

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise de Juntas Coladas de Compósitos de Fibras
Naturais**

Henrique Fernandes Medeiros de Queiroz

Dayane Velloso

Profa. Orientadora: Doina Mariana Banea

Rio de Janeiro

Novembro de 2018

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Análise de Juntas Coladas de Compósitos de Fibras
Naturais**

Henrique Fernandes Medeiros de Queiroz

Dayane Velloso

Projeto final apresentado em cumprimento às normas
do Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ,
como parte dos requisitos para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica

Profa. Orientadora: Doina Mariana Banea

**Rio de Janeiro
Novembro de 2018**

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

Q3 Queiroz, Henrique Fernandes Medeiros de
Análise de juntas coladas de compósitos de fibras naturais /
Henrique Fernandes Medeiros de Queiroz, Dayane Velloso.—2018.
xiii, 91f. + anexos : il. (algumas color.) , graf. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.

Bibliografia : f. 90-91

Orientadora : Doina Mariana Banea

1. Engenharia mecânica. 2. Juntas (Engenharia). 3. Materiais
compostos. 4. Fibras. 5. Adesivos. I. Velloso, Dayane. II. Banea,
Doina Mariana (Orient.). III. Título.

CDD 621

Agradecimentos

Agradecemos, primeiramente, a Deus por ser fonte de força ao longo de toda essa jornada; aos nossos familiares, por toda ajuda e compreensão nos momentos de ausência. Agradecemos a nossa professora e orientadora Doina Mariana Banea por sua dedicação, paciência, por todos os conhecimentos transferidos e por acompanhar de forma tão presente o desenvolvimento do nosso projeto. Aos amigos Rosemere Lima, Daniel Kawasaki, Jorge Neto, Brenno Duarte, Alexandre Luiz Pereira e finalmente Hiron Akira por todo o suporte, ensinamentos e por estarem sempre dispostos a nos ajudar; e agradecemos também a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste projeto.

Resumo

A utilização de compósitos reforçados com fibras naturais na indústria é promissora. Além de trazer benefícios como a diminuição do custo de produção, e um menor consumo de energia devido à redução de peso nas estruturas; os compósitos de fibras naturais causam menor impacto ao meio ambiente, ou seja, são uma alternativa correta e barata em comparação a outros materiais. Deste modo, no presente trabalho, foram analisadas juntas de sobreposição simples de compósitos reforçados com fibras sintéticas, fibras naturais e compósitos híbridos, com o objetivo de comparar essas juntas e analisar sua aplicabilidade na indústria automotiva, para fins não estruturais, substituindo materiais que tenham maior custo, causam maior impacto ao meio ambiente e que tenham propriedades similares aos compósitos reforçados com fibras naturais. O adesivo estrutural BETAMATE 2096 e a Resina Epóxi AR260 foram utilizados como adesivo para produzir as juntas coladas. Foram realizados testes de tração, e por meio destes fica evidenciada a superioridade do BETAMATE em todas as juntas ensaiadas. As juntas fibra de vidro apresentaram os melhores resultados. Em relação aos compósitos reforçados com fibras naturais, as juntas de junta reforçadas com fibra de vidro obtiveram os melhores resultados tanto na comparação entre juntas similares quanto na comparação de juntas dissimilares.

Palavras-chave: Juntas, juntas coladas, adesivos, adesão, fibras naturais, compósitos

Abstract

The use of natural fiber reinforced composites in the industry is promising. In addition to bringing benefits such as lower production costs, and lower energy consumption due to weight reduction in structures; natural fiber composites cause less impact to the environment, that is, they are a more environmentally friendly and cheap alternative in comparison to other materials. Thus, in the present work, single lap joints of composites reinforced with synthetic fibers and natural fibers and hybrid composites were analyzed, in order to introduce these types of joints in the automotive industry, for non-structural applications, replacing materials that have a higher cost, cause a greater environmental impact and similar properties to the composites reinforced with natural fibers. The comparison of adhesives: BETAMATE 2096 and Epoxy Resin AR260 was also analyzed. Tension tests were performed on single lap joints with two different adhesives (BETAMATE 2096 and an epoxy resin). The superiority of BETAMATE was evidenced in all tested joints. The glass fiber joints presented the best results overall. In relation to the naturally reinforced composites, the glass reinforced jute obtained the best results both in the similar and dissimilar joint comparisons.

Keywords: Joints, bonded joints, adhesives, adhesion, natural fibres, composites

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO	2
1.2 JUSTIFICATIVA	2
1.3 OBJETIVOS	2
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	3
CAPÍTULO 2.....	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 INTRODUÇÃO	4
2.1.1 <i>Definições de Componentes de uma Junta Colada</i>	5
2.2 A LIGAÇÃO ADESIVA	6
2.2.1 <i>Etapas do Processo de Ligação</i>	6
2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DE JUNTAS COLADAS	7
2.3.1 <i>Vantagens</i>	7
2.3.2 <i>Desvantagens</i>	8
2.4 ADESIVOS.....	8
2.4.1 <i>Adesivos termoendurecíveis</i>	9
2.4.2 <i>Adesivos termoplásticos</i>	10
2.4.3 <i>Adesivos elastômeros</i>	10
2.4.4 <i>Adesivos híbridos</i>	11
2.5 COMPÓSITOS	11
2.5.1 <i>Reforços</i>	11
2.5.2 <i>Fibras Sintéticas</i>	13
2.5.2.1 <i>Fibra de Vidro</i>	13
2.5.2.2 <i>Fibra de Carbono</i>	14
2.5.2.3 <i>Fibra Aramida</i>	15
2.5.3 <i>Fibras Naturais</i>	15
2.5.3.1 <i>Desvantagens das Fibras Naturais</i>	16
2.5.3.2 <i>Organização Estrutural das Fibras Naturais</i>	17
2.5.3.3 <i>Comparação com a Fibra de Vidro</i>	18
2.5.3.4 <i>Juta</i>	19
2.5.3.5 <i>Sisal</i>	19
2.5.3.6 <i>Curauá</i>	20
2.6 MATRIZES	20

2.7 O CARREGAMENTO	22
2.7.1 Tração e compressão	22
2.7.2 Cisalhamento.....	23
2.7.3 Clivagem e arrancamento	24
2.7.4 Tensões térmicas residuais.....	25
2.8 TIPOS DE JUNTAS	26
2.9 MODOS DE RUPTURA.....	27
2.9.1 A Falha Adesiva	27
2.9.2 A Falha Coesiva.....	28
2.9.3 Falha Mista.....	28
2.11 PROCESSO DE ADESÃO	28
2.12 A PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE	29
2.12.1 Preparação de materiais metálicos.....	30
2.12.2 Preparação de compósitos	30
2.13 ENSAIOS	30
2.13.1 Ensaio de tração	31
CAPÍTULO 3.....	32
MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
3.1 RESINA	32
3.2 ADESIVOS.....	33
3.3 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS.....	34
3.3.1 Tratamento Alcalino	37
3.3.2 Manufatura dos Compósitos	38
3.3.3 Corte	42
3.4 COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS SINTÉTICAS.....	42
3.4.1 Fibra de Vidro	42
3.4.2 Fibra de Carbono	43
3.5 PREPARO DE SUPERFÍCIE	43
3.6 MOLDE	44
3.7 FABRICAÇÃO DAS JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES	45
3.7.1 Plano de Fabricação.....	45
3.7.2 Geometria da Junta	46
3.7.3 Montagem do Molde	46
3.7.4 Fabricação da Junta	47
3.7.5 Cura.....	48
3.8 ENSAIOS	49
CAPÍTULO 4.....	51

RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1 RESULTADOS.....	51
4.2 DISCUSSÃO.....	54
4.2.1 <i>BETAMATE 2096</i>	54
4.2.1.1 Juntas Coladas de Compósitos Reforçados com Fibras Sintéticas Similares.....	54
4.2.1.2 Juntas Coladas de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais (Híbridos).....	55
4.2.1.3 Juntas Coladas de Compósitos Reforçadas com Fibras Naturais e Sintéticas (Dissimilares).....	55
4.2.1.4 Juntas Coladas de Compósitos Reforçadas com Fibras Naturais Alcalinizadas.....	56
4.2.2 <i>RESINA AR260</i>	56
4.2.2.1 Juntas Coladas de Compósitos Reforçados com Fibras Sintéticas Similares.....	56
4.2.2.2 Juntas Coladas de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais (Híbridos).....	57
4.2.2.3 Juntas Coladas de Compósitos Reforçadas com Fibras Naturais e Sintéticas (Dissimilares).....	57
4.2.2.4 Juntas Coladas de Compósitos Reforçadas com Fibras Naturais Alcalinizadas.....	57
4.3 MODOS DE RUPTURA.....	57
4.3.1 <i>Juntas Sintéticas Similares</i>	59
4.3.1.1 FV-FV.....	59
4.3.1.2 FC-FC.....	62
4.3.1.3 Comparação do grupo de juntas sintéticas similares.....	66
4.3.2 <i>Juntas Naturais Híbridas Similares</i>	66
4.3.2.1 SV-SV.....	67
4.3.2.2 JV-JV.....	71
4.3.2.3 Comparação do grupo de juntas naturais híbridas similares.....	75
4.3.3 <i>Juntas Dissimilares</i>	75
4.3.3.1 SV-FC.....	75
4.3.3.2 JV-FC.....	80
4.3.3.3 Comparação do grupo de juntas dissimilares.....	84
4.3.4 <i>Juntas Naturais</i>	85
4.3.4.1 S-S.....	85
4.3.4.2 Comparação do grupo de juntas naturais.....	88
CAPÍTULO 5.....	89
CONCLUSÕES	89
TRABALHOS FUTUROS	90
REFERÊNCIAS	91
ANEXO A.....	93
ANEXO B	98

Lista de Figuras

Figura 1: Áreas envolvidas [2].	4
Figura 2: Esquema de uma junta colada [2].	5
Figura 3: Adesão e coesão na zona de colagem [5].	6
Figura 4: Comparação de distribuição de esforços em uma junta colada e rebitada [2].	7
Figura 5: Características específicas de acordo com o serviço [6].	12
Figura 6: Classificação segundo o reforço [6].	12
Figura 7: Curva característica do módulo de elasticidade em função da temperatura para polímeros, modificado [6].	22
Figura 8: Modos de carregamento de uma junta colada [2].	22
Figura 9: Comparação entre tensões resultantes por força axial e não axial em uma junta de topo [2].	23
Figura 10: Distribuição de tensão numa junta de sobreposição [2].	24
Figura 11: Representação da diferença entre solicitações [2].	25
Figura 12: Tensões térmicas residuais. a) Junta não afetada por tensões. b) Junta com tensão térmica c) Carga de tensão assimétrica presente no adesivo; modificado [12].	26
Figura 13: Tipos principais de juntas [2].	27
Figura 14: Modos de ruptura do adesivo a) Adesiva b) Coesiva c) Mista [5].	27
Figura 15: Esquema de processos de adesão de juntas coladas, modificado [13].	29
Figura 16: Máquina utilizada para a realização dos experimentos no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES), CEFET-RJ.	31
Figura 17: Resina e endurecedor utilizados.	33
Figura 18: Estrutura da trama bidirecional [3].	34
Figura 19: Manta bidirecional de Juta utilizada.	35
Figura 20: Manta bidirecional de Sisal utilizada.	35
Figura 21: Fibra de Vidro utilizada como reforço.	36
Figura 22: Mantas de Sisal/FV.	36
Figura 23: Manta de Juta/FV.	37
Figura 24: Mantas sendo tratadas.	38
Figura 25: Mantas sendo secadas no forno.	38
Figura 26: Balança utilizada.	39
Figura 27: Processo de homogeneização da resina e endurecedor.	39
Figura 28: EPI utilizado.	40

Figura 29: Desmoldante utilizado.....	40
Figura 30: Processo de <i>hand lay up</i> do compósito Sisal/FV.....	41
Figura 31: Após a cura.	41
Figura 32: Placas manufaturadas. a) Juta-Fibra de Vidro, b) Sisal-Fibra de Vidro, c) Sisal-Sisal Alcalinizado.....	41
Figura 33: Substratos cortados. a) Juta, b) Sisal.	42
Figura 34: Substratos de Fibra de Vidro utilizados.	43
Figura 35: Substratos de Fibra de Carbono utilizados.	43
Figura 36: Substratos de Fibra de Vidro após abrasão superficial.	44
Figura 37: Molde utilizado na fabricação das juntas coladas.....	44
Figura 38: Estrutura da junta.	46
Figura 39: Ferramentas utilizadas na manufatura das juntas. a) Espaçadores de 0.2 mm. b) Adesivo BETAMATE 2096 e aplicador. c) Espaçadores de Teflon. Todas ferramentas fornecidas pelo LADES, CEFET/RJ.	47
Figura 40: Posicionamento dos substratos com os espaçadores de Teflon no molde.....	47
Figura 41: Juntas de FV-FV no molde com o adesivo BETAMATE 2096.....	48
Figura 42: Prensa hidráulica aquecida utilizada.	48
Figura 43: Juntas de SV-SV (B) curadas e identificadas.	49
Figura 44: Junta de SV-SV sendo ensaiada.....	50
Figura 45: Gráfico Força-Deslocamento para BETAMATE 2096.....	51
Figura 46:Gráfico Força-Deslocamento para Resina Epóxi AR260.	52
Figura 47: Comparação geral dos dados.	52
Figura 48: Lupa utilizada.	59
Figura 49: Foto das superfícies de ruptura das juntas coladas de FV-FV.....	60
Figura 50: Detalhe da superfície de ruptura da FV-FV para BETAMATE.....	60
Figura 51: Detalhe da superfície de ruptura da FV-FV para resina.....	61
Figura 52: Foto aumentada da superfície de ruptura da FV-FV para BETAMATE.	61
Figura 53: Foto aumentada da superfície de ruptura da FV-FV para resina.	62
Figura 54: Foto das superfícies de ruptura das juntas coladas de FC-FC.	62
Figura 55: Detalhe da superfície de ruptura da FC-FC para BETAMATE (CP 1).	63
Figura 56: Detalhe da superfície de ruptura da FC-FC para BETAMATE (CP 2).	63
Figura 57: Detalhe da superfície de ruptura da FC-FC para BETAMATE (CP 3).	64
Figura 58: Foto aumentada da superfície de ruptura de FC para BETAMATE com detalhe da falha.	64

Figura 59: Detalhe da superfície de ruptura da FC-FC para resina (CP 1).....	65
Figura 60: Foto aumentada da superfície de ruptura de FC para resina com detalhe da falha.....	65
Figura 60: Detalhe da superfície de ruptura da FC-FC para resina (CP 2).....	66
Figura 62: Comparação dos dados do grupo de juntas sintéticas similares.	66
Figura 63: Foto das superfícies de ruptura das juntas coladas de SV-SV.....	67
Figura 64: Detalhe da superfície de ruptura do SV-SV para BETAMATE (CP 1).....	68
Figura 65: Detalhe da superfície de ruptura do SV-SV para BETAMATE (CP 2).....	68
Figura 66: Detalhe da superfície de ruptura do SV-SV para BETAMATE (CP 3).....	69
Figura 67: Foto aumentada da superfície de ruptura do SV-SV para BETAMATE (CP 2).....	69
Figura 67: Detalhe da superfície de ruptura do SV-SV para resina (CP 2).	70
Figura 68: Detalhe da superfície de ruptura do SV-SV para resina (CP 3).	70
Figura 70: Foto aumentada da superfície de ruptura do SV-SV para resina.	71
Figura 71: Foto aumentada do SV para resina com detalhe da fibra de reforço.	71
Figura 72: Foto das superfícies de ruptura das juntas coladas de JV-JV.	72
Figura 73: Detalhe da superfície de ruptura da JV-JV para BETAMATE.	72
Figura 74: Detalhe da superfície de ruptura da JV-JV para resina.	72
Figura 75: Foto aumentada da superfície de ruptura da JV-JV para BETAMATE.....	73
Figura 76: Foto aumentada da superfície de ruptura da JV-JV para resina.	73
Figura 77: Detalhe da quebra do substrato de JV-JV para BETAMATE.	74
Figura 78: Detalhe da quebra de substrato de JV-JV para resina.	74
Figura 79: Comparação dos dados do grupo de juntas naturais híbridas similares.	75
Figura 80: Foto das superfícies de ruptura das juntas coladas de SV-FC para BETAMATE.	76
Figura 81: Foto das superfícies de ruptura das juntas coladas de SV-FC para resina.	76
Figura 82: Detalhe da superfície de ruptura do SV-FC para BETAMATE (CP 3).....	77
Figura 83: Foto aumentada da área de ruptura do SV-FC com detalhe do modo de ruptura para o BETAMATE.	77
Figura 84: Detalhe da superfície de ruptura do SV-FC para resina (CP 2).....	78
Figura 85: Foto aumentada da área de ruptura do SV-FC com detalhe do modo de ruptura para resina.	78
Figura 86: Foto aumentada da superfície de ruptura do SV-FC para BETAMATE.	79
Figura 87: Foto aumentada da superfície de ruptura do SV-FC para resina.	79
Figura 88: Foto das superfícies de ruptura das juntas coladas de JV-FC para BETAMATE.	80
Figura 89: Foto das superfícies de ruptura das juntas coladas de JV-FC para resina.	80
Figura 90: Detalhe da superfície de ruptura da JV-FC para BETAMATE (CP 1).....	81

Figura 91: Foto aumentada da superfície de ruptura da JV-FV com detalhe do modo de ruptura para BETAMATE.....	81
Figura 92: Detalhe da superfície de ruptura da JV-FC para resina (CP 2).....	82
Figura 93: Foto aumentada da superfície de ruptura da JV-FV com detalhe do modo de ruptura para resina.....	82
Figura 94: Foto aumentada da superfície de ruptura da JV-FC para BETAMATE.	83
Figura 95: Foto aumentada da superfície de ruptura da JV-FC para resina.	83
Figura 96: Comparação dos dados do grupo de juntas dissimilares.	84
Figura 97: Foto das superfícies de ruptura das juntas coladas de S-S.	85
Figura 98: Detalhe da quebra dos substratos de S-S para BETAMATE.	85
Figura 99: Foto aumentada da quebra do substrato de S-S para BETAMATE.....	86
Figura 100: Detalhe da quebra dos substratos de S-S para a resina.	86
Figura 101: Detalhe da superfície de ruptura do S-S para resina (CP 1).	87
Figura 102: Detalhe da superfície de ruptura da S-S para resina (CP 2).	87
Figura 103: Foto aumentada da superfície de ruptura da S-S com detalhe do modo de ruptura para resina.	87
Figura 104: Comparação dos dados do grupo de juntas naturais.	88

Lista de Tabelas

Tabela 1: Propriedades do substrato de Fibra de Carbono utilizada [7].	15
Tabela 2: Comparação das propriedades das fibras naturais e a fibra de vidro [6] [8].	18
Tabela 3: Conclusões da comparação [6].	18
Tabela 4: Propriedades mecânicas da resina utilizada [3].	33
Tabela 5: Propriedades do adesivo BETAMATE 2096.	34
Tabela 6: Juntas fabricadas.	45
Tabela 7: Média de espessuras dos substratos utilizados.	46
Tabela 8: Força de ruptura em função dos substratos utilizados.	53
Tabela 9: Comparação entre BETAMATE e resina em melhoria de resistência em todas as juntas.	53
Tabela 10: Comparação entre juntas sintéticas e naturais.	53

Lista de Abreviaturas e Siglas

- CET – Coeficiente de Expansão Térmica
- CFRP – Carbon Reinforced Polymer
- ΔT – Diferencial de Temperatura
- T_O - Temperatura de Cura
- T_{SF} - Temperatura Live de Tensões
- T_g - Temperatura de Transição Vítrea
- T_m - Temperatura de Fusão
- MFLE - Mecânica da Fratura Linear Elástica
- MFEP - Mecânica da Fratura Elasto-Plástica
- K - Fator de Intensidade de Tensão
- K_I - Fator de Intensidade de Tensão de Modo I
- β - Fator de Modificação da Intensidade da Tensão
- σ - Tensão de Carregamento
- a – Comprimento Inicial da Trinca
- K_{Ic} - Fator de Intensidade de Tensão Crítico Modo I
- MZC – Modelo de Zona Coesiva
- T - Tração
- T_{max} - Tração máxima
- δ - Deslocamento Relativo
- δ_c - Deslocamento Relativo na Tração Máxima
- G – Taxa de Liberação de Energia
- G_c - Taxa de Liberação de Energia Crítica
- DCB - Double Cantilever Beam
- τ – Tensão Média de Corte
- F_{max} - Força Máxima
- b – Largura da Junta
- l – Comprimento de Sobreposição

Capítulo 1

Introdução

Historicamente, materiais compósitos vêm sendo usados desde a antiguidade para todo tipo de aplicação: desde paredes de cabanas (lama) até madeira laminada e colada pelos Mesopotâmios [1].

Desde a segunda guerra mundial, movida principalmente pela indústria aeronáutica, a pesquisa de materiais compósitos e juntas adesivas vem sendo ativamente desenvolvida. As melhorias contínuas nessas áreas em conjunto vêm gerando estruturas mais leves, resistentes e baratas.

Compósitos são materiais constituídos por um ou mais materiais de fases distintas. Os mais comuns são compostos de: reforço e matriz. A fibra ou reforço proporciona a força e a rigidez para suportar as cargas estruturais, enquanto a matriz mantém a estabilidade geométrica e a orientação das fibras.

Estes constituintes possuem características físicas e químicas individuais, porém uma vez unidos, eles geram um novo material com características melhores cuja obtenção seria impossível sozinhos [2].

Dentro deste leque de materiais, existe a possibilidade de tanto a fibra ou a matriz ou até ambos, serem de natureza orgânica ou inorgânica.

O setor de aplicação de fibras naturais vem ganhando atenção tanto por pesquisadores como a indústria em geral por possuírem várias vantagens em relação as fibras sintéticas. Estas podem ser subdivididas em: animal, mineral e celulose.

Entre estas, as fibras de celulose possuem menor níveis de toxicidade, logo, se destacam. Atualmente vários tipos de fibras naturais foram estudados, incluindo: Juta, sisal e rami [3].

Por terem sua origem de forma natural elas apresentam um custo muito inferior e uma fabricação muito menos complexa. Como consequência apresentam uma menor necessidade energética para fabricação e reciclagem, em média menos da metade das sintéticas. Além disso eles apresentam boa manutenção e são biodegradáveis. [4].

1.1 Motivação

Uma motivação importante para o presente trabalho se encontra no contínuo esforço do estudo de juntas coladas para a melhoria das tecnologias de modo a tornar este tipo de fabricação cada vez mais viável e confiável sem o comprometimento da eficiência de tais juntas em comparação com ligações mecânicas mais convencionais. Um outro fator relevante é que compósitos de fibras naturais, quando comparadas com as fibras sintéticas, apresentam como principais vantagens: um menor impacto ambiental, menor gasto energético para sua produção, custo inferior, apresentam baixa toxicidade, além de serem biodegradáveis e renováveis.

Atualmente, a utilização de compósitos de fibras naturais tem apresentado relevante crescimento nas indústrias automotivas, esportiva e de defesa. Sendo assim, torna-se importante o estudo da aplicação de juntas coladas com substratos de compósitos de fibras naturais.

1.2 Justificativa

As indústrias hoje em dia estão cada vez mais interessadas na pesquisa de juntas coladas e cada vez mais mostrando interesse também nos compósitos de fibras naturais. Através da ligação adesiva de juntas com substratos biodegradáveis o consumo energético diminui e o impacto ambiental se torna cada vez menor o que é uma preocupação constante de todos os setores industriais. Fora isto temos também, por intermédio do adesivo, a capacidade de unir juntas de materiais dissimilares, algo que traz muitas melhorias em comparação com estruturas comuns. Estas serão discutidas mais a fundo neste trabalho.

1.3 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é investigar a influência de substratos distintos tanto de compósitos reforçados por fibras naturais quanto sintéticas e compósitos naturais reforçados intralaminarmente por fibras sintéticas assim como a comparação dos seguintes adesivos: BETAMATE 2096 e Resina AR260 na resistência de juntas de modo a averiguar a utilização destes na indústria automobilística de modo a substituir os sintéticos em aplicações não estruturais.

1.4 Organização do Trabalho

O trabalho foi dividido em 5 capítulos, sendo eles:

Capítulo 1: Apresentação da introdução e objetivos específicos assim como os tipos de ensaios experimentais.

Capítulo 2: Foi realizada uma pesquisa abrangente na literatura disponível sobre os aspectos relevantes ao tópico de juntas coladas e compósitos de fibras naturais assim como ensaios e implicações.

Capítulo 3: Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados para substratos e adesivos, as geometrias dos substratos e juntas e finalmente a fabricação das juntas coladas para a análise experimental.

Capítulo 4: Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais em termos de gráficos e tabelas de valores numéricos assim como a documentação fotográfica. Baseado nestes resultados apresenta-se também a discussão e explicação dos mesmos.

Capítulo 5: Neste capítulo são apresentadas as conclusões finais da pesquisa assim como sugestões de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Introdução

O projeto de uma junta colada depende totalmente de um estudo detalhado de seus componentes. A indústria aeronáutica foi a principal razão pela qual as juntas coladas estruturais foram desenvolvidas. Durante a segunda guerra mundial grandes avanços foram obtidos nos adesivos e por consequência vários aspectos de uma junta colada foram pesquisados e melhorados.

Através dos esforços iniciais pela indústria aeronáutica, outras indústrias iniciaram aplicações de juntas coladas afim de diminuir peso, custo e tempo de produtividade. A indústria de automóveis é um ótimo exemplo de aplicações diversificadas desta tecnologia com o propósito de diminuir peso e alcançar velocidades maiores com consumos menores.

Por fim vale ressaltar que a ciência da adesão abrange um enorme leque de conhecimento e pluridisciplinaridade de modo que áreas diferentes se sobrepõem. Esta revisão terá como objetivo a apresentação de fatores de grande importância, porém é necessário denotar a impossibilidade de tratar de todos os temas que influenciam na ciência da adesão como um todo. A interação das áreas envolvidas pode ser vista na Figura 1.

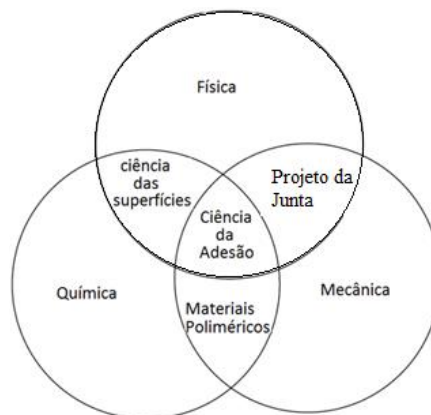


Figura 1: Áreas envolvidas [2].

2.1.1 Definições de Componentes de uma Junta Colada

Apesar dos adesivos terem sua utilização desde a antiguidade, seu desenvolvimento na área industrial só vem avançando nos últimos 80 anos. Isto se dá aos fatos de os adesivos modernos serem baseados em polímeros sintéticos cujo desenvolvimento teve seu início na década de 40.

Temos as seguintes definições gerais:

- **Adesivo:** Material de natureza polimérica aplicado a superfícies com o intuito de ligá-las e posteriormente resistir a sua separação;
- **Adesivo Estrutural:** Adesivo que é capaz de resistir a forças consideráveis (~ 7 MPa) e por consequência é responsável pela resistência e a rigidez de uma estrutura;
- **Substrato:** Material a ser ligado, também chamado de aderente uma vez que a ligação foi feita;
- **Primário:** Substância utilizada por vezes, de aplicação direta na superfície, com o intuito de melhorar a adesão ou proteger as superfícies até a aplicação do adesivo;
- **Interfase:** Região entre o adesivo e o aderente. Região fina entre os componentes mencionados que possui características físicas e químicas diferentes dos mesmos. Região de importância crítica na determinação correta de uma ligação adesiva;
- **Interface ou camada limite:** Plano de contato entre as superfícies de dois materiais. Está contida na interfase e tem sua utilidade na descrição de energia superficial.
- **Junta:** Conjunto final de adesivo, aderentes, primário (se utilizado) e todas interfases associadas [2];

A Figura 2 apresenta o esquema final de uma junta colada.

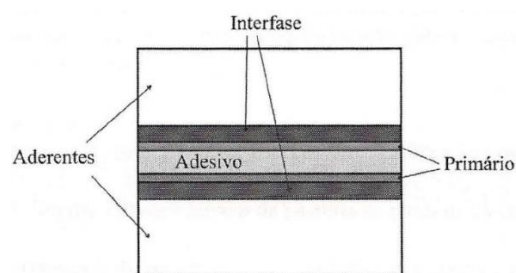


Figura 2: Esquema de uma junta colada [2].

2.2 A Ligação Adesiva

A compreensão básica deste fenômeno exige a definição de dois conceitos importantes:

- **Adesão:** É a atração entre duas substâncias resultante das forças intermoleculares que se estabelecem entre elas;
- **Coesão:** Envolve forças intermoleculares dentro de uma substância [2];

A Figura 3 apresenta uma visualização destes fenômenos.

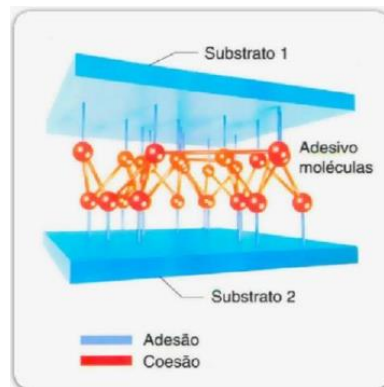


Figura 3: Adesão e coesão na zona de colagem [5].

2.2.1 Etapas do Processo de Ligação

Para a obtenção de uma boa ligação adesiva, é necessário seguir os seguintes passos:

- Selecionar o adesivo correto;
- Projetar a junta;
- Preparo da superfície;
- Processo de fabricação;
- Controle do processo (ensaios destrutivos e não destrutivos) [2];

2.3 Vantagens e desvantagens de juntas coladas

Existem certas vantagens e desvantagens associadas a uma ligação através de um adesivo em comparação com métodos tradicionais de ligações mecânicas. As seções a seguir discutirão as principais.

2.3.1 Vantagens

As vantagens principais são as seguintes:

- **Distribuição de tensões mais uniforme:** Através do adesivo as tensões são mais uniformemente distribuídas ao longo de toda área ligada, o que possibilita um aumento na rigidez e na distribuição de carga e logo é possível uma redução de peso e por consequência, de custo. A Figura 4 ilustra este efeito em comparação com uma junta rebitada e podemos ver a concentração de tensões nesta. Conclui-se também que a junta rebitada possui menor resistência a fadiga;

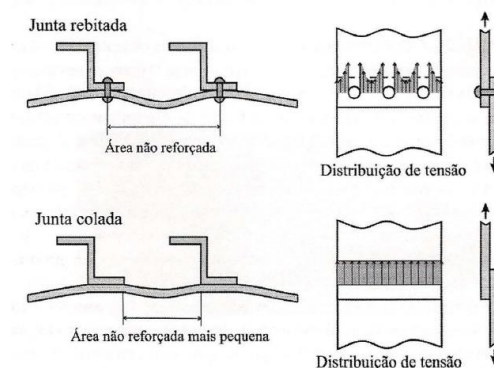


Figura 4: Comparação de distribuição de esforços em uma junta colada e rebitada [2].

- **Amortecimento de vibrações:** Absorção parcial de tensões, o que permite um aumento a resistência a fadiga dos componentes ligados;
- **Ligação de materiais diferentes:** É possível a ligação de materiais distintos e com coeficientes de expansão térmicos diferentes pois a flexibilidade do adesivo irá compensar a diferença;
- **Estruturas com contornos regulares:** Possibilidade de estruturas com superfícies regulares sem interferências de rebites ou soldas [2];

2.3.2 Desvantagens

As desvantagens principais são as seguintes:

- **Projeto:** É vital um projeto cuidadoso para evitar ao máximo as forças de arrancamento, clivagem e impacto;
- **Condições ambientais:** Apresentam limitada resistência a condições ambientais extremas, com ênfase na temperatura e umidade, isto devido à natureza polimérica do adesivo;
- **Tempo de cura:** A ligação não é instantânea, necessitando comumente de ferramentas de fixação para impedir o movimento das peças durante o processo de cura. Isto pode acarretar em um aumento de custo;
- **Temperatura de cura:** É comum que os adesivos necessitem de uma temperatura específica para a cura e isto acarreta em equipamentos especiais como fornos e prensas e também aumenta o custo;
- **Preparo da superfície:** É vital o bom preparo superficial dos substratos a serem ligados. Estes podem ser de natureza mecânica ou química. Este tópico será explorado mais a fundo neste trabalho;
- **Controle de qualidade:** O controle de qualidade é mais difícil pois a maioria das falhas que devem ser identificadas são invisíveis pois estão dentro da estrutura adesiva. Logo este depende do desenvolvimento contínuo de técnicas não destrutivas adequadas [2];

2.4 Adesivos

A escolha do adesivo correto para o projeto de junta é claramente vital. Os adesivos em si fazem parte de uma gama extensa e logo se faz necessário uma classificação específica. A mais ampla classificação se dá com a diferença entre adesivos sintéticos e naturais. Os sintéticos têm sua origem na indústria enquanto os naturais são fabricados de subprodutos animais ou agrícolas. Esta classificação inicial embora útil, se torna rapidamente muito abrangente, logo hoje em dia os adesivos são classificados adicionalmente de acordo com sua função, composição química, modo de aplicação, forma física, custo e aplicação.

A classificação funcional define os adesivos entre serem estruturais ou não. Os adesivos estruturais apresentam elevado desempenho atuando sob cargas elevadas.

Tipicamente recebem esta definição os adesivos que apresentam resistência ao cisalhamento superior a faixa de 5 a 10 MPa e uma boa resistência em meios ambientais comuns. Sua função principal é manter as estruturas ligadas sob cargas elevadas.

As formas físicas dos adesivos são variadas. Comumente estas são: várias partes (sem solvente), uma parte sem solvente (líquido ou pasta), uma parte em solução (líquido) e sólido (pó, fita, filme, etc.).

Existe também a definição por modo de cura (solidificação). Esta pode ocorrer dos seguintes modos: por reação química (incluindo reação com o endurecedor ou com energia externa tal como calor, radiação, catalisador de superfície etc.), por perda de solvente, por perda de água ou por arrefecimento a partir do estado fundido. O modo de cura pode ser um fator muito importante no processo de seleção pois ele pode limitar significativamente as características do adesivo para uma aplicação particular.

A classificação dos adesivos segundo a sua composição química descreve adesivos como sendo termoplásticos, termoendurecíveis, elastómeros ou híbridos. Geralmente a composição química está subdividida em tipos ou famílias dentro de cada grupo, tais como os epóxis, os uretanos, o Neoprene e os cianoacrilatos [2].

2.4.1 Adesivos termoendurecíveis

Os adesivos termoendurecíveis tem como característica principal a impossibilidade de serem aquecidos e amolecidos repetidamente após a sua cura inicial. Uma vez completamente curados eles podem ser amolecidos até certo ponto, porém não podem ser refundidos e restaurados ao estado pré-cura. Eles são não fundíveis e insolúveis. Após uma certa temperatura esses adesivos sofrem degradação e enfraquecimento devido a oxidação e quebras nas cadeias moleculares. A cura ocorre por uma reação química irreversível a temperatura ambiente ou a temperaturas elevadas dependendo do tipo do adesivo. A reticulação que ocorre na reação de cura é devida à ligação de dois polímeros lineares, resultando numa estrutura tridimensional rígida [2].

2.4.2 Adesivos termoplásticos

Os adesivos termoplásticos diferem dos termoendurecíveis por não curarem com calor. Originalmente formados por polímeros sólidos que amolecem ou fundem ao serem aquecidos. Ao passo que as moléculas não curam numa estrutura reticulada, eles podem ser fundidos com aplicação de calor e aplicados sobre um substrato. A repetida exposição a altas temperaturas pode causar dano a estrutura molecular por oxidação o que limita o número de ciclos térmicos. Uma vez aplicado os substratos são unidos e a ligação ocorre por arrefecimento. Sua temperatura de serviço é mais limitada que os termoendurecíveis. Embora alguns destes adesivos apresentem uma excelente resistência ao corte a temperaturas moderadas, estes materiais não são reticulados e tendem a fluir sob baixas temperaturas. Esta deformação a longo prazo pode ocorrer a temperatura ambiente ou a temperaturas mais baixas dependendo do adesivo. Esta característica é muitas vezes a razão pela qual estes adesivos não são utilizados em aplicações estruturais. Finalmente, estes adesivos não apresentam uma resistência a solventes e agentes químicos tão boa quanto os termoendurecíveis [2].

2.4.3 Adesivos elastômeros

Os adesivos elastômeros apresentam uma classificação própria por causa de suas características reológicas únicas. Baseados em polímeros elastômeros sintéticos ou naturais, eles têm grande tenacidade e capacidade de deformação, assim, são capazes de elevados graus de deformação quando tracionados ou comprimidos, retomando seu comprimento inicial uma vez que a carga é removida. Devido a sua boa absorção energética eles atribuem uma boa resistência a juntas submetidas a carregamentos não uniformes. Estes adesivos podem ser termoendurecíveis ou termoplásticos. Devido a sua alta viscoelasticidade, os adesivos elastômeros possuem alto grau de deformação, baixo módulo de elasticidade e elevada tenacidade. Logo, eles apresentam uma boa resistência ao arrancamento e boa flexibilidade o que permite ligar substratos com coeficientes de expansão térmica (CET) diferentes. Também são utilizados como vedantes, para amortecimento de vibrações e isolamento sonoro [2].

2.4.4 Adesivos híbridos

Os adesivos híbridos são o resultado de uma combinação das resinas termoendurecíveis, termoplásticas e elastômeras em um único adesivo. O objetivo foi extrair o melhor de cada tipo. De modo geral, adesivos rígidos e frágeis para altas temperaturas são combinados com um adesivo elastômero ou termoplástico flexível e tenaz para melhorar a resistência ao arrancamento e a capacidade de absorver energia. Recentemente as propriedades de tenacidade de materiais termoendurecíveis foram melhoradas sem reduzir substancialmente sua resistência a altas temperaturas. Esses sistemas consistem em híbridos reativos, onde dois componentes líquidos reagem, e híbridos de fase dispersa, onde um agente flexibilizante é incorporado na matriz com partículas discretas. Nos sistemas híbridos reativos, o adesivo flexibilizante reage com o adesivo base originando flexibilidade e tenacidade sem redução significativa de outras propriedades. Um exemplo típico deste tipo de sistema é o adesivo epóxi - uretano.

Um método alternativo de melhorar a tenacidade é introduzir uma microestrutura específica no adesivo. Adesivos híbridos têm resistências elevadas ao arrancamento, impacto e cisalhamento sem sacrificar a resistência química e a resistência a altas temperaturas. Têm também a capacidade para ligar substratos oleosos [2].

2.5 Compósitos

2.5.1 Reforços

O reforço constitui o elemento fundamentalmente estrutural em um compósito pois estabelece a resistência mecânica do mesmo. Logo é vital a escolha correta do reforço de modo a estar de acordo com as características de serviço como visto na Figura 5 [6].

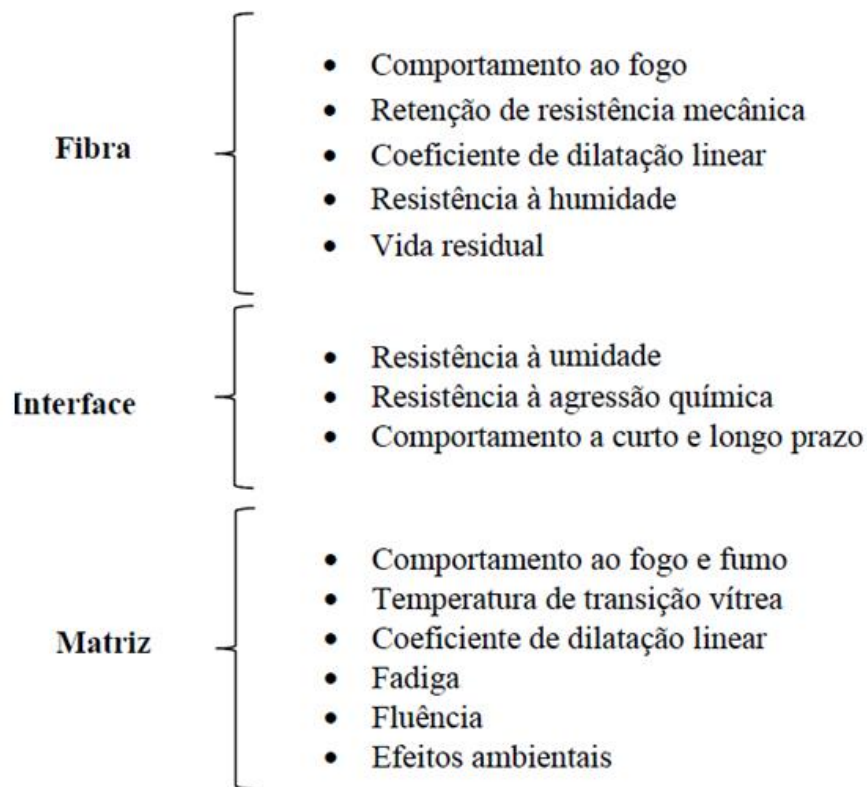


Figura 5: Características específicas de acordo com o serviço [6].

As fibras constituintes do reforço do compósito são chamadas de fase dispersa (para compósitos de uma única camada) e podem ser de tipos variados, visto na Figura 6 [6].

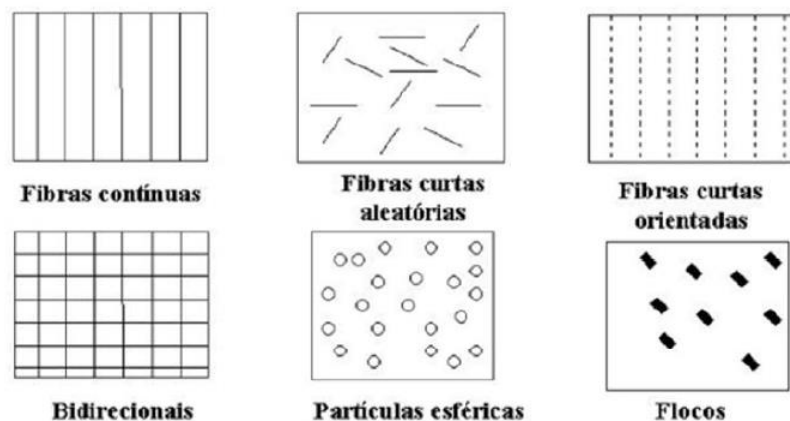


Figura 6: Classificação segundo o reforço [6].

2.5.2 Fibras Sintéticas

Segue uma apresentação pouco aprofundada dos tipos mais comuns de fibras sintéticas visto que este não é o objetivo principal deste trabalho.

2.5.2.1 Fibra de Vidro

Inicialmente desenvolvidas para otimizar o peso específico das fibras para mercados particulares como placas de circuito impressas que requerem baixa condutividade elétrica por exemplo. As características principais da fibra de vidro são:

- **Corrosão:** Geralmente boa, resultando no uso extensivo em aplicações como a marinha, offshore, caixas de pontes, válvulas de pressão químicas, e transporte de líquidos (tubulações);
- **Baixo peso:** Pesa apenas um quarto do peso do aço, possuindo boas aplicações na indústria automotiva e aeronáutica;
- **Resistência:** Geralmente boa, sendo utilizada em aplicações marítimas como botes salva-vidas. É possível proporcionar valores altos de energia específica para uso em aplicações de absorção de energia, por exemplo nos “*crash tests*” efetuados pelas empresas da indústria automobilística;
- **Liberdade de processo:** Vasta escolha de processos para obtenção de fibras diferentes que vão de encontro a diferentes necessidades em relação ao volume de produção, tamanho do produto, performance, e requisitos de qualidade;
- **Liberdade de forma:** possibilidade de produção de uma vasta gama de formas, incluindo curvatura dupla, proporciona flexibilidade no design e consolidação do produto;

Estas fibras são, portanto, largamente utilizadas e possuem uma razão de qualidade/preço competitiva. No entanto, mesmo sendo uma fibra tão abrangente no mercado, em situações com uma solicitação estrutural menor os compósitos de fibras naturais fariam o trabalho exemplarmente com um custo reduzido [6].

2.5.2.2 Fibra de Carbono

A mais utilizada em aplicações de elevada solitação estrutural como nas indústrias aeronáutica, aeroespacial e automobilística (em casos especiais de alta performance).

Inicialmente distribuída em 2 grupos:

- **Fibra de carbono:** Percentual de carbono entre 80% e 95%;
- **Fibra de Grafite:** Percentual de carbono chegando a 99% [6].

Segue a classificação das fibras de carbono:

- **UHM (*ultra high modulus*):** Para fibras com módulos superiores a 500 [GPa];
- **HM (*high modulus*):** Para fibras com módulos superiores a 300 [GPa] e razão resistência mecânica/módulo em tração inferior a 1%;
- **IM (*intermediate modulus*):** para fibras com módulos até 300 [GPa] e razão resistência mecânica/módulo de cerca de 1%;
- **Fibras de baixo módulo (*low modulus*):** Para fibras com valores inferiores a 100 [GPa];
- **HS (*high strength*):** Para fibras de resistência à tração superiores a 3 [GPa] e razão resistência/rigidez entre 0,015 e 0,02;

As propriedades ortotrópicas do substrato de Fibra de Carbono utilizadas neste trabalho podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades do substrato de Fibra de Carbono utilizada [7].

Propriedade	Valor
Módulo de Young na direção 1 [GPa]	109
Módulo de Young na direção 2 [GPa]	8,82
Módulo de Young na direção 3 [GPa]	8,82
Módulo de Cisalhamento na direção 1 [GPa]	4,315
Módulo de Cisalhamento na direção 2 [GPa]	4,315
Módulo de Cisalhamento na direção 3 [GPa]	3,2
Coefficiente de Poisson 1-2	0,342
Coefficiente de Poisson 2-3	0,342
Coefficiente de Poisson 3-3	0,38

2.5.2.3 Fibra Aramida

Comercializadas pela primeira vez pela empresa *DuPont*, introduzidas no mercado como fibras de alta resistência e alto módulo baseadas numa ligação de poliamidas aromáticas. Ao serem introduzidas tinham como distinção de outras fibras o fato de terem elevada resistência na relação rigidez/peso e apresentando excelente resistência química, mecânica boa resistência ao impacto e à fadiga, boa capacidade de amortecimento de vibrações, boas capacidades dielétricas, elevadas resistências a solventes orgânicos, combustíveis e lubrificantes tornou-se forte candidata para utilização em compósitos de alta performance.

Utilizados na indústria balística, especificamente em coletes a prova de balas e blindagens devido a sua alta capacidade de absorção energética. Como desvantagens temos: baixa resistência a compressão e flexão bem como elevada sensibilidade a corte interlaminar [6].

2.5.3 Fibras Naturais

Com a preocupação sempre crescente das indústrias e sociedades modernas com a poluição e o impacto no meio ambiente, surgiram os compósitos reforçados com fibras naturais que juntamente com uma diminuição no custo da produção trazem a vantagem de terem reforços biodegradáveis.

Seguem algumas vantagens das fibras naturais:

- Natureza não abrasiva;
- Biodegradabilidade (desvantagem em relação às propriedades mecânicas);
- Baixo consumo de energia (na produção e uso devido a baixo peso);
- Baixo custo [6];

2.5.3.1 Desvantagens das Fibras Naturais

Existem algumas desvantagens que atualmente impedem que as fibras naturais tomem o lugar das fibras de vidro, e uma das mais importantes e alvo de muitas pesquisas é a higroscopia destas. Esta propriedade denota a notável capacidade das fibras naturais de absorção de umidade. Esta fraca resistência a umidade das fibras naturais (hidrofílicas) é incompatível com a boa resistência a umidade das matrizes poliméricas (hidrofobia). Esta incompatibilidade se traduz numa fraca ligação entre fibra e matriz, ou seja, a interface.

Para tentar remediar este fato, diversos tratamentos químicos ou físicos são aplicados para conceder ligação, estabilidade dimensional e afinidade adesiva às matrizes poliméricas, como por exemplo:

- Compatibilizadores;
- Tratamentos alcalinos;
- Acetilação;
- Enxerto copolimerização;
- Maleico-anidrido de polipropileno-co-polímero (MAH-PP);

Estes tratamentos têm sido usados para se ultrapassar a incompatibilidade das polaridades superficiais entre fibra (polar) e matriz polimérica (apolar).

A resistência ao impacto das fibras naturais é muito inferior comparada com seu concorrente direto a fibra de vidro. Esta resistência é muito influenciada pela força de ligação entre fibra e matriz. A energia de impacto é dissipada pela delaminação, fratura da fibra e/ou matriz e arrancamento de fibra. A fratura da fibra dissipa menos energia comparado com o arrancamento. A fratura é comum em compósitos com elevada ligação fibra/matriz enquanto o arrancamento é sinal de fraca ligação na interface [6].

2.5.3.2 Organização Estrutural das Fibras Naturais

As fibras naturais podem ser orgânicas ou inorgânicas, ou seja, provenientes de plantas ou animais e provenientes de fibras minerais, respectivamente.

Por exemplo:

- **Orgânicas de Origem Vegetal:** Abacá, Coco, Algodão, Linho, Cânhamo, Juta, Rami e Sisal;
- **Orgânicas de Origem Animal:** Lã de Alpaca, lã de Angorá, pelos de Camelo, pelo de cabra Caxemira, pelo de cabra Angorá, fibra dos casulos de larvas *Silk*, lã de Ovelha;

As fibras naturais de origem vegetal são provenientes de vários elementos ou camadas existentes numa planta:

- **Fibras da entrecasca (provenientes do caule):** Linho, Cânhamo, Juta, *Kenaf*, Rami;
- **Fibras da folha:** Sisal, Abacá, Palmeira;
- **Fibras de semente:** Algodão, Coco, Sumaúma;

Entre as fibras naturais de origem vegetal, as provenientes do caule são as mais amplamente aceitas como as melhores candidatas para se utilizarem como reforços de compósitos devido as suas boas propriedades mecânicas.

A rigidez do compósito também depende do comprimento da fibra e do diâmetro da mesma, dado que para menores diâmetros o contato específico entre esta e a matriz será maior aumentando, portanto, a rigidez.

A tensão de ruptura de qualquer compósito depende de vários fatores, porém os mais importantes são: as propriedades das fibras, da matriz e da porcentagem de fibra existente no compósito. As propriedades mecânicas das fibras, como módulo de Young e a tensão de tração máxima estão relacionados com a composição química e estrutura interna da mesmas [6].

2.5.3.3 Comparação com a Fibra de Vidro

As Tabelas 2 e 3 a seguir apresentam uma comparação entre as fibras naturais e a fibra de vidro:

Tabela 2: Comparação das propriedades das fibras naturais e a fibra de vidro [6] [8].

Propriedades	Fibras			
	Juta	Sisal	Curauá	Fibra de vidro
Densidade [g / cm^3]	1,46	1,33	1,40	2,55
Resistência a tração [$10^6 N / m^2$]	400 a 800	600 a 700	500 a 1150	2400
Módulo de Young (E) [GPa]	10 a 30	38	12	73
Módulo de Young Específico [$E/densidade$]	7 a 21	29	-	29
Alongamento até a ruptura [%]	1,80	2 a 3	3,7 a 4,3	3
Absorção de umidade [%]	12	11	-	-
Preço/Kg (\$), bruto	0,35 a 2	0,6 a 0,7	0,6	1,3

Tabela 3: Conclusões da comparação [6].

Propriedade	Fibras Naturais	Fibra de Vidro
Densidade	Baixa	Duas vezes o das fibras naturais
Custo	Baixo	Baixo, porém mais alto que o das fibras naturais
Renovabilidade	Sim	Não
Reciclabilidade	Sim	Não
Consumo de energia	Baixa	Alto
Distribuição	Ampla	Ampla
Ausência de CO2	Sim	Não
Abrasivo para máquinas	Não	Sim
Risco para saúde quando inalado	Não	Sim
Degradação	Biodegradável	Não biodegradável

É importante mencionar também a variabilidade das propriedades das fibras naturais devida a certos fatores como:

- Condições de crescimento:
 - Época de plantio;
 - Período de crescimento;
 - Época de colheita;
- Condições meteorológicas que sofreram;
- Tipos de tratamentos que receberam durante ou após a colheita podem variar de produtor para produtor e ainda mais de país para país;
- Ainda que fora das propriedades, não deixa de ser uma característica a apontar: variação do preço de produtor para produtor [6];

2.5.3.4 Juta

Juta é o nome comum dado as fibras extraídas do caule das plantas pertencentes ao gênero botânico *Corchorus*. Embora existam mais de 40 espécies cultivadas, apenas duas são cultivadas comercialmente: *C. capsularis* conhecida por “juta branca” e *C. olitorius* conhecida por “juta Tossa”.

Uma das fibras naturais mais resistentes sendo a segunda mais produzida mundialmente, seguindo o algodão. Possui boas qualidades de isolamento térmico e moderada absorção de umidade [6].

2.5.3.5 Sisal

Uma das fibras naturais mais largamente utilizadas e de fácil cultivo. Sisal é uma fibra dura extraída das folhas da planta *Agave sisalana*. Nativa de países tropicais e subtropicais da América do Norte e Sul, ela é agora cultivada largamente em países da África, Índia e no Oriente.

Embora ela seja uma das fibras naturais mais utilizadas, uma grande quantidade deste recurso renovável ainda é subutilizado. No momento, o sisal é mais utilizado pelas indústrias marítimas e agrícolas para cordas. Outras aplicações incluem: barbantes, estofamentos, redes de pescas e até artigos de moda como bolsas [9].

2.5.3.6 Curauá

O Curauá, *Ananas erectifolius*, que o identifica como sendo da família do abacaxi, é uma planta da região Amazônica com grande potencial para uso de suas fibras. Suas folhas são rígidas, eretas e com faces planas podendo alcançar mais de um metro de comprimento e quatro centímetros de largura. As fibras extraídas são relativamente macias e com elevada resistência mecânica em comparação com outras fibras. Está entre as quatro mais rígidas do seu tipo. Utilizada originalmente pelos índios para tecer redes, fazer cordas e linhas de pesca.

Os resultados das pesquisas realizadas até hoje para avaliar as propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de curauá têm sido animadores, uma vez que eles apresentam resistência mecânica comparável à das de sisal e juta [10].

2.6 Matrizes

Matriz é a fase contínua de um compósito e é um constituinte fundamental cujo objetivo é:

- Manter a coesão das fibras;
- Proteger as fibras do meio envolvente;
- Distribuir o carregamento pelas fibras;
- Redistribuir o carregamento pelas fibras resistentes em caso de ruptura;

Esta fase pode ser metálica, polimérica, cerâmica ou cimento. Serão tratados neste trabalho os polímeros visto que são os utilizados nas matrizes reforçadas com fibras naturais devido ao seu fácil processamento, baixa densidade.

A matriz polimérica se divide em termoplásticos e termoendurecíveis.

Os termoplásticos são definidos como materiais reformáveis com a aplicação de calor de modo a serem recicláveis. Também apresentam maior resistência ao impacto, maior tenacidade e uma higroscopia muito menor em comparação com os termoendurecíveis. A interação entre temperatura e módulo de elasticidade pode ser vista na Figura 7.

Propriedades termomecânicas:

- Comportamento frágil abaixo do T_g ;
- Comportamento viscoelástico imediatamente acima do T_g seguido de elasticidade e comportamento de fluido a altas temperaturas;
- Capacidade de se deformar viscoelasticamente ou plasticamente;
- Pode ser derretido e reformado até um número limite de ciclos antes de se degradar significativamente;
- Pode ser resistente ao impacto se a temperatura local estiver acima da T_g ;
- A temperatura máxima de trabalho geralmente é menor do que a dos termoendurecíveis;

As matrizes termoendurecíveis são constituídas por estruturas rígidas e não podem ser reprocessados. Uma vez aquecidos assumem forma permanente. Uma das principais vantagens das resinas termoendurecíveis é a maior facilidade de impregnação do reforço pois antes da cura eles apresentam viscosidades muito inferiores à dos termoplásticos.

Propriedades termomecânicas:

- Comportamento essencialmente frágil ao longo de um intervalo amplo de temperaturas;
- Incapacidade de se deformar viscoelasticamente;
- Comportamento elástico;
- Estrutura não-cristalina sob a forma de uma rede de ligação cruzada;
- Polímero irá queimar ou degradar ao invés de fundir [6];

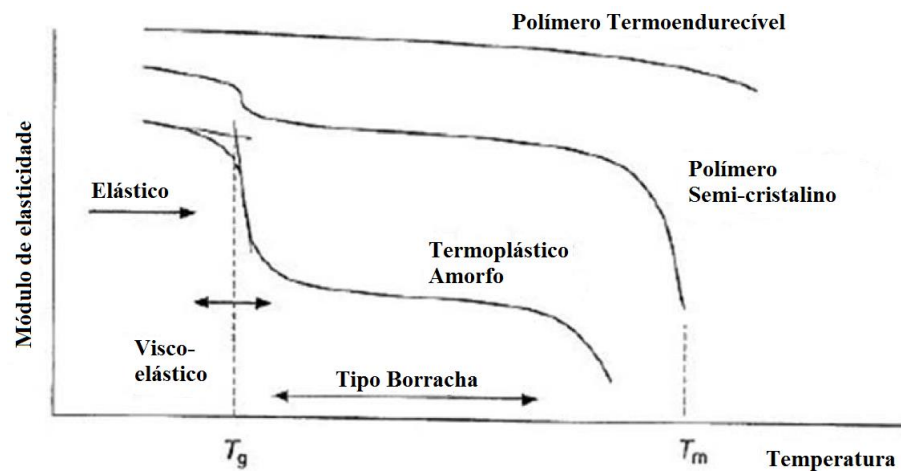


Figura 7: Curva característica do módulo de elasticidade em função da temperatura para polímeros, modificado [6].

2.7 O Carregamento

Para o correto projeto de uma junta é vital o conhecimento das sollicitações principais. Logo a importância de identificar os modos de carregamento existentes. São estes: cisalhamento, tração e compressão, arrancamento e clivagem, como mostra a Figura 8 [2].

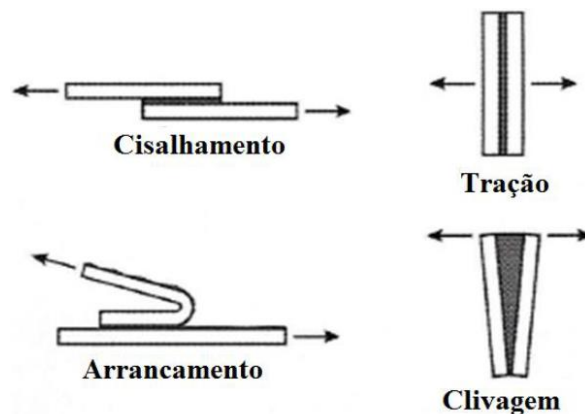


Figura 8: Modos de carregamento de uma junta colada [2].

2.7.1 Tração e compressão

Este modo de carregamento ocorre quando as forças em atuação se encontram perpendiculares ao plano da junta e uniformemente distribuídas ao longo da área colada. O projeto correto deve posicionar as superfícies dos substratos paralelos e as forças normais.

Infelizmente de um ponto de vista prático a espessura do adesivo é de difícil controle e as forças atuantes são raramente unicamente axiais, originando assim tensões de arrancamento e clivagem que são fortemente indesejáveis. Ver Figura 7. Os substratos também devem ser suficientemente rígidos para garantir a distribuição uniforme da tensão. Analogamente, as forças de compressão devem ser mantidas alinhadas para manter o adesivo em compressão pura. Uma junta adesiva em compressão só rompe se a distribuição de tensões não for uniforme. Na realidade, uma junta em “pura” compressão quase não precisa de adesivo [2]. A Figura 9 ilustra o efeito de forças axiais e não axiais.

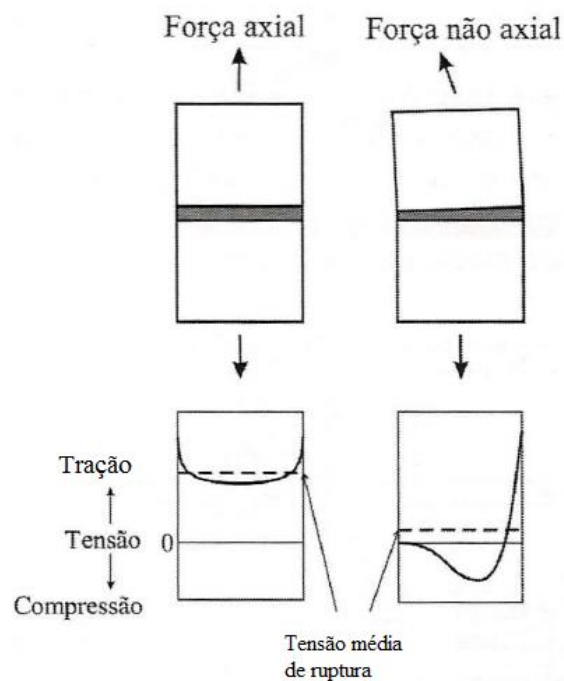


Figura 9: Comparação entre tensões resultantes por força axial e não axial em uma junta de topo [2]

2.7.2 Cisalhamento

Este modo de carregamento ocorre quando as forças em atuação se encontram no plano do adesivo e tendem a separar os substratos. Devido a contribuição de toda área colada, as juntas tendem a ter sua maior resistência neste modo de carregamento. Percebe-se que a maior parte da tensão se localiza nos extremos da sobreposição e que a região central pouco contribui para a sustentação da carga como visto na Figura 10 [2].

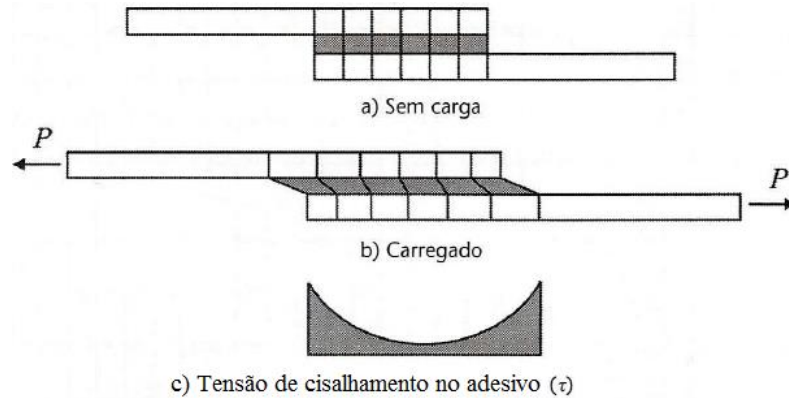


Figura 10: Distribuição de tensão numa junta de sobreposição [2].

2.7.3 Clivagem e arrancamento

Esses modos são situações mais perigosas para uma junta colada. A clivagem é definida como a tensão atuante na junta como resultado de forças na extremidade de uma junta rígida que tende a separar os substratos. As tensões de arrancamento são análogas, porém a diferença é que um ou ambos dos substratos são flexíveis. Logo, o ângulo de separação pode ser muito maior para o arrancamento do que para a clivagem.

Ao passo que em situações de arrancamento ou clivagem as tensões se encontram concentradas em áreas muito menores em relação ao cisalhamento, estas são muito menos resistentes. Toda a tensão se encontra concentrada em uma das extremidades da junta de modo que o adesivo localizado na outra extremidade pouco contribui para a resistência da junta. Os adesivos frágeis e rígidos são particularmente sensíveis as forças de arrancamento, porém os adesivos mais dúcteis e flexíveis permitem uma menor concentração de tensões e logo maior resistência, ver Figura 11. Os adesivos epóxis rígidos têm uma resistência ao arrancamento de apenas 0,35 N/mm, enquanto que os adesivos mais tenazes podem chegar aos 4-8 N/mm [2].

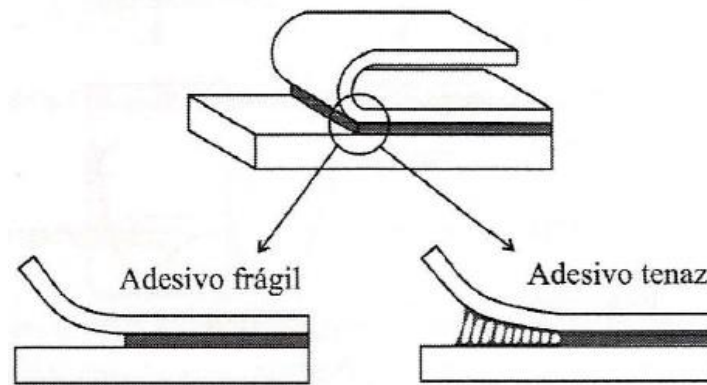


Figura 11: Representação da diferença entre sollicitações [2].

2.7.4 Tensões térmicas residuais

Uma grande vantagem de uma união adesiva é a possibilidade de juntas de materiais distintos. O problema se encontra no fato de que materiais dissimilares podem possuir CETs muito diferentes. Logo, mudanças em temperatura podem introduzir tensões térmicas na junta. A cura do adesivo a resultante encolhimento do material em si pode introduzir tensões internas. Com isso, deformações ou trincas podem aparecer. É importante considerar os efeitos térmicos pois eles geralmente levam a uma redução da força da junta embora em alguns casos o oposto ocorra [11].

Muitos autores descobriram que a tensão térmica causada pela redução em volume do adesivo na cura é muito menor que aquela causada por aderentes com CETs diferentes. Logo, tensões térmicas se tornam importantes nesses casos. No caso, por exemplo, de liga metálica com CFRP ilustrado na Figura 12a, o metal tende a contrair ao passo que a temperatura diminui em relação a temperatura de cura e isto é parcialmente resistido pelo compósito (CET menor), o que resulta em tensões residuais nos extremos da junta. Neste caso uma extremidade terá tensão residual de cisalhamento positiva enquanto o outro terá tensão residual de cisalhamento negativa como mostra a Figura 12b. As tensões térmicas são benéficas em um extremo da junta, mas tem o efeito oposto no outro extremo. A tensão térmica pode ser calculada com a seguinte fórmula:

$$\Delta T = T_O - T_{SF} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde T_o é a temperatura de cura e T_{SF} é a temperatura livre de tensões [12].

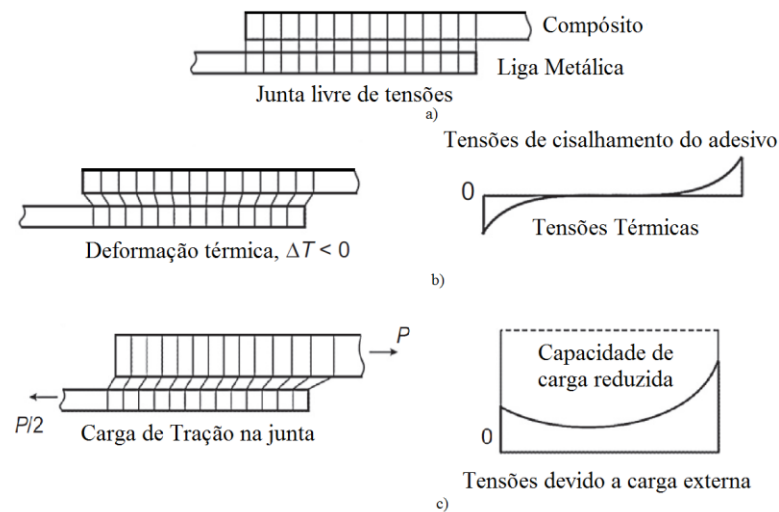


Figura 12: Tensões térmicas residuais. a) Junta não afetada por tensões. b) Junta com tensão térmica c) Carga de tensão assimétrica presente no adesivo; modificado [12].

A resistência da junta será afetada pela distribuição de tensões não uniforme, como visto na Figura 12c.

2.8 Tipos de Juntas

Existem muitas configurações diferentes de juntas. Entre as mais comuns estão: junta de sobreposição simples, junta de sobreposição dupla, juntas com chanfro (*scarf joint*) e as juntas em degraus, estas e outras podem ser vistas na Figura 13.

A junta de sobreposição simples tem sido a mais estudada na literatura devido a sua facilidade de fabricação [2].

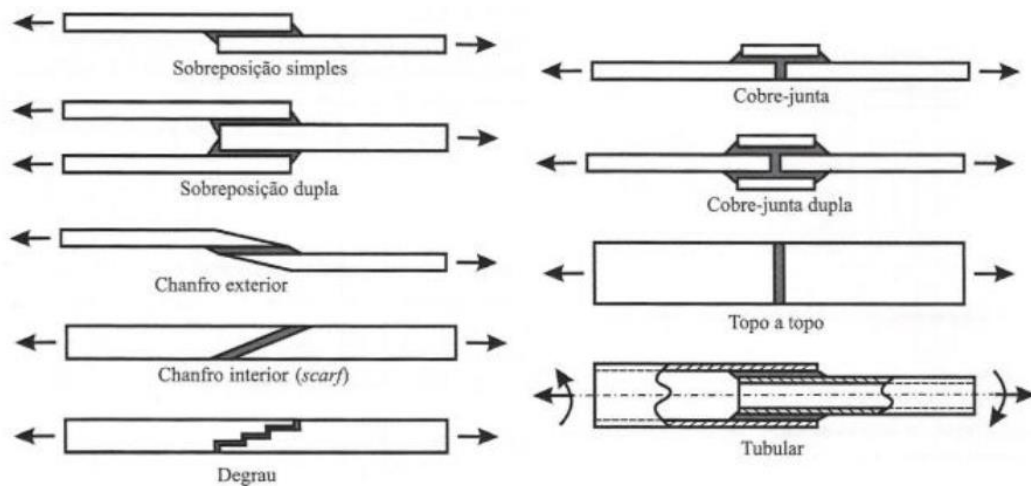


Figura 13: Tipos principais de juntas [2].

2.9 Modos de Ruptura

No projeto de uma junta colada é fundamental a correta avaliação da distribuição do perfil de tensões e por consequência, dos modos de ruptura induzidos. De modo geral, existem 3 tipos de rupturas diferentes em juntas coladas, como visto na Figura 14. Ruptura coesiva, adesiva e mista. Pode ocorrer também a ruptura de um dos substratos [2].

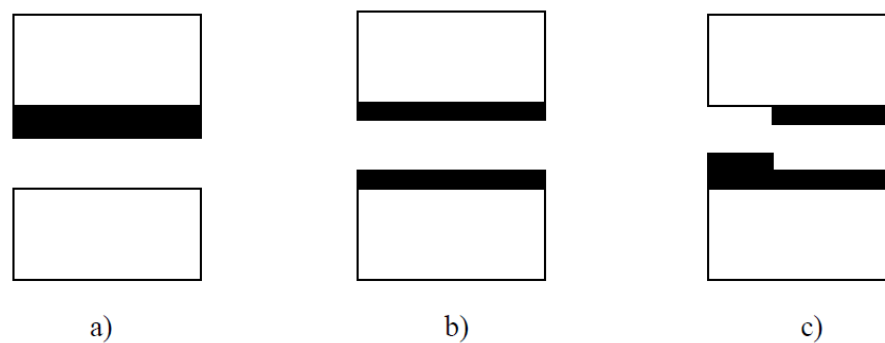


Figura 14: Modos de ruptura do adesivo a) Adesiva b) Coesiva c) Mista [5].

2.9.1 A Falha Adesiva

A ruptura adesiva ocorre quando existe um defeito na colagem devido a: estado superficial ruim, adesivo mal adaptado ou problema durante a execução do processo. Na maioria dos casos esta ruptura está relacionada a um tratamento superficial de baixa qualidade.

Em muitas situações, a adesão entre dois materiais pode falhar em consequência do ambiente a que os materiais foram expostos durante uma aplicação. Entre os fatores que podem levar à falha estão: temperatura, pH, produtos químicos agressivos e irradiação térmica. [5].

2.9.2 A Falha Coesiva

Este tipo de falha é caracterizado pelo fato da ruptura ocorrer na parte adesiva, quando o limite de resistência do adesivo é excedido. Por isso, neste caso, não é necessário que haja uma preocupação com a execução do processo, como há no caso da falha adesiva. Porém, se os valores das tensões mecânicas que provocaram essa ruptura são considerados baixos, isso pode ser um indicativo que a escolha do tipo de adesivo não foi a ideal e provavelmente houve um problema de coesão do adesivo [5].

2.9.3 Falha Mista

A falha mista é caracterizada pela presença das falhas adesiva e coesiva simultaneamente. Este tipo de ruptura ocorre geralmente quando há uma má preparação da superfície. Ocorre primeiramente uma ruptura adesiva, que pode ser atribuída a uma má preparação da superfície, por exemplo; e posteriormente uma falha do tipo coesiva, devido a um alto nível de tensões por exemplo [5].

2.11 Processo de adesão

O processo de adesão é um dos aspectos a levar em conta na manufatura de uma junta. Existem três tipos principais de processos de adesão: co-cura, co-adesão e adesão secundária. O processo de co-adesão é feito quando um aderente é curado com o adesivo enquanto no processo de co-cura ambas as partes são curadas simultaneamente (os substratos e o adesivo). A adesão secundária ocorre quando a camada adesiva é curada entre dois painéis de compósitos (substratos) pré-curados. A adesão multi-material também é possível e é feita do mesmo jeito que a adesão secundária. A co-cura é preferida em comparação com a adesão secundária pois o número de ciclos de cura e partes é reduzido, ou seja, reduz etapas, porém em estruturas

maiores e mais complexas a adesão secundária é a mais utilizada [13]. A Figura 15 mostra um esquema destes processos.

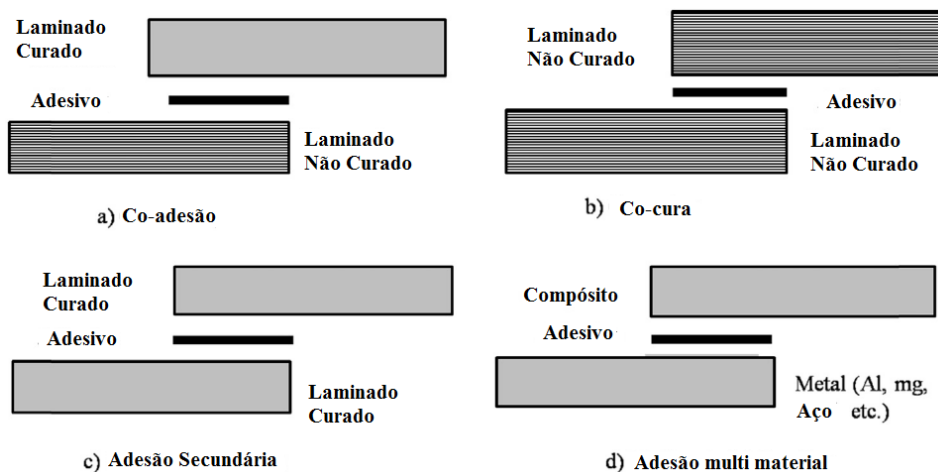


Figura 15: Esquema de processos de adesão de juntas coladas, modificado [13].

2.12 A preparação da superfície

A preparação superficial deve ser executada com bastante atenção pois é uma das fases mais importantes da preparação da junta colada, visto que sua resistência final depende fortemente desta etapa. O principal objetivo dos tratamentos superficiais é obter uma superfície limpa e molhável, sendo molhabilidade a tendência de um fluido espalhar-se preferencialmente sobre uma superfície sólida em presença de outra fase imiscível, baseado na natureza de suas substâncias e da limpeza. O principal objetivo do tratamento superficial antes da colagem é que posteriormente não se tenha uma ruptura adesiva e sim coesiva [2]. A ruptura coesiva é um indicativo de que a preparação superficial foi feita de forma correta, porém se em um ensaio destrutivo tem-se uma ruptura na interface adesivo-substrato, é necessário rever a preparação superficial. por tudo isso, todos os substratos devem passar por um processo de tratamento superficial antes da colagem como por exemplo: remoção de óleos, gorduras, impressões digitais, agentes desmoldantes da superfície; modificação química da superfície, com a substituição do óxido presente por outro mais fortemente ligado a liga metálica base mais resistente; e alteração da topografia superficial, como o aumento da rugosidade por exemplo [2].

2.12.1 Preparação de materiais metálicos

A superfície pode ser lixada ou jateada, com o objetivo de remover óxidos ou hidróxidos, quando este encontra-se em ambientes com umidade. No caso de tratamentos químicos utiliza-se geralmente ácido clorídrico ou sulfúrico [2].

2.12.2 Preparação de compósitos

As superfícies dos compósitos estão geralmente cobertas por desmoldantes a base de silicone ou fluorcarbonetos, sendo fundamental a remoção destes agentes antes da aplicação do adesivo. É necessário que se tenha cuidado com a preparação superficial desses materiais pois alguns tratamentos podem danificar as fibras superficiais [2].

2.13 Ensaaios

Os ensaios têm como objetivo avaliar o desempenho de um adesivo, as propriedades físicas, químicas, mecânicas, térmicas, entre outras, para que se possa ter uma ideia de seu comportamento em diferentes condições ambientais e mecânicas. Os ensaios mais usuais requerem um corpo de prova e são conhecidos como ensaios destrutivos. Estes ensaios levam em consideração a geometria da junta, a interface, a camada primária, a preparação da superfície, o tempo de cura e o adesivo. Os principais ensaios realizados são: ensaios de dureza, ensaio de temperatura de transição vítrea e ensaio de juntas [2].

Os ensaios de dureza são utilizados para verificar o grão de cura de um adesivo. Pode-se citar como exemplo o método Shore, o método Barcol e a Nanoindentação, para obter a dureza dos materiais. Uma dureza baixa pode significar a presença de defeitos ou de que a cura ainda não está completa, já uma dureza elevada pode ser um indicativo de uma cura exagerada. O ensaio de transição vítrea serve para obter a caracterização da variação do módulo de elasticidade e do volume específico. Já o ensaio de juntas analisa o comportamento de materiais de diferentes formatos de juntas sobre tensão [2].

2.13.1 Ensaio de tração

O ensaio de cisalhamento por tração é um dos mais comuns para caracterizar uma junta adesiva de sobreposição simples, pois os resultados obtidos são de suma importância para a determinação das condições geométricas e do tipo de adesivo em aplicação na indústria. O resultado é expresso pela tensão média de corte τ , quando ocorre a ruptura. Dada pela relação entre a força máxima ($F_{m\acute{a}x}$), aplicada sobre a área de sobreposição dos substratos, onde b é a largura da junta e l , o comprimento de sobreposição, temos [2]:

$$\tau = \frac{F_{m\acute{a}x}}{lb} \quad (\text{Eq. 2})$$

Este ensaio é regulamentado principalmente pela norma BS EM ISO 527-4 ou outras similares [6]. Na Figura 26 temos a máquina que será utilizada.



Figura 16: Máquina utilizada para a realização dos experimentos no Laboratório de Compósitos e Adesivos (LADES), CEFET-RJ.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Com o crescente interesse de vários setores industriais nos compósitos com reforços de fibras naturais, se torna necessária a análise experimental para o correto projeto de uma junta de modo a manter sua integridade durante o trabalho e também para a validação de métodos analíticos e numéricos. Nesta pesquisa, juntas de sobreposição simples, foram submetidas a testes de tração para que pudéssemos comparar sua resistência mecânica e seus modos de falha. A eficiência das juntas, é afetada diretamente se a preparação superficial não for correta, por isso, neste capítulo é mostrado o passo a passo da preparação dos corpos de prova, como foram realizados os ensaios, e os materiais utilizados nestes processos.

3.1 Resina

A resina utilizada foi a bi componente Epóxi AR260 e endurecedor AH260 fornecida pela Barracuda Advanced Composites, Rio de Janeiro – Brasil. Esta pode ser vista na Figura 17. Para maiores detalhes sobre a resina utilizada, a folha de dados técnicos desta se encontra em anexo neste trabalho. Apesar da resina utilizada não ser considerada um adesivo, esta foi utilizada como tal para a confecção das juntas coladas. Isto é justificado pois a resina utilizada para produzir o compósito foi a mesma utilizada para a colagem das juntas, por se tratar do mesmo material, temos uma maior afinidade química entre adesivo e aderente, além da possibilidade de realizar outros processos de adesão como a co-adesão ou co-cura, o que é bastante interessante pois reduz etapas do processo de adesão.



Figura 17: Resina e endurecedor utilizados.

A Tabela 4, contém as propriedades mecânicas da resina utilizada.

Tabela 4: Propriedades mecânicas da resina utilizada [3].

Tensão de Ruptura (MPa)	28
Módulo de Young (GPa)	3,9
Densidade (g/cm^3)	1,15
Alongamento (%)	10

3.2 Adesivos

Foi utilizado o adesivo estrutural BETAMATE 2096, fornecido pela DOW Brasil. Ele é um adesivo epóxi bi componente curado por reação química. Desenvolvido especialmente para reparos e construção de veículos, possui excelente adesão à aços automotivos e fibras de carbono, aços revestidos e alumínio pré-tratado, além de alta durabilidade, coesão e proteção contra corrosão devido a sua capacidade selante.

De acordo com especificações do fabricante o adesivo é curado completamente após 2 horas a 60 graus Celsius. As propriedades mecânicas deste adesivo podem ser vistas na Tabela 5. Para maiores informações a respeito deste adesivo, a folha de dados técnicos deste se encontra em anexo neste trabalho.

Tabela 5: Propriedades do adesivo BETAMATE 2096.

Tensão de Ruptura (MPa)	29
Módulo de Young (GPa)	1700
Densidade (g/cm^3)	1,2
Alongamento (%)	9

A resina, previamente descrita, utilizada na fabricação dos compósitos também será utilizada como adesivo neste trabalho.

3.3 Compósitos Reforçados com Fibras Naturais

Foi utilizada trama bidirecional (0 e 90 graus) de Sisal e Juta adquiridos por Sisalsul, São Paulo – Brasil. A estrutura da trama pode ser vista na Figura 18. As mantas utilizadas podem ser vistas nas Figuras 19 e 20. Foi utilizado como reforço intralaminar a Fibra de Vidro fornecida pela empresa, que pode ser vista na Figura 21.

Foram manufacturados compósitos reforçados por fibra de vidro, de Juta e de Sisal e também um compósito de Sisal bidirecional sem nenhum reforço e contando com tratamento alcalino que será descrito.

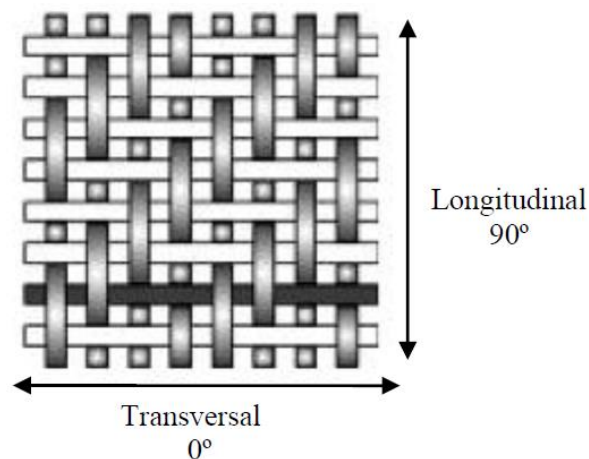


Figura 18: Estrutura da trama bidirecional [3].



Figura 19: Manta bidireccional de Juta utilizada.



Figura 20: Manta bidireccional de Sisal utilizada.



Figura 21: Fibra de Vidro utilizada como reforço.

No caso das mantas reforçadas com fibra de vidro (FV), ela foi trançada longitudinalmente seguindo o *plain weave* de modo a ter um padrão de trança intercalado entre as fibras da manta base. As mantas naturais reforçadas podem ser vistas nas Figuras 22 e 23.



Figura 22: Mantas de Sisal/FV.

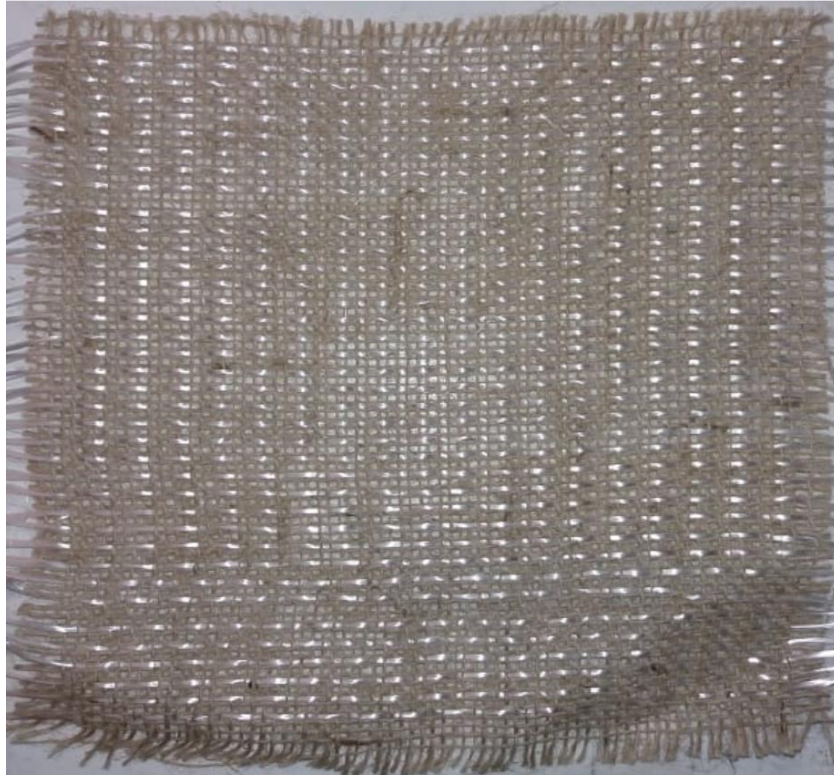


Figura 23: Manta de Juta/FV.

3.3.1 Tratamento Alcalino

As mantas de Sisal bidirecional foram primeiramente lavadas em água corrente para a remoção de resíduos e gorduras. Elas foram posteriormente submetidas a um tratamento superficial alcalino para a melhoria da adesão entre fibra e matriz [14]. Este tratamento consiste na submersão das mantas em uma solução de água e bicarbonato de sódio na razão de 2g para cada 100ml por 1 hora. As mantas de Juta/FV e Sisal/FV não receberam tratamento superficial. Após lavagem e tratamento, as mantas foram secadas em um forno a 100 graus Celsius por 2 horas. O tratamento de alcalinização e o forno utilizado para secagem podem ser vistos nas Figuras 24 e 25.

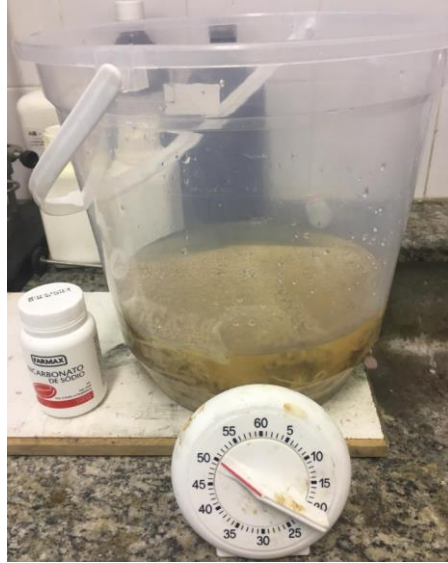


Figura 24: Mantas sendo tratadas.



Figura 25: Mantas sendo secadas no forno.

3.3.2 Manufatura dos Compósitos

As mantas de fibras naturais reforçadas foram levadas ao forno a 100 graus Celsius por 1 hora para remoção de umidade. Elas foram posteriormente pesadas com a utilização de uma balança eletrônica para o cálculo da resina e endurecedor necessários. A balança utilizada pode ser vista na Figura 26.



Figura 26: Balança utilizada.

Com o valor da massa das fibras, foi calculado a massa da resina e endurecedor necessário para um compósito com porcentagem de fibras em volume de 30%, levando em conta a fração de 100/26 de resina e endurecedor. Os valores de massa de resina e endurecedor foram então homogeneizados. O resultado pode ser visto na Figura 27.



Figura 27: Processo de homogeneização da resina e endurecedor.

Foram utilizadas placas metálicas para prensar os compósitos. Estas placas receberam um tratamento de desmoldante líquido para possibilitar a retirada dos compósitos após a cura. Este produto possui alta toxicidade e deve ser utilizado com o EPI adequado como luvas de borracha e respiradores com filtro que podem ser vistos na Figura 28. Importante também o fato que o desmoldante é passado 1 vez para cada uso da superfície e deixado secar completamente. O desmoldante utilizado pode ser visto na Figura 29.



Figura 28: EPI utilizado.



Figura 29: Desmoldante utilizado.

Uma vez que as mantas estão secas e a mistura de resina e endurecedor homogeneizada, o processo de *hand lay up* é iniciado. Este consiste da utilização de um molde de silicone sobre uma das placas metálicas dentro do qual as mantas são postas, uma por uma e recebem a resina de modo manual e o mais homogêneo possível. O molde de silicone serve para o controle dimensional de espessura do compósito final ao mesmo tempo que permite o vazamento de uma pequena quantidade de resina o que gera um compósito com a maior homogeneidade de resina através do seu volume e, portanto, de melhor qualidade. O silicone utilizado foi provido pelo LADES. O processo e seu resultado após cura podem ser vistos nas Figuras 30 e 31.



Figura 30: Processo de *hand lay up* do compósito Sisal/FV.



Figura 31: Após a cura.

O resultado final das placas manufaturadas pode ser visto na Figura 32.

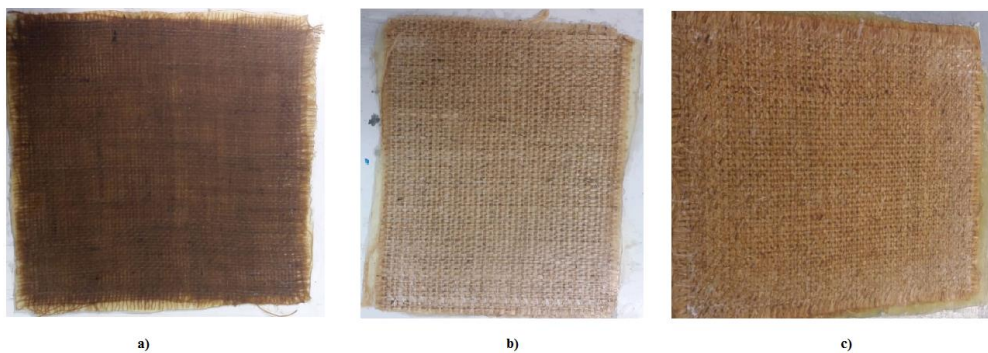


Figura 32: Placas manufaturadas. a) Juta-Fibra de Vidro, b) Sisal-Fibra de Vidro, c) Sisal-Sisal Alcalinizado.

3.3.3 Corte

As placas foram marcadas e cortadas manualmente com o auxílio da retífica fornecida pelo LADES de acordo com o padrão da norma ASTM D – 1002, como pode ser visto na Figura 33.

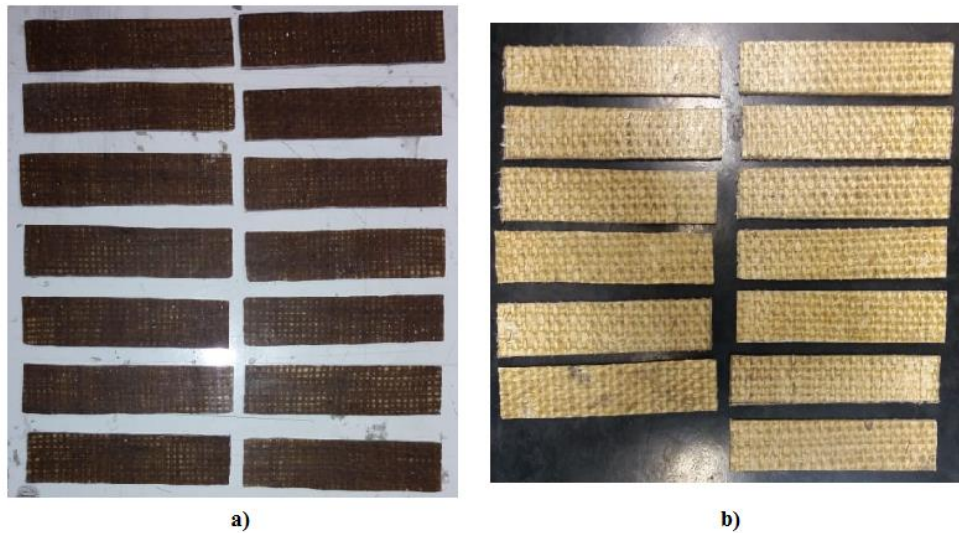


Figura 33: Substratos cortados. a) Juta, b) Sisal.

3.4 Compósitos Reforçados com Fibras Sintéticas

3.4.1 Fibra de Vidro

Foram utilizados substratos de Fibra de Vidro bidirecional previamente fabricados no LADES com a mesma resina utilizada na fabricação dos compósitos naturais deste trabalho. Eles podem ser vistos na Figura 34.

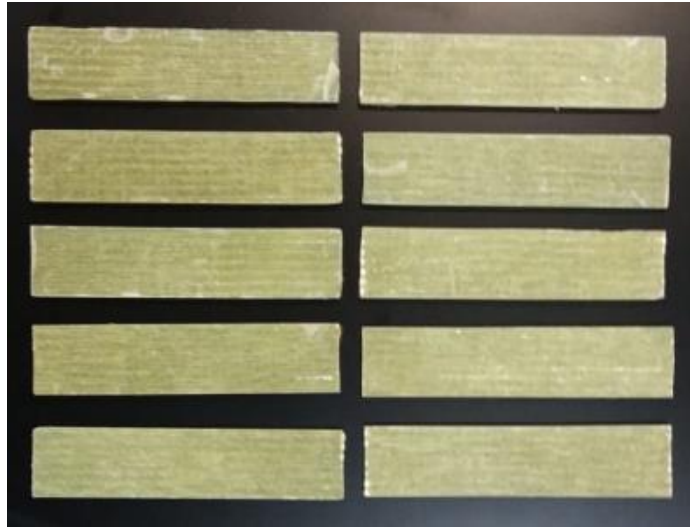


Figura 34: Substratos de Fibra de Vidro utilizados.

3.4.2 Fibra de Carbono

Os substratos de Fibra de Carbono utilizados neste trabalho foram fornecidos pelo LADES provenientes de pesquisa anterior [7]. Eles podem ser vistos na Figura 35.

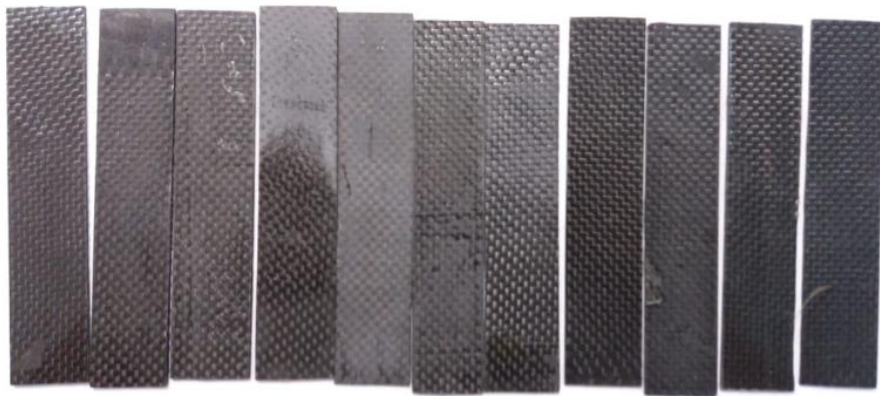


Figura 35: Substratos de Fibra de Carbono utilizados.

3.5 Preparo de Superfície

Todos os substratos utilizados receberam tratamento superficial que consiste de abrasão por lixa 50 em padrões opostos de 45 graus para a melhoria da adesão entre adesivo e substrato através de aumento de rugosidade superficial melhorando a ancoragem entre adesivo e substrato

além da remoção de traços de desmoldante entre outras substâncias indesejáveis [15]. O resultado pode ser visto na Figura 36. Finalmente, as superfícies foram limpas com acetona.

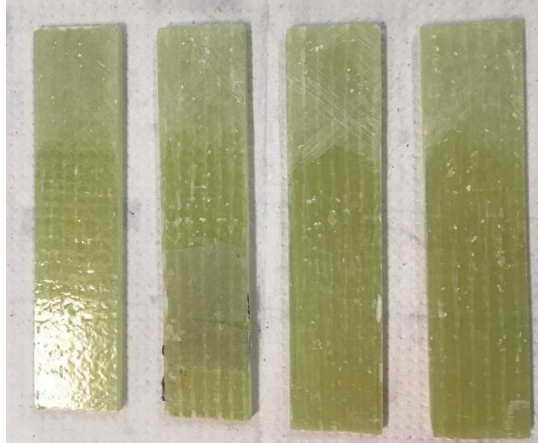


Figura 36: Substratos de Fibra de Vidro após abrasão superficial.

3.6 Molde

Foi utilizado molde fornecido pelo LADES que pode ser visto na Figura 37. Este recebeu aplicação de desmoldante líquido em ambas as superfícies em contato com as juntas de modo a possibilitar a remoção segura após a cura.

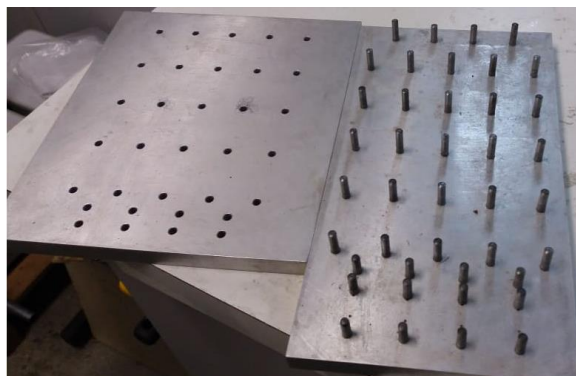


Figura 37: Molde utilizado na fabricação das juntas coladas.

3.7 Fabricação das Juntas de Sobreposição Simples

3.7.1 Plano de Fabricação

Foi elaborado um plano de produção das juntas coladas divididas em: Juntas Similares, que utilizam os mesmos substratos e Juntas Dissimilares com substratos distintos, que pode ser visto na Tabela 6. Sendo utilizada a seguinte nomenclatura para os substratos e adesivos:

- SV: Compósito bidirecional de Fibra de Sisal reforçado por Fibra de Vidro.
- JV: Compósito bidirecional de Fibra de Juta reforçado por Fibra de Vidro.
- S: Compósito bidirecional de Fibra de Sisal alcalinizado.
- FC: Compósito bidirecional de Fibra de Carbono.
- FV: Compósito bidirecional de Fibra de Vidro.
- B: Adesivo estrutural BETAMATE 2096.
- R: Resina Epóxi AR260.

Tabela 6: Juntas fabricadas.

JUNTAS SIMILARES	JUNTAS DISSIMILARES
SV-SV (B)	SV-FC (B)
SV-SV (R)	JV-FC (R)
JV-JV (B)	SV-FC (B)
JV-JV (R)	SV-FC (R)
FV-FV (B)	-
FV-FV (R)	-
FC-FC (B)	-
FC-FC (R)	-
S-S (B)	-
S-S (R)	-

Totalizando 14 grupos a serem estudados e comparados. Foram produzidos no mínimo 3 juntas para cada grupo.

3.7.2 Geometria da Junta

A geometria da junta pode ser vista na Figura 38.

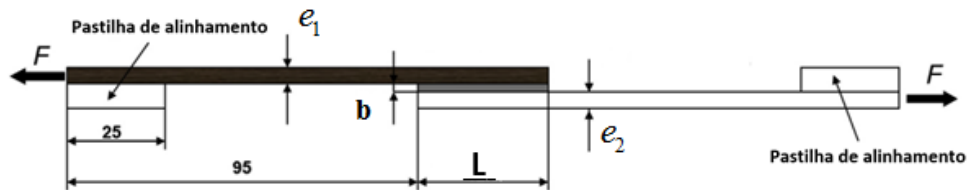


Figura 38: Estrutura da junta.

A Tabela 7 mostra os valores médios de espessura dos substratos para cada grupo. A espessura do adesivo utilizada foi 0,2 mm e o comprimento da sobreposição foi 12,5 mm.

Tabela 7: Média de espessuras dos substratos utilizados.

Substrato	Média de e (mm)	Desv. Pad.
S	4,26	0,42
FV	4	0
SV	4,4	0,22
JV	3,15	0,33
FC	1,88	0,3

As medidas foram feitas na mediana do comprimento de sobreposição, uma vez para cada substrato.

3.7.3 Montagem do Molde

Foram utilizadas as seguintes ferramentas para a montagem do molde: Espaçadores de metal de 0,2 mm de espessura para o controle dimensional da camada adesiva, placas de Teflon para o controle do comprimento da sobreposição e um aplicador específico para o tubo de BETAMATE 2096 fornecido pelo LADES, pois este possui um sistema de aplicação de proporção correta automático. Estas ferramentas podem ser vistas na Figura 39.

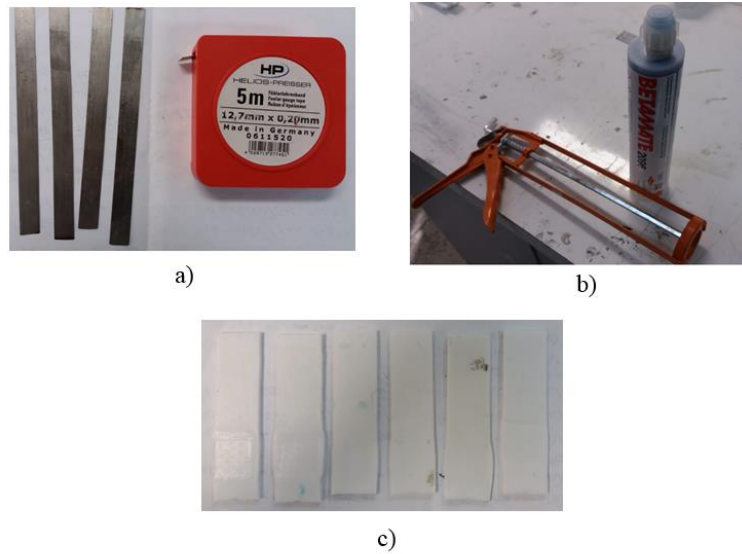


Figura 39: Ferramentas utilizadas na manufatura das juntas. a) Espaçadores de 0.2 mm. b) Adesivo BETAMATE 2096 e aplicador. c) Espaçadores de Teflon. Todas ferramentas fornecidas pelo LADES, CEFET/RJ.

A montagem do molde foi feita posicionando os espaçadores de Teflon e o substrato de modo que eles preenchessem toda a área entre os pinos separadores e logo acima o mesmo foi feito em reverso de modo que a área de substrato sobre substrato seja somente a área colada. Os espaçadores de metal foram posicionados entre os substratos e os espaçadores de Teflon. Este processo pode ser visto na Figura 40.

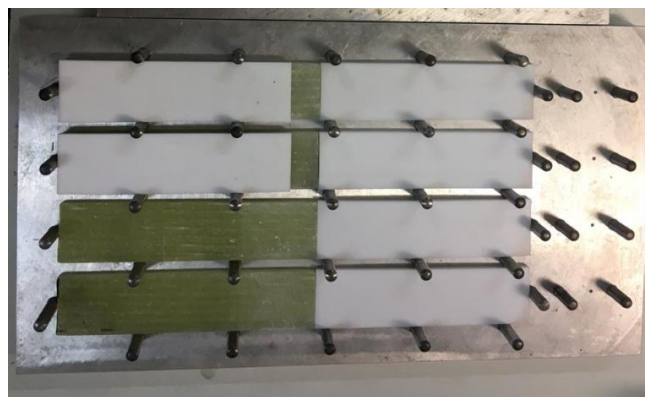


Figura 40: Posicionamento dos substratos com os espaçadores de Teflon no molde.

3.7.4 Fabricação da Junta

Após a o posicionamento dos substratos inferiores juntamente com os espaçadores, o adesivo é preparado, homogeneizado e finalmente aplicado em ambas as superfícies dos substratos da junta de modo a evitar falhas. Então os substratos que ficarão na parte superior,

são posicionados, formando assim, a junta de sobreposição simples. A mesma é colocada na prensa hidráulica para que se inicie o processo de cura do adesivo. O molde montado pode ser visto na Figura 41.

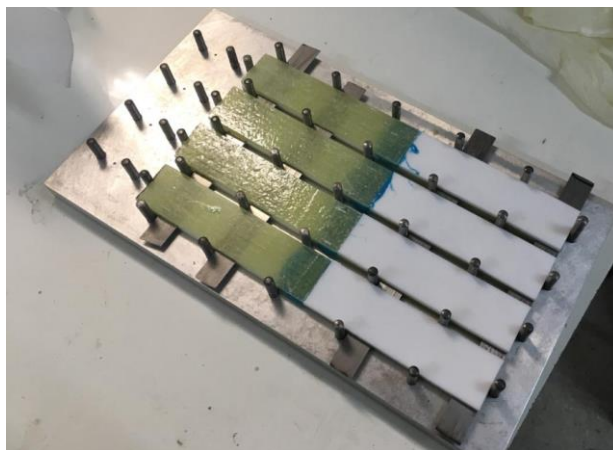


Figura 41: Juntas de FV-FV no molde com o adesivo BETAMATE 2096.

3.7.5 Cura

Foi utilizada uma prensa hidráulica de pratos quentes SL 12/20 fornecida pelo fabricante SOLAB pertencente ao LADES que pode ser vista na Figura 42.



Figura 42: Prensa hidráulica aquecida utilizada.

O molde foi inserido na prensa aquecida sem aplicação significativa de pressão, a 60 graus Célsius, por 2 horas conforme definido pelo fabricante. Após o tempo de cura a prensa foi desligada e o molde foi deixado para esfriar lentamente. Após o resfriamento total do molde as juntas foram retiradas e o excesso de adesivo foi removido através de ferramentas de corte e

lixas. As juntas foram então identificadas em termos de substrato e adesivo como pode ser visto na Figura 43.



Figura 43: Juntas de SV-SV (B) curadas e identificadas.

3.8 Ensaios

As juntas foram ensaiadas na Máquina de Ensaios Mecânicos de Parafusos INSTRON 5966 disponível no LADES/CEFET-RJ. Foi utilizada célula de carga de 10 kN e velocidade de 1 mm/min. De acordo com a ASTM D 1002, a velocidade de teste recomendada se aproxima a 1,3 mm/min de modo que a carga no espécime seja de 80 a 100 kg/cm². Todos os ensaios foram feitos a temperatura ambiente, sabendo que variações em temperaturas afetam as propriedades do adesivo [16]. Um exemplo de ensaio pode ser visto na Figura 44.



Figura 44: Junta de SV-SV sendo ensaiada.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados quantitativos provenientes dos ensaios de tração e qualitativos oriundos da inspeção visual dos substratos após os ensaios. Serão apresentados também resultados médios com tratamento estatístico para cada grupo de juntas estudado. Parâmetro principal de comparação será a força de ruptura.

4.1 Resultados

Após os ensaios de tração os dados da máquina foram tratados a fim de serem apresentados em um gráfico de Força-Deslocamento. Estes dados foram divididos para cada adesivo e podem ser vistos nas Figuras 45 e 46.

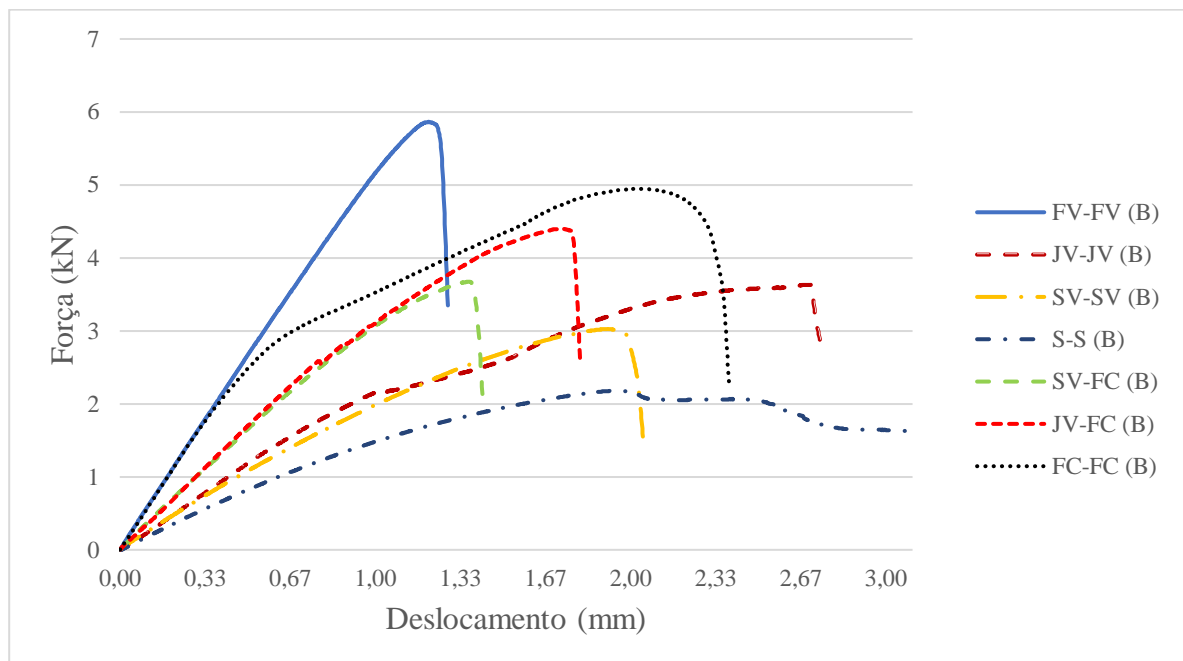


Figura 45: Gráfico Força-Deslocamento para BETAMATE 2096.

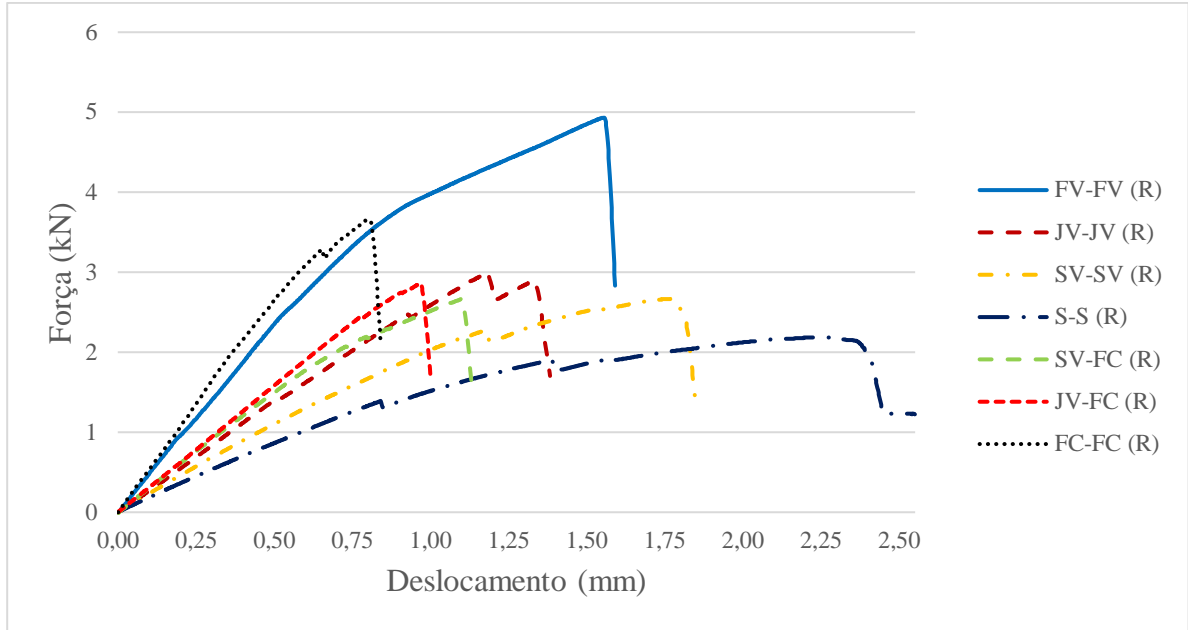


Figura 46: Gráfico Força-Deslocamento para Resina Epóxi AR260.

Os dados de força de ruptura com desvio padrão por grupo pode ser visto na Figura 47.

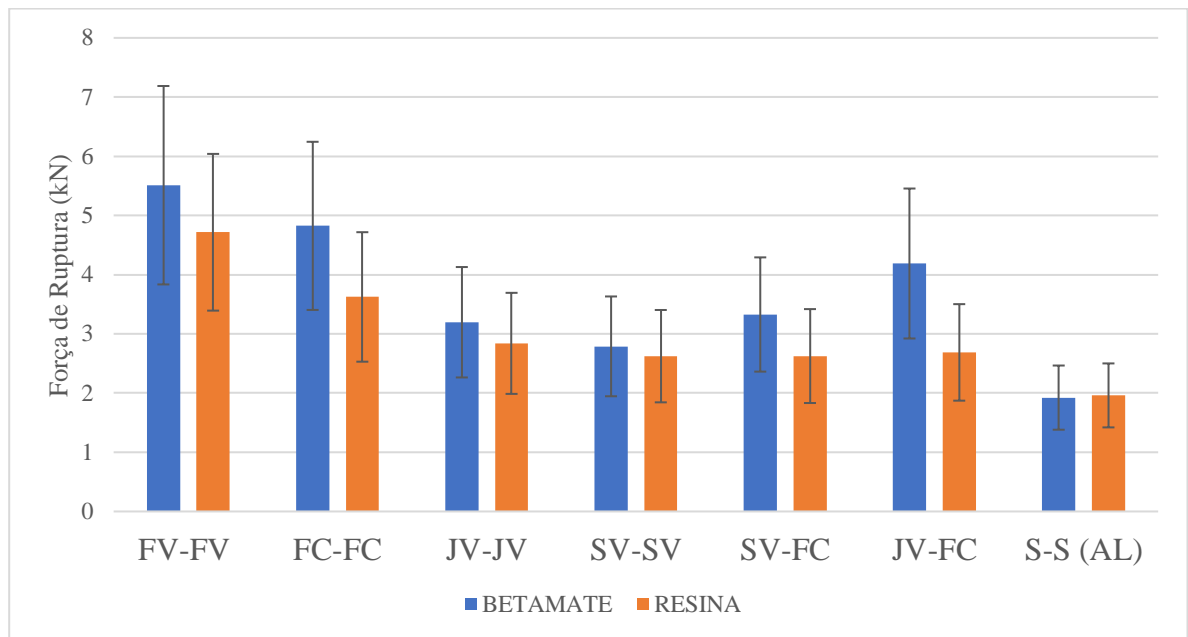


Figura 47: Comparação geral dos dados.

As forças de ruptura em função dos substratos utilizados podem ser vistas na Tabela 8.

Tabela 8: Força de ruptura em função dos substratos utilizados.

Junta	BETAMATE 2096		RESINA AR260	
	Força (kN)	Desv. Pad.	Força (kN)	Desv. Pad.
FV-FV	5,51	1,67	4,71	1,32
FC-FC	4,82	1,42	3,62	1,09
JV-FC	4,2	1,26	2,68	0,81
SV-FC	3,32	0,96	2,62	0,79
JV-JV	3,2	0,93	2,83	0,85
SV-SV	2,8	0,84	2,62	0,78
S-S	1,92	0,54	1,96	0,54

A comparação percentual entre adesivos em termos de maior eficiência (maior força de ruptura) pode ser vista na Tabela 9.

Tabela 9: Comparação entre BETAMATE e resina em melhoria de resistência em todas as juntas.

Junta	Ganho do BETAMATE em relação a resina.
JV-FC	35,86%
FC-FC	24,89%
SV-FC	21,11%
FV-FV	14,42%
JV-JV	11,16%
SV-SV	5,94%
S-S	-1,96%

A comparação percentual entre juntas sintéticas e naturais pode ser vista na Tabela 10.

Tabela 10: Comparação entre juntas sintéticas e naturais.

Junta	GANHO DA FV-FV		GANHO DA FC-FC	
	BETAMATE	RESINA	BETAMATE	RESINA
JV-JV	42%	40%	33,75%	21,64%
SV-SV	49%	44%	42,19%	27,61%
SV-FC	40%	44%	31,04%	27,56%
JV-FC	24%	43%	13,18%	25,86%
S-S	65%	58%	60,15%	45,90%

Através dos gráficos força-deformação observa-se comportamentos característicos. Ao passo que a rigidez diminui o deslocamento aumenta. Isto está ligado ao material do substrato e também a sua espessura.

Através da Tabela 8 podemos ver um gradiente de eficiência que diminui ao passo que a rigidez da junta diminui. Substratos com menor rigidez geram maiores deformações plásticas e logo maiores tensões de arrancamento.

Na Tabela 9 podemos ver que o BETAMATE obteve melhores resultados em todas as juntas com exceção das juntas naturais, embora esta diferença seja muito pequena.

Finalmente, na Tabela 10 podemos ver que as juntas de JV-FC tiveram os melhores resultados em relação as juntas sintéticas para o BETAMATE e as juntas de JV-JV os melhores resultados para a resina. Estes foram ressaltados na cor verde para melhor visualização.

4.2 Discussão

A discussão dos resultados experimentais quantitativos e qualitativos baseados na inspeção visual das superfícies de ruptura das juntas ensaiadas serão apresentadas a seguir separadas por adesivo e por tipo de junta.

4.2.1 BETAMATE 2096

4.2.1.1 Juntas Coladas de Compósitos Reforçados com Fibras Sintéticas Similares

As juntas coladas de compósitos reforçados com fibras sintéticas similares estudadas foram Fibra de Vidro e Fibra de Carbono. A FV-FV apresentou a maior resistência entre todas as juntas testadas. Observou-se uma diminuição da resistência de 12% da FC-FC em comparação. Embora sendo este um reforço mais resistente em relação ao vidro [17], esta diminuição se deve a diferença de rigidez dos substratos. As juntas de FV possuem rigidez superior devido a grande diferença de espessura [18]. A fibra de carbono possui 1.8 mm de espessura, já a fibra de vidro, possui espessura de 4.0 mm.

4.2.1.2 Juntas Coladas de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais (Híbridos)

As juntas coladas de compósitos reforçados com fibras naturais e sintéticas estudados foram: bidirecional de fibra de Juta reforçada com Fibra de Vidro (JV) e bidirecional de fibra de Sisal reforçada com Fibra de Vidro (SV). A JV-JV obteve um ganho de 12,75% em relação ao SV-SV. Este ganho em resistência está ligado ao fato que existe uma grande diferença de espessura entre as fibras de Juta e Sisal, sendo a posterior mais espessa. Isto faz com que exista uma distância maior entre a superfície colada e a fibra de reforço. Com base na inspeção visual a olho nu e através de aumento da área delaminada por meio de lupa, nota-se uma clara diferença entre o papel do vidro no reforço de Juta versus Sisal como pode ser visto nas Figuras 64 e 73. No caso do SV a delaminação ocorreu na camada superior dominada quase completamente pela presença da fibra de Sisal com um efeito diminuído da fibra de vidro. Em contrapartida nota-se na área delaminada de JV uma atuação muito mais pronunciada da fibra de vidro que pode ser vista no fato da remoção da resina em volta das fibras de vidro (*pull out*) no JV ser muito mais acentuada do que no SV onde ele é pouco visível na área delaminada, assim como a ruptura de fibras de vidro. De fato, observa-se que somente a superfície do *bundle* da fibra de vidro no SV interagiu com a área colada e de fato influenciou a resistência final como pode ser visto na Figura 71. Como estas juntas são similares em geometria e material, elas estão relativamente equilibradas em termos de distribuição de tensão e rigidez, logo o fenômeno previamente descrito foi o fator mais relevante na diferença de resistências.

É importante também o fato que o Sisal utilizado no SV não recebeu tratamento superficial e demonstrou problema de molhabilidade sob inspeção visual.

4.1.2.3 Juntas Coladas de Compósitos Reforçadas com Fibras Naturais e Sintéticas (Dissimilares)

As juntas coladas de compósitos reforçadas com fibras naturais e sintéticas e puramente sintéticas estudadas foram: JV-FC e SV-FC. O ganho observado da JV-FC em relação a SV-FC foi de 20,57%. Levando em consideração a grande diferença de espessuras entre os substratos de SV e FC e a menor diferença de espessura entre os de JV e FC observa-se que as juntas de JV-FC apresentaram maior equilíbrio geométrico. Juntas com substratos dissimilares

em espessura geram distribuições de tensão assimétricas e esta excentricidade no eixo de carga causa rotações deletérias a resistência da junta. Portanto, a junta mais equilibrada terá a eficiência maior [18].

4.1.2.4 Juntas Coladas de Compósitos Reforçadas com Fibras Naturais Alcalinizadas

As juntas coladas de compósitos reforçadas com fibras naturais alcalinizadas estudadas foram as de bidirecional de fibra de Sisal com tratamento alcalino, S-S. Isto foi feito para a possível determinação da melhoria da molhabilidade além da expansão do escopo experimental. A resistência da junta foi muito menor em comparação com as reforçadas sinteticamente a despeito do tratamento superficial como era esperado. Logo, foi observado uma diminuição da resistência de 39,84% e 31% em relação as juntas de JV-JV e SV-SV respectivamente. Nota-se que a menor eficiência em relação a ambos embora relevante denota a alta resistência do Sisal. Foi observado também que em todos os casos a falha se deu por propagação de trinca e quebra nos substratos enquanto a área colada se manteve. Isto denota que o Sisal mesmo com tratamento alcalino é menos resistente que o adesivo utilizado.

4.2.2 RESINA AR260

4.2.2.1 Juntas Coladas de Compósitos Reforçados com Fibras Sintéticas Similares

Foi observado uma diminuição da resistência de 23% da FC-FC em relação a FV-FV. Esta diminuição se deve aos fatores discutidos na seção anterior além da menor ductilidade da resina em comparação com o BETAMATE. Sendo este mais dúctil ele é capaz de absorver as tensões de pico nos limites da área colada melhor, evitando assim falha prematura e apresentando eficiência superior [19].

4.2.2.2 Juntas Coladas de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais (Híbridos)

A JV-JV obteve um ganho de 7,62% em relação ao SV-SV. Este ganho se deve as mesmas razões discutidas na seção anterior assim como a diferença de ductilidade da resina [19].

4.2.2.3 Juntas Coladas de Compósitos Reforçadas com Fibras Naturais e Sintéticas (Dissimilares)

A JV-FC obteve um ganho de 2,3% em relação ao SV-FC. Este ganho se deve as mesmas razões discutidas na seção anterior assim como a diferença de ductilidade da resina [19].

4.2.2.4 Juntas Coladas de Compósitos Reforçadas com Fibras Naturais Alcalinizadas

Como era esperado, a junta de S-S apresentou uma diminuição de resistência de 30,96% e 25,27% em relação as juntas de JV-JV e SV-SV respectivamente. Esta diferença em relação ao BETAMATE se deve a diferença de ductilidade dos adesivos [19]. Após inspeção visual sob aumento da área delaminada, foi constatado melhora na molhabilidade do Sisal causado pelo tratamento alcalino.

4.3 Modos de Ruptura

Como descrito na seção 2.9 existem três tipos de ruptura possíveis para juntas adesivas: adesiva, coesiva ou mista para substratos metálicos. Porém no caso de substratos de materiais compósitos existem também outras possibilidades devido a presença de camadas de fibras como descrito na norma ASTM D5573.

São estas:

- Falha coesiva de camada fina ou Falha da interfase (*Thin-Layer Cohesive Failure or Interphase failure*);
- Delaminação (*Fibre-Tear Failure*);
- Delaminação leve (*Light-Fibre-Tear Failure*);
- Falha por quebra de substrato (*Stock-Break Failure*);
- Falha mista (*Mixed Failure*);

A falha coesiva de camada fina é definida como ocorrendo muito perto da interface adesivo-substrato, caracterizada pela presença “salpicada” do adesivo em uma superfície de substrato e uma camada espessa de adesivo na outra superfície.

A falha de delaminação é uma falha que ocorre dentro da matriz do compósito e é caracterizada pela visibilidade de fibras de reforço em ambas as superfícies de ruptura.

A falha de delaminação leve é uma falha que ocorre dentro do substrato, próxima a superfície caracterizada por uma fina camada de resina da matriz sobre o adesivo com poucas ou nenhuma fibra de reforço transferida para o adesivo.

A falha por quebra do substrato é caracterizada pela propagação de trinca dentro do substrato e fora da área colada, porém normalmente próximo a ela.

A falha mista pode ser qualquer combinação de duas ou mais das falhas previamente descritas.

Devido à dificuldade da determinação exata do modo de ruptura em alguns casos somente através da inspeção visual a olho nu, foram tiradas fotos em uma lupa com aumento de 0,63x das superfícies de ruptura. Foi utilizada a lupa disponível no Laboratório de Materiais, LAMAT CEFET/RJ que pode ser vista na Figura 48.



Figura 48: Lupa utilizada.

4.3.1 Juntas Sintéticas Similares

4.3.1.1 FV-FV

Para o grupo de FV todas as falhas para BETAMATE e resina foram delaminações. Isto é verificável a olho nú pela presença de adesivo e claramente fibras delaminadas em ambas as superfícies de ruptura de modo homogêneo. As Figuras 49 a 53 mostram estes resultados.

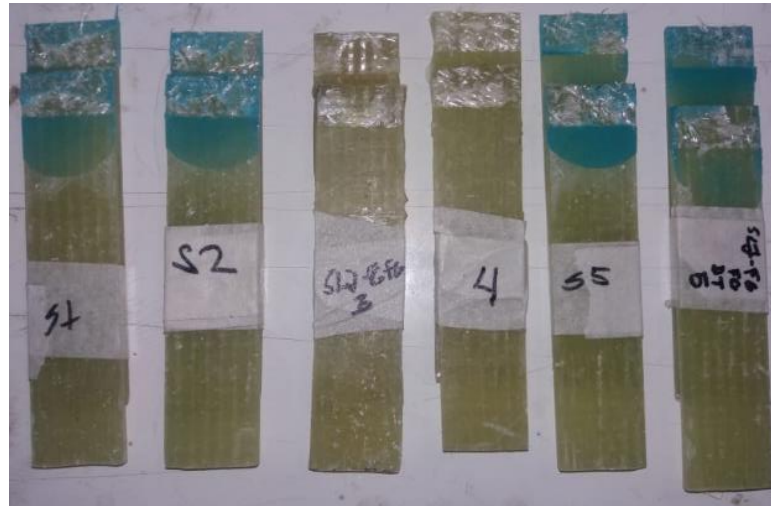


Figura 49: Foto das superfícies de ruptura das juntas coladas de FV-FV.

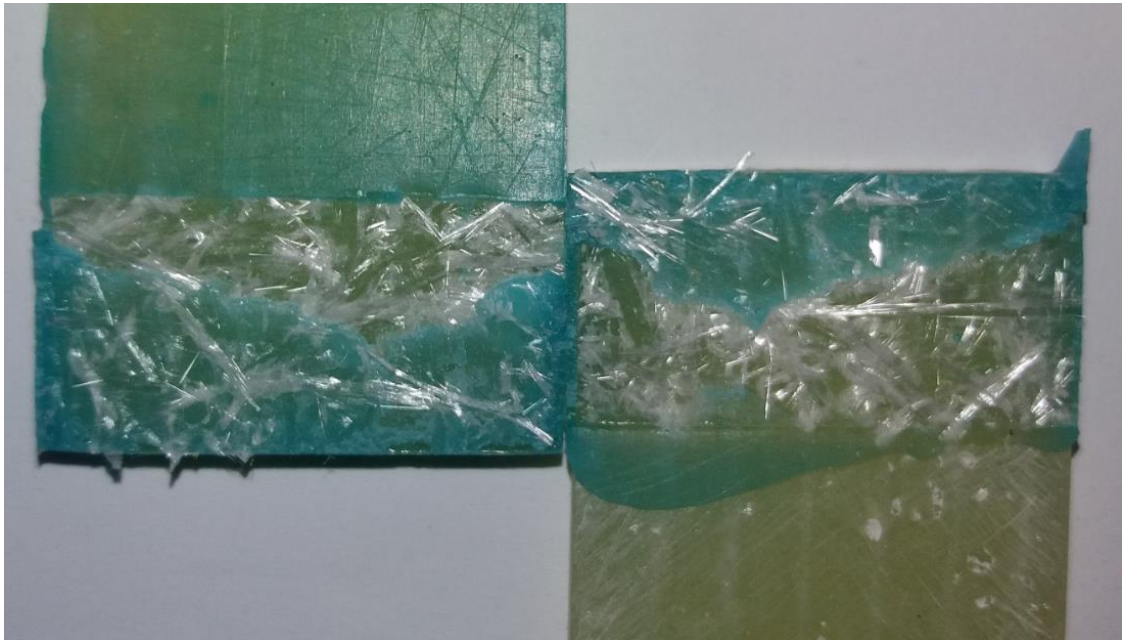


Figura 50: Detalhe da superfície de ruptura da FV-FV para BETAMATE.



Figura 51: Detalhe da superfície de ruptura da FV-FV para resina.

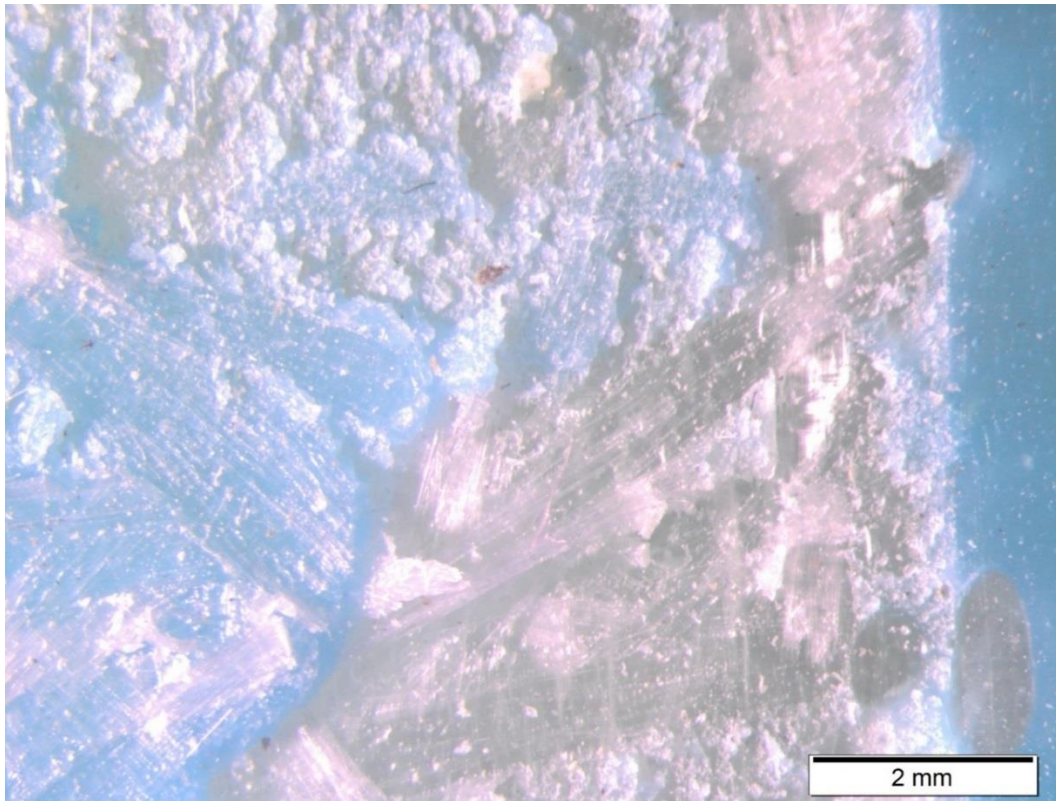


Figura 52: Foto aumentada da superfície de ruptura da FV-FV para BETAMATE.

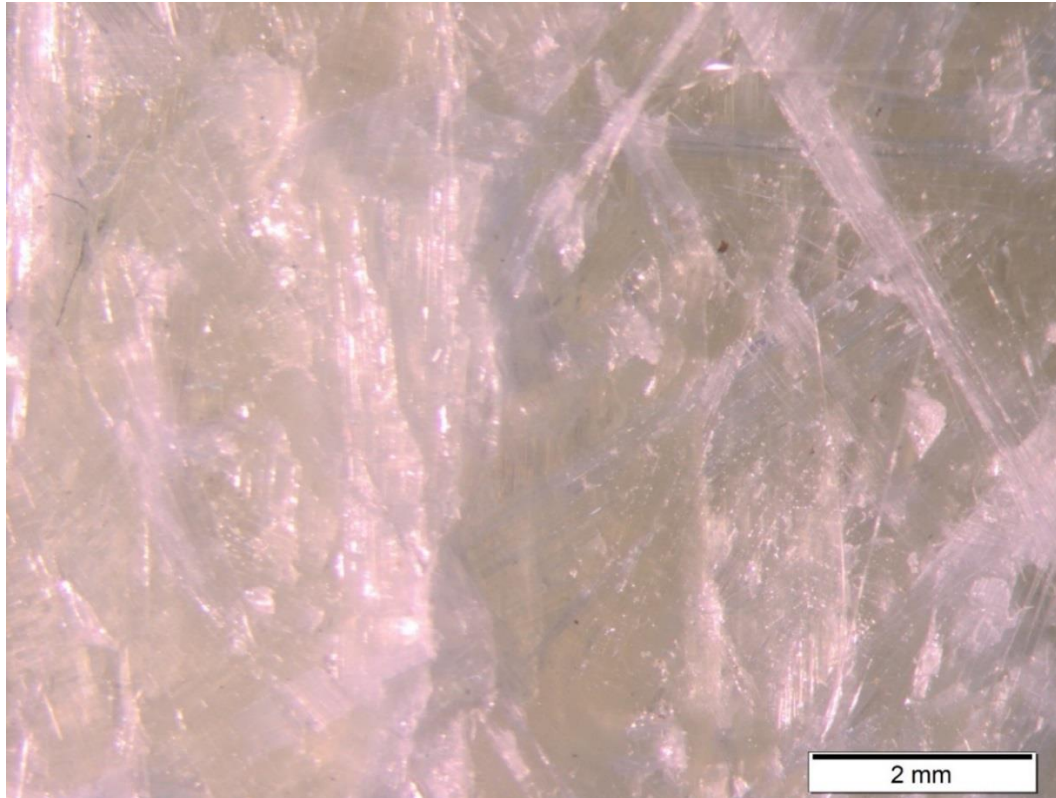


Figura 53: Foto aumentada da superfície de ruptura da FV-FV para resina.

4.3.1.2 FC-FC

Os modos de falha observados para o grupo de FC foram falhas mistas compostas de falha da interfase, delaminação assim como falha coesiva. As superfícies de ruptura podem ser vistas na Figura 54.



Figura 54: Foto das superfícies de ruptura das juntas coladas de FC-FC.

Nas juntas com BETAMATE foram observadas falha da interfase total (Figura 55) e falhas mistas de interfase e coesiva (Figuras 56 e 57). Na Figura 55 a olho nú é possível visualizar uma camada espessa de adesivo em um dos substratos enquanto no outro aparentemente não existe camada de adesivo.

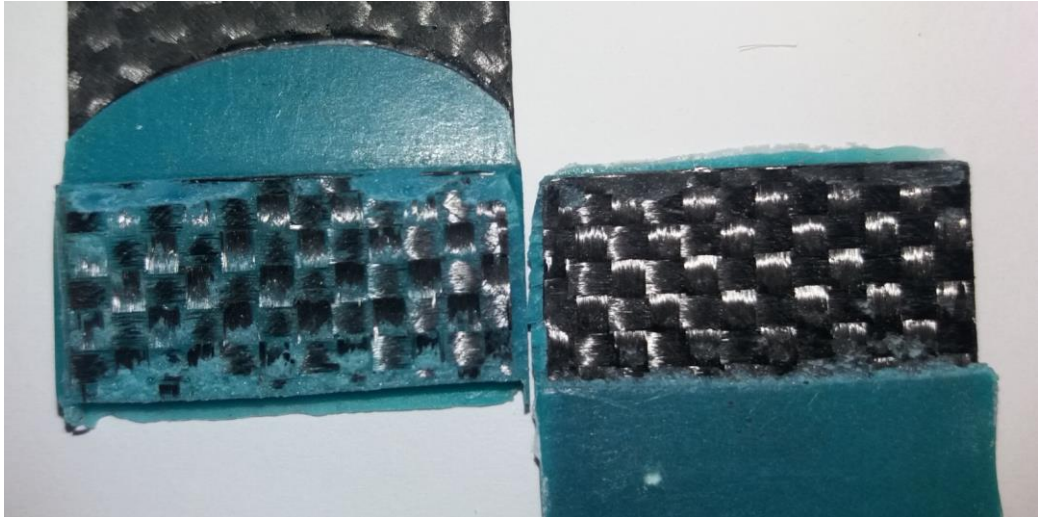


Figura 55: Detalhe da superfície de ruptura da FC-FC para BETAMATE (CP 1).



Figura 56: Detalhe da superfície de ruptura da FC-FC para BETAMATE (CP 2).



Figura 57: Detalhe da superfície de ruptura da FC-FC para BETAMATE (CP 3).

Com o auxílio da lupa mencionada anteriormente foram tiradas fotos aumentadas para a definição do modo de ruptura para casos como o da Figura 55. Esta foto aumentada para o caso do BETAMATE pode ser vista na Figura 58. Logo, na Figura 58 com a foto aumentada podemos observar flóculos de adesivo assim como fibras rompidas na camada aparentemente sem adesivo. Isto confirma a falha como de interfase como descrita na norma.

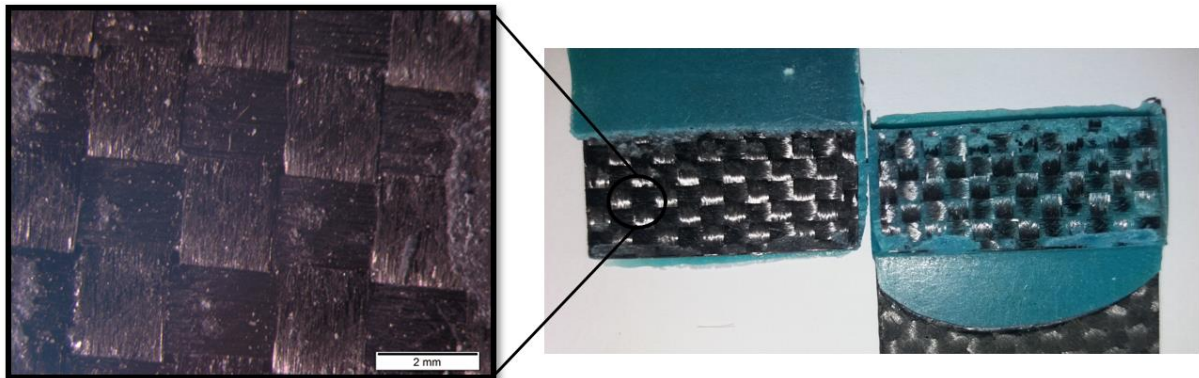


Figura 58: Foto aumentada da superfície de ruptura de FC para BETAMATE com detalhe da falha.

Para a resina foi observado falha coesiva e de interfase. Como pode ser visto na Figura 59, ocorreu falha da interfase onde se observa uma camada espessa de adesivo em uma das superfícies e aparentemente nenhum adesivo na outra camada.



Figura 59: Detalhe da superfície de ruptura da FC-FC para resina (CP 1).

A olho nú esta situação poderia ser considerada falha adesiva, porém podemos ver a presença de flóculos de resina e fibras delaminadas com o auxílio da foto aumentada da área na Figura 60.

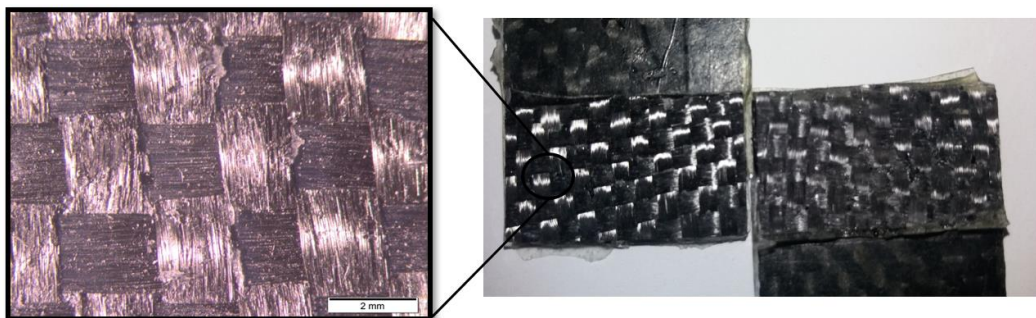


Figura 60: Foto aumentada da superfície de ruptura de FC para resina com detalhe da falha.

A Figura 60 mostra caso da resina com falha coesiva pela presença de camada adesiva relativamente homogênea em ambos substratos.



Figura 61: Detalhe da superfície de ruptura da FC-FC para resina (CP 2).

4.3.1.3 Comparação do grupo de juntas sintéticas similares

Uma vez descrito o resultado qualitativo do grupo de juntas sintéticas similares, podemos observar novamente os dados estatísticos vistos na Figura 62. Observa-se que a falha de delaminação total homogênea da FV em comparação com as falhas de interfase e delaminação da FC contribuíram para resultados melhores. O grupo FC foi menos eficiente e isto está ligado a rigidez inferior dos substratos devido a diferença de espessura, mas também, aparentemente ao modo de falha de interfase.

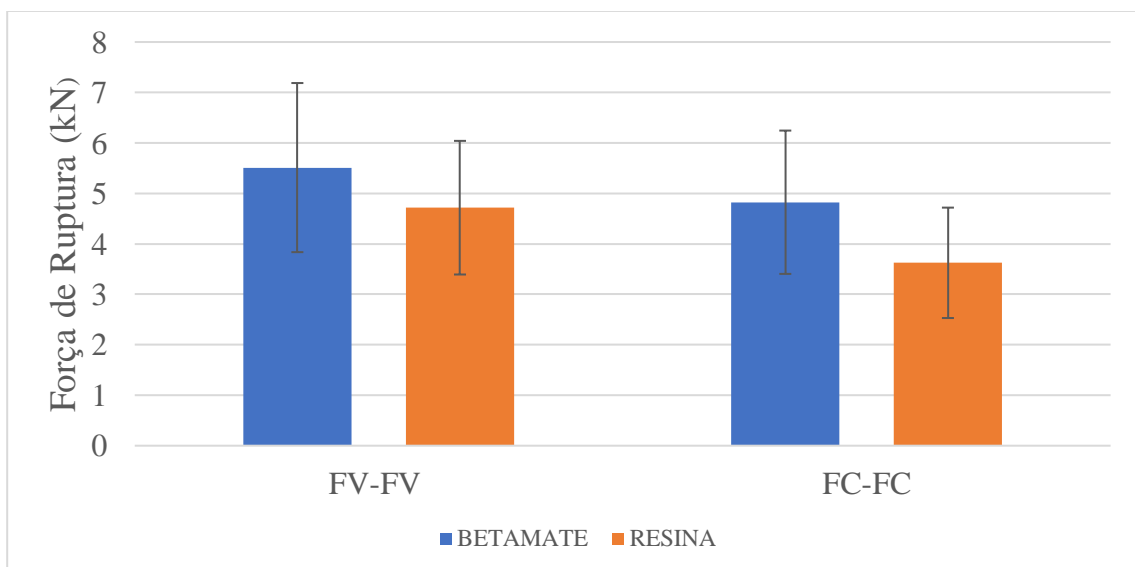


Figura 62: Comparação dos dados do grupo de juntas sintéticas similares.

4.3.2 Juntas Naturais Híbridas Similares

4.3.2.1 SV-SV

Os modos de ruptura do grupo SV foram interfase, delaminação e mistos de ambos. As superfícies de ruptura podem ser vistas na Figura 63.

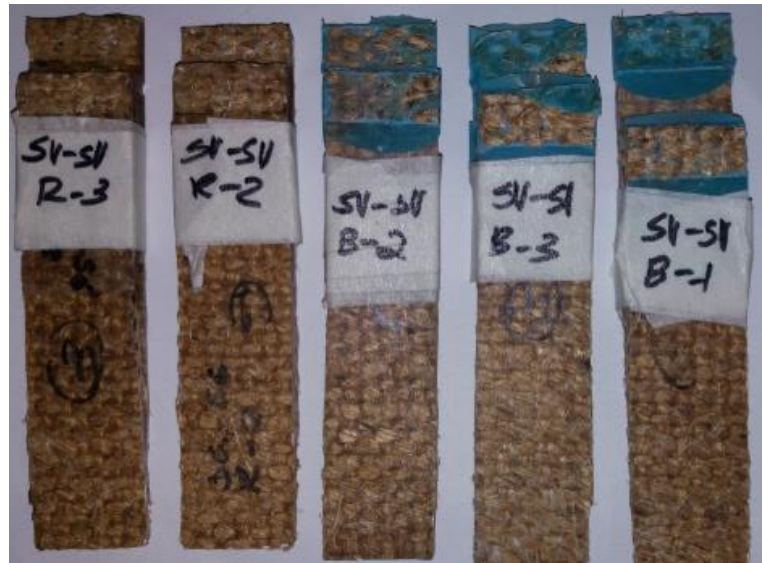


Figura 63: Foto das superfícies de ruptura das juntas coladas de SV-SV.

Para o BETAMATE foi observado falha da interfase total e falha mista interfase e delaminação (Figuras 64 a 66). Isto se deve a observação de camada espessa de adesivo assim como fibras delaminadas em uma das superfícies de ruptura assim como pouquíssimo adesivo na outra como pode ser visto nas Figuras 64 e 66.



Figura 64: Detalhe da superfície de ruptura do SV-SV para BETAMATE (CP 1).



Figura 65: Detalhe da superfície de ruptura do SV-SV para BETAMATE (CP 2).



Figura 66: Detalhe da superfície de ruptura do SV-SV para BETAMATE (CP 3).

A Figura 65 denota caso de aparente falha mista entre interfase e coesiva, porém após inspeção aumentada (Figura 67), é possível observar fibras delaminadas junto ao adesivo tornando esta falha mista em interfase e delaminação.

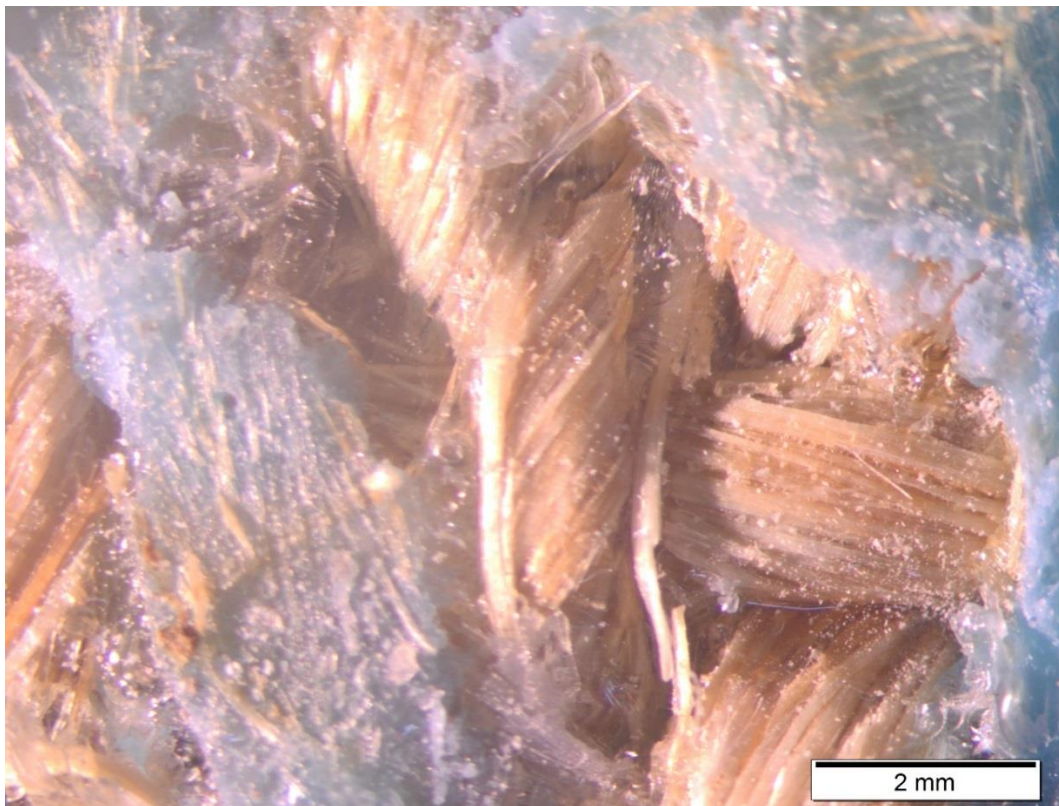


Figura 67: Foto aumentada da superfície de ruptura do SV-SV para BETAMATE (CP 2).

No caso da resina as falhas foram análogas como pode ser visto nas Figuras 67 e 68. Onde observa-se falha mista entre interfase e delaminação.



Figura 68: Detalhe da superfície de ruptura do SV-SV para resina (CP 2).



Figura 69: Detalhe da superfície de ruptura do SV-SV para resina (CP 3).

As Figuras 70 e 71 mostram o que foi discutido anteriormente na seção 4.2.1.2 no que diz respeito ao papel do reforço de vidro no caso do SV onde observa-se a ruptura da parte superior do *bundle* da fibra de vidro e esta continua no seu caminho intralaminar na manta base de Sisal.

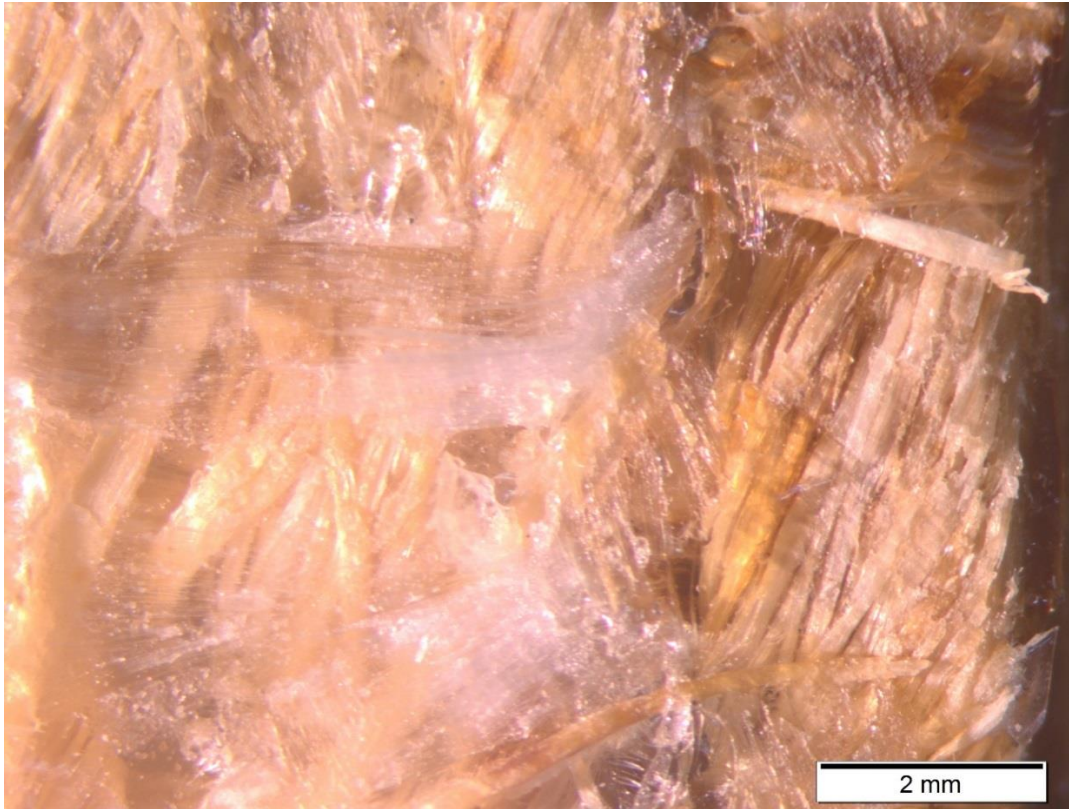


Figura 70: Foto aumentada da superfície de ruptura do SV-SV para resina.



Figura 71: Foto aumentada do SV para resina com detalhe da fibra de reforço.

4.3.2.2 JV-JV

Os modos de ruptura do grupo JV-JV foram delaminação e quebra de substrato para ambos adesivos. As superfícies de ruptura podem ser vistas na Figura 72.



Figura 72: Foto das superfícies de ruptura das juntas coladas de JV-JV.

As Figuras 73 e 74 mostram casos análogos para BETAMATE e resina onde ocorreu delaminação e quebra de substrato.

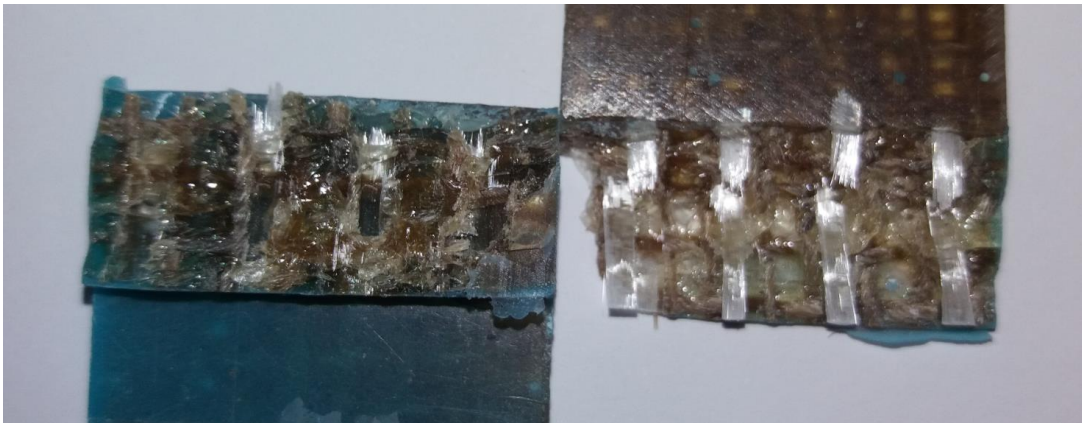


Figura 73: Detalhe da superfície de ruptura da JV-JV para BETAMATE.



Figura 74: Detalhe da superfície de ruptura da JV-JV para resina.

Observa-se a olho nú *pull out* e quebra do reforço. Isto pode ser visto mais claramente nas fotos aumentadas, com auxílio de lupa, que podem ser vistas nas Figuras 75 e 76.

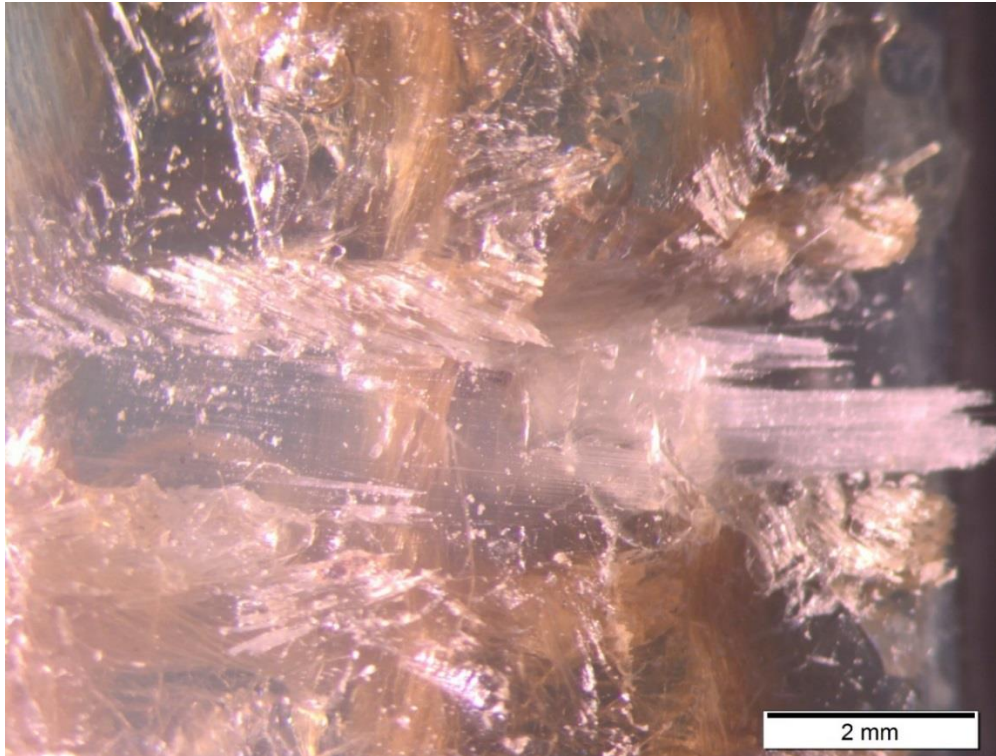


Figura 75: Foto aumentada da superfície de ruptura da JV-JV para BETAMATE.

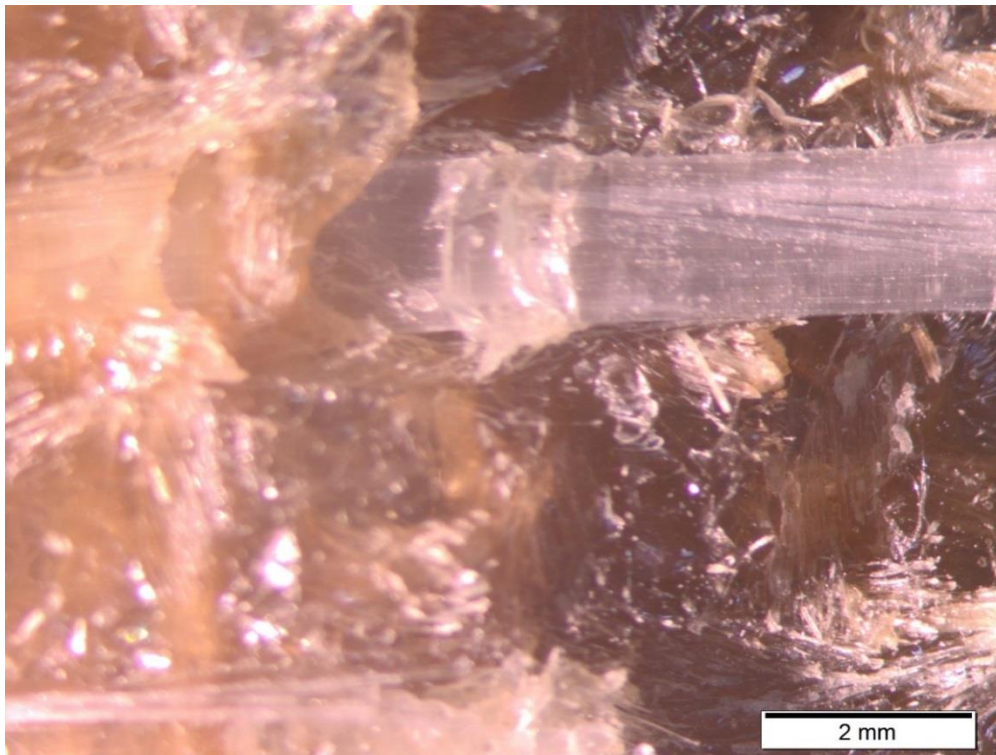


Figura 76: Foto aumentada da superfície de ruptura da JV-JV para resina.

Também ocorreram propagação de trinca somente no substrato tanto para BETAMATE quanto para resina. Como pode ser visto nas Figuras 77 e 78.



Figura 77: Detalhe da quebra do substrato de JV-JV para BETAMATE.



Figura 78: Detalhe da quebra de substrato de JV-JV para resina.

No caso do BETAMATE isto ocorreu devido a diferença de rigidez dos substratos e no caso da resina também. A propagação de trinca ocorreu perto, mas não dentro da área colada, como previsto na norma. Nota-se novamente o que foi previamente discutido no quesito de comprometimento do reforço na resistência final da junta o que se refletiu quantitativamente e qualitativamente.

4.3.2.3 Comparação do grupo de juntas naturais híbridas similares

Uma vez descrito o resultado qualitativo do grupo de juntas naturais híbridas similares podemos observar novamente os dados estatísticos vistos na Figura 79. Observa-se que no SV as falhas foram interfase e delaminação mistas e na JV foram delaminação e quebra do substrato. Nota-se novamente a maior eficiência do grupo onde a falha da interfase não ocorreu.

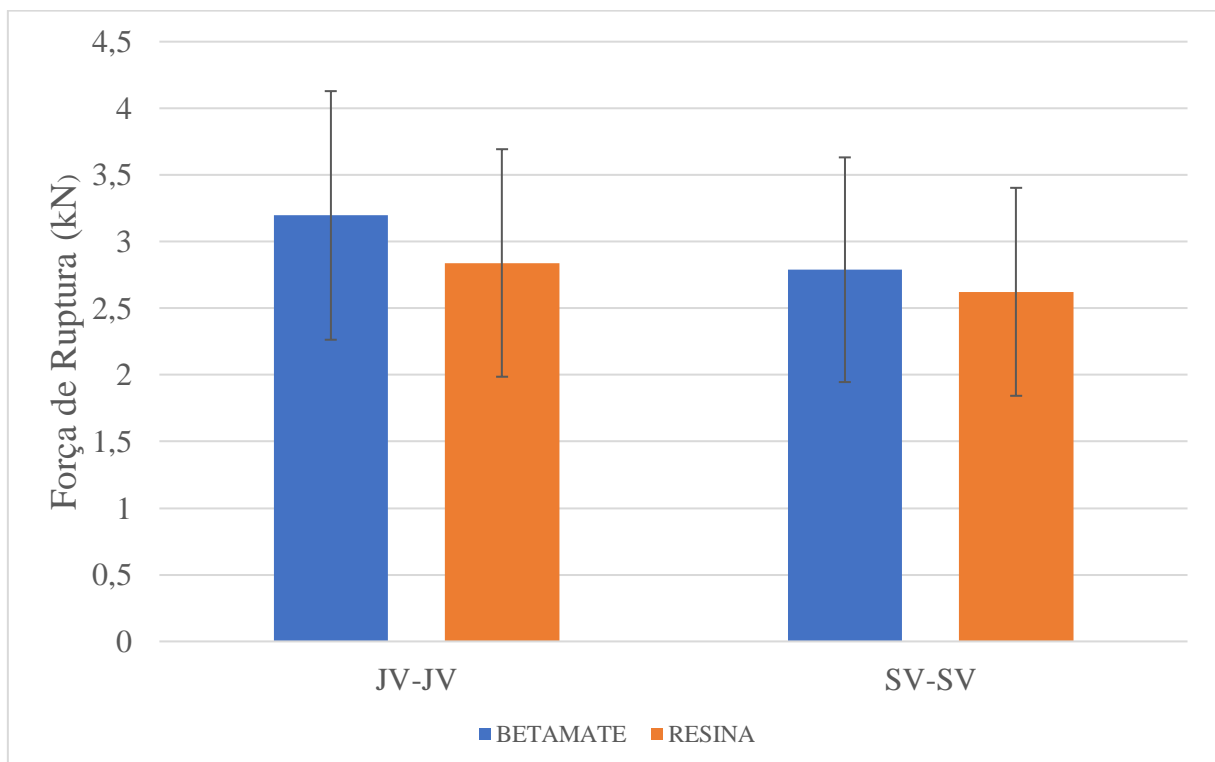


Figura 79: Comparação dos dados do grupo de juntas naturais híbridas similares.

4.3.3 Juntas Dissimilares

4.3.3.1 SV-FC

Os modos de ruptura do grupo SV-FC foram falhas mistas da interfase e delaminação. As superfícies de ruptura podem ser vistas nas Figuras 80 e 81.



Figura 80: Foto das superfícies de ruptura das juntas coladas de SV-FC para BETAMATE.



Figura 81: Foto das superfícies de ruptura das juntas coladas de SV-FC para resina.

No caso do BETAMATE foi observado flóculos de adesivo na camada com falha aparentemente adesiva o que define esta falha como de interfase de acordo com a norma como pode ser visto na Figura 82 e confirmada na Figura 83 onde com o auxílio da lupa observa-se os flóculos de adesivo previstos na norma.



Figura 82: Detalhe da superfície de ruptura do SV-FC para BETAMATE (CP 3).

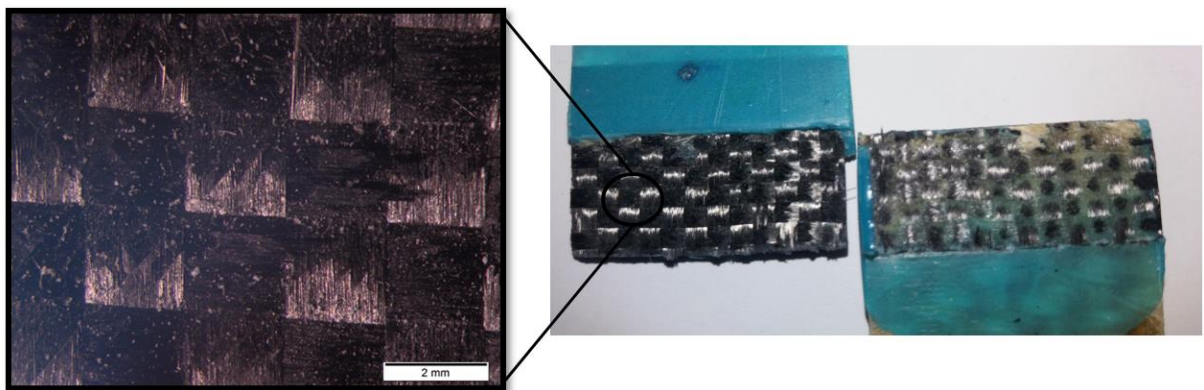


Figura 83: Foto aumentada da área de ruptura do SV-FC com detalhe do modo de ruptura para o BETAMATE.

No caso da resina foi observado situação análoga vista na Figura 84 e confirmada na Figura 85.

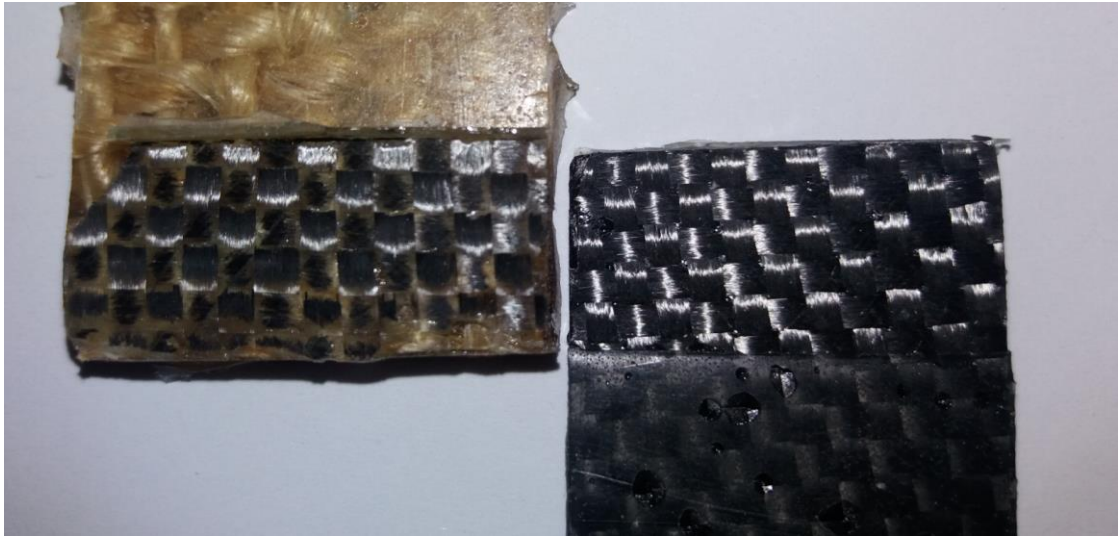


Figura 84: Detalhe da superfície de ruptura do SV-FC para resina (CP 2).

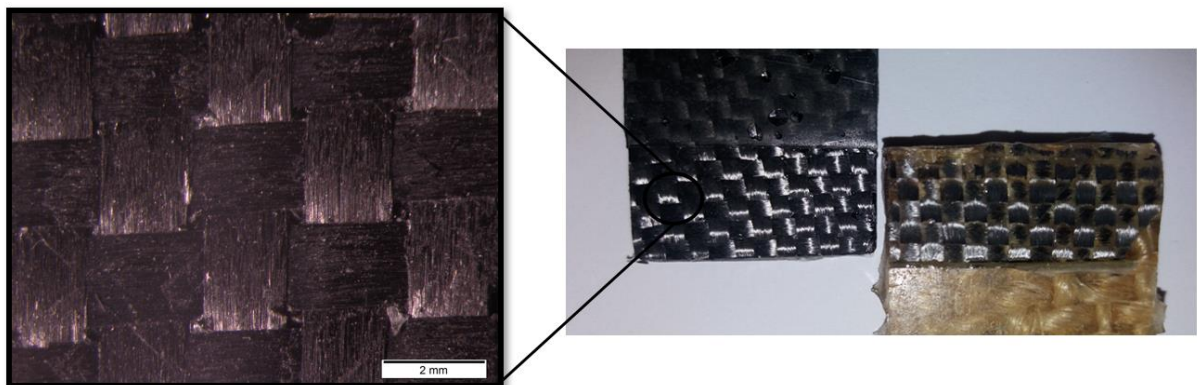


Figura 85: Foto aumentada da área de ruptura do SV-FC com detalhe do modo de ruptura para resina.

As Figuras 86 e 87 mostram fotos aumentadas das superfícies de ruptura para BETAMATE e resina.

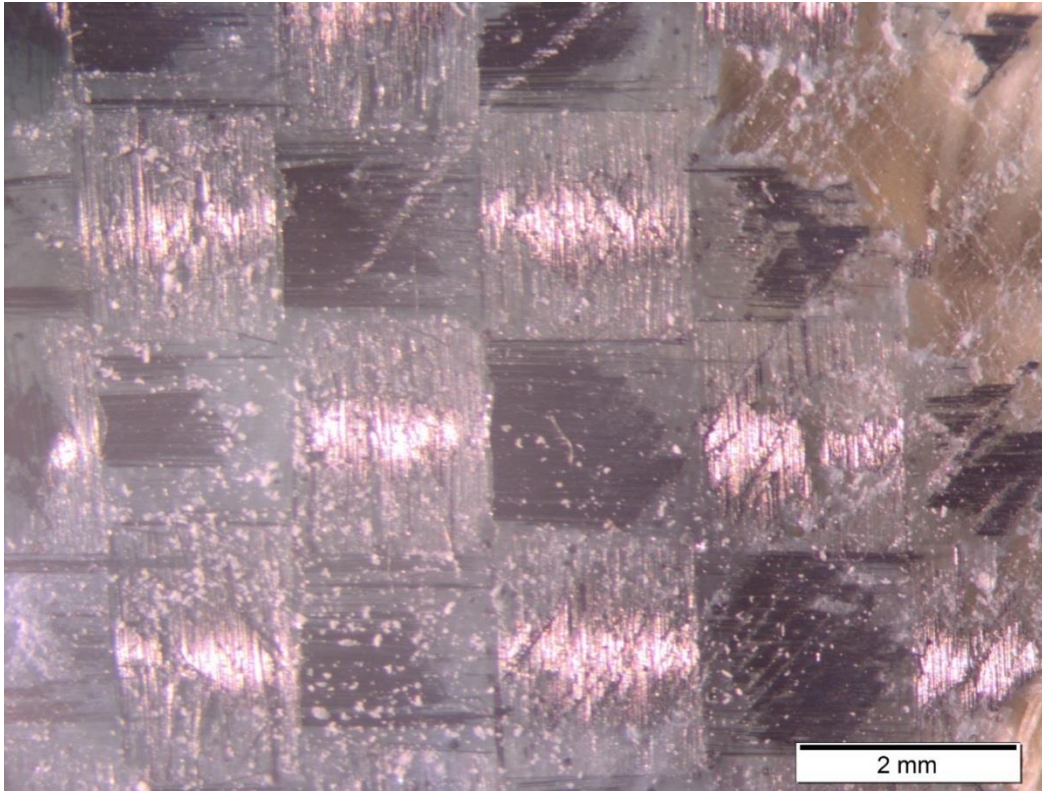


Figura 86: Foto aumentada da superfície de ruptura do SV-FC para BETAMATE.

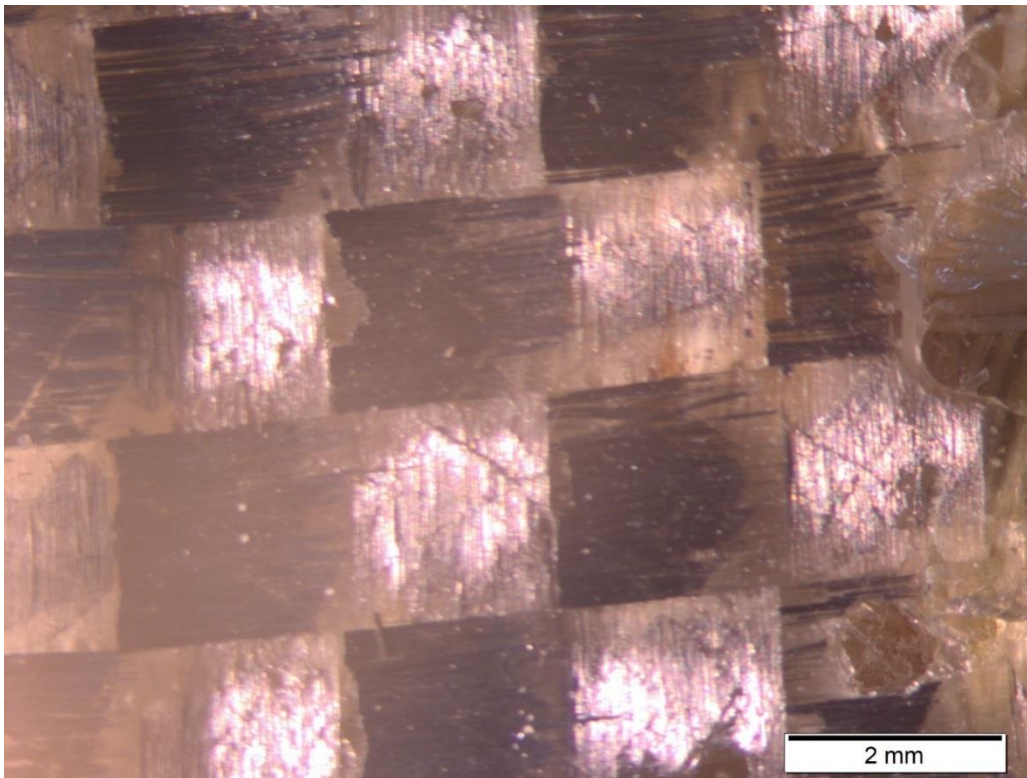


Figura 87: Foto aumentada da superfície de ruptura do SV-FC para resina.

4.3.3.2 JV-FC

O modo de ruptura do grupo JV-FV foi misto (delaminação e interfase). As superfícies de ruptura podem ser vistas nas Figuras 88 e 99.

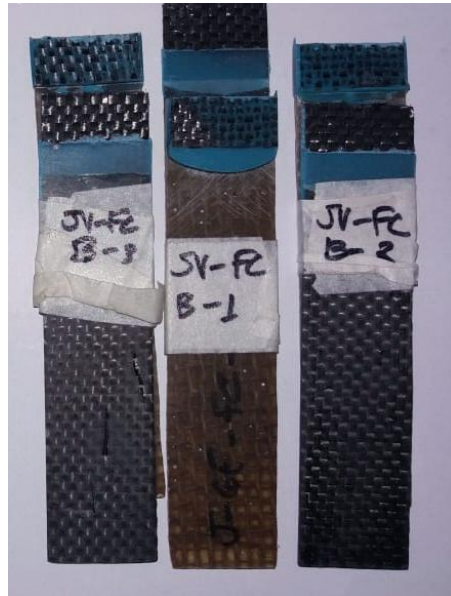


Figura 88: Foto das superfícies de ruptura das juntas coladas de JV-FC para BETAMATE.



Figura 89: Foto das superfícies de ruptura das juntas coladas de JV-FC para resina.

Para o caso do BETAMATE observa-se delaminação e falha da interfase determinada através de inspeção visual a olho nú da superfície de ruptura e através de foto aumentada com auxílio de lupa que podem ser vistas nas Figuras 90 e 91. Observa-se camada espessa de adesivo em um dos substratos assim como rompimento de fibras e delaminação porém a presença de adesivo é de difícil determinação a olho nú no substrato de FC. Através da lupa podemos ver flóculos de adesivo assim como rompimento de fibras.

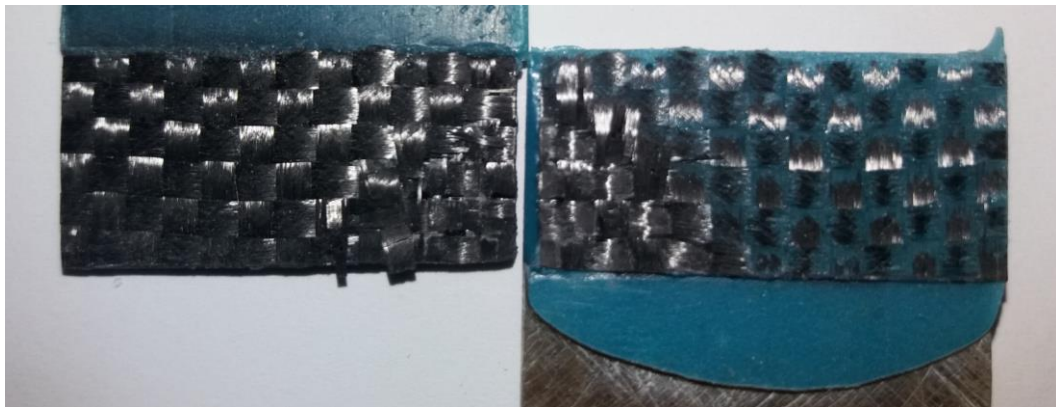


Figura 90: Detalhe da superfície de ruptura da JV-FC para BETAMATE (CP 1).

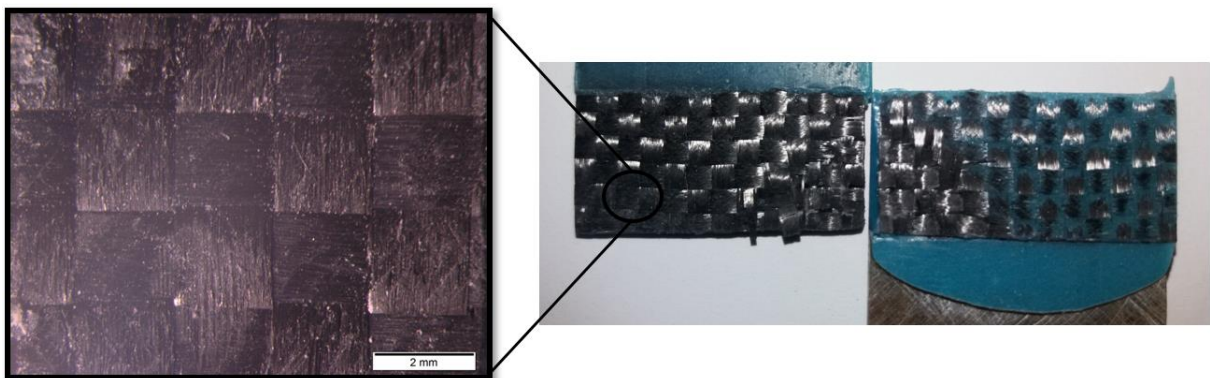


Figura 91: Foto aumentada da superfície de ruptura da JV-FV com detalhe do modo de ruptura para BETAMATE.

O modo de ruptura para a resina foi análogo como pode ser visto nas Figuras 92 e 93.

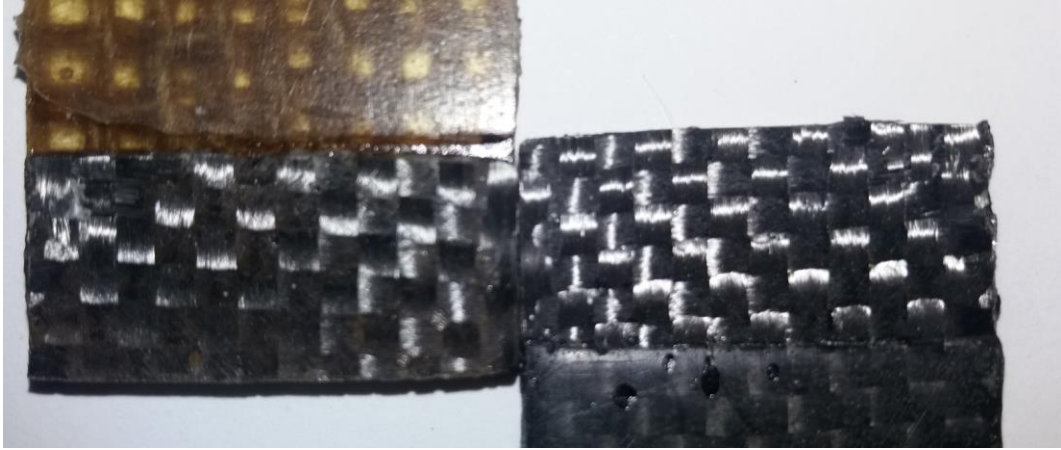


Figura 92: Detalhe da superfície de ruptura da JV-FC para resina (CP 2).

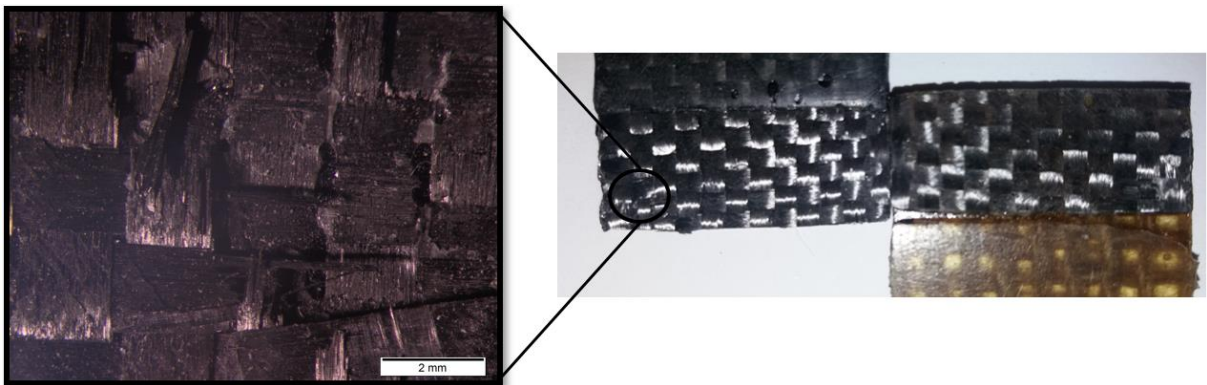


Figura 93: Foto aumentada da superfície de ruptura da JV-FV com detalhe do modo de ruptura para resina.

As Figuras 94 e 95 mostram fotos aumentadas das superfícies de ruptura para BETAMATE e resina.

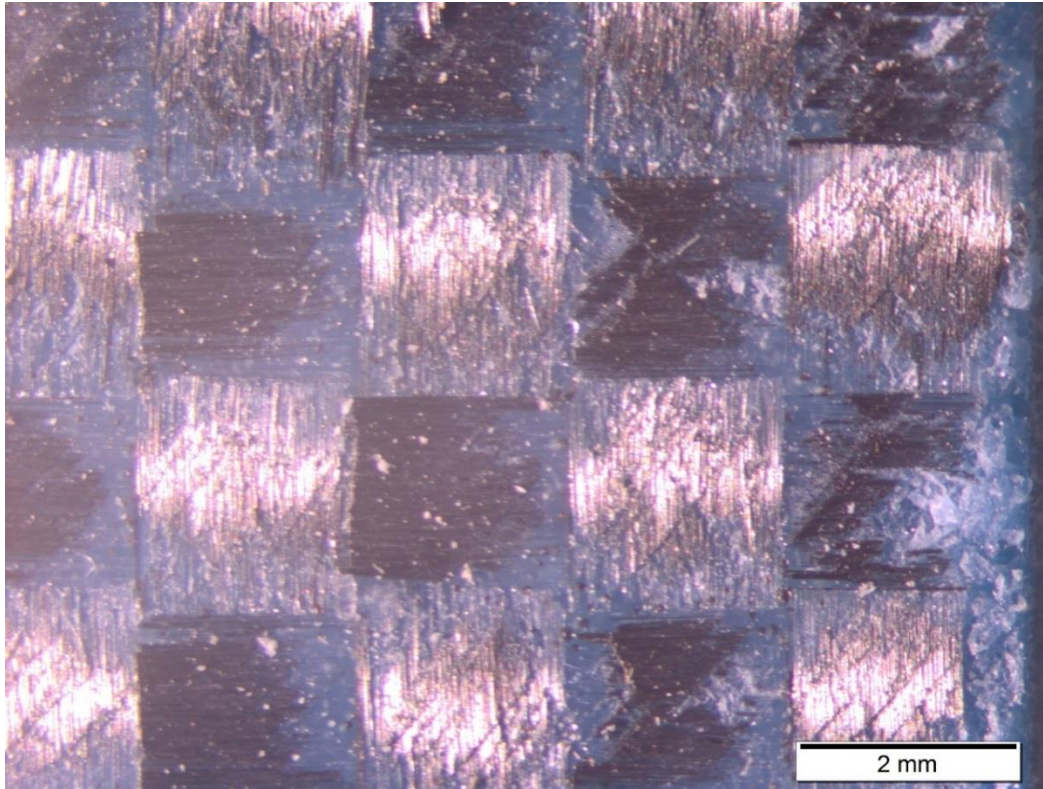


Figura 94: Foto aumentada da superfície de ruptura da JV-FC para BETAMATE.

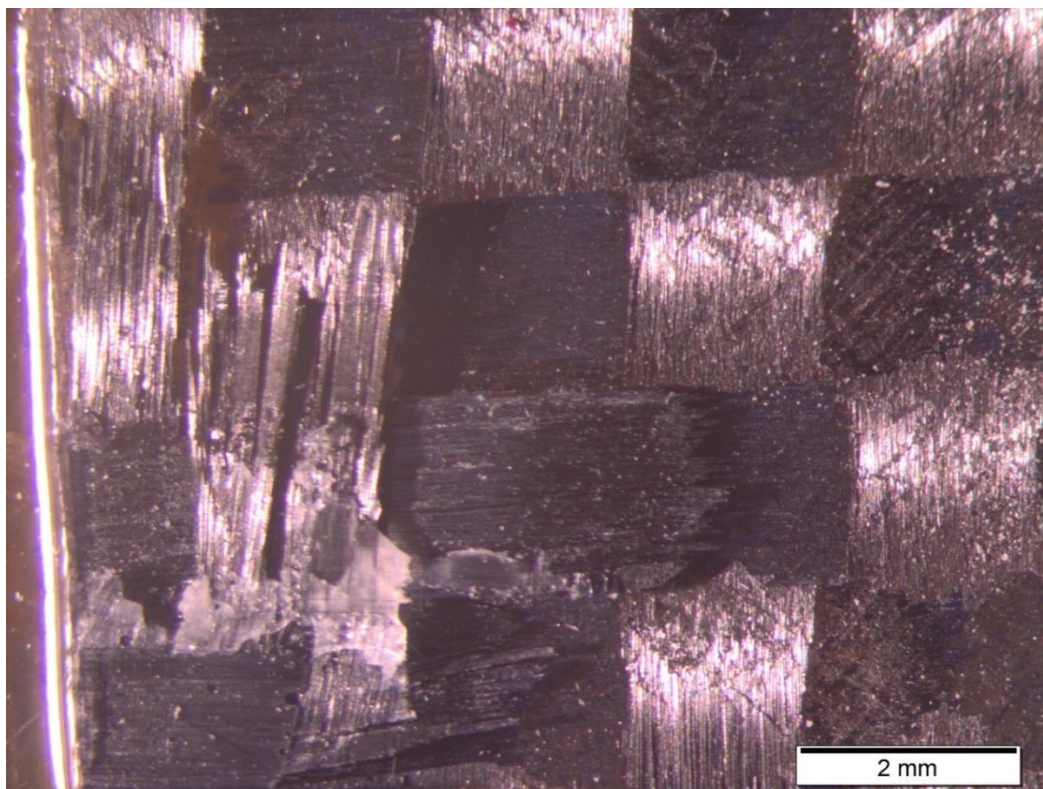


Figura 95: Foto aumentada da superfície de ruptura da JV-FC para resina.

4.3.3.3 Comparação do grupo de juntas dissimilares

Uma vez descrito o resultado qualitativo do grupo de juntas similares sintéticas podemos observar novamente os dados estatísticos vistos na Figura 96. Observa-se que no SV-FC as falhas foram interfase e delaminação mistas e na JV-FC foram análogas, porém observa-se que a camada de delaminação no caso JV foi mais uniforme e espessa dada uma análise qualitativa. Isto se torna particularmente aparente na comparação entre as fotos aumentadas das Figuras 86 e 87 e as Figuras 94 e 95. Nota-se também a presença de ruptura de fibras de carbono mais pronunciadas no caso JV. Embora a falha de interfase tenha sido observada para ambos substratos SV e JV, o grupo que demonstrou delaminação de FC mais uniforme também teve maior eficiência quantitativa.

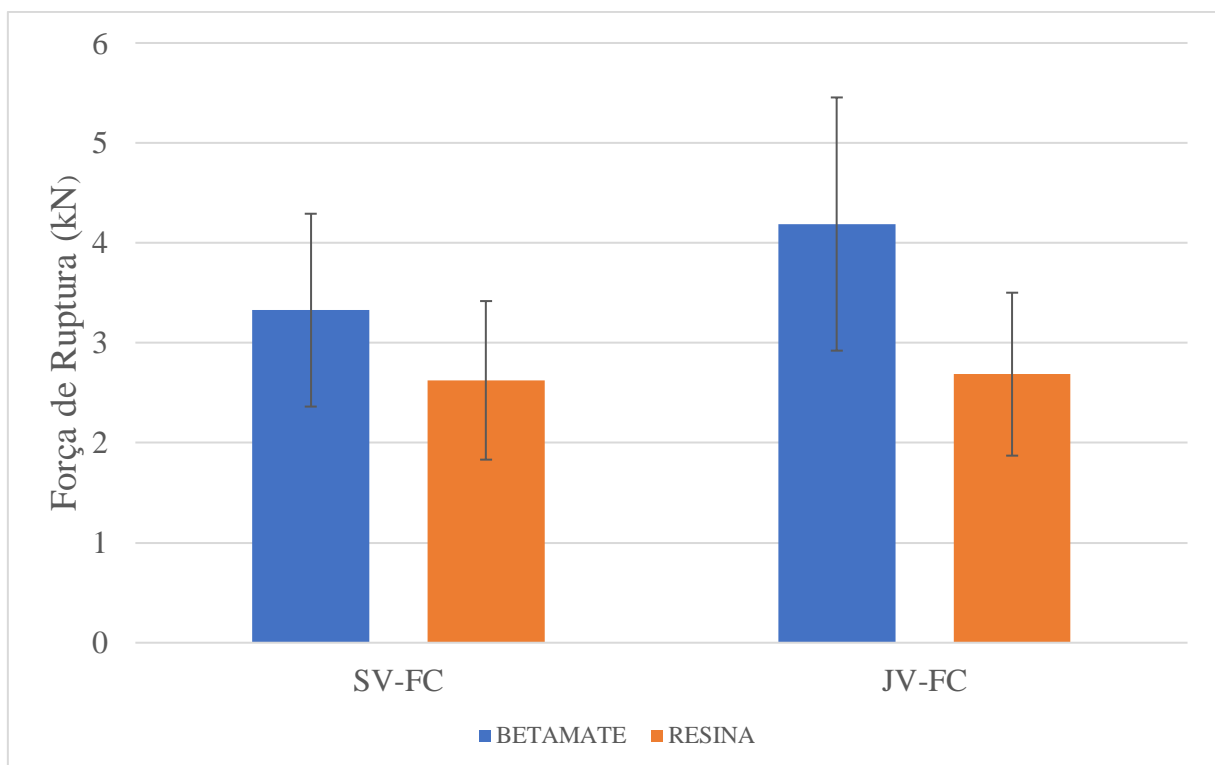


Figura 96: Comparação dos dados do grupo de juntas dissimilares.

4.3.4 Juntas Naturais

4.3.4.1 S-S

O modo de ruptura do grupo S-S foi somente quebra de substrato para o BETAMATE e falha mista (interfase e delaminação) e quebra do substrato para resina. As superfícies de ruptura podem ser vistas na Figura 97.



Figura 97: Foto das superfícies de ruptura das juntas coladas de S-S.

Para o BETAMATE todas as falhas ocorreram por propagação de trinca no substrato na região entre as lâminas, se iniciando perto do limite da área colada significando que a camada adesiva é mais resistente que o substrato, isto pode ser visto na Figura 98. A Figura 99 mostra foto aumentada da propagação da trinca entre lâminas no caso do BETAMATE.



Figura 98: Detalhe da quebra dos substratos de S-S para BETAMATE.



Figura 99: Foto aumentada da quebra do substrato de S-S para BETAMATE.

No caso da resina foi observado falha do substrato por propagação de trinca (Figura 100) e falhas mistas por delaminação e interfase que podem ser vistas nas Figuras 101 e 102.



Figura 100: Detalhe da quebra dos substratos de S-S para a resina.



Figura 101: Detalhe da superfície de ruptura do S-S para resina (CP 1).

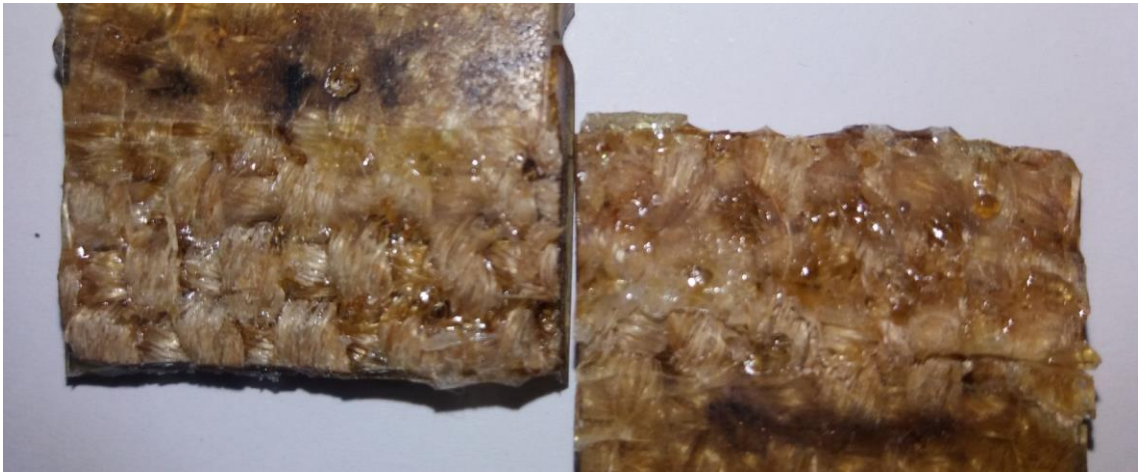


Figura 102: Detalhe da superfície de ruptura da S-S para resina (CP 2).

A Figura 103 mostra uma foto aumentada com auxílio de lupa, onde podem ser vistos flóculos de adesivo assim como quebra de fibras, o que confirma o modo de ruptura.

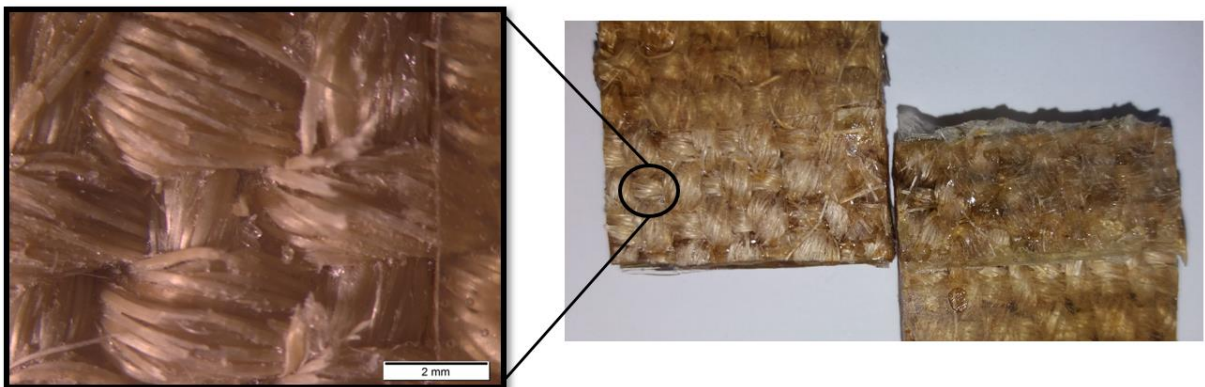


Figura 103: Foto aumentada da superfície de ruptura da S-S com detalhe do modo de ruptura para resina.

4.3.4.2 Comparação do grupo de juntas naturais

Uma vez descrito o resultado qualitativo do grupo de juntas similares sintéticas podemos observar novamente os dados estatísticos vistos na Figura 104. Como era esperado o grupo de juntas naturais obteve eficiência menor em comparação com os híbridos. Observa-se, porém, que o estudo das juntas naturais não foi em vão pois em conjunto com a conclusão qualitativa do grupo híbrido podemos dizer que o reforço do SV foi importante para a resistência final da junta devido a melhor eficiência quando comparado com as juntas naturais não reforçadas. Na análise entre adesivos das juntas naturais observa-se uma diferença muito pequena entre eficiências e juntamente com o fato que foram observadas quebras de substrato assim como delaminação e interfase é possível que o quesito de afinidade química entre resina utilizada como adesivo e a resina do próprio compósito tenham sido responsáveis pela maior eficiência.

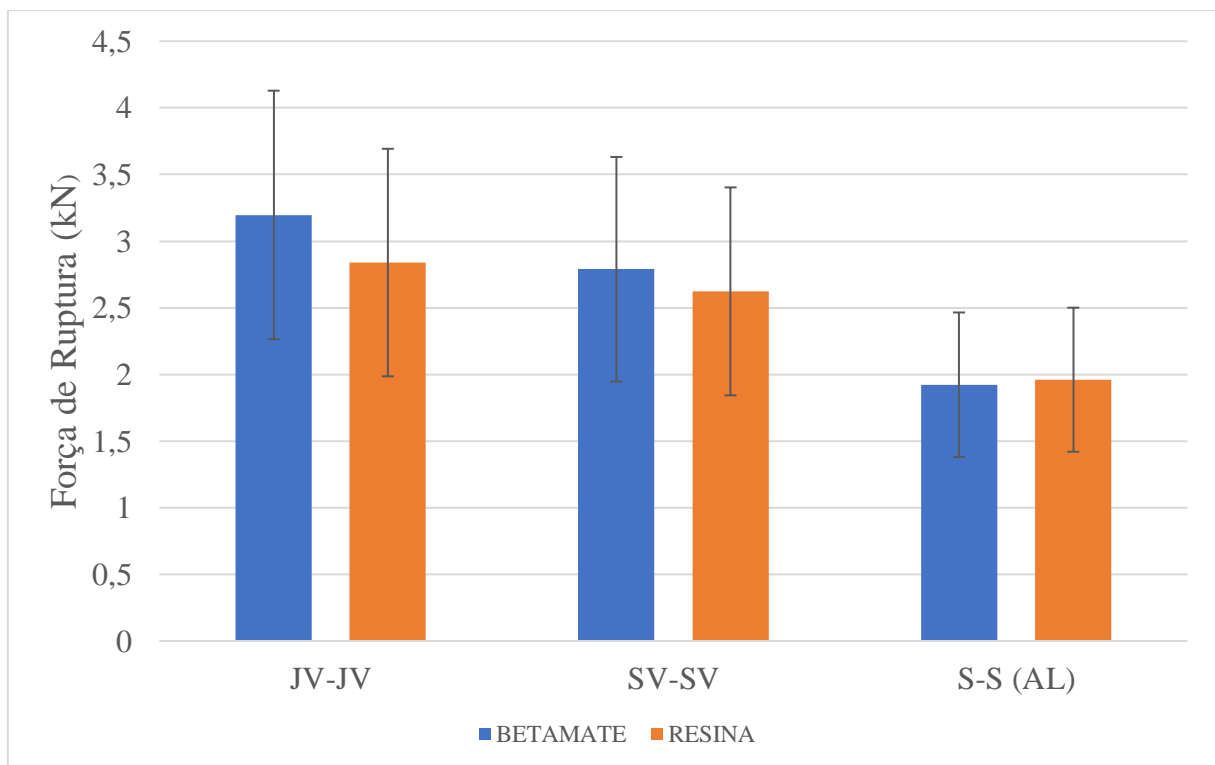


Figura 104: Comparação dos dados do grupo de juntas naturais.

Capítulo 5

Conclusões

Neste trabalho foram estudadas juntas coladas de materiais compósitos reforçados com fibras sintéticas e fibras naturais com a utilização de dois adesivos diferentes.

Os adesivos utilizados foram o adesivo estrutural bi componente BETAMATE 2096 fornecido pela DOW Brasil e a Resina Epóxi bi componente AR260 fornecido pela Barracuda Advanced Composites Brasil.

As superfícies de ruptura foram observadas no microscópio.

Podemos tirar as seguintes conclusões:

1. O BETAMATE 2096 foi superior em todas as juntas testadas, com ganho variando de aprox. 6% a 36% devido a maior resistência e ductilidade entre outros fatores.
2. Existe uma relação entre a espessura do *bundle* de fibra natural e a eficiência do reforço intralaminar na resistência da junta. Foi observado que a Juta por ser uma fibra mais fina, fez com que o reforço de fibra de vidro fosse mais capaz de resistir a tensão devido a menor distância entre as fibras de reforço e a superfície colada. No caso do SV, foi observado uma influência diminuída do reforço sintético.
3. As juntas de JV foram as melhores tanto na comparação de juntas similares quanto dissimilares com ganho de resistência de 12,75% e 20,57% para BETAMATE 2096 respectivamente e 7,62% e 2,3% para Resina Epóxi AR260 respectivamente.
4. As juntas de FV foram as mais eficientes com ambos adesivos.

Trabalhos Futuros

Como sugestões de trabalhos futuros tem-se:

- Realização de análise numérica.
- Utilização de substratos diferentes como aço IF e fibra de carbono prepreg.
- Utilização de reforços naturais diferentes como o Curauá.
- Análise de diferentes comprimentos de sobreposição.

Referências

- [1] Mar-Bal, “History of Composite Materials,” 26 03 2018. [Online]. Available: <http://www.mar-bal.com/language/en/applications/history-of-composites/>.
- [2] L. F. M. d. Silva, A. G. d. Magalhaes e M. F. S. F. d. Moura, *Juntas adesivas estruturais*, Porto: Publindustria, ©2007, 2007.
- [3] D. K. K. Cavalcanti, J. d. S. S. Neto, R. d. A. A. Lima, S. R. d. B. De Barros e D. M. Banea, “MECHANICAL CHARACTERISATION OF HYBRID NATURAL FIBERS COMPOSITES,” em *24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering*, Curitiba, 2017.
- [4] N. Jauharia, R. Mishrab e H. T. Thakurc, “Natural Fibre Reinforced Composite Laminates – A Review,” em *4th International Conference on Materials Processing and Characterization*, Delhi, 2015.
- [5] K. A. FUCUHARA, “Aplicação De Adesivos Estruturais Em Painéis De Carros,” Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, 2014.
- [6] N. M. B. G. de Almeida, “Estudo estrutural de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de juta,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.
- [7] G. C. C. Fiuza, “Análise de comportamento mecânico de juntas coladas multimateriais,” Rio de Janeiro, 2016.
- [8] R. Zah, R. Hischier, A. L. Leão e I. Braun, “Curaua’ fibers in the automobile industry e a sustainability assessment,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 15, pp. 1032-1040, 2007.
- [9] Y. Li, Y.-W. Mai e L. Ye, “Sisal fibre and its composites: a review of recent developments,” *Composites Science and Technology*, vol. 60, pp. 2037-2055, 2000.
- [10] S. N. Monteiro, R. C. M. P. Aquino, F. P. D. Lopes, E. A. de Carvalho e J. R. M. d’Almeida, “Comportamento Mecânico e Características Estruturais de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras Contínuas e Alinhadas de Curauá,” *Revista Matéria*, vol. 11, pp. 197-203, 2006.

- [11] L. F. da Silva, R. Adams e M. Gibbs, “Manufacture of adhesive joints and bulk specimens with high-temperature adhesives,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, n° 24, pp. 69-83, 2004.
- [12] L. da Silva e R. Campilho, “Design of adhesively-bonded composite joints,” Elsevier Ltd., Porto, 2015.
- [13] S. Budhe, M. Banea, S. de Barrosa e L. da Silva, “An updated review of adhesively bonded joints in composite materials,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, pp. 30-42, 2017.
- [14] E. T. N. Bisanda, “The Effect of Alkali Treatment on the Adhesion Characteristics of Sisal Fibres,” *Applied Composite Materials*, n° 7, p. 331–339, 2000.
- [15] M. dos Reis, M. D. Banea, S. Budhe e S. de Barros, “EFFECT OF ADHEREND SURFACE PREPARATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM BONDED JOINTS,” Galati University Press,, Rio de Janeiro, 2017.
- [16] M. D. Banea e L. F. M. da Silva, “The effect of temperature on the mechanical properties of adhesives for the automotive industry,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*, pp. 51-62, 1 Abril 2010.
- [17] S. Y. Fu, B. Lauke, E. Mäder, C. Y. Yue e X. Hu, “Tensile properties of short-glass-fiber- and short-carbon-fiber-reinforced polypropylene composites,” *Composites: Part A*, vol. 31, pp. 1117-1125, 2000.
- [18] M. D. Banea, M. Rosioara, R. J. C. Carbas e L. F. M. da Silva, “Multi-material adhesive joints for automotive industry,” *Composites B*, vol. 151, pp. 71-77, 2018.
- [19] M. D. Banea, L. F. M. da Silva, R. Carbas e R. D. S. G. Campilho, “Effect of material on the mechanical behaviour of adhesive,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 31, p. 663–676, 2017.

ANEXO A

Folha de Dados Técnicos do Adesivo



Dow Automotive

Technical Datasheet

BETAMATE™ 2096

Crash resistant 2-Component Structural Adhesive

Description / Application:

BETAMATE™ 2096 is a two component, epoxy based adhesive especially developed for the body shop and the repair of vehicles. The adhesive is used in the car to increase the operation durability, the crash performance and the body stiffness.

Properties:

- Excellent adhesion to automotive steels, including coated steels (e.g. e-coated or organic coated steel) and pretreated aluminum
- Helps to increase or restore the stiffness and the crash stability of the entire car body
- High durability of the adhesive and the adhesive bond
- Due to its sealing capability the metal and weld points are protected against corrosion
- Compatible with other mechanical and thermal joining techniques

Application:

The product is cold pumpable and applicable as a bead (mixing ratio 2:1; static or dynamic). It can be applied with the following parameters:

application speed	Up to 300 mm/s
temperatures: follower plate follower plate - doser	recommended: cold cold
nozzle	cold

For an optimum tack of the adhesive, the parts to bond should be stored at 15°C or higher. In case of an application break longer than 1 hour the mixer should be changed.

All Dow Automotive products are primarily developed in co-operation with the automobile manufacturers, according to their needs and their specifications; they are approved for the specific applications as defined by the customer.

The use of the product other than approved application have to be released in written form by the Technical Service of Dow Automotive.

Technical Data:

Basis	component A: epoxy resin / component B: polymeric amines
Colour	A: blue / B: white
Density (23°C)	1.12 g/ml
Mixing Ratio	A:B = 2:1
Viscosity/Yield Point (23°C, Bohlin, Casson)	component A: 140 Pas / 2Pa component B: 2 Pas / 270 Pa
Time to Handle	approx. 1 hour
Curing Condition	ambient temperature: after 2 days 90% of end toughness temperatures up to 180 °C feasible
Standard Curing	60°C / 2 hours, 2 or 7 days at room temperature (Drive away strength after approx. 10 hours)
Tensile Strength (DIN EN ISO 527-1)	29 MPa
Elongation at Break (DIN EN ISO 527-1)	approx. 9 %
E-Modulus (DIN EN ISO 527-1)	1700 MPa
Lap Shear Strength (DIN EN 1465) (CRS 14O3, 1.5 mm) (Adhesive layer thickness: 0.2 mm Bonded area: 25x10 mm)	
2d RT	18 MPa
2h 60°C	20 Mpa
30 min 180°C	18 MPa
(AA6016, pretreated, 1.3 mm) (Adhesive layer thickness: 0.2 mm Bonded area: 25x10 mm)	
2d RT	18 MPa
2h 60°C	20 MPa
30 min 180°C	21 Mpa
T-Peel Strength (DIN EN ISO 11339) (H340 LAD + Z Daimler 0.8 mm) (Adhesive layer thickness: 0.2 mm Bonded area: 25x100 mm)	6 N/mm
Impact Peel Strength (ISO 11343) (CRS 14O3, 1.0mm, 23°C, 2m/s) (Adhesive layer thickness: 0.2 mm Bonded area: 20x30 mm)	
2d RT	11 N/mm
2h 60°C	13 N/mm
12 Min 120°C + 30 Min 180°C	13 N/mm
Bonding Surface Preparation	Oily surfaces should be cleaned

Application Tool**Cartridges:**

side by side cartridge: hand-operated gun with mechanical piston: Mixpac DM 200-01.

Single cartridge (components one after another): Application with a standard 1-component hand-operated or pneumatic gun with piston bar (**no direct air guns !**).

1-component battery guns may be used, if they are equipped with adjustable feed.

Drums, pails: With standard 2K-based systems

Application notes

- for the Aftermarket (curing temp $\leq 60^{\circ}\text{C}$) it is recommended to clean the surface with Betaclean™ 3350 before the application. On oily surfaces lower mechanical properties might be achieved.
- If BM 2096™ is applied out of cartridges it is necessary to equalize the filling levels.
- for the best performance it is recommended to reject the first few grams of mixed adhesive.
- During the storage time a crystallization of the resin may occur. By heating the adhesive to 40 - 50 °C for about 15 to 30 minutes this physical process is reversible. All properties stay on the same level.
- Before the application the material temperature of both the resin and the hardener should be at min. 15°C.

eaning

Uncured material can be removed with BETACLEAN 3510.

Attention: The contact with bonded areas should be avoided.

Containers

Drums: 200kg A-Component / 96.6kg B-Component

Pails: 20 kg pails (diameter 280mm) with PE-liner

Cartridges: - side by side 0,24 kg (215ml /A+B)

-universal single cartridge 0,22 kg (195 ml) / A+B) usable volume: 180ml

- side by side 56g (50ml /A+B)

Shelf life

Storable at temperatures between 10 and 30°C for twelve months.

The given data are standard values.

Health and Safety:

□ Bulk Exothermic Reaction

The material curing reaction is exothermic. If the material is held in bulk the reaction is accompanied by a rapid build-up of exothermic heat. To avoid the risk of this bulk exothermy, containers of the material should in no circumstances be heated by e.g. hot plates or simple drum heaters. If heating a bulk quantity of the material is considered necessary, advice should be sought.

□ Caution

The adhesive resins are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with foodstuffs or food utensils, and measures should also be taken to prevent the uncured materials, from coming into contact with skin, since people with particularly sensitive skins may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleaned at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. For further and more detailed precaution measures see the Health and Safety Data Sheet.

Notice:

Quality is our utmost goal. Dow Automotive works according to a modern quality management system conforming to international standard ISO/TS 16949. All sites of Dow Automotive are certified according to ISO 14001.

All statements, technical information and recommendations contained in this document are based on tests that we deem reliable. However, the customer is responsible to determine the suitability of the product for customer's intended purpose. No freedom from any patent owned by Dow or others is to be interfered.

NO WARRANTIES ARE GIVEN. ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.

Dow Automotive Systems Main Offices

<p>The Dow Chemical Company Customer Information Group Europe</p> <p>Phone +800 3 6946367 Phone +32 3 450 2240 Italia 800 783 825 Fax +32 3 450 2815</p>	<p>Dow Automotive Systems World Head Quarter</p> <p>1250 Harmon Road Auburn Hills, MI 48326 USA Tel. +1 248 391 63 00 Fax +1 248 391 64 17</p>	<p>Dow Automotive Systems</p> <p>Dow Deutschland Anlagengesellschaft GmbH Am Kronberger Hang 4 65824 Schwalbach Germany Tel: +49 6196 566 0 Fax: +49 6196 566 444</p>	<p>Dow Automotive Systems</p> <p>Dow Europe GmbH Bachtobelstrasse 3 8810 Horgen Switzerland Tel. +41 44 728 2111 Fax. +41 44 728 2935</p>
<p>Dow Automotive Systems</p> <p>St. George's Way Bermuda Industrial Estate Nuneaton CV10 7QT United Kingdom Tel: + 44 24 7635 7200 Fax: + 44 24 7635 7257</p>	<p>Dow Automotive Systems</p> <p>Dow Chemical Ibérica, S.L. Ribera del Loira, 4-6 - Planta 4ª (Edificio IRIS) 28042 Madrid Spain Tel. + 34 91 740 7800 Fax. + 34 91 740 7785</p>	<p>Dow Automotive Systems</p> <p>Dow France S.A.S. 23 avenue Jules Rimet 93631 La Plaine St Denis Cedex France Tel: +33 1 49 21 78 78 Fax: +33 1 49 21 79 79</p>	<p>Dow Automotive Systems</p> <p>Dow Italia Divisione Commerciale s.r.l. Via F. Albani, 65 20148 Milano Italy Tel: +39 02 482 21 Fax: +39 02 482 241 08</p>

ANEXO B

Folha de Dados Técnicos da Resina

Descrição

O sistema de resina epoxy AR260 com endurecedor epoxy AH260 é um sistema de cura rápida, de baixa viscosidade, para uso em laminação manual, laminação a vácuo e infusão.

Propriedades Mecânicas

Propriedade	Teste	Unidade	Valor
Cor	Visual	-	Âmbar claro
Dureza Shore D	ASTM D-2240	-	87
Resistência à tração	ASTM D-638	MPa	73,77
Módulo de tração	ASTM D-638	MPa	3157,80
Resistência ao alongamento	ASTM D-638	%	8,8
Resistência à compressão	ASTM D-695	MPa	88,94
Resistência à flexão	ASTM D-790	MPa	199,28
Módulo de flexão	ASTM D-790	MPa	2737,22
HDT - Cura a temperatura ambiente	ASTM D-648	°C	58
HDT - Temperatura de pós-cura	ASTM D-648	°C	98
Impacto Izod, com entalhe	ASTM D-256	kJ/m ²	2,67
Contração	ASTM D-2566	mm/mm	<0,002

Propriedades de Manuseio

Propriedade	Teste	Unidade	Valor
Densidade da Resina	ASTM E-201	Kg/m ³	1150,33
Densidade do endurecedor	ASTM E-201	Kg/m ³	946,63
Viscosidade da Resina a 25°C	ASTM D-2393	cps	1.200
Viscosidade do Endurecedor a 25°C	ASTM D-2393	cps	30
Viscosidade Mista a 25°C	ASTM D-2393	cps	300
Viscosidade Mista a 49°C	ASTM D-2393	cps	140
Taxa de mistura por peso (100 A)	Calculado	-	100A : 26B
Gel time a 25°C (150g massa)	ASTM D-2471	minutos	290
Pot life a 25°C (150g massa)	ASTM D-2471	minutos	120

Armazenagem e Manuseio

O sistema de resina deve ser armazenado em local seco, entre 15,5 e 37,7°C, e deve sempre ser tampado após o uso.

Em caso de cristalização do produto, aquecer à temperatura de 40°C até os cristais se dissolverem e mexer bem depois que o produto estiver liquefeito. Sempre utilize ferramentas limpas e secas para misturar e aplicar os produtos.

A mistura deve ser feita cuidadosamente e imediatamente antes do uso, seguindo a taxa de mistura descrita neste datasheet. A temperatura do ambiente não deve ser menor que 16°C durante a mistura.