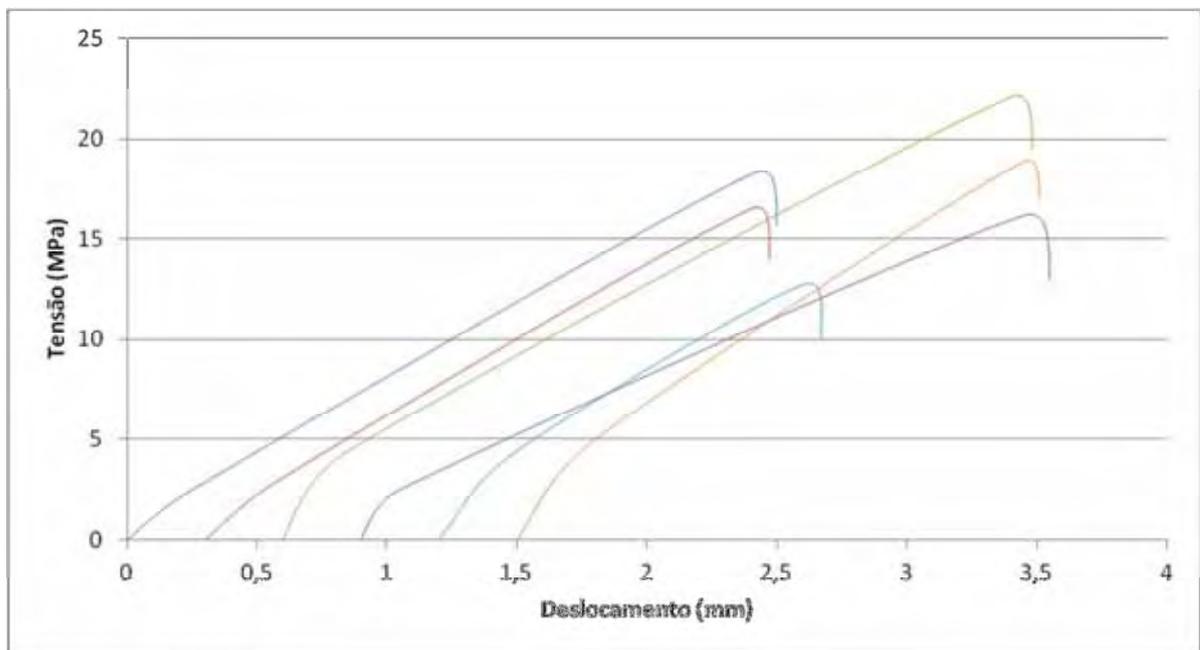


Figura 58: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 1 ensaiado em cisalhamento.

É possível notar uma mudança de inclinação em todas as curvas da Figura 58, logo após o início do teste. Esse comportamento se repete em todos os ensaios de cisalhamento e deve-se ao alinhamento das garras da máquina de ensaio.

A Figura 59 ilustra o modo de falha do tipo 100% de rompimento de fibra das juntas adesivas do grupo 1 ensaiado em cisalhamento.



Figura 59: Modo de falha com 100% de rompimento de fibra, encontrado nos corpos de prova do grupo 1 ensaiado em cisalhamento.

A Figura 60 mostra as curvas tensão/deslocamento para os aderentes sem tratamento superficial, unidos pelo adesivo epóxi e ensaiados em clivagem.

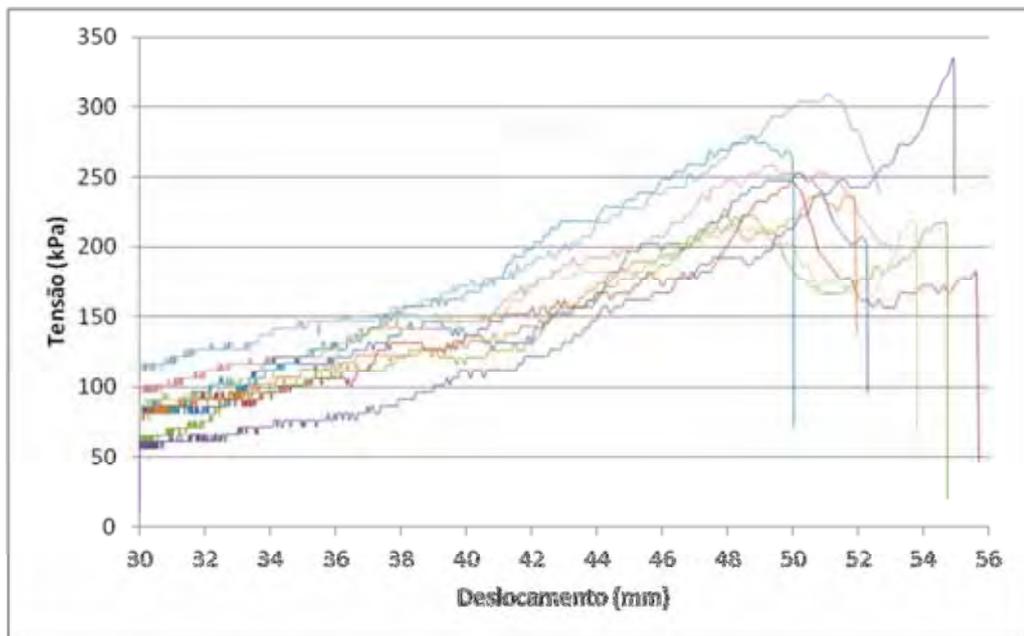


Figura 60: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 1 ensaiado em clivagem.

A energia média de iniciação de trinca do grupo 1 é de 4852 J/m^2 ($\sigma = 316$). Como explicado no item 3.2.2, o cálculo da energia é feito determinando a área sob a curva até o deslocamento onde ocorre a falha da junta.

As curvas da Figura 60 apresentam patamares de tensão constante e pequenas quedas de tensão (da ordem de 5 kPa) com o aumento de deslocamento. Essa característica, comum a todos os ensaios de clivagem realizados neste trabalho, é devido à diferença entre os coeficientes de atrito estático e dinâmico do aderente, que ocasiona um tempo de resposta diferenciado e captado pelo equipamento de ensaio.

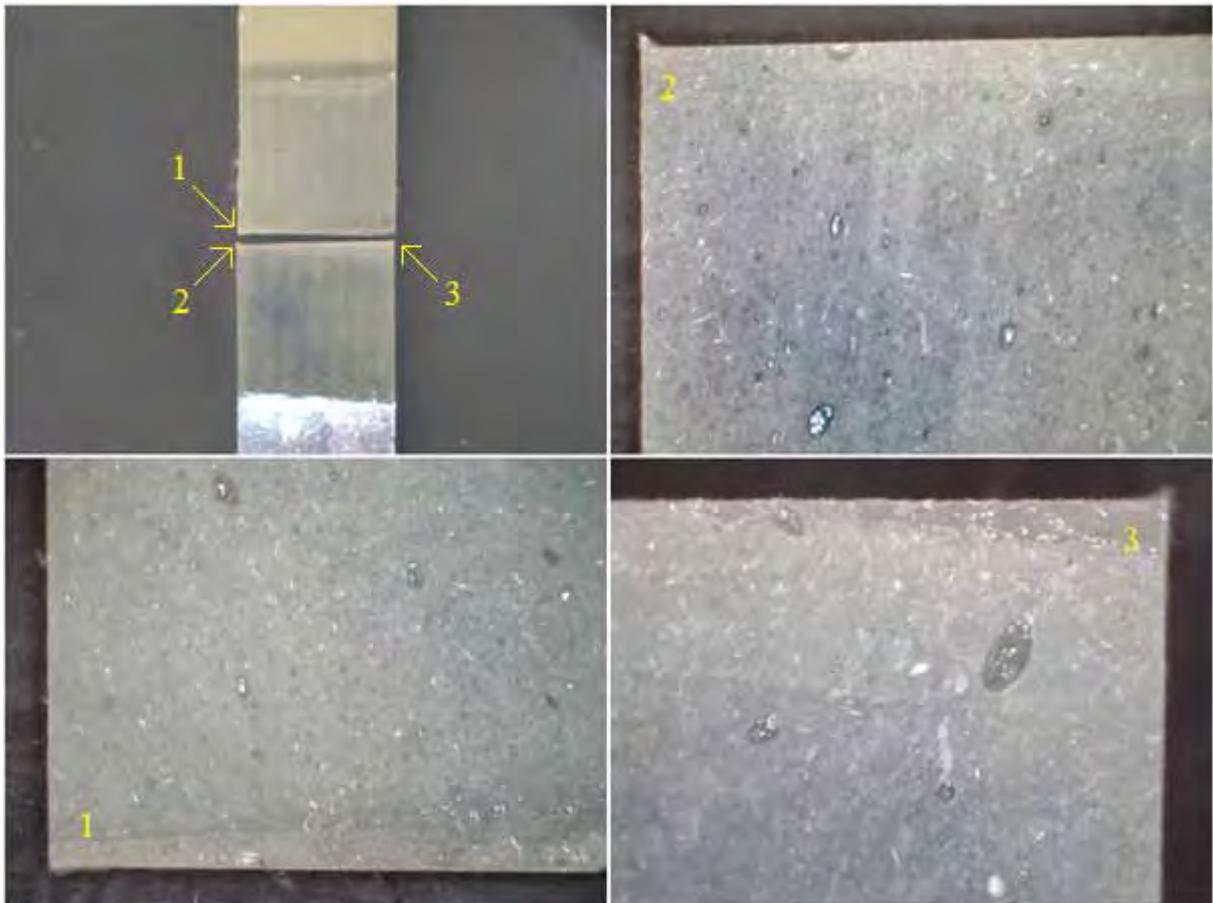


Figura 61: Modo de falha do tipo coesiva próxima à interface, encontrado nos corpos de prova do grupo 1 ensaiado em clivagem.

A falha do grupo 1 ensaiado em clivagem (Figura 61) foi do tipo coesiva próxima à interface com o aderente, mostrando que, embora o adesivo tenha apresentado compatibilidade com o aderente (ausência de falhas adesivas), não resistiu às concentrações de tensões transversais ao plano de cisalhamento que surgem durante a clivagem.

É importante notar a presença de bolhas de ar na linha de colagem, que, dependendo do tamanho e concentração, pode diminuir o valor de tensão de ruptura e alterar o modo de falha da junta. No entanto a análise dos corpos de prova do grupo 1 não mostrou relação entre as bolhas e os valores de tensão de ruptura. O modo de falha também não sofreu influência, sendo coesivo próximo à interface para todos os corpos de prova ensaiados em clivagem deste grupo.

4.2. GRUPO 2 (Adesivo Epóxi, abrasão)

A Figura 62 mostra as curvas tensão/deslocamento para os aderentes com tratamento superficial por abrasão, unidos pelo adesivo epóxi e ensaiados em cisalhamento.

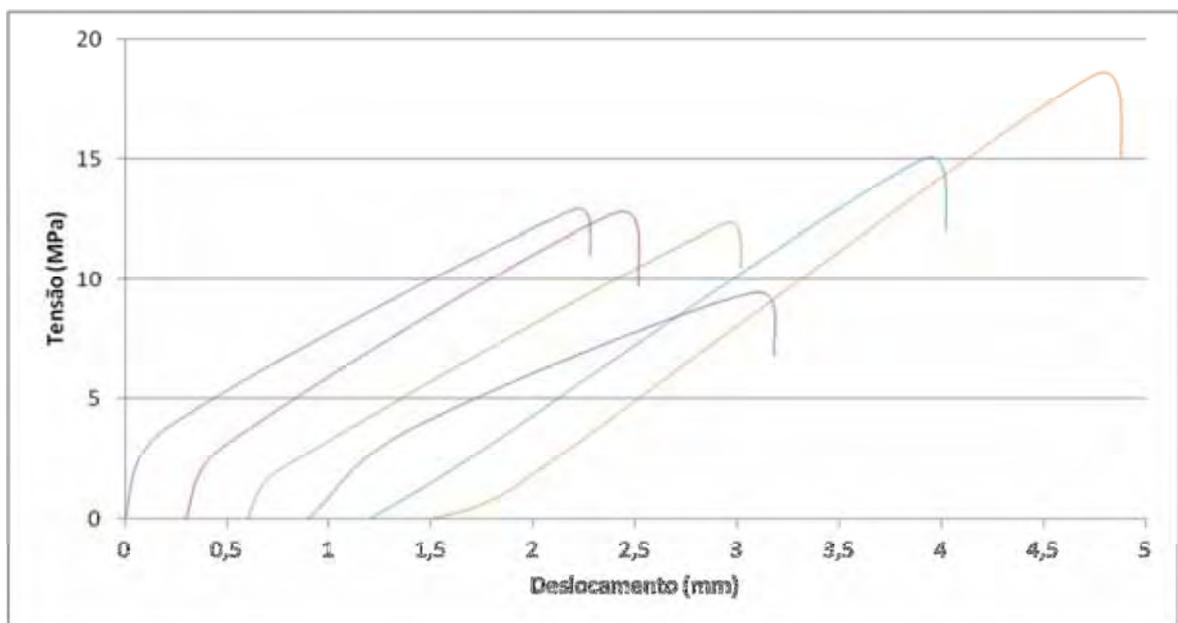


Figura 62: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 2 ensaiado em cisalhamento.

A tensão média de ruptura em cisalhamento do grupo 2 é de 13,41 MPa ($\sigma = 2,99$).

A Figura 63 ilustra o modo de falha das juntas do grupo 2 ensaiado em cisalhamento. Tal como ocorrido no cisalhamento do grupo 1, a falha foi predominantemente do tipo rompimento de fibra.



Figura 63: Modo de falha do tipo rompimento de fibra, encontrado nos corpos de prova do grupo 2 ensaiado em cisalhamento.

A Figura 64 mostra as curvas tensão/deslocamento para os aderentes com tratamento superficial por abrasão, unidos pelo adesivo epóxi e ensaiados em clivagem.

Essas curvas são similares às obtidas no ensaio do grupo 1, apresentando novamente patamares de tensão constante e leves quedas da ordem de 5 kPa.

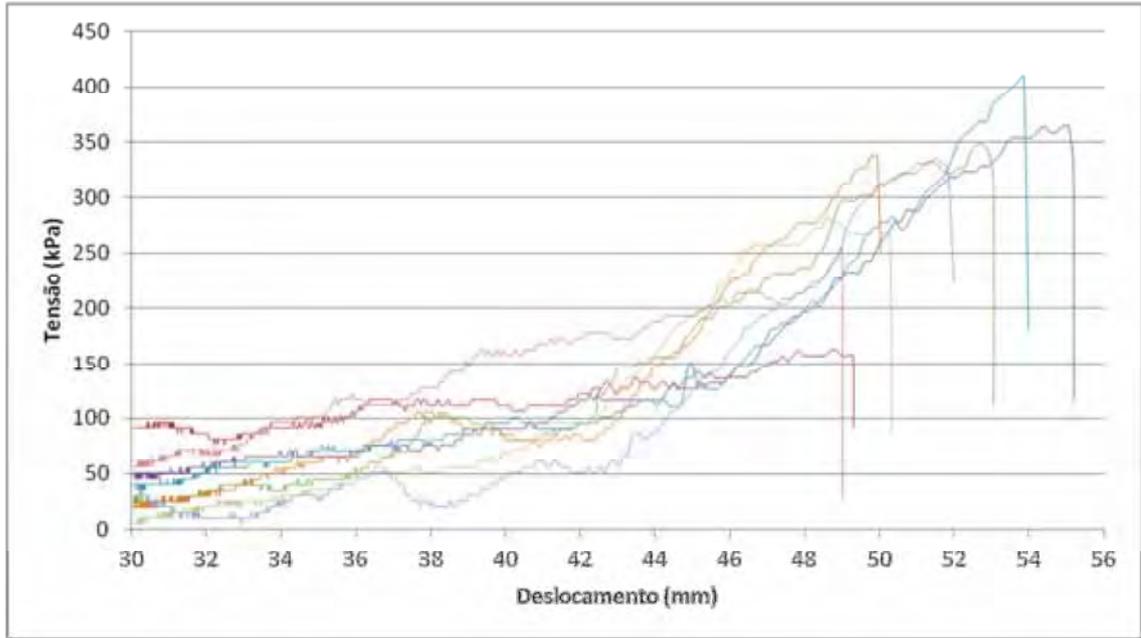


Figura 64: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 2 ensaiado em clivagem.

A energia média de iniciação de trinca do grupo 2 é de 3249 J/m^2 ($\sigma = 554$).

A Figura 65 ilustra o modo de falha 100% coesivo das juntas do grupo 2 ensaiadas em clivagem.



Figura 65: Modo de falha do tipo coesiva, encontrado nos corpos de prova do grupo 2 ensaiado em clivagem.

A sequência de micrografias de MEV da Figura 66 mostra com maior ampliação a superfície de um corpo de prova do grupo 2 após o ensaio de clivagem. A falha foi do tipo coesivo, sendo possível notar detalhes da formulação do adesivo, como a adição de fibras de vidro picadas, que segundo o fabricante, aumentam a resistência coesiva do adesivo. As bolhas de ar também estão presentes neste grupo e tal como no grupo 1, não foi possível relacioná-las a um decréscimo na energia de iniciação de trinca.

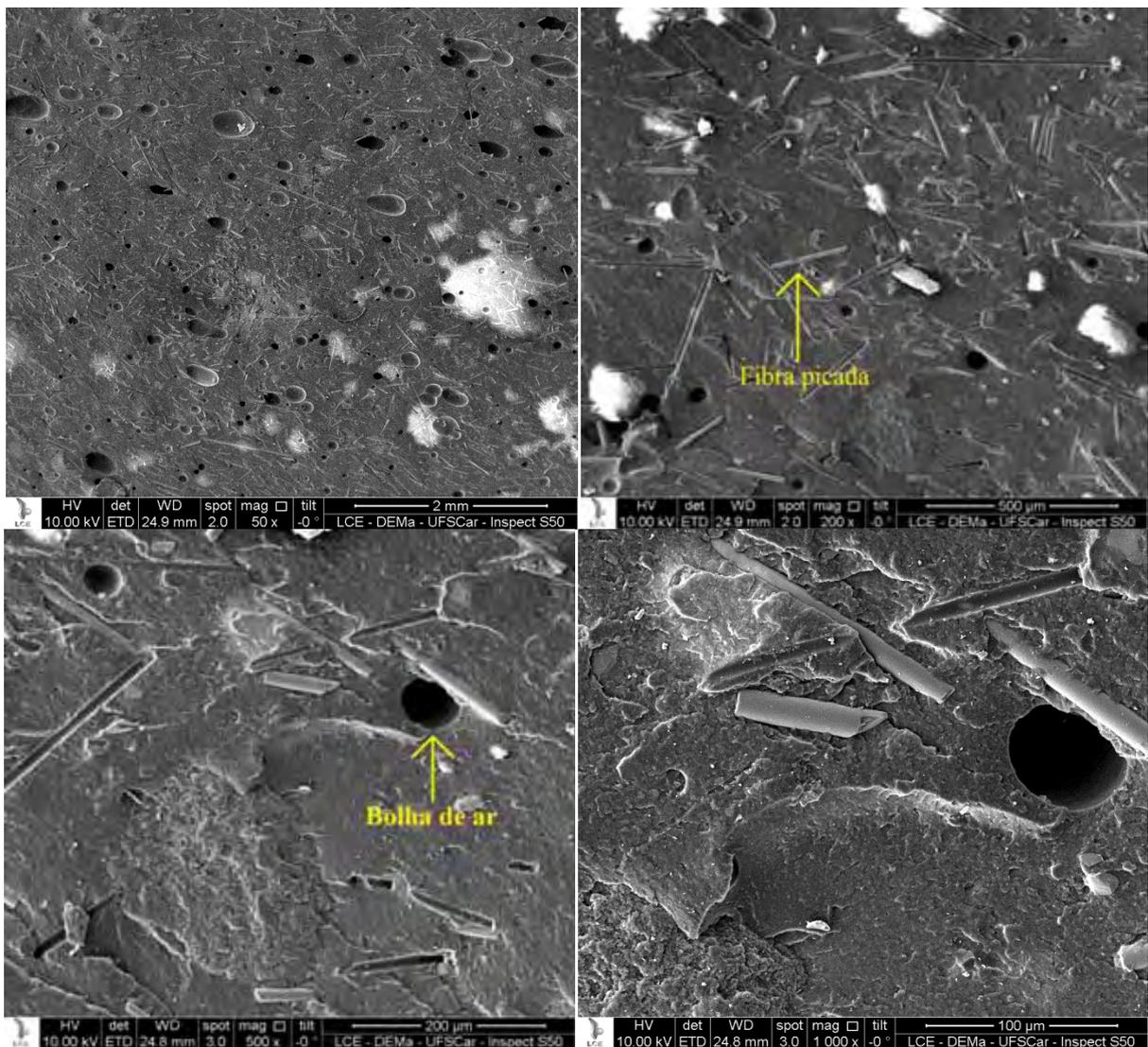


Figura 66: Micrografia MEV da superfície de um corpo de prova do grupo 2 ensaiado em clivagem após falha coesiva do adesivo.

4.3. GRUPO 3 (Adesivo Epóxi, peel-ply)

A Figura 67 mostra as curvas tensão/deslocamento para os aderentes com tratamento superficial por *peel-ply*, unidos pelo adesivo epóxi e ensaiados em cisalhamento.

A tensão média de ruptura em cisalhamento do grupo 3 é de 22,33 MPa ($\sigma = 0,76$).

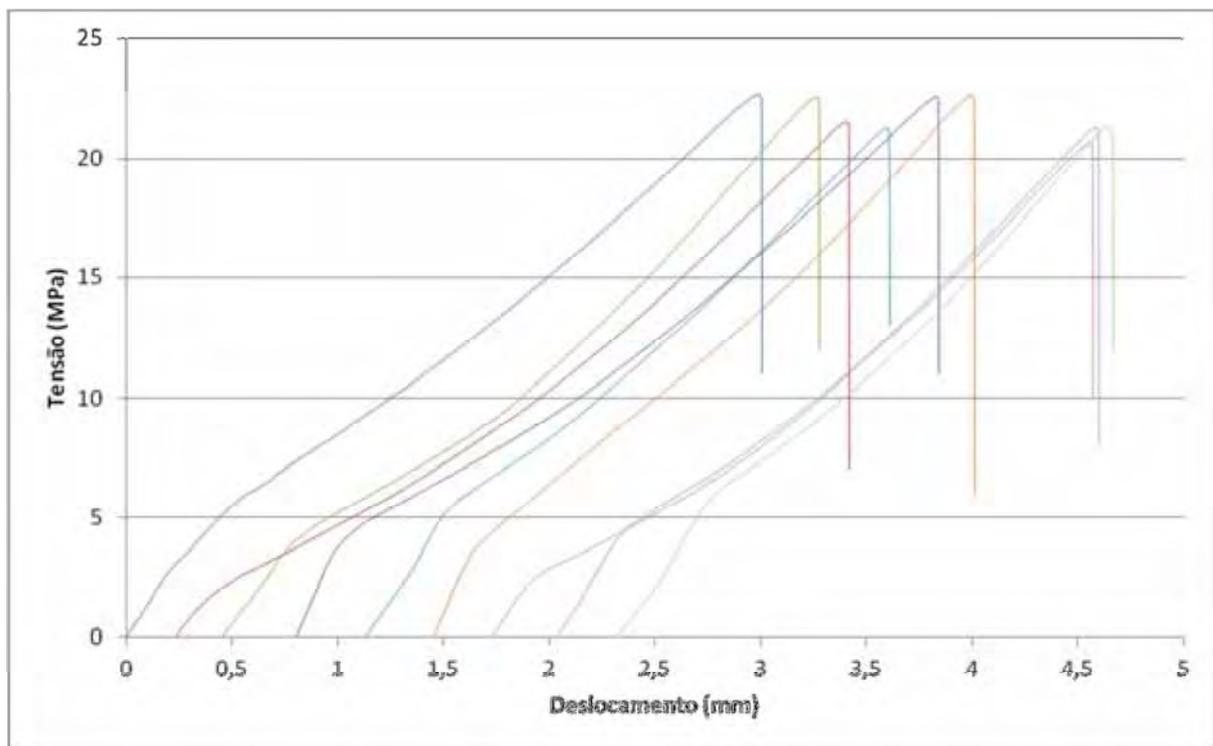


Figura 67: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 3 ensaiado em cisalhamento.

A Figura 68 ilustra o modo de falha em cisalhamento das juntas adesivas deste grupo, predominantemente do tipo rompimento de fibra.



Figura 68: Modo de falha do tipo rompimento de fibra, encontrado nos corpos de prova do grupo 3 ensaiado em cisalhamento.

A Figura 69 mostra as curvas tensão/deslocamento para os aderentes com tratamento superficial por *peel-ply*, unidos pelo adesivo epóxi e ensaiados em clivagem.

A energia média de iniciação de trinca do grupo 3 é de 3487 J/m^2 ($\sigma = 917$).

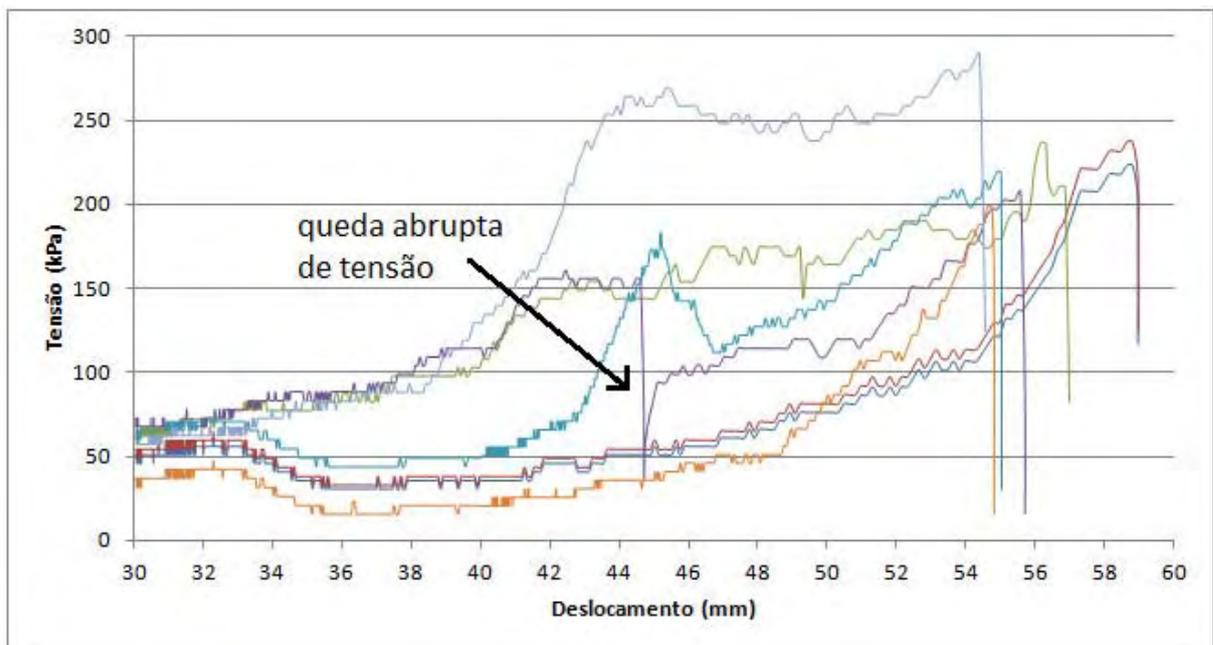


Figura 69: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 3 ensaiado em clivagem.

Nota-se que uma das curvas da Figura 69 apresentou uma queda abrupta de tensão com 44,5 mm de deslocamento. Isso ocorreu devido ao rompimento por compressão do excesso de adesivo, que se encontrava entre os aderentes e que não se descolou completamente do filme desmoldante, com a passagem da cunha (Figura 70).

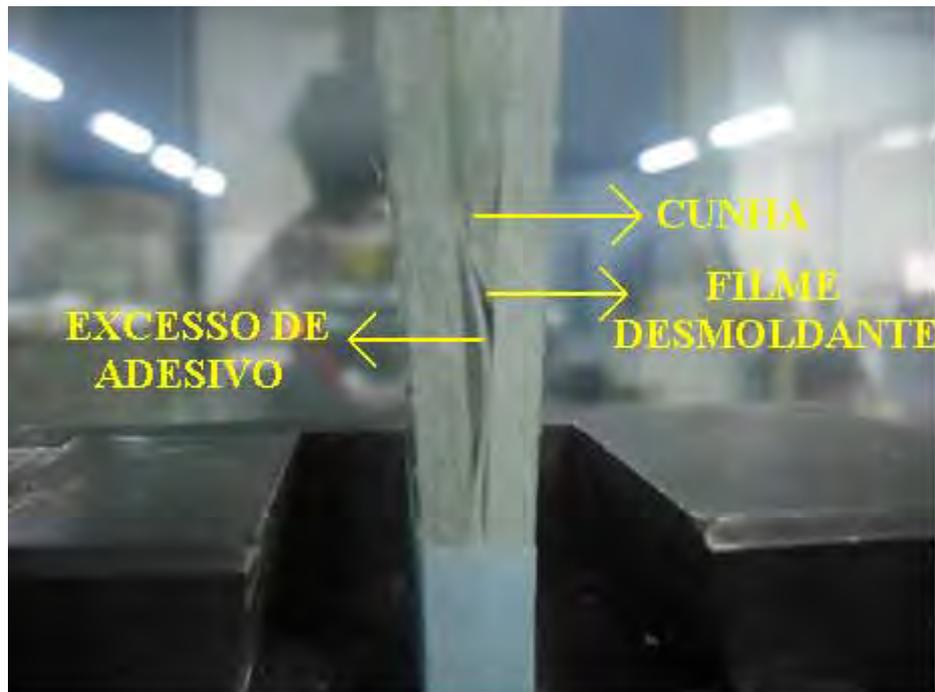


Figura 70: Excesso de adesivo que não se descolou completamente do filme desmoldante com a passagem da cunha.

A Figura 71 ilustra o modo de falha em clivagem do tipo coesivo encontrada neste grupo.



Figura 71: Modo de falha do tipo coesivo, encontrado nos corpos de prova do grupo 3 ensaiado em clivagem.

4.4. GRUPO 4 (PU, sem tratamento superficial)

A Figura 72 mostra as curvas tensão/deslocamento para os aderentes sem tratamento superficial, unidos pelo adesivo poliuretano e ensaiados em cisalhamento. A tensão média de ruptura em cisalhamento do grupo 4 é de 10,79 MPa ($\sigma = 0,76$).

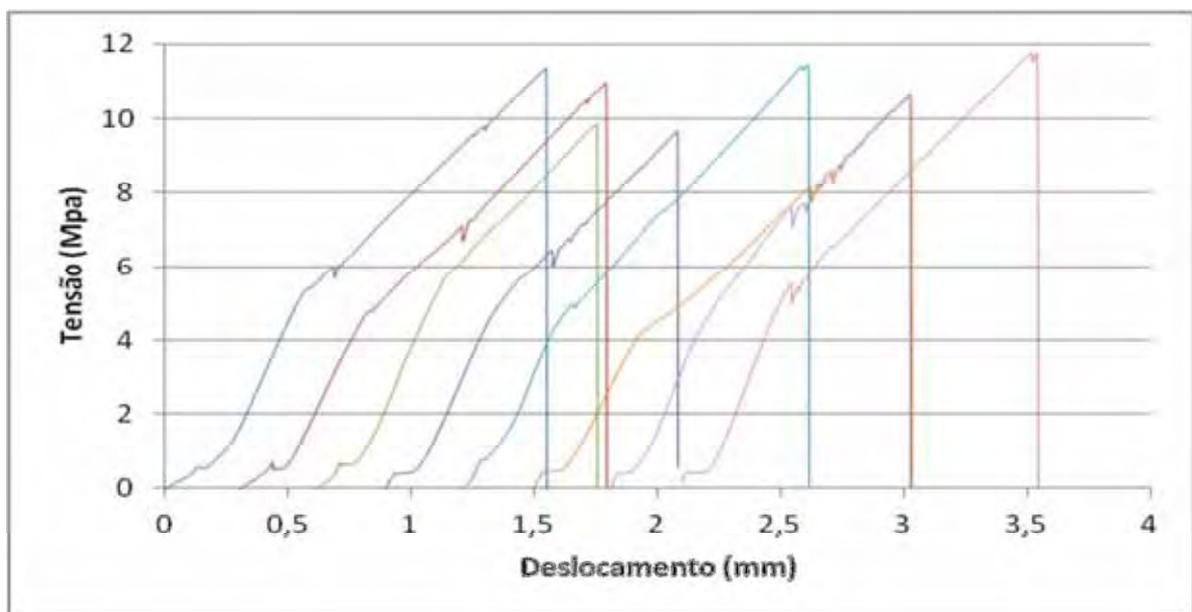


Figura 72: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 4 ensaiado em cisalhamento.

É possível notar pequenas quedas de tensão nas curvas do grupo 4 e de outros grupos ensaiados em cisalhamento. Isso ocorre quando a garra presa a um dos aderentes desliza até prender novamente. Como a força da garra aumenta com deslocamento relativo do substrato, o escorregamento cessa e os níveis anteriores de tensão são retomados.

O baixo valor de ruptura deste grupo, em relação aos substratos sem tratamento colados com epóxi (grupo 1), mostra uma menor afinidade química entre o adesivo poliuretano e o substrato fabricado em epóxi. Consequência disto é o modo de falha em cisalhamento completamente do tipo adesiva mostrado na sequência de fotos da Figura 73.

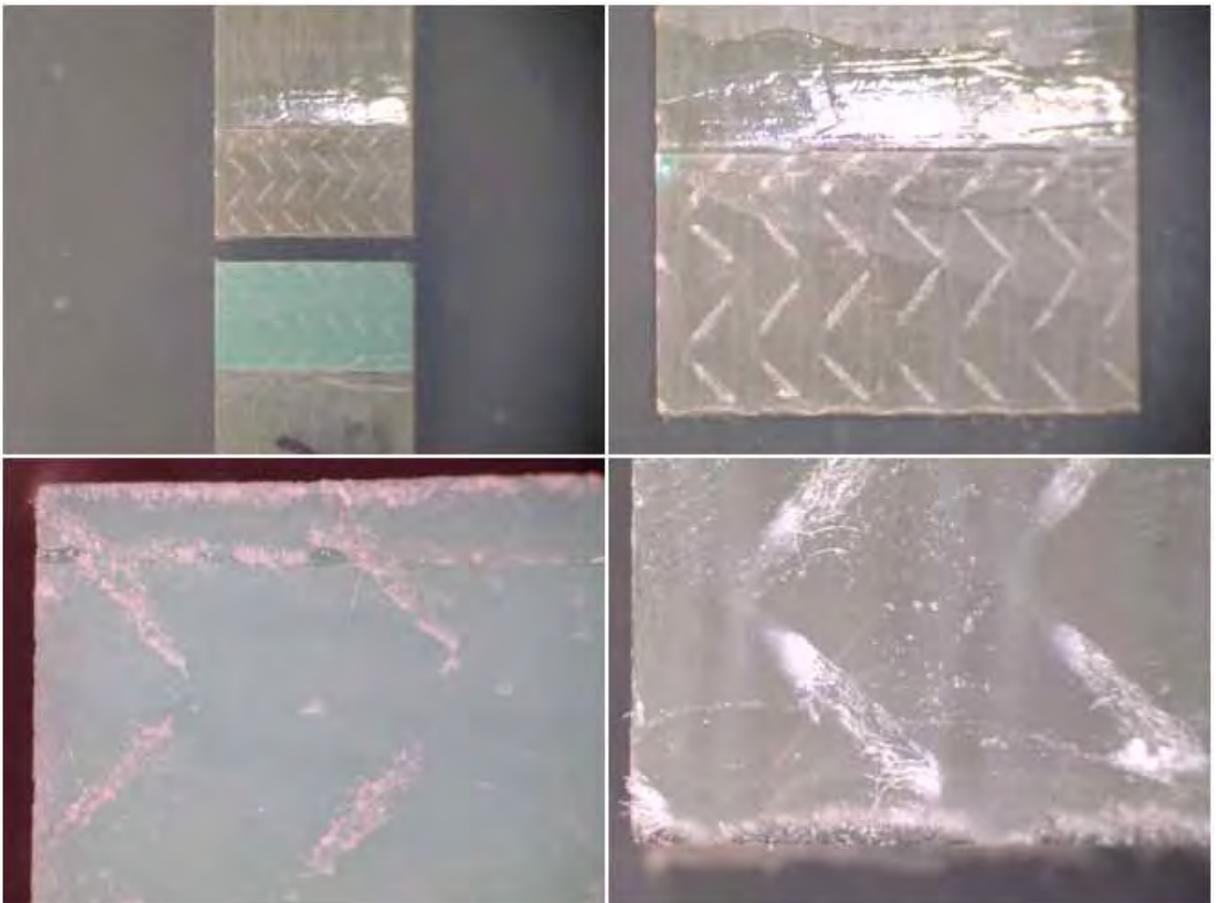


Figura 73: Modo de falha do tipo adesiva, encontrado nos corpos de prova do grupo 4 ensaiado em cisalhamento.

A Figura 74 mostra com uma maior ampliação os dois aderentes que formavam o corpo de prova apresentado na Figura 73. Por causa do modo de falha, um dos aderentes permaneceu unido ao adesivo (Figura 74b), enquanto o outro aderente não apresentou traços do adesivo em sua superfície (Figura 74a). Em ambos aderentes é possível notar cordões formados por fios de poliéster utilizados na confecção do tecido de fibra de vidro para estabilização do urdume. Como os fios de poliéster não possuem a superfície tratada (ao contrário dos fios da fibra de vidro), eles não obtêm uma boa ligação com a matriz polimérica e uma parte é arrancada, ficando aderida ao adesivo, enquanto outra permanece unida ao aderente.

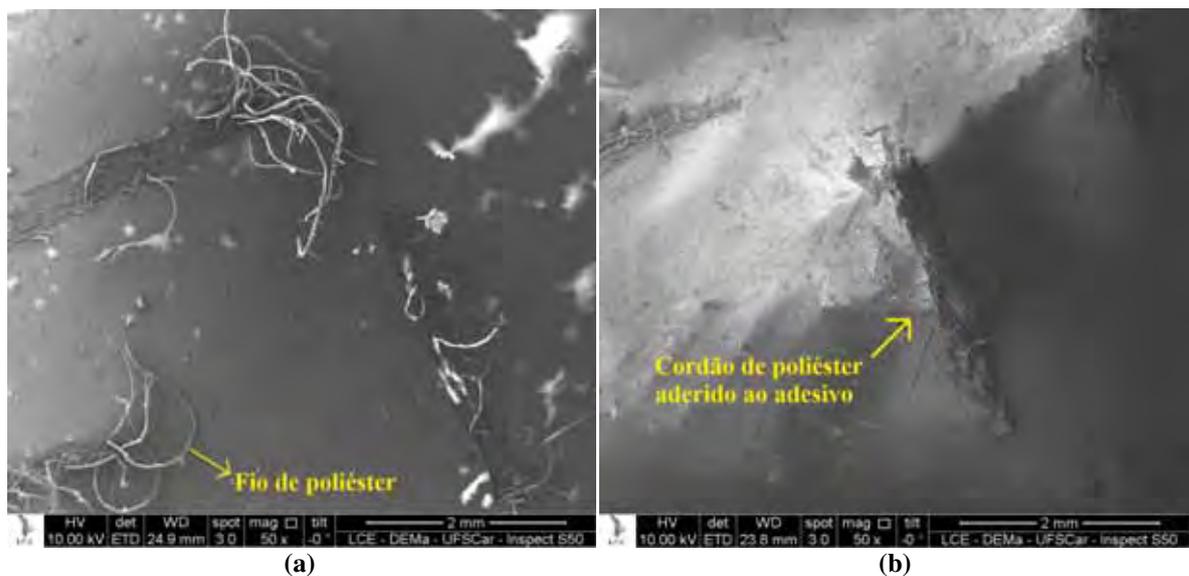


Figura 74: Micrografia MEV da superfície de um corpo de prova do grupo 4 ensaiado em cisalhamento após falha do tipo adesiva. Superfície sem presença de adesivo (a) e adesivo presente na superfície de um dos aderentes (b).

Analisando a Figura 74 (a), nota-se que a matriz polimérica não apresenta fraturas, indicando que a força de união com o adesivo não superou a força coesiva da matriz polimérica na superfície do aderente.

A Figura 75 mostra as curvas tensão/deslocamento para os aderentes sem tratamento superficial, unidos pelo adesivo poliuretano e ensaiados em clivagem.

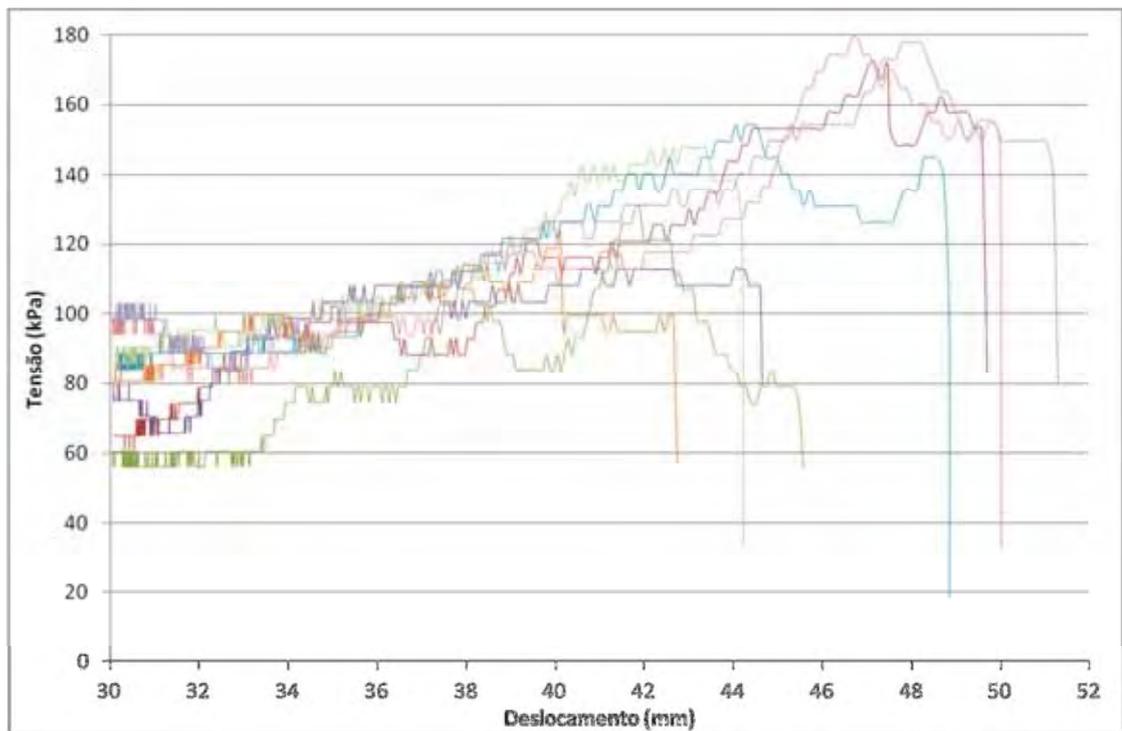


Figura 75: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 4 ensaiado em clivagem.

A energia média de iniciação de trinca do grupo 4 é de 3222 J/m^2 ($\sigma = 603$), valor menor do que o encontrado para os aderentes sem tratamento colados com adesivo epóxi (grupo 1).

A Figura 76 ilustra um modo de falha em clivagem do tipo misto, com cerca de 20% de falha adesiva e 80% de falha coesiva.

Esse resultado pode ser explicado, em parte, pela menor afinidade química entre o adesivo poliuretano e o substrato em epóxi (causa da falha adesiva) e em parte, pela menor resistência à tração/coesiva do adesivo poliuretano (causa da falha coesiva). A resistência à

tração do adesivo é uma variável importante nos ensaios de clivagem, pois neste ensaio surgem forças de tração transversais ao plano dos aderentes, tal como ilustrado na Figura 48 da seção 3.3.1.2.



Figura 76: Modo de falha misto (20% adesivo e 80% coesivo), encontrado nos corpos de prova do grupo 4 ensaiado em clivagem.

4.5. GRUPO 5 (PU, abrasão)

A Figura 77 mostra as curvas tensão/deslocamento para os aderentes tratados por abrasão, unidos pelo adesivo poliuretano e ensaiados em cisalhamento.

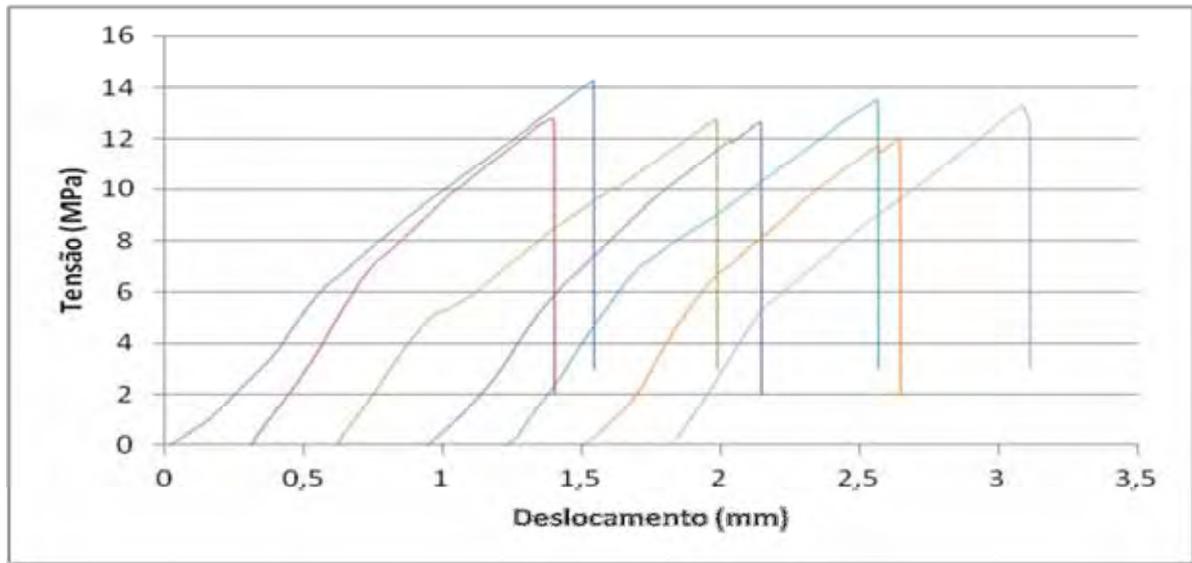


Figura 77: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 5 ensaiado em cisalhamento.

A tensão média de ruptura em cisalhamento do grupo 5 é de 13,04 MPa ($\sigma = 0,74$), valor próximo ao encontrado para outros grupos de aderentes lixados (grupos 2 e 8).

Tais resultados sugerem uma influência da exposição das fibras de vidro, provocada pela abrasão da matriz polimérica (como ilustrado pela Figura 35), nos valores de ruptura das juntas adesivas, tal como exposto por Reinhart (1987).

O modo de falha em cisalhamento deste grupo é predominantemente do tipo rompimento de fibra, como ilustrado pela Figura 78.

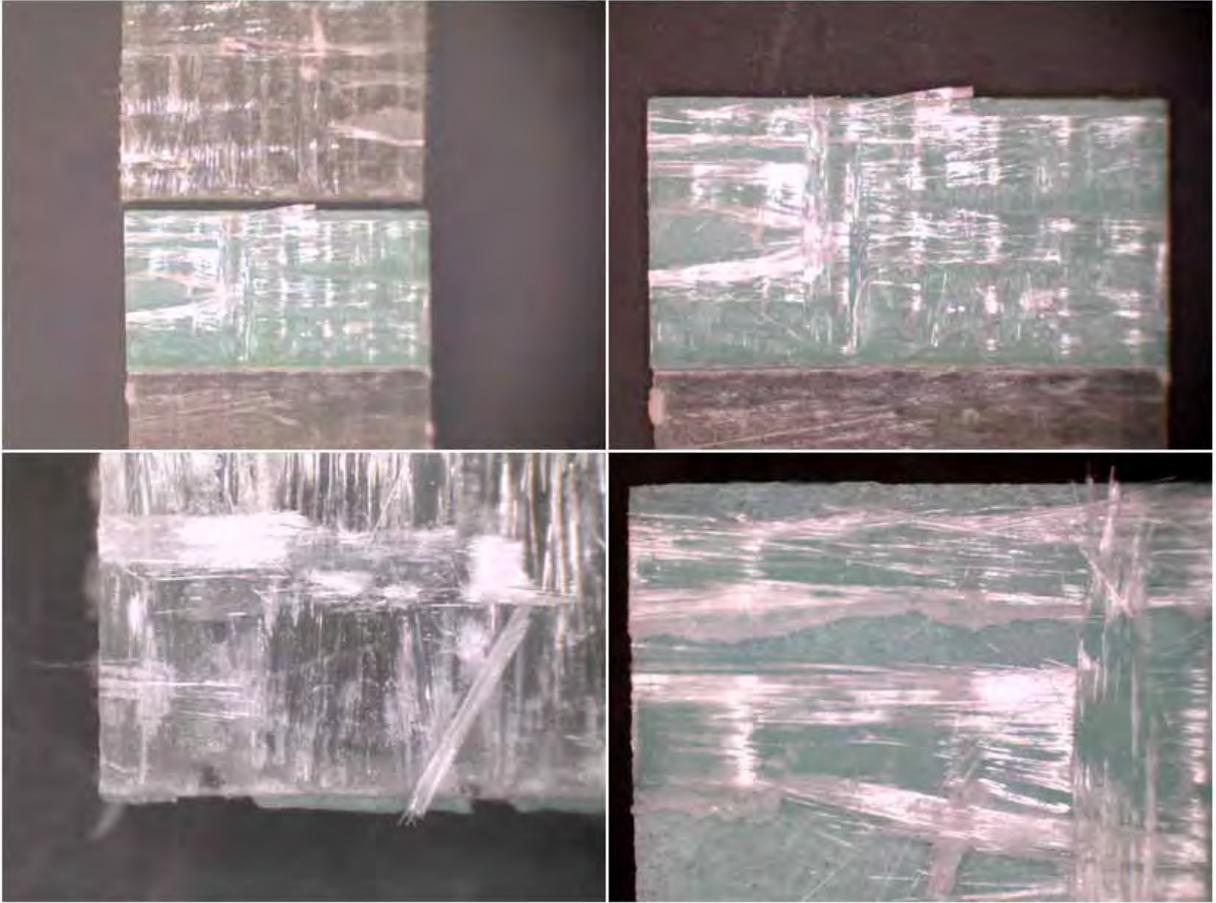


Figura 78: Modo de falha do tipo rompimento de fibra, encontrado nos corpos de prova do grupo 5 ensaiado em cisalhamento.

A Figura 79 mostra as curvas tensão/deslocamento para os aderentes tratados por abrasão, unidos pelo adesivo poliuretano e ensaiados em clivagem.

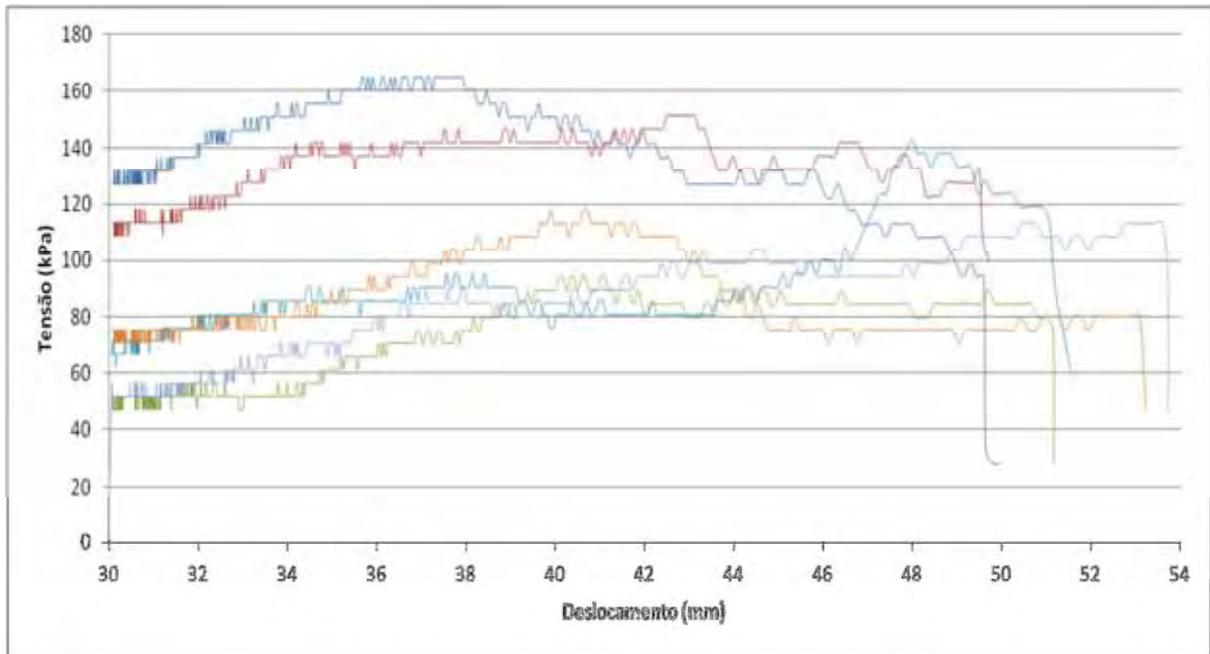


Figura 79: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 5 ensaiado em clivagem.

A energia média de iniciação de trinca do grupo 5 é de 3194 J/m^2 ($\sigma = 567$).

O modo de falha em clivagem deste grupo é do tipo misto, com aproximadamente 50% de falha coesiva e 50% de rompimento leve de fibras (Figura 80).



Figura 80: Modo de falha misto (50% coesivo e 50% rompimento leve de fibras), encontrado nos corpos de prova do grupo 5 ensaiado em clivagem.

4.6. GRUPO 6 (PU, peel-ply)

A Figura 81 mostra as curvas tensão/deslocamento para os aderentes com tratamento superficial por *peel-ply*, unidos pelo adesivo poliuretano e ensaiados em cisalhamento.

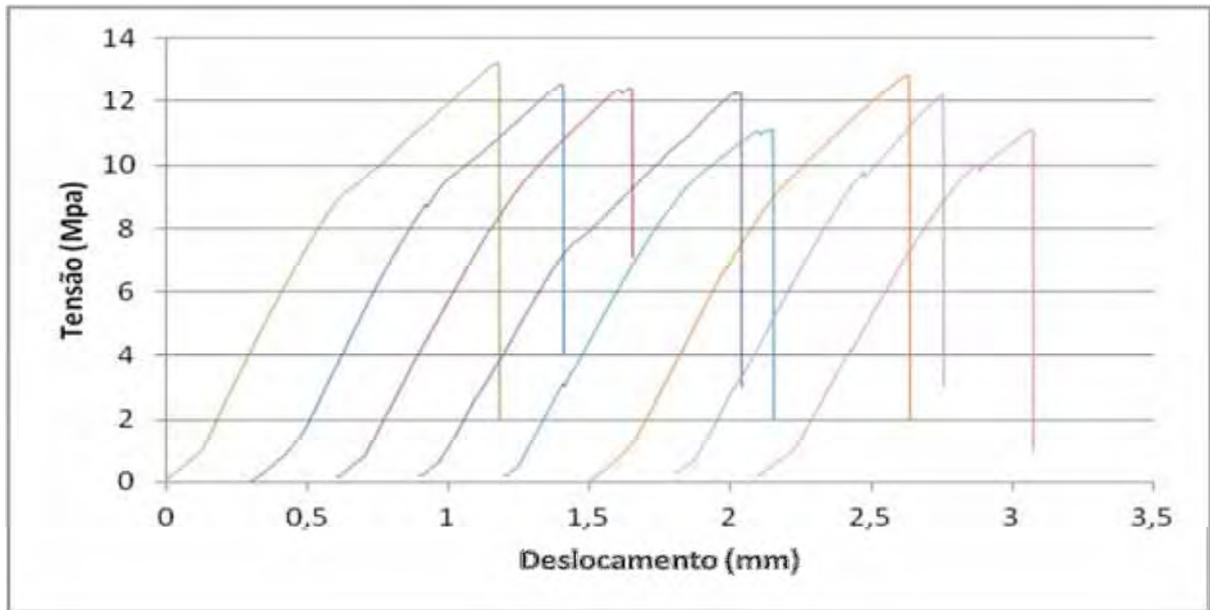


Figura 81: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 6 ensaiado em cisalhamento.

A tensão média de ruptura em cisalhamento do grupo 6 é de 12,22 MPa ($\sigma = 0,76$), 55% do valor encontrado para os aderentes com mesmo tratamento superficial e colados com epóxi. Esse resultado pode ser explicado pela menor resistência coesiva do poliuretano, quando comparado ao epóxi. Segundo dados dos fabricantes, a resistência à tração do adesivo epóxi é cerca de 27 MPa, enquanto para o poliuretano é aproximadamente 20 MPa.

A Figura 82 ilustra o modo de falha misto que este grupo apresentou após o ensaio de cisalhamento.

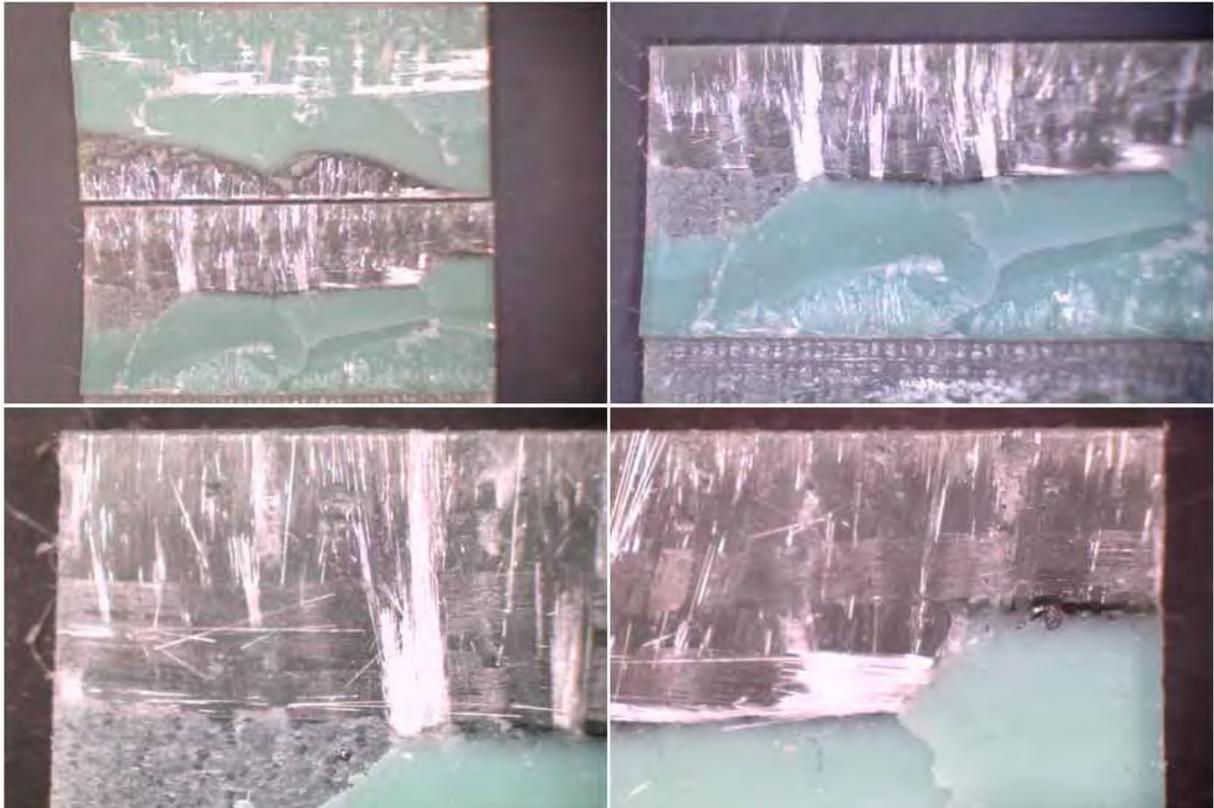


Figura 82: Modo de falha misto (30% coesivo e 70% rompimento de fibras), encontrado nos corpos de prova do grupo 6 ensaiado em cisalhamento.

A Figura 83 mostra as curvas tensão/deslocamento para os aderentes com tratamento superficial por *peel-ply*, unidos pelo adesivo poliuretano e ensaiados em clivagem.

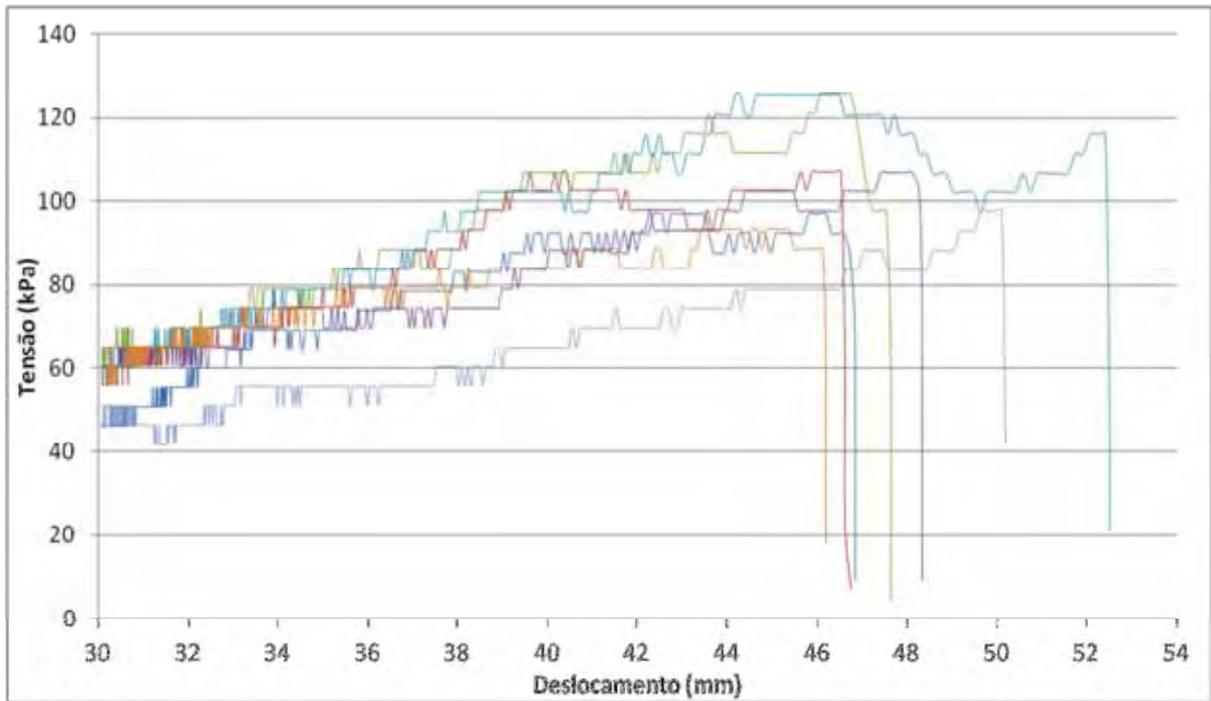


Figura 83: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 6 ensaiado em clivagem.

A energia média de iniciação de trinca do grupo 6 é de 2365 J/m^2 ($\sigma = 299$), menor valor para todos os grupos testados em clivagem. A Figura 84 ilustra o modo de falha misto deste grupo, com 50% de falha coesiva e 50% coesiva próxima à interface do substrato após o ensaio de clivagem.



Figura 84: Modo de falha misto (50% coesivo e 50% coesivo próximo à interface), encontrado nos corpos de prova do grupo 6 ensaiado em clivagem.

4.7. GRUPO 7 (MMA, sem tratamento superficial)

A Figura 85 mostra as curvas tensão/deslocamento para os aderentes sem tratamento superficial, unidos pelo adesivo metil-metacrilato e ensaiados em cisalhamento.

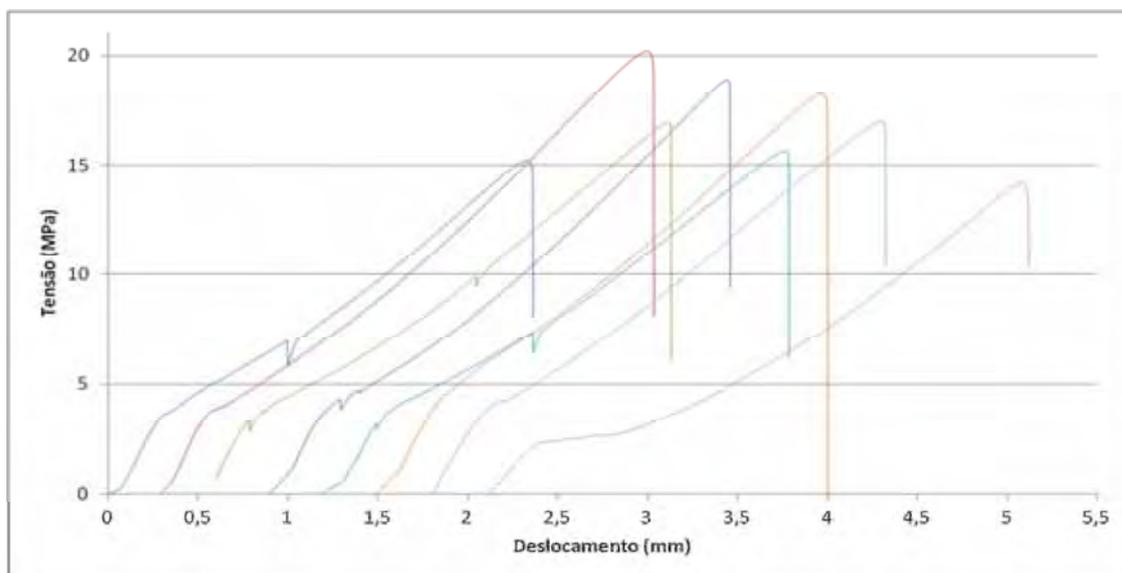


Figura 85: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 7 ensaiado em cisalhamento.

A tensão média de ruptura em cisalhamento do grupo 7 é de 17,03 MPa ($\sigma = 2,01$), resultado igual ao obtido pelos aderentes sem tratamento colados com epóxi, o que indica uma boa compatibilidade entre o metil-metacrilato e os substratos fabricados em epóxi.

A Figura 86 mostra o modo de falha em cisalhamento deste grupo, com cerca de 90% de rompimento de fibra e 10% de falha adesiva.



Figura 86: Modo de falha misto (90% rompimento de fibra e 10% adesiva), encontrado nos corpos de prova do grupo 7 ensaiado em cisalhamento.

A Figura 87 mostra as curvas tensão/deslocamento para os aderentes sem tratamento superficial, unidos pelo adesivo metil-metacrilato e ensaiados em clivagem.

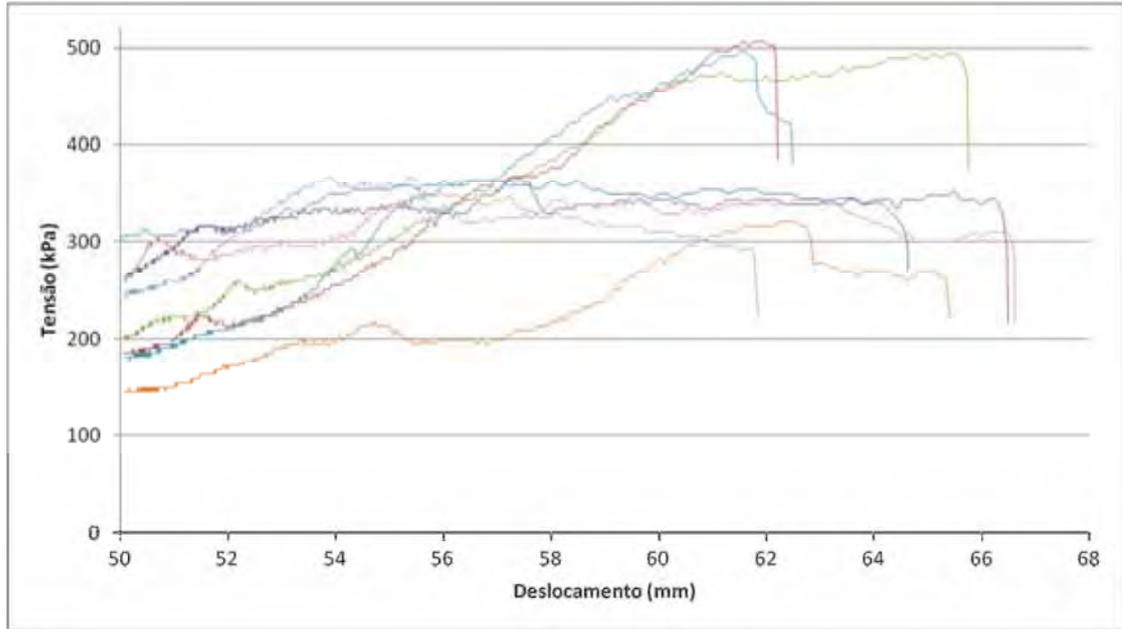


Figura 87: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 7 ensaiado em clivagem.

A energia média de iniciação de trinca do grupo 7 é de 9643 J/m^2 ($\sigma = 807$), valor superior ao encontrado nos aderentes colados com epóxi e poliuretano sob as mesmas condições de tratamento superficial.

Essa melhor resistência à clivagem deve-se em parte à maior flexibilidade do adesivo empregado na junta (TROUGHTON, 2008). O metil-metacrilato utilizado na fabricação dos corpos de prova dos grupos 7 ao 9 possui módulo elástico de cerca de 1000 MPa, enquanto os adesivos epóxi e poliuretano são menos elásticos, possuindo módulo próximo de 4500 MPa.

A Figura 88 indica um modo de falha misto em clivagem, com 20% de rompimento leve de fibra e 80% de falha coesiva próxima à interface.



Figura 88: Modo de falha misto (20% rompimento leve de fibra e 80% coesiva próxima à interface), encontrado nos corpos de prova do grupo 7 ensaiado em clivagem.

4.8. GRUPO 8 (MMA, abrasão)

A Figura 89 mostra as curvas tensão/deslocamento para os aderentes tratados por abrasão, unidos pelo adesivo metil-metacrilato e ensaiados em cisalhamento.

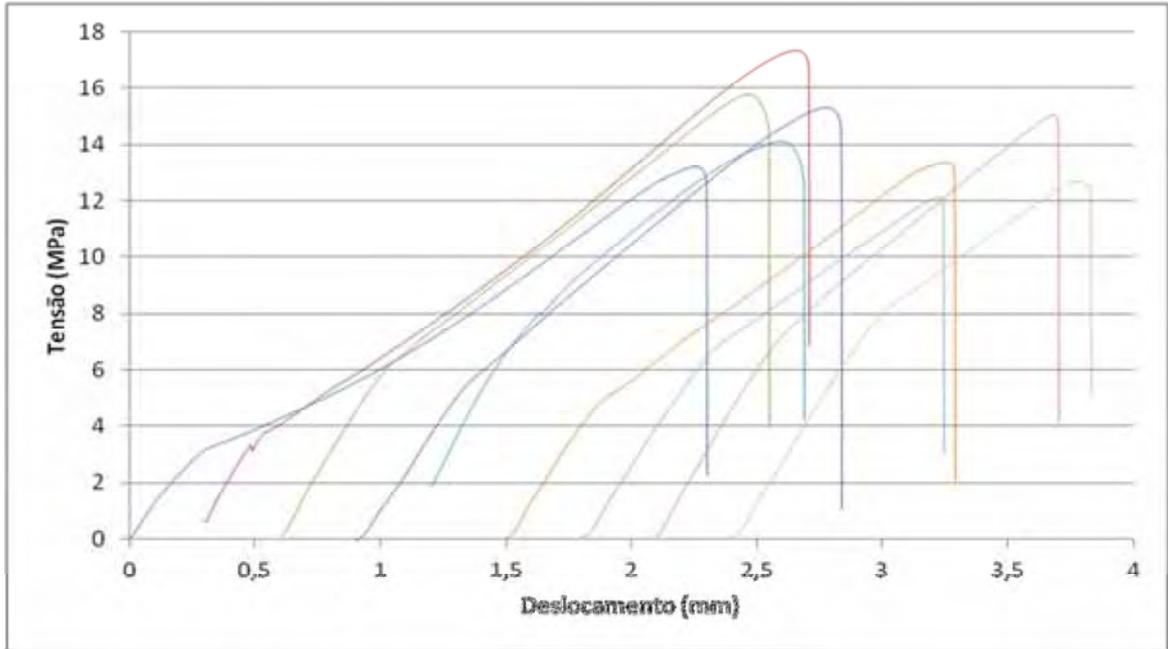


Figura 89: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 8 ensaiado em cisalhamento.

A tensão média de ruptura em cisalhamento do grupo 8 é de 14,32 MPa ($\sigma = 1,67$). Esse valor é próximo ao encontrado para os grupos 2 e 5, sugerindo, novamente, uma influência da exposição das fibras de vidro nos valores de ruptura das juntas adesivas.

A Figura 90 indica um modo de falha em cisalhamento predominantemente do tipo rompimento de fibra.



Figura 90: Modo de falha do tipo rompimento de fibra, encontrado nos corpos de prova do grupo 8 ensaiado em cisalhamento.

A Figura 91 mostra as curvas tensão/deslocamento para os aderentes com tratamento superficial por abrasão, unidos pelo adesivo metil-metacrilato e ensaiados em clivagem.

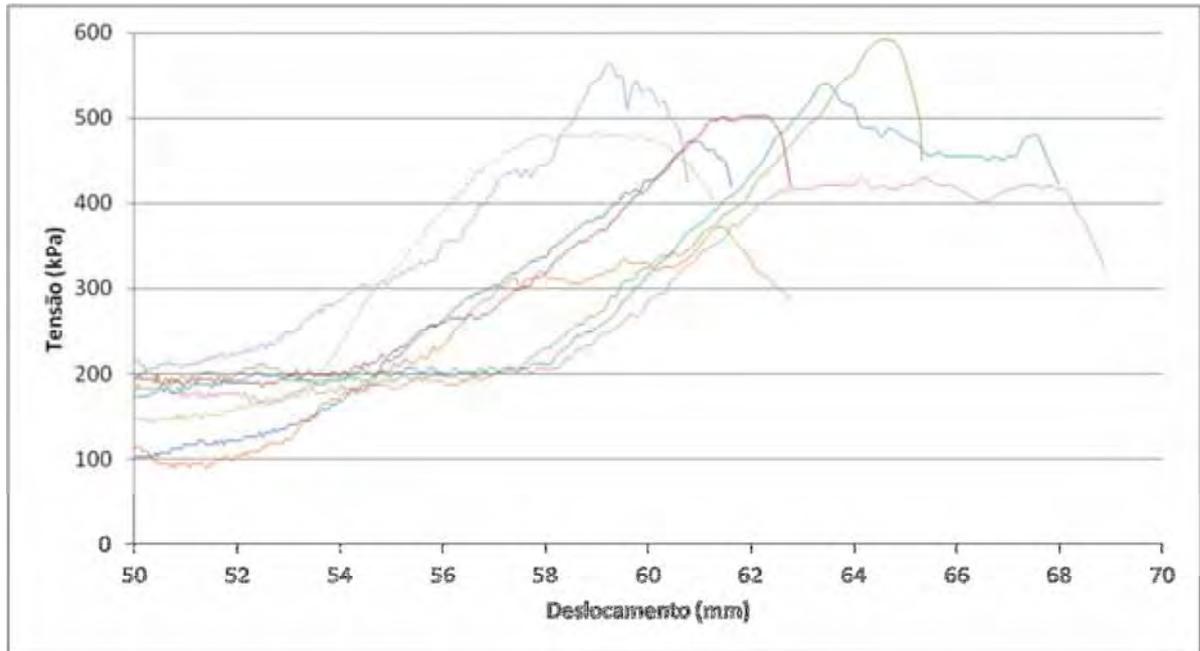


Figura 91: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 8 ensaiado em clivagem.

A energia média de iniciação de trinca do grupo 8 é de 8572 J/m^2 ($\sigma = 1007$), valor que também foi superior ao encontrado nos aderentes tratados por abrasão e colados com epóxi e poliuretano.

A Figura 92 indica um modo de falha misto em clivagem, com 90% de falha coesiva e 10% de rompimento de fibras.



Figura 92: Modo de falha misto (10% rompimento de fibras e 90% coesiva), encontrado nos corpos de prova do grupo 8 ensaiado em clivagem.

4.9. GRUPO 9 (MMA, peel-ply)

A Figura 93 mostra as curvas tensão/deslocamento para os aderentes tratados por *peel-ply*, unidos pelo adesivo metil-metacrilato (MMA) e ensaiados em cisalhamento.

A tensão média de ruptura em cisalhamento do grupo 9 é de 15,31 MPa ($\sigma = 1,51$). Esse resultado indica que a resistência ao cisalhamento das juntas unidas pelo MMA não aumentou após o tratamento superficial por abrasão e a utilização do *peel-ply*.

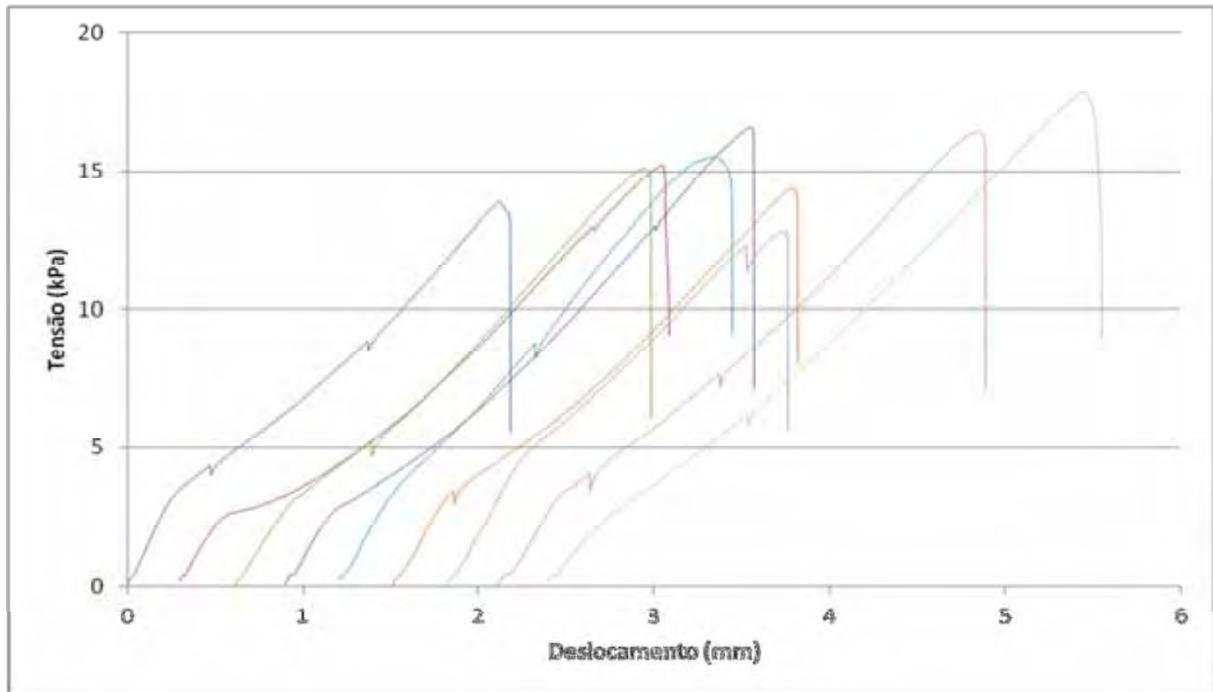


Figura 93: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 9 ensaiado em cisalhamento.

A Figura 94 indica um modo de falha em cisalhamento do tipo rompimento de fibra encontrado nos corpos de prova do grupo 9.



Figura 94: Modo de falha do tipo rompimento de fibra, encontrado nos corpos de prova do grupo 9 ensaiado em cisalhamento.

A Figura 95 mostra os dois aderentes que formavam um dos corpos de prova do grupo 9 após o ensaio de cisalhamento. Na falha desta junta, parte das fibras de um dos aderentes rompeu-se, ficando unidas ao adesivo que permaneceu ligado ao outro aderente.

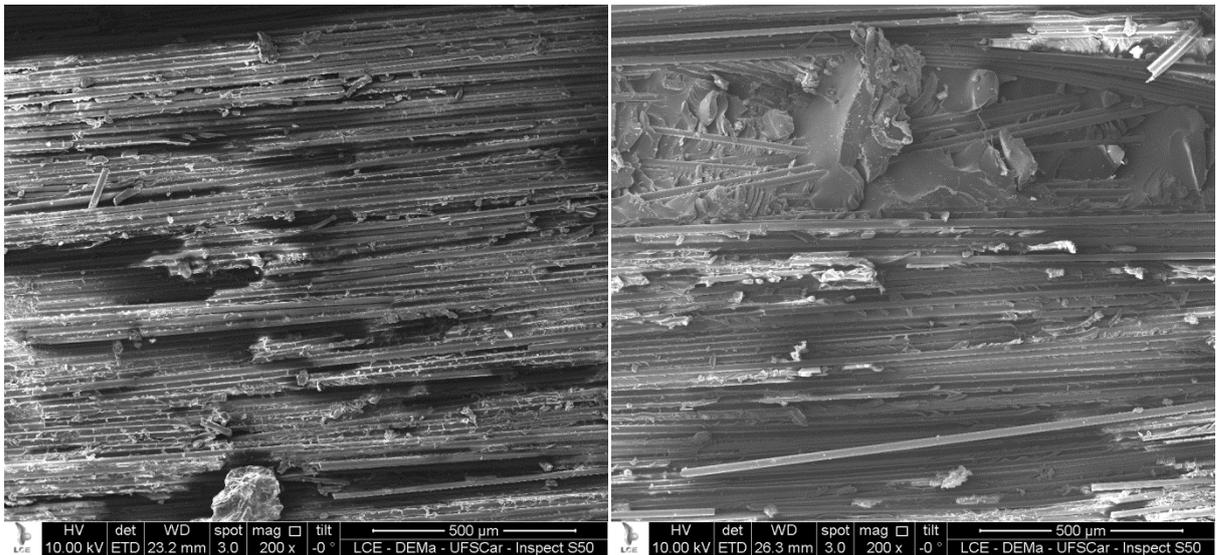


Figura 95: Micrografia MEV da superfície de aderentes do grupo 9 após falha do tipo rompimento de fibra no ensaio de cisalhamento.

A Figura 96 mostra as curvas tensão/deslocamento para os aderentes tratados por *peel-ply*, unidos pelo adesivo metil-metacrilato e ensaiados em clivagem.

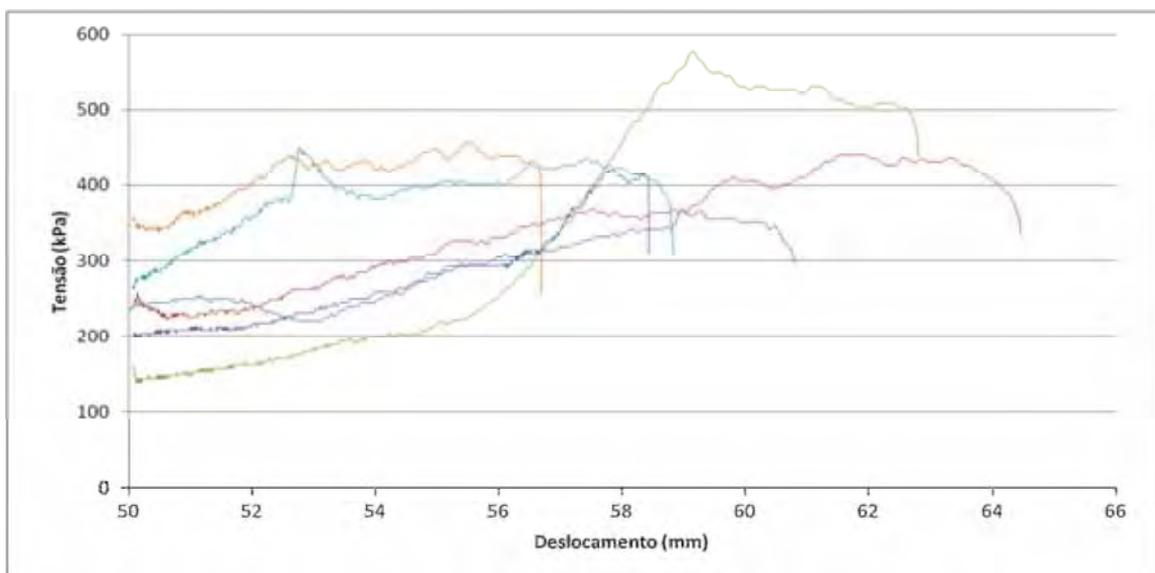


Figura 96: Curvas tensão/deslocamento para o grupo 9 ensaiado em clivagem.

A energia média de iniciação de trinca do grupo 9 é de 9460 J/m^2 ($\sigma = 1291$), valor que, juntamente com os resultados dos grupos 7 e 8, confirmam a superior resistência à clivagem do adesivo metil-metacrilato, quando comparado aos adesivos epóxi e poliuretano utilizados nos ensaios deste trabalho.

A Figura 97 indica um modo de falha em clivagem do tipo misto, com 15% de falha coesiva e 85% de rompimento de fibras.

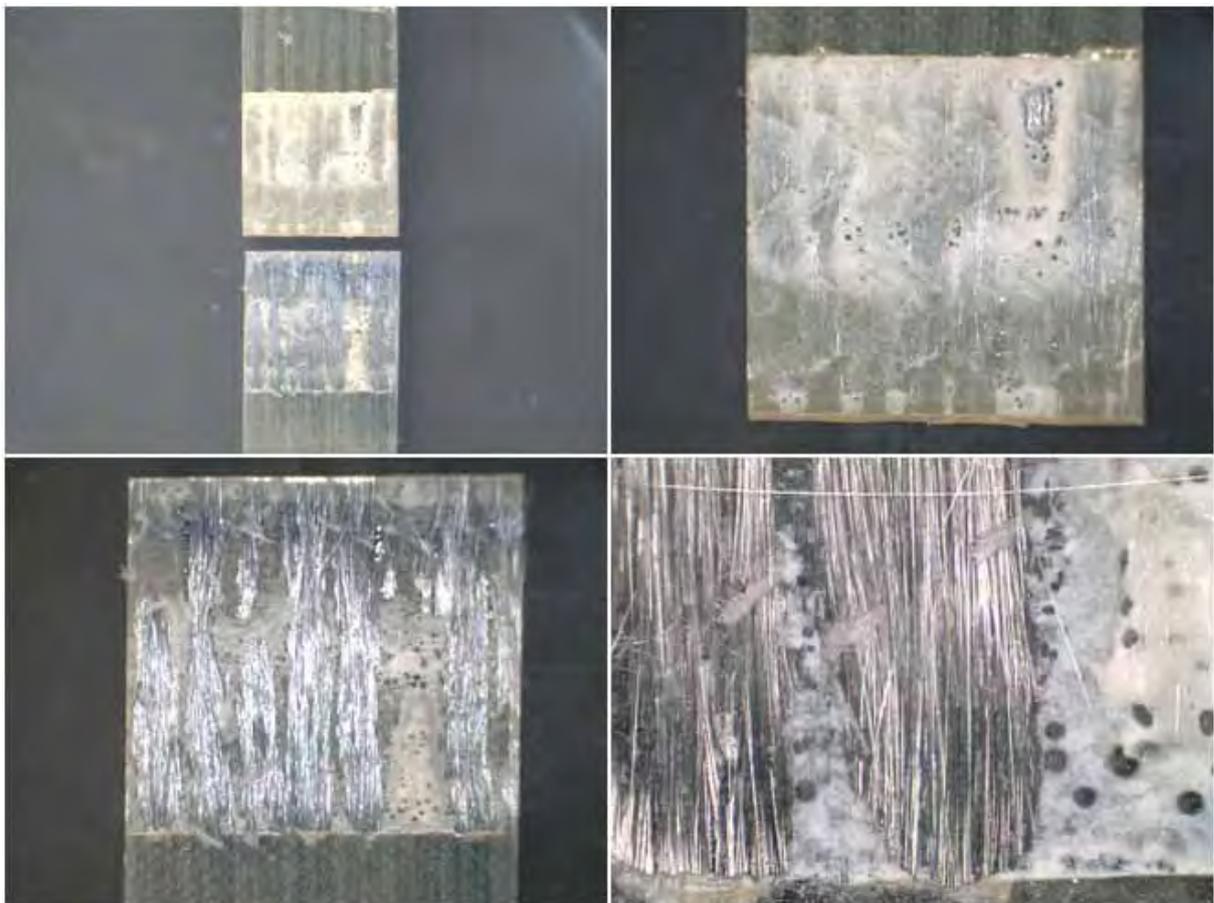


Figura 97: Modo de falha misto (85% rompimento de fibras e 15% coesiva), encontrado nos corpos de prova do grupo 9 ensaiado em clivagem.

5. DISCUSSÕES

A Tabela 10 resume os resultados dos ensaios de cisalhamento e clivagem para cada um dos 9 grupos testados.

Tabela 10: Valores de tensão de cisalhamento e clivagem dos ensaios e modos de falha.

Grupo	Adesivo	Tratamento Superficial	Tipo de Ensaio	Tensão/Energia	Modo de Falha
1	EPÓXI	-	cisalhamento	17,46 MPa	rompimento de fibra
	EPÓXI	-	clivagem	4852 J/m ²	coesivo próximo à interface
2	EPÓXI	abrasão	cisalhamento	13,41 MPa	rompimento de fibra
	EPÓXI	abrasão	clivagem	3249 J/m ²	coesivo
3	EPÓXI	peel-ply	cisalhamento	22,33 MPa	rompimento de fibra
	EPÓXI	peel-ply	clivagem	3487 J/m ²	coesivo
4	PU	-	cisalhamento	10,79 MPa	adesivo
	PU	-	clivagem	3222 J/m ²	20% adesivo 80% coesivo
5	PU	abrasão	cisalhamento	13,04 MPa	rompimento de fibra
	PU	abrasão	clivagem	3194 J/m ²	50% coesivo 50% rompimento leve de fibra
6	PU	peel-ply	cisalhamento	12,22 MPa	30% coesivo 70% rompimento leve de fibra
	PU	peel-ply	clivagem	2365 J/m ²	50% coesivo 50% coesivo próximo à interface
7	MMA	-	cisalhamento	17,03 MPa	90% rompimento de fibra 10% adesiva
	MMA	-	clivagem	9643 J/m ²	20% rompimento leve de fibra 80% coesivo próximo à interface
8	MMA	abrasão	cisalhamento	14,32 MPa	rompimento de fibra
	MMA	abrasão	clivagem	8572 J/m ²	90% coesivo 10% rompimento de fibra
9	MMA	peel-ply	cisalhamento	15,31 MPa	rompimento de fibra
	MMA	peel-ply	clivagem	9461 J/m ²	15% coesivo 85% rompimento de fibra

Uma primeira análise dos dados apresentados na Tabela 10 mostrou que 90% das falhas em cisalhamento são predominantemente do tipo rompimento de fibra e que 90% das falhas em clivagem são coesivas.

Isso reforça o fato de que juntas adesivas devem ser projetadas para resistir ao cisalhamento (STRAALEN, 2001) e que esforços de clivagem devem ser evitados ao máximo. No caso da clivagem ou *peeling* serem os esforços predominantes, um adesivo de menor módulo elástico deve ser utilizado, fato demonstrado pelas maiores tensões de ruptura apresentadas pelos aderentes colados com metil-metacrilato (MMA) e ensaiados em clivagem.

Um ponto importante sobre a análise dos modos de falha é que esta não pode ser realizada separadamente dos resultados de tensão dos ensaios. Vide, por exemplo, os grupos 7 e 9, que, apesar de possuírem valores muito próximos de energia de iniciação de trinca, possuem modos de falha bastante distintos. Desta forma, o gráfico da Figura 98, que mostra a resistência das juntas adesivas ao cisalhamento e o gráfico da Figura 99, que apresenta a energia média de iniciação de trinca das juntas testadas em clivagem, serão utilizados em conjunto com a Tabela 10.

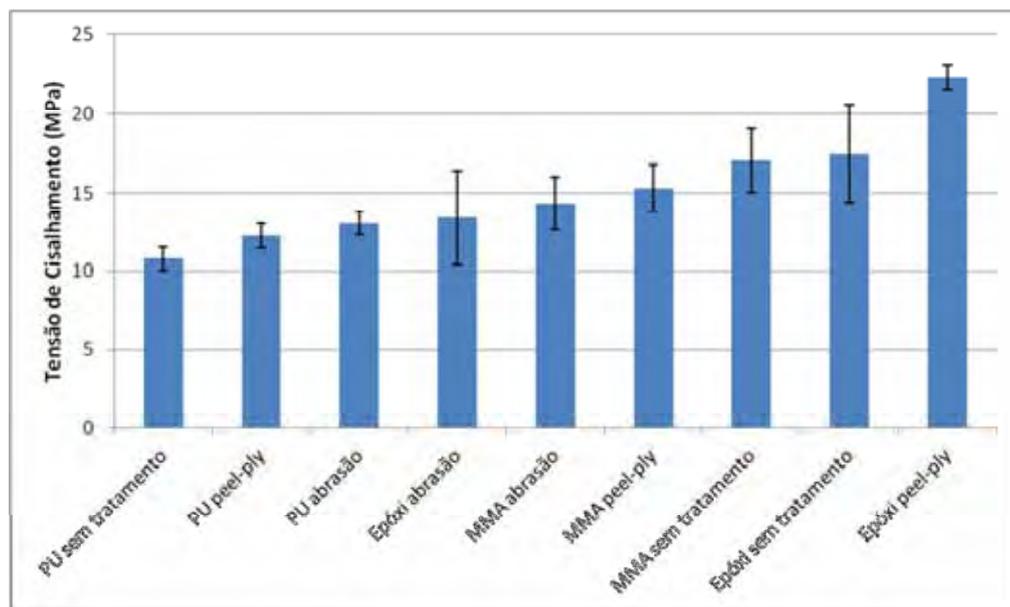


Figura 98: Resistência média e desvio padrão dos grupos testados em cisalhamento.

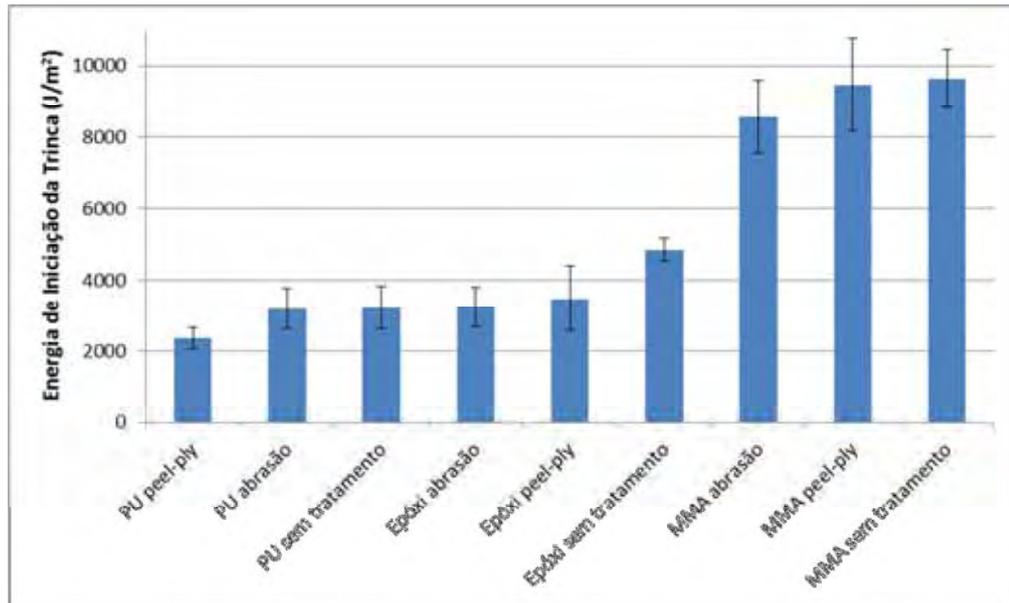


Figura 99: Energia média de iniciação de trinca e desvio padrão dos grupos testados em clivagem.

O gráfico da Figura 98 mostra uma maior resistência ao cisalhamento para juntas adesivas coladas com epóxi e tratadas com um *peel-ply* de nylon. Esse resultado, 28% superior ao epóxi sem tratamento, deve-se ao fato dos aderentes também serem construídos com resina epóxi, o que aumenta sua afinidade química junto ao adesivo (BANEJA *et al*, 2008) e à capacidade do *peel-ply* de criar uma superfície mais reativa (BROCKMANN *et al*, 2010). Na Figura 40 é possível notar um aumento da área de contato entre os aderentes devido à rugosidade impressa pelo *peel-ply*. O incremento da superfície de contato também contribui para a maior resistência dessas juntas.

O acréscimo da resistência ao cisalhamento devido ao uso do *peel-ply* não foi observado para as juntas unidas por MMA ou por PU. Já nos testes de clivagem (Figura 99), o efeito do *peel-ply* foi diminuir a resistência das juntas coladas com epóxi e PU. O grupo colado com MMA e tratado com *peel-ply* não apresentou melhora significativa.

Os resultados dos ensaios de clivagem foram mais influenciados pelo grupo químico dos adesivos do que pelo tratamento superficial dos aderentes. Isso é evidenciado pelo agrupamento dos adesivos no gráfico da Figura 99.

O MMA foi o adesivo que apresentou maior resistência à clivagem. Como explicado na seção 4.9, isso se deve a um menor módulo elástico quando comparado aos adesivos PU e epóxi.

Os resultados dos testes de cisalhamento também deixaram evidente que os aderentes colados com PU obtiveram a menor média de tensão de ruptura, sendo que a única falha adesiva de todos os ensaios ocorreu para o grupo de aderentes sem tratamento superficial e unidos com poliuretano.

O gráfico da Figura 98 ainda mostra que os grupos de aderentes tratados por abrasão obtiveram valores de ruptura em cisalhamento muito próximos, com médias variando de 13,04 a 14,32 MPa. Esse resultado, somado ao fato de que todos esses grupos apresentaram modo de falha do tipo rompimento de fibra, sugere um limite de resistência ao cisalhamento para aderentes tratados por abrasão (tal como exposto na seção 4.5).

Tal limite de ruptura para aderentes tratados por abrasão não surgiu quando realizados os ensaios de clivagem. Nestes, a falha coesiva da junta ocorreu antes que algum processo na interface adesivo/aderente pudesse surgir.

Não foi possível correlacionar a influência dos tratamentos superficiais dos ensaios de cisalhamento com os de clivagem. As Figuras 98 e 99 mostram que, para um mesmo grupo de adesivos (com exceção do MMA), os tratamentos superficiais que apresentaram melhores resultados em cisalhamento não foram os mesmos do ensaio de clivagem.

6. CONCLUSÕES

O grupo 3, formado por substratos tratados com *peel-ply* e colados com adesivo epóxi, apresentou o melhor desempenho nos ensaios de cisalhamento, com tensão média de ruptura 28% superior ao grupo de aderentes sem tratamento e colados com o mesmo adesivo.

Os grupos colados com adesivo PU apresentaram os piores desempenhos, tanto nos ensaios de cisalhamento quanto nos de clivagem.

Os grupos colados com adesivo MMA obtiveram valores nos ensaios de clivagem cerca de 170% superiores aos demais grupos, mostrando que esse adesivo é uma boa opção para juntas carregadas em *peeling* e/ou clivagem, uma vez que, neste tipo de carregamento, os adesivos PU e epóxi falhariam prematuramente em modo coesivo.

Ao considerar outros aspectos que envolvem a manufatura de pás eólicas, tais como ciclo de produção e robustez do processo, o tratamento de grandes superfícies com *peel-ply* mostra-se superior à abrasão, por ser mais rápido e fácil de controlar, além de gerar uma superfície pronta para colagem, sem a necessidade de limpeza.

Os dados também mostraram que o desempenho dos grupos tratados com *peel-ply* foi superior ao dos grupos tratados por abrasão (com exceção dos grupos colados com PU). Os substratos tratados com *peel-ply* e colados com epóxi foram 66,5% superiores em cisalhamento e 7,3% superiores em clivagem quando comparados aos substratos abradados. Já os substratos colados com MMA e tratados com *peel-ply* foram 6,9% superiores em cisalhamento e 10,4% superiores em clivagem em relação aos substratos tratados por abrasão.

Embora os grupos de controle (sem tratamento) tenham apresentado resultados superiores em todos os ensaios de clivagem, a ausência de tratamento superficial é um risco à

qualidade das juntas adesivas, uma vez que não há controle sobre variáveis que influenciam a adesão, tais como limpeza e energia/reatividade superficial do aderente.

A abrasão é mais bem empregada na preparação de superfícies menores, onde o controle sobre o processo é maior e nos casos em que o uso do *peel-ply* não é mais possível. Essas condições normalmente ocorrem em áreas danificadas da pá, onde um reparo estrutural é necessário.

É importante ressaltar que todos os dados apresentados neste trabalho resultam de ensaios de adesivos com formulações específicas, portanto, não é possível generalizar os resultados para os demais adesivos presentes no mercado, mesmo para aqueles que apresentem o mesmo grupo químico.

Um exemplo de como a formulação do adesivo modifica drasticamente as características originais do polímero é o poliuretano. Conhecido por sua flexibilidade, o adesivo poliuretano utilizado neste trabalho possui módulo de rigidez de cerca de 4500 MPa, tornando-o tão rígido quanto o adesivo epóxi. Por esse motivo, um plano de testes deve ser elaborado sempre que houver a necessidade do emprego de um novo adesivo ou método de preparação superficial.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARANTE, O.A.C. et al. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília, 2001.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em 20 setembro de 2010.
- ASTM D2584 - 11. Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins.
- ASTM D5041 - 04. Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Joints.
- ASTM D5573 - 99. Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints.
- ASTM D5868 - 01. Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding.
- ASTM D6465 - 05. Standard Guide for Selecting Aerospace and General Purpose Adhesives and Sealants.
- BANEA, M.D; SILVA, L.F.M. **Adhesively bonded joints in composite materials: an overview**. Journal of Materials Design and Applications. 2008. Disponível em <<http://pil.sagepub.com/content/223/1/1>>. Acesso em 15 outubro 2009.
- BAUER, R.S.; CORLEY, S. Epoxy Resins. In: LEE, S.M. **Reference Book for Composites Technology**. Lancaster: Technomic, 1989. v.1, p.17-48.
- BROCKMANN, W. et al. **Adhesive Bonding**. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
- Bruyne, N.A. **Klebtechnik - Die Adhäsion in Theory und Praxis**. Stuttgart: Berliner Union, 1957.
- BURTON, T. et al. **Wind Energy Handbook**. Chichester: Wiley, 2001.
- CALLISTER, W.D.J. **Fundamentals of Material Science and Engineering**. New York: Wiley, 2001.
- DRACHMANN, A.G. **Heron's windmill**. Centaurus, 1961. p. 145-151.
- ELLIS, B. Introduction to the chemistry, synthesis, manufacture and characterization of epoxy resins. In: ELLIS, B. **Chemistry and technology of epoxy resins**. Blackie Academic, 1993. p.1-35.
- ENERDATA. Portal da empresa. Disponível em <<http://www.enerdata.net>>. Acesso em: 9 novembro 2010.

EWEA - EUROPEAN WIND ENERGY ASSOCIATION. Portal da Associação. Disponível em <<http://www.ewea.org>>. Acesso em 10 novembro 2009.

GOLAND, M.; REISSNER, E. **The Stresses in Cemented Lap Joints**. Transactions of ASME Journal of Applied Mechanics, v. 66, 1944, p.A17-A27.

GWEA - GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Portal da Associação. Disponível em <<http://www.gwec.net>>. Acesso em 25 outubro 2010.

HANSEN, M.O.L. **Aerodynamics of Wind Turbines**. 2.ed. London: Earthscan, 2008.

HASSANM, Y.H.; HILL, D.R. **Islamic Technology: An Illustrated History**. Cambridge University Press, 1986.

MARTINEZ, E. et al. **Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method**. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 14, 2009, p.52-63.

MAY, C.A. Epoxy Resins. In: REINHART, T.J. **Engineered Materials Handbook-Composites**. Ohio: ASM International, 1987. p.66.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Disponível em <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em 3 setembro de 2010.

NELSON, V. **Wind Energy - Renewable Energy and the Enviroment**. CRC Press, 2009.

NETCOMPOSITES. Portal da empresa. Disponível em <<http://www.netcomposites.com>>. Acesso em 05 junho 2010.

NETO, L.F; PARDINI, L.C. **Compósitos Estruturais**. São Paulo: Edgar Blucher, 2006.

PPG FIBER GLASS. Portal da empresa. Disponível em <<http://www.ppg.com/glass/fiberglass>>. Acesso em 23 junho 2010.

REINHART, T.J. **Engineered Materials Handbook - Composites**. Ohio: ASM International, 1987.

REIS, P.N.B. et al. **Stacking laminate effects on adhesive lap joints strength**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRACTURE, 11., 2005, Turin.

RICHMOND. Portal da empresa. Disponível em <<http://www.richmondaircraft.com>>. Acesso em 10 junho 2012.

SAERTEX. Portal da empresa. Disponível em <<http://www.saertex.com>>. Acesso em 10 junho 2012.

SHENGZHEN SAILONG FIBERGLASS COMPANY LTD. Portal da empresa. Disponível em <<http://www.sailongbq.com>>. Acesso em 16 junho 2011

SØRENSEN, B.F. et al. Blade materials, testing methods and structural design. In: TONG, W. **Wind Power Generation and Wind Turbine Design**. Boston: WIT Press, 2010. p.417-418.

STRAALEN, I.J. **Development of Design Rules for Structural Adhesive Bonded Joints a Systematic Approach**. 2001. 167 f. Tese (Doutorado)-Technische Universiteit Delft, 2001.

TONG, W. **Wind Power Generation and Wind Turbine Design**. Boston: WIT Press, 2010.

TROUGHTON, M.J. **Handbook of Plastics Joining: A Practical Guide**. New York: William Andrew Inc, 2008.

VOYUTSKII, S.S. **Autohesion and Adhesion of High Polymers**. New York: Wiley, 1963.

WILLIAMS, J. Adhesives Selection. In: REINHART, T.J. **Engineered Materials Handbook -Composites**. Ohio: ASM International, 1987. p.683-685.