

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA  
FONSECA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**Anna Carolina da Silva Calheiros de Mendonça**

**Vitor Pastor da Silva Dias**

**JUNTAS ADESIVAS DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE JUTA,  
CARBONO E HÍBRIDO DE JUTA/CARBONO PARA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**Rio de Janeiro**

**2023**

**Anna Carolina da Silva Calheiros de Mendonça**

**Vitor Pastor da Silva Dias**

**JUNTAS ADESIVAS DE COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE JUTA,  
CARBONO E HÍBRIDO DE JUTA/CARBONO PARA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Ricardo Alexandre Amar Aguiar

Co-orientadores: Doina Mariana Banea e Henrique Fernandes Medeiros De Queiroz

**Rio de Janeiro**

**2023**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M539 Mendonça, Anna Carolina da Silva Calheiros de  
Juntas adesivas de compósitos reforçados com fibras de juta,  
carbono e híbrido de juta/carbono para indústria automotiva / Anna  
Carolina da Silva Calheiros de Mendonça [e] Vitor Pastor da Silva  
Dias. — 2023.

88f. + anexo : il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica  
Celso Suckow da Fonseca, 2023.

Bibliografia : f. 85-88

Orientador: Ricardo Alexandre Amar Aguiar

Coorientadores: Doina Mariana Banea [e] Henrique Fernandes  
Medeiros De Queiroz

1. Engenharia mecânica. 2. Fibra de carbono. 3. Fibras naturais. 4.  
Sisal (Fibra). 5. Juntas adesivas. I. Dias, Vitor Pastor da Silva. II.  
Aguiar, Ricardo Alexandre Amar (Orient.). II. Banea, Doina Mariana  
(Coorient.). III. Queiroz, Henrique Fernandes Medeiros de (Coorient.).  
IV. Título.

CDD 621

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradecemos a Deus por nos proporcionar saúde, sabedoria e perseverança ao longo dessa jornada acadêmica. Sua presença constante foi fundamental para superarmos desafios e buscarmos conhecimento.

Aos nossos pais, que sempre estiveram ao nosso lado, apoiando e incentivando nossos estudos, somos imensamente gratos. Seu amor incondicional e dedicação foram essenciais para que pudéssemos trilhar esse caminho com confiança e determinação.

Aos nossos orientadores, Henrique, Daniel, professora Mariana e professor Ricardo, agradecemos por compartilharem seus conhecimentos, orientações, críticas construtivas ao longo do desenvolvimento deste trabalho e pela confiança depositada. Sua expertise, paciência e contribuições valiosas foram fundamentais para o aprimoramento deste estudo em dupla.

Por fim, gostaríamos de agradecer aos nossos colegas da universidade pelo apoio e companheirismo ao longo dessa jornada acadêmica. Suas trocas de ideias, discussões e amizade foram fundamentais para tornar essa experiência ainda mais enriquecedora. Agradecemos por estarem sempre presentes, compartilhando momentos memoráveis durante nossa trajetória universitária

“Sê forte e corajoso; não temas, nem te espantes; porque o Senhor teu Deus é contigo, por onde quer que andares.”

Josué 1:9

## RESUMO

MENDONÇA, Anna Carolina; DIAS, Vitor Pastor da Silva. **Juntas adesivas de compósitos reforçados com fibras de juta, carbono e híbrido de juta/carbono para indústria automotiva.** 2023. 102 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

Em busca da redução dos custos de produção e um desenvolvimento mais sustentável, os materiais compósitos reforçados com fibras naturais apresentam um crescimento de aplicações na indústria. Entretanto, um dos grandes desafios para a ampliação da aplicação desses materiais são as propriedades mecânicas inferiores aos dos compósitos sintéticos. Como uma alternativa, percebe-se o crescimento de estudos na literatura em busca de viabilizar o uso de compósitos híbridos na indústria com o objetivo de obter as vantagens dos compósitos sintéticos e naturais simultaneamente. Dessa forma, através da hibridização e união por juntas coladas realizada por diferentes tipos de adesivos estruturais, este trabalho apresenta a caracterização mecânica e a análise da eficiência de juntas adesivas de compósitos híbridos reforçados com fibras sintéticas de carbono e natural de juta para aplicação na indústria automotiva. Foram realizados ensaios mecânicos a fim de obter-se as propriedades mecânicas desse material para discussão e comparação com a literatura. Como conclusão a incorporação de fibras de carbono nos compósitos híbridos de juta resultou em um aumento significativo na resistência mecânica e na eficiência das juntas adesivas.

**Palavras-chave:** Compósito híbrido. Fibra de carbono. Fibra de juta. Juntas coladas.

## ABSTRACT

DIAS, Vitor Pastor da Silva. **Adhesively bonded joints of jute, carbon and hybrid jute/carbon composites for automotive industry**. 2023. 102 pages. Trabalho de Conclusão de Curso - Federal Center of Technological Education – Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2023.

To reduce the production costs and a sustainable development growth, the use of composite materials reinforced with natural fiber have been growing in industry applications. However, one of the big challenges of the enlargement of these materials is the lower mechanical properties in comparison to synthetic composite. As an alternative, it is noticed the growth of studies in the literature about more application with hybrid composites in the industry. The goal is obtaining the advantages of synthetic and natural composites in one application. Thus, this study focuses on the mechanical characterization and efficiency analysis of adhesive joints in hybrid composites reinforced with synthetic carbon fibers and natural jute fibers, intended for automotive industry applications. The investigation includes the hybridization process and bonding using various types of structural adhesives. Mechanical tests were conducted to determine the material's mechanical properties, facilitating a thorough discussion and comparison with existing literature. The results demonstrate a significant increase in both mechanical strength and adhesive joint efficiency with the incorporation of carbon fibers into the jute hybrid composites.

**Keywords:** Hybrid composite. Carbon fiber. Jute fiber. Bonded joints.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Número de pesquisas publicadas relacionadas à sustentabilidade, compósitos verdes a indústria 4.0 adaptado .....	17
Figura 2 - a) Planta de juta e b) extração da fibra de juta .....	19
Figura 3 - Fibras de Juta .....	19
Figura 4 - Produção global de fibra de Carbono.....	20
Figura 5 - Mercedes-AMG F1 W14 E PERFORMANCE 2023 .....	21
Figura 6 - Distribuição de tensão pelo método de união tradicional (rebite) X União com Junta colada .....	24
Figura 7 - Cenário de aplicações de compósitos reforçados com fibras naturais (adaptado).....	26
Figura 8 - Diferentes configurações de juntas adesivas .....	28
Figura 9 - Lixagem da superfície.....	29
Figura 10 - Visualização da tensão de cisalhamento e arrancamento em juntas adesivas .....	30
Figura 11 - Resistência à falha da amostra de junta (adaptado).....	32
Figura 12 - Superfícies de falha típicas de corpos de prova com adesivo (adaptado) .....	32
Figura 13 - Possíveis modos de falha em junta coladas com aderentes de materiais compósitos .....	33
Figura 14 - Sequência de empilhamento das fibras naturais e sintéticas do G3J5G3 .....	35
Figura 15 - Representação dos tipos de falha nos corpos de prova; a) G3J5G3; b) G2J5G2; c) GFRP; d) JFRP (vista superior) e e) JFRP (vista lateral) (adaptado).....	36
Figura 16 - Representação da curva tensão deformação em função do material do aderente (adaptado).....	36
Figura 17 - Diferentes configurações dos compósitos híbridos e símbolos utilizados como referência (adaptado) .....	37
Figura 18 - Gráfico com os resultados do teste de tração (adaptado).....	38
Figura 19 - Gráfico com os resultados do teste de flexão em 3 pontos (adaptado) ..	39
Figura 20 - Gráfico com os resultados do teste de impacto (adaptado) .....	39
Figura 21 - Gráfico com os resultados de absorção de água (adaptado).....	40
Figura 22 - Mantas de fibra sintética de carbono e fibra natural de juta .....	41
Figura 23 - Resina HEX 135 SLOW .....	42
Figura 24 - BETAMATE 2096.....	43
Figura 25 - Adesivo AR-345 .....	44
Figura 26 - Forno usado no LADES para remoção da umidade da Fibra .....	45
Figura 27 - Homogeneização da resina e endurecedor .....	45
Figura 28 - Sobreposição das mantas de juta e carbono no molde .....	46
Figura 29 - Processo de hand lay up do compósito .....	46
Figura 30 - EPI utilizado durante o processo de laminação .....	47
Figura 31 - Prensa Solab SL-20.....	47
Figura 32 - Placa manufaturada do compósito.....	48



Figura 33 - Parte dos substratos cortados .....	48
Figura 34 - Representação das camadas de empilhamento .....	49
Figura 35 - Identificação dos corpos de prova antes da preparação da superfície ...	50
Figura 36 - Substratos após a preparação da superfície.....	50
Figura 37 - Configuração SJLs.....	52
Figura 38 – Representação da Junta colada no molde após a aplicação do adesivo BETAMATE 2096 .....	52
Figura 39 - Junta Colada após o processo de cura.....	53
Figura 40 - Ensaio de tração do substrato C2 .....	54
Figura 41 - Ensaio de flexão do substrato AC1 .....	54
Figura 42 - Máquina de impacto utilizada.....	55
Figura 43 - Ensaio de Juntas coladas do substrato AC1.....	56
Figura 44 - Curvas Tensão-Deformação representativas como função da arquitetura .....	57
Figura 45 – Tensão média com desvio padrão como função da arquitetura.....	58
Figura 46 - Módulo de elasticidade com desvio padrão como função da arquitetura	58
Figura 47 - Modos de falha representativos do ensaio de tração: a) Juta, b) AC1, c) AC2, d) C1, e) C2, f) CFRP .....	61
Figura 48 - Curvas Tensão à flexão-deformação representativas como função da arquitetura .....	62
Figura 49 - Tensão média com desvio padrão como função da arquitetura.....	62
Figura 50 - Rigidez Flexural com desvio padrão como função da arquitetura.....	63
Figura 51 - Modos de falha representativos do ensaio de flexão: a) Juta, b) AC1, c) AC2, d) C1 e C2, e) CFRP .....	66
Figura 52 - Energia de Impacto Média para cada substrato.....	67
Figura 53 - Modos de falha representativos do ensaio de impacto: a) Juta, b) AC1, c) AC2, d) C1, e) C2, f) CFRP .....	69
Figura 54 - Curva Força-Deslocamento do ensaio de juntas adesivas (BETAMATE 2096) .....	70
Figura 55 - Curva Força-Deslocamento do ensaio de juntas adesivas (AR345).....	70
Figura 56 - Desvio padrão do da carga máxima do ensaio de juntas adesivas (BETAMATE 2096).....	71
Figura 57 - Desvio padrão do da carga máxima do ensaio de juntas adesivas (AR345).....	71
Figura 58 - Superfície de ruptura das juntas colada de JUTA - BETAMATE 2096....	77
Figura 59 - Superfície de ruptura das juntas colada de JUTA - AR345.....	77
Figura 60 - Superfície de ruptura das juntas colada do AC1 - BETAMATE 2096.....	78
Figura 61 - Superfície de ruptura das juntas colada do AC1 - AR345.....	78
Figura 62 - Superfície de ruptura das juntas colada do AC2 - BETAMATE 2096.....	79
Figura 63 - Superfície de ruptura das juntas colada do AC2 - AR345.....	79
Figura 64 - Superfície de ruptura das juntas colada do C1 - BETAMATE 2096.....	80
Figura 65 - Superfície de ruptura das juntas colada do C1 - AR345 .....	80
Figura 66 - Superfície de ruptura das juntas colada do C2 - BETAMATE 2096.....	81

Figura 67 - Superfície de ruptura das juntas colada do C2 - AR345 .....	81
Figura 68 - Superfície de ruptura das juntas colada do CFRP - BETAMATE 2096...	82
Figura 69 - Superfície de ruptura das juntas colada do CFRP - AR345 .....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade Fibras Naturais .....	17
Tabela 2 - Comparação das Características das Fibras Naturais e Sintéticas.....	18
Tabela 3 - Características das resinas Termorrígidas.....	22
Tabela 4 - Características das Resinas.....	23
Tabela 5 - Classificação dos Adesivos.....	24
Tabela 6 - Vantagens e desvantagens de fibras das fibras naturais .....	27
Tabela 7 - Propriedades da resina HEX 135 Slow .....	42
Tabela 8 - Propriedades do adesivo BETAMATE 2096. ....	43
Tabela 9 - Propriedades do Adesivo AR-345 .....	44
Tabela 10 - Identificação do substrato por adesivo .....	51
Tabela 11 - Resultados do Substratos após Ensaio de Tração.....	59
Tabela 12 –Resultados dos Substratos após ensaio de Flexão.....	63
Tabela 13 - Energia de impacto por substrato.....	67
Tabela 14 - Força de Ruptura e deslocamento da junta com AR345.....	71
Tabela 15 - Força de Ruptura e deslocamento da junta com BETAMATE 2096.....	72
Tabela 16 - Ganho do adesivo AR345 em relação ao BETAMATE 2096 .....	75

## LISTA DE SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CRFP	<i>Carbon Fiber Reinforced Plastic</i>
GFRP	<i>Glass Fiber Reinforced Plastic</i>
JFRP	<i>Jute Fiber Reinforced Plastic</i>
LFT	<i>Light Fiber Tear</i>
PAN	Poliacrilonitrila
PEEK	Poli-Éteréter-Cetona
PET	Polietileno Tereftalato
SJLs	<i>Single-Lap Joints</i>
TLC	<i>Thin Layer Cohesive Failure</i>

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	13
1.2 JUSTIFICATIVA .....	14
1.3 OBJETIVOS .....	14
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	14
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	16
2.2 FIBRAS NATURAIS .....	16
2.2.1 Fibras De Juta .....	18
2.3 FIBRA DE CARBONO .....	20
2.4 RESINAS .....	21
2.4.1 Resinas Termorrígidas .....	21
2.4.2 Resinas Termoplásticas .....	22
2.5 ADESIVOS .....	23
2.6 MATERIAIS COMPÓSITOS HÍBRIDOS .....	25
2.7 COMPÓSITOS HÍBRIDOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS .....	26
2.8 JUNTAS ADESIVAS .....	27
2.8.1 Configuração Das Juntas Adesivas .....	27
2.8.2 Preparação Da Superfície De Juntas Adesivas .....	28
2.8.3 Estado De Tensões Em Juntas Adesivas .....	29
2.8.4 Efeito Da Espessura Da Camada Adesiva .....	31
2.8.5 Tipos De Falha Das Juntas Adesivas .....	33
2.9 ANÁLISE EXPERIMENTAL DE JUNTAS ADESIVAS DE COMPÓSITOS HÍBRIDOS NA LITERATURA .....	34
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>41</b>
3.1 FIBRAS DE JUTA E DE CARBONO .....	41
3.2 RESINA .....	42
3.3 ADESIVOS .....	43
3.4 FABRICAÇÃO DOS COMPÓSITOS .....	44
3.5 FABRICAÇÃO DAS JUNTAS COLADAS .....	50
3.6 ENSAIOS REALIZADOS .....	53
3.6.1 Ensaio De Tração .....	53
3.6.2 Ensaio De Flexão .....	54
3.6.3 Ensaio De Impacto .....	55
3.6.4 Ensaio De Tração De Juntas Coladas .....	56
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>57</b>
4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO .....	57
4.1.1 Efeito Da Hibridização .....	59
4.1.2 Efeito Da Simetria .....	60

4.1.3 Mecanismo De Falha.....	60
4.2 ENSAIO DE FLEXÃO .....	61
4.2.1 Efeito Da Hibridização .....	63
4.2.2 Efeito Da Simetria .....	64
4.2.3 Mecanismo De Falha.....	65
4.3 RESULTADOS DO ENSAIO DE IMPACTO.....	66
4.3.1 Efeito Da Hibridização .....	67
4.3.2 Efeito Da Simetria .....	68
4.3.3 Mecanismo De Falha .....	68
4.4 RESULTADOS DO ENSAIO DE JUNTAS ADESIVAS .....	69
4.4.1 Adesivo AR345.....	72
4.4.1.1 Efeito da hibridização .....	72
4.4.1.2 Efeito da simetria.....	73
4.4.2 Adesivo Betamate 2096 .....	74
4.4.2.1 Efeito da hibridização .....	74
4.4.2.2 Efeito da simetria.....	74
4.4.3 Efeito Do Tipo Do Adesivo .....	75
4.4.4 Análise Do Modo De Falha Das Juntas Adesivas .....	76
<b>5.CONCLUSÃO .....</b>	<b>83</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>98</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos por serem uma combinação de dois materiais capazes de melhorar as propriedades entre si, podem de forma flexível atender aos requisitos que um projeto precisa para ser realizado. Quando comparados à materiais metálicos, os quais possuem uma maior aplicação atualmente na indústria, os materiais compósitos apresentam propriedades mecânicas próximas e em certos casos até mesmo superiores. Além disso, uma das principais vantagens é a redução de massa. Conseqüentemente, isso torna-se uma grande vantagem tanto para a indústria automobilística como também para a aeronáutica e espacial, pois com a redução de massa dos componentes, ocasionará uma redução de consumo de combustível e emissão de poluentes.

Os materiais compósitos mais utilizados na indústria são os sintéticos (Fibra de Carbono, fibra de aramida, fibra de vidro e entre outros). Contudo, esses materiais sintéticos apresentam um alto custo que por muitas das vezes pode inviabilizar a aplicação desses materiais. Por outro lado, existem os compósitos naturais que apresentam um crescimento de estudos na literatura e de aplicação na indústria, esses materiais apesar de apresentarem propriedades mecânicas inferiores quando comparados aos compósitos sintéticos, são biodegradáveis e apresentam um menor custo [36].

### 1.1 MOTIVAÇÃO

Uma das motivações deste trabalho consiste na continuidade do projeto de Iniciação Científica realizado pelos autores durante o curso de graduação sobre fibras naturais como reforço para o plástico ABS usando a fabricação a partir da impressão 3D e o estudo e caracterização mecânica de compósitos híbridos reforçados com fibra sintética de carbono e fibra natural de juta.

Além disso, com o avanço da tecnologia e com o cenário do mercado mundial e o perfil do consumidor mudando no século 21, é notório cada vez mais a busca de utilizar materiais que sejam sustentáveis e também reduzam o custo. Dessa forma, à fim de atingir ambos os objetivos, sustentabilidade e baixo custo, torna-se necessário estudar as propriedades de materiais que possuem estas características que podem

ser aplicados na indústria, sobretudo a automotiva que será o foco deste trabalho, e que sejam alternativa para substituição dos materiais usados atualmente. Sendo assim, terão como estudo neste trabalho as fibras naturais e compósitos híbridos.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A utilização de materiais compósitos reforçados com fibras naturais ganhou uma atenção especial dos pesquisadores e da indústria com o objetivo de reduzir os custos de produção e atingir um menor impacto ambiental. Entretanto, a baixa compatibilidade entre a fibra natural e a matriz, a alta absorção de umidade pelas fibras naturais, a baixa resistência ao calor, baixa resistência ao impacto e pouca durabilidade constituem alguns dos desafios atuais para a ampliação da utilização desses materiais na indústria. Com isso, torna-se necessário propor novas soluções para minimizar o impacto das desvantagens e melhorar a performance dos materiais compósitos reforçados com fibras naturais.

## 1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho de conclusão de curso consiste em estudar e caracterizar mecanicamente e analisar a eficiência de juntas coladas com diferentes adesivos estruturais de compósitos híbridos reforçados com fibra sintética de carbono e fibra natural de juta para a aplicação na indústria automotiva. Para atingir o objetivo principal, foi definido como objetivos específicos:

- Investigar o efeito da hibridização nas propriedades mecânicas dos compósitos de fibra de juta com carbono;
- Investigar a influência de diferentes sequências de empilhamento de forma simétrica e assimétrica no compósito.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho foi dividido em 5 tópicos:

- 1) Introdução: Apresentação do tema e objetivos do trabalho.
- 2) Revisão Bibliográfica: Pesquisa na literatura atual sobre o tema do trabalho, definição conforme a literatura sobre os tópicos abordados e



apresentação dos resultados referentes ao tema que se encontram na literatura.

- 3) **Materiais e Métodos:** Neste capítulo são apresentados todos os materiais utilizados durante a fabricação dos compósitos, todas etapas dos processos de manufatura e por fim o desenvolvimento da análise experimental.
- 4) **Resultados e discussão:** Neste tópico são apresentados os principais resultados da análise experimental, discutindo suas implicações e interpretações, proporcionando uma análise crítica dos resultados obtidos.
- 5) **Conclusão:** Por fim, neste capítulo é apresentada a conclusão final referente ao projeto e sugestões para trabalhos futuros referentes ao tema.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 INTRODUÇÃO

A utilização de materiais compósitos reforçados com fibras naturais ganhou destaque entre pesquisadores e na indústria com o objetivo de reduzir os custos de produção e gerar um menor impacto ambiental [1]. Entretanto, a baixa compatibilidade entre a fibra natural e a matriz, a alta absorção de umidade pelas fibras naturais, a baixa resistência ao calor, baixa resistência ao impacto e pouca durabilidade constituem alguns dos desafios atuais para a ampliação da utilização desses materiais na indústria [2]. Com isso, há uma crescente demanda de artigos e livros sendo publicados com objetivo de propor novas soluções para minimizar o impacto das desvantagens e melhorar a performance dos materiais compósitos reforçados com fibras naturais [1].

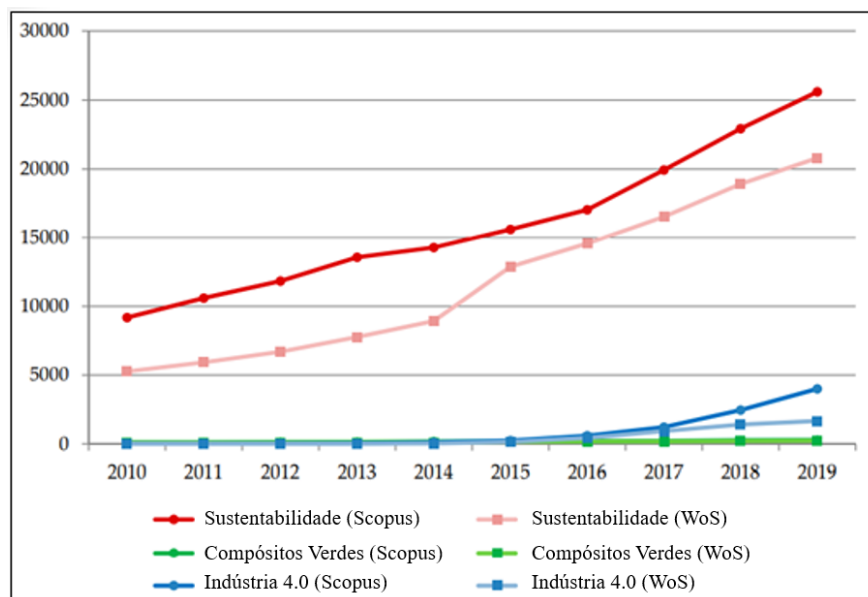
Um dos métodos de melhoria nas propriedades dos compósitos reforçados com fibras naturais é através da realização de tratamento superficial das fibras naturais. Esses tratamentos são feitos antes da realização do processamento do material e com o objetivo de realçar as propriedades mecânicas das fibras, aprimorar a ligação interfacial entre matriz e fibra, diminuir a rugosidade e diminuir a natureza hidrofílica das fibras [3].

Além destes, é também comum utilizar como tratamentos superficial, o tratamento alcalino. Este, a partir de pesquisas na literatura, apresentou ser um dos tratamentos mais eficientes e simples para a melhoria na propriedade de adesão entre a fibra e a matriz [4]. Isto porque, através desse tratamento é possível obter uma superfície mais limpa e uniforme através da retirada de impurezas. Além disso, geralmente a realização deste é suficiente para reduzir o teor de lignina e conseqüentemente reduzir a natureza hidrofílica da fibra [5, 6].

### 2.2 FIBRAS NATURAIS

As fibras naturais, também conhecidas como compósitos verdes, são derivadas de plantas ou resinas biodegradáveis [7]. As fibras naturais utilizadas como compósitos reforçados vem ganhando espaço na indústria. A procura de materiais de

alto desempenho para engenharia que não gerem impacto ao meio ambiente influenciou o aumento do número de pesquisas sobre quais desses materiais podem ser levados ao mercado [8] como pode ser visto na Figura 1.



**Figura 1 - Número de pesquisas publicadas relacionadas à sustentabilidade, compósitos verdes a indústria 4.0 adaptado**  
Fonte: [9].

Além disso, as fibras naturais podem ser encontradas na natureza. A abundância de fibra natural disponível pode ajudar a reforçar a implementação da mesma no mercado [8]. Alguns deles estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 - Quantidade Fibras Naturais	
Fibra	Quantidade (tons)
Juta	2600 x 10 <sup>3</sup>
Algodão	18.5 x 10 <sup>6</sup>
Bamboo	30,000 x 10 <sup>3</sup>
Sisal	370
Kenaf	970
Fibra	Quantidade (tons)
Cânhamo	214
Coco	100
Ramie	100

Fonte: [10, 11] Adaptado.

Na Tabela 2, são apresentadas quais as vantagens das fibras naturais comparadas com uma fibra sintética. A aplicação de cada uma vai variar de acordo com sua utilização no produto final. Quando se compara economicamente e levando em consideração a sustentabilidade, as fibras naturais levam a características vantajosas [13].

<b>Tabela 2 - Comparação das Características das Fibras Naturais e Sintéticas</b>	
<b>Fibras Naturais</b>	<b>Fibras Sintéticas</b>
Menos abrasivo	Qualidade da fibra mais consistente
Baixa densidade	Durabilidade
Bom isolamento acústico	Estabilidade térmica
Biodegradável	Propriedades mecânicas boas
Recurso Natural	Resistência à umidade

Fonte: [12]

### 2.2.1 FIBRAS DE JUTA

A fibra de juta (*Cochorus capsularis*) é uma fibra natural têxtil e tem como componente em destaque a celulose [13]. Ela pode fornecer como característica principal a alta resistência e baixa densidade quando combinada com polímeros.

Tem também como propriedades, baixo custo, alto módulo e resistência específica. Ademais, podem ser utilizadas em painéis de carros, telhados de casa e tanques de armazenamento, por exemplo [14]. Além de ser encontrada em abundância como mostrado na Tabela 1.

Esta fibra é encontrada no norte do país, predominante em clima de alta umidade e temperatura onde consegue se desenvolver. Sua planta chega a até 4 metros de altura. Por ser fácil de cultivo, a juta é responsável por garantir a subsistência de famílias ribeirinhas na Amazônia [14].

A fibra útil usada na para fabricação de compósito permanece entre o caule e o talo com um diâmetro de 20 milímetros aproximadamente. Para realizar sua extração é feita a maceração onde ocorre a separação da casca com o talo. Este processo é favorecido em regiões de alta temperatura, como os locais que são cultivados a planta [13].

Na Figura 2 e Figura 3 são representadas, a planta (Figura 2a), a extração (Figura 2b) e a fibra de juta.



**Figura 2 - a) Planta de juta e b) extração da fibra de juta**  
Fonte: [14].



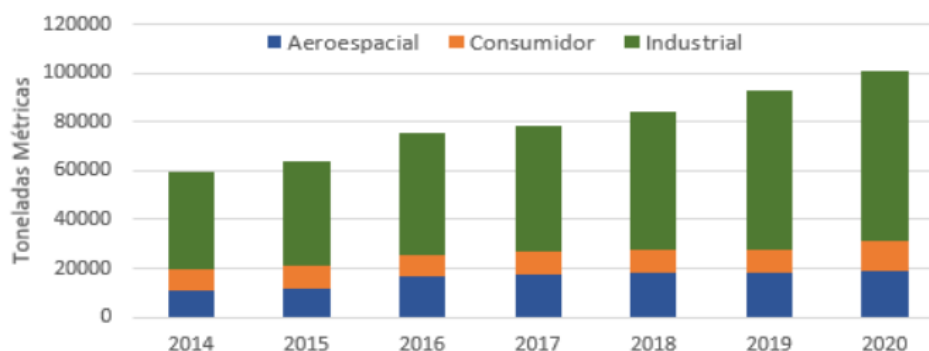
**Figura 3 - Fibras de Juta**  
Fonte: [13].

Além das características e vantagens comentadas anteriormente, o uso da juta se faz positivo por ser um recurso provido de fonte renovável, é biodegradável, não é tóxico e todo o seu ciclo de vida é voltado para preservação do meio ambiente [15].

## 2.3 FIBRA DE CARBONO

A fibra de carbono é um material de engenharia sintético usado como reforço na matriz polimérica de materiais compósitos. Foi descoberta em 1880 por Thomas Edison com a finalidade de ser usada para eletricidade, mas o interesse surgiu apenas em 1950 quando a busca por materiais para foguete se iniciou [16]. Seus filamentos são de escala micrométrica e são produzidos a partir da pirólise da poliácridonitrila (PAN), piche ou raio [17].

Possui alta aplicação devido às características atribuídas ao mesmo como: alto módulo e força específica, leveza, resistência à fadiga e calor, ótimo isolante de radiações eletromagnéticas, baixa expansão ao trabalhar em altas temperaturas e alta resistência mecânica [16]. Em decorrência à essas atribuições nas propriedades mecânicas, em diversos setores como aeronáutico e de petróleo e gás que vêm investindo cada vez mais neste material, fazendo o mercado econômico deste produto alcançar 800 milhões de libras apenas no ano de 2017 [16]. Na Figura 4 representa a quantidade de fibras produzida no mercado.



**Figura 4 - Produção global de fibra de Carbono**

Fonte: [17]

Outro setor que faz grande uso das fibras de carbono é o setor automobilístico. Como no atual cenário mundial da quarta revolução industrial que se vive no século 21 a preocupação com meio ambiente e a poluição que se é gerada é um ponto importante a se destacar. Por isso, a busca por carros que poluam menos e que ao mesmo tempo sejam leves e com alta performance, os compósitos reforçados por esta fibra foi a solução encontrada. Na Figura 5 é representado o chassi e a asa dianteira de um carro de Fórmula 1, feito inteiramente com fibra de carbono, dessa forma, o

veículo se tornou mais leve, contribuiu para melhorar performance aerodinâmica, tornando-o mais rápido.[18]



**Figura 5 - Mercedes-AMG F1 W14 E PERFORMANCE 2023**

Fonte: [18]

## 2.4 RESINAS

Através da utilização das resinas na fabricação de compósitos, é possível dar forma ao material, possibilitar o alinhamento das fibras de reforço, transferir a carga uniformemente para as fibras promovendo rigidez para a estrutura e possibilitar a proteção das fibras contra ataques químicos e deteriorações mecânicas [2, 19]. Tem como objetivo unir as fibras e garantir com que as mesmas não sofram desgaste do meio ambiente e protegem o material compósito sofram de flambagem ao sofrer compressão [20].

Existem dois tipos de resinas que são amplamente usadas para a fabricação de materiais compósitos, as termorrígidas e as termoplásticas. O critério de seleção entre um dos dois tipos de resina dependerá do tipo de aplicação que está planejado para o material.

### 2.4.1 Resinas Termorrígidas

Também chamados de termofixos, as resinas termorrígidas são formadas de macromoléculas de alta ligação de forma que, são impossíveis de dissolvê-las a partir de solventes comuns [5]. Devido sua cadeia química tridimensional altamente

resistente à esforços e vibrações, apenas processos de altas temperaturas podem mudar sua estrutura, dessa forma sua implementação na fabricação de compósitos se torna difícil e desvantajosa pela necessidade de se acrescentar aditivos que facilitem seu manuseio. Porém, uma vez submetidas à estes processos, perdem suas características e não conseguem voltar sua forma original [5].

De um modo geral, estas resinas possuem baixa viscosidade, permitindo com que sua aderência com fibras seja mais fácil [20]. Devido a isso, são os polímeros mais aplicados em materiais compósitos e vendidos comercialmente em larga escala. Os casos mais típicos de fabricação para este material são moldagem em compressão, moldagem em injeção e *spray up* [21].

A Tabela 3 apresenta algumas resinas termorrígidas, suas vantagens e limitações para sua implementação.

**Tabela 3 - Características das resinas Termorrígidas**

RESINA	VANTAGEM	DESVANTAGEM
Epóxi	Resistência química; Propriedades Térmicas; Baixa perda de volume na cura	Causa irritabilidade na pele; Necessário tempo longo de cura.
Poliéster	Alta aplicabilidade; Cura em temperatura ambiente; Boas propriedades elétricas.	Flamabilidade; Alta perda de volume na cura.
Silicone	Boas propriedades térmicas; Não tóxico; Resistente à oxidação	Perda de adesão; Cura apenas em alta temperatura

Fonte: [7] Adaptado

#### 2.4.2 Resinas Termoplásticas

Ao contrário das termorrígidas, as resinas termoplásticas possuem a capacidade de serem fundidas e resfriadas múltiplas vezes permitindo o que se chama *shelf life*, devida sua cadeia molecular ser linear de forma que não perdem suas propriedades quando passam por esses ciclos [22]. Com alta ductilidade e tenacidade, estas resinas são mais resistentes à impactos, porém, são limitadas para fabricação



de compósitos por dificuldade de se unir à fibras longas devido sua alta viscosidade [20].

Apesar de seu custo ser bem favorável para a implementação do seu uso, matrizes de materiais compósitos termoplásticos só conseguem trabalhar em uma faixa de temperatura baixa. Para solucionar tal problema é necessário trabalhar esta resina misturada com algum tipo de fibra. Quando combinada com a fibra de aramida por exemplo, sua faixa de temperatura em que pode ser usada aumenta, não consegue absorver água ou ser impactada pela umidade [21]. Tem como aplicação a indústria aeroespacial, aeronáutica e automobilística [23]. Na Tabela 4 são apresentadas algumas das resinas mais conhecidas no mercado, suas vantagens e desvantagens.

**Tabela 4 - Características das Resinas**

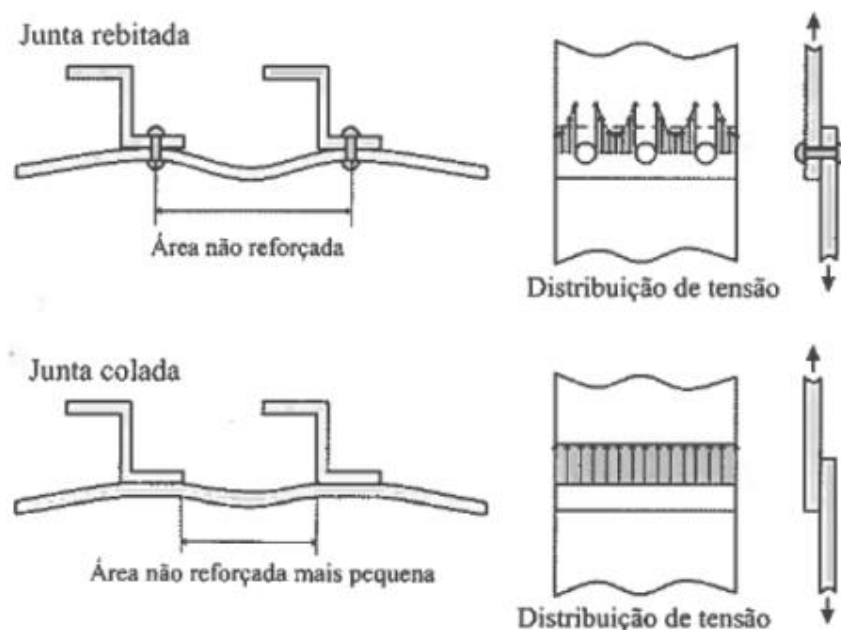
RESINA	VANTAGEM	DESVANTAGEM
PEEK	Boa tenacidade, alta resistência ao desgaste; Estabilidade em altas temperaturas;	Compósito formado com carbono é extremamente abrasivo
PET	Estabilidade térmica e química; Leve; Boa resistência a fratura.	Dependendo do seu uso, pode haver contaminação do conteúdo para o PET e vice versa.
ABS	Biocompatibilidade; Baixo custo; Condutor elétrico.	Tempo de resfriamento curto, necessidade de controle de temperatura.

Fonte: [23-26]

## 2.5 ADESIVOS

Os adesivos têm como finalidade serem aplicadas em peças de alta complexidade que não poderiam ser fabricadas pelos métodos tradicionais que se é conhecido na indústria como soldagem, parafuso e rebite. Tais processos usados comumente na indústria são concentradores de tensões e para minimizar o impacto destes, o adesivo é uma alternativa ideal pois ele contribui para o alívio das mesmas

uniformizando as tensões ao longo de toda o comprimento que se é aplicado como pode ser visto na Figura 6 [27].



**Figura 6 - Distribuição de tensão pelo método de união tradicional (rebite) X União com Junta colada**

Fonte: [27]

Este material traz como vantagem a redução do peso do componente fabricado, característica importante em diversos setores como automotivo e aeronáutico [28].

Contudo, o uso de adesivos torna-se limitado quando o material é submetido a condições de alta temperatura pois o mesmo possui fraca resistência ao fogo. Outra desvantagem do uso de adesivos é a extremo cuidado que se deve ter ao preparar a superfície do material que receberá o adesivo. Ele precisa estar limpo para poder ter uma melhor adesão do mesmo. Combinado com a necessidade de usar ferramentas que fixem os materiais [27].

Os adesivos podem ser classificados de 3 formas diferentes: pela função, pela aplicação e pela composição como pode se ver na Tabela 5:

**Tabela 5 - Classificação dos Adesivos**

<b>Função</b>	
<b>Estrutural</b>	<b>Não Estrutural</b>
(Resistência entre 5MPa e 10 MPa)	(Resistência menor que 5Mpa)

<b>Aplicação</b>			
<b>Reação Química</b> (agente endurecedor ou fonte externa – calor, radiação)	<b>Perda de solvente ou água</b> (endurecido com a evaporação da água ou solvente)	<b>Arrefecimento</b> (adesivos que se fundem quando aquecido e endurecem ao arrefecer)	
<b>Composição</b>			
<b>Termoplásticos</b> (Fundidos com aplicação de Calor)	<b>Elastômeros</b> (Consegue sofrer grande deformação tratativa ou compressiva)	<b>Termo-endurecíveis</b> (Curam à temperatura ambiente ou altas temperaturas)	<b>Híbridos</b> (Combinação dos adesivos mencionados)

Fonte: [27]

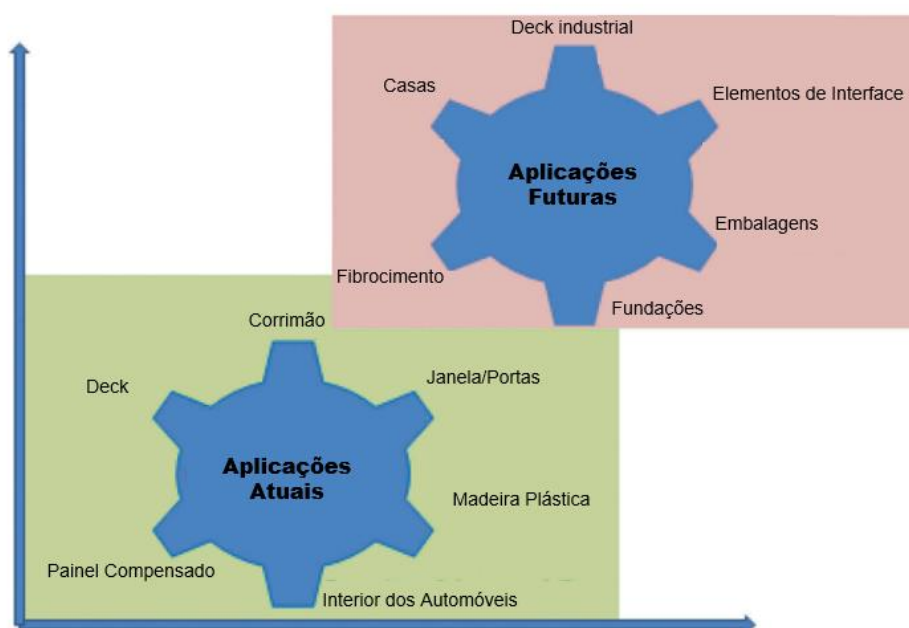
## 2.6 MATERIAIS COMPÓSITOS HÍBRIDOS

Um dos outros métodos de melhoria das propriedades dos materiais compósitos reforçados com fibras naturais apresentados na literatura é através da hibridização [1, 29, 30]. Esse método consiste em aplicar dois ou mais reforços em uma única matriz e tem o objetivo de balancear as propriedades mecânicas dos materiais com sustentabilidade, baixo custo, a performance do material, atingir uma maior resistência na interface matriz/fibra e uma menor absorção de umidade [31, 32]. Além disso, a literatura já mostra que compósitos híbridos apresentam propriedades próximas aos dos compósitos sintéticos e ganham no quesito custo e sustentabilidade [29].

A fibra sintética de vidro é a fibra mais utilizada na hibridização com fibras naturais [1, 29]. Isso se deve ao fato de que existem muitas aplicações de baixa solicitação estrutural e de menor contato com o meio aquoso, nos quais a fibra de vidro poderia ser substituída por fibras naturais. Dessa forma, seria possível exercer a mesma função com uma redução de custo e maior sustentabilidade [33].

## 2.7 COMPÓSITOS HÍBRIDOS REFORÇADOS COM FIBRAS NATURAIS

A utilização de compósitos reforçados com fibras sintéticas ainda representa a maior parcela de utilização na indústria. Entretanto, na última década através da busca de redução de custos e uma produção prejudicial ao meio ambiente, percebe-se um notável crescimento de pesquisas na literatura em relação à utilização dessas fibras [2]. As fibras naturais já apresentam aplicações em partes não estruturais da indústria automotiva [29]. Além disso, o uso de compósitos reforçados com fibras naturais já é utilizado também para mesas, cadeiras e outras aplicações de menor esforço estrutural. A Figura 7 resume o atual cenário e o que se espera conforme pesquisas encontradas na literatura para o futuro da aplicação desses materiais na indústria [34].



**Figura 7 - Cenário de aplicações de compósitos reforçados com fibras naturais (adaptado)**  
**Fonte: [34]**

Comparado com os materiais de fibra sintéticas, um mesmo produto fabricado com fibra de vidro, por exemplo, pode ter o mesmo peso, porém apresentar 30% maior resistência quando comparado com os reforços de fibras naturais [5]. Também comparando com a fibra de vidro, o reforço de fibras naturais traz também melhor resistividade térmica e uma melhor proteção da pele contra a radiação [6].

O uso de compósitos feitos com fibras naturais também atrai interesse no aspecto econômico. Estas podem ser encontradas com um terço do valor comparados

com a fibra de vidro por exemplo [31]. Apesar de possibilitar uma redução dos custos e atingir um maior nível de sustentabilidade. Todavia, existem uma série de características que vão de encontro à possibilidade ampliação da utilização desses materiais. As principais vantagens e desvantagens da utilização desses materiais são informadas na Tabela 6.

**Tabela 6 - Vantagens e desvantagens de fibras das fibras naturais**

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Menor custo	Propriedades Mecânicas Inferiores
Menor massa	Maior absorção de umidade
Menor consumo energético	Menor resistência térmica
Biodegradável	Variação na qualidade

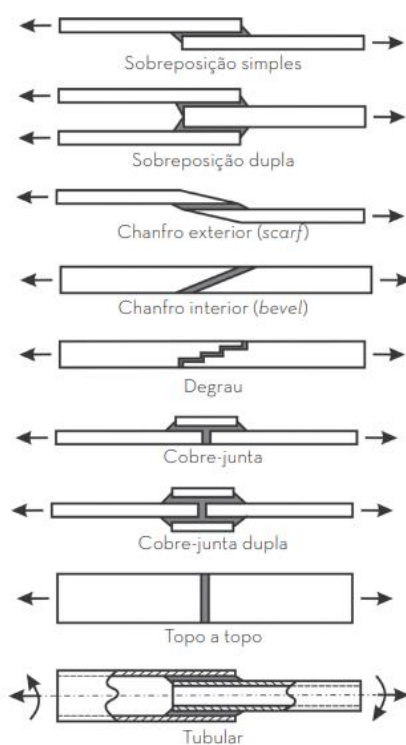
Fonte: [2]

## 2.8 JUNTAS ADESIVAS

### 2.8.1 Configuração das Juntas Adesivas

O método mais comum para união de materiais compósitos é através de juntas coladas. A união adesiva de materiais compósitos é capaz de fornecer um maior potencial de redução de peso e custo, conseqüentemente se torna o método mais utilizado para a união de materiais compósitos [35]. Além disso, o comportamento de juntas coladas é amplamente estudado na literatura.

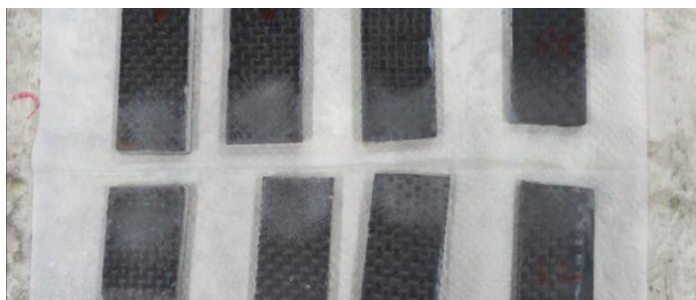
Existe uma grande variedade de configurações de juntas coladas disponíveis na literatura e estão representadas na Tabela 8. Cada configuração apresentada apresenta diferentes processos de fabricação com o objetivo de reduzir a concentração de tensões na área adesiva. Entretanto, a configuração *single-lap joints* (SJLs) ou Junta de Sobreposição Simples apresenta a maior simplicidade, eficácia e facilidade de fabricação, sendo uma das mais utilizadas e estudadas [31].



**Figura 8 - Diferentes configurações de juntas adesivas**  
**Fonte: [36]**

### 2.8.2 Preparação da Superfície de Juntas Adesivas

Com o objetivo de aprimorar a adesão entre o substrato e o adesivo, uma das etapas da fabricação de juntas adesivas é o tratamento superficial. O tratamento da superfície consiste na limpeza através de produtos químicos e lixagem da superfície que está ilustrada na Figura 9. É possível eliminar possíveis sujeiras, óleos e outros materiais que podem influenciar na qualidade da adesão entre o adesivo e o substrato. Além disso, atua na melhoria da performance na adesão mecânica entre os dois componentes. Dessa forma, o tratamento superficial torna-se altamente relevante na fabricação de uma junta adesiva, pois pode aprimorar de forma significativa a confiabilidade e qualidade da junta.



**Figura 9 - Lixagem da superfície**

### 2.8.3 Estado de Tensões em Juntas Adesivas

Por causa da natureza do carregamento das juntas, elas estão sujeitas a diferentes tipos de tensões, incluindo a tensão de cisalhamento e arrancamento.

A tensão de cisalhamento está relacionada à força atuante de forma paralela ao plano da junta favorecendo a separação através do deslizamento entre as superfícies dos componentes da junta adesiva. Com a aplicação de uma tensão uniforme de cisalhamento em toda a área da junta adesiva, é possível utilizar plenamente a superfície de adesão para suportar a carga aplicada. Dessa maneira, é possível distribuir o esforço de forma mais eficiente, aumentando a resistência da junta e garantindo uma melhor performance em condições de carga [37].

Em relação à tensão de arrancamento, ela ocorre devido à excentricidade do eixo de carga por causa de geometria da junta do tipo sobreposição simples. Conseqüentemente, esse desalinhamento provoca um momento na sobreposição e a tendência rotação ocasionando os picos de tensão de arrancamento nas extremidades. A distribuição de tensão de arrancamento se concentra principalmente nas bordas da junta adesiva, devido à presença de descontinuidades geométricas na interface entre o adesivo e o substrato. Essa concentração de tensão pode provocar a ocorrência de falhas precoces nas bordas da junta adesiva, diminuindo, assim, a sua resistência global.

A Figura 10 apresenta a distribuição tensão de cisalhamento e arrancamento em juntas adesivas de alumínio e adesivos epóxi sujeitas a carregamentos de cisalhamento e arrancamento. Os resultados indicaram que a distribuição de tensão de cisalhamento é relativamente uniforme em toda a área de adesão, enquanto a distribuição de tensão de arrancamento é mais concentrada nas bordas da junta. A resposta mecânica das juntas adesivas sob diferentes condições de carregamento é

crucial para projetar juntas adesivas mais eficazes e resistentes. A distribuição de tensão na borda da junta adesiva, por exemplo, pode resultar em falhas prematuras e reduzir a resistência geral da junta. Por isso, é fundamental levar em conta essa distribuição de tensão ao projetar juntas adesivas e avaliar sua resistência em situações reais de aplicação [35].

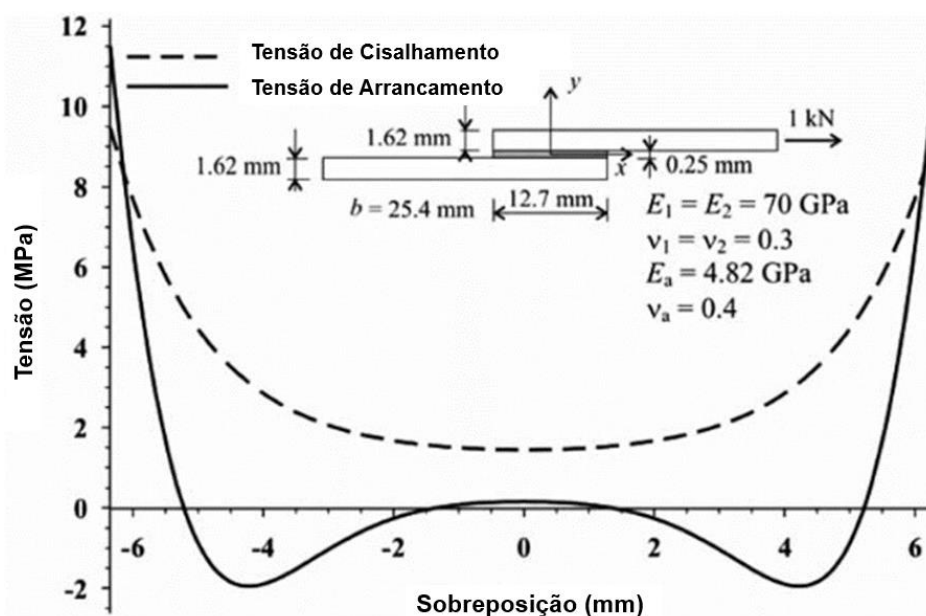


Figura 10 - Visualização da tensão de cisalhamento e arrancamento em juntas adesivas  
 Fonte: [35] Adaptado

É importante destacar a influência do aderente e do adesivo com relação ao estado de tensão da junta adesiva. Um adesivo de natureza frágil geralmente apresenta maior resistência mecânica. Entretanto, esse tipo de adesivo não apresenta uma boa distribuição das tensões como função das sobreposições maiores.

Para um adesivo com características dúcteis, haverá uma distribuição mais uniforme das tensões ao longo da junta como mencionado no item 2.5. Conseqüentemente, será reduzido o risco de falhas através de concentradores de tensões. Além disso, a carga aumenta de modo quase-linear conforme o tamanho da sobreposição.

Em relação à rigidez do aderente, ela é crucial para garantir uma distribuição adequada de tensão na interface adesiva-substrato, especialmente no que diz respeito à tensão de arrancamento. Quando o aderente possui alta rigidez, ele apresenta maior resistência à rotação de ponta na sobreposição, o que resulta em maior tensão nas bordas da junta adesiva. Como consequência, essa concentração



de tensão pode provocar falhas prematuras nas bordas da junta, afetando sua resistência geral. Por isso, a rigidez do aderente deve ser avaliada com atenção durante a concepção de juntas adesivas, a fim de escolher um adesivo que apresente a resistência adequada para a aplicação específica.

Além disso, a configuração da junta também apresentará influência no estado de tensão da junta adesiva. Para o caso de geometrias mais complexas como a de sobreposição dupla ou do tipo *scarf* que foram apresentadas no tópico 2.8.1, elas apresentam picos de tensão menores por causa da geometria dos aderentes e da simetria do eixo de carga. Em relação à geometria de sobreposição simples, ela apresenta maiores picos de tensão de arrancamento que podem ocasionar modos de falha indesejáveis, como a delaminação e cargas inferiores. Entretanto, a geometria SLJ é a mais utilizada, isso deve-se ao fato de que apresenta o processo de fabricação mais simples e de baixo custo.

#### 2.8.4 Efeito da Espessura da Camada Adesiva

Outro tópico importante é a espessura da camada adesiva, pois ela apresenta influência na carga de ruptura da junta adesiva. Setores de energia eólica, por exemplo, que fazem o uso de adesivo ser comum, necessitam de que a espessura seja na escala de centímetros. Neste caso, a espessura do adesivo é considerada um parâmetro geométrico importante pois ele pode definir a distribuição da tensão, o local do descolamento ao ser submetido por uma força. Isso porque, o comportamento plástico do material pode ser associado com esse parâmetro. Quando se utiliza uma camada muito fina, a zona plástica não consegue se desenvolver. Por outro lado, quando a camada da junta possui uma espessura alta, a trinca que se desenvolve ao passar por um ensaio trativo é significativa levando a energia da fratura ser maior [29].

Em relação ao efeito da espessura da camada adesiva em juntas adesivas de compósitos unidirecionais. Contrariando a análise matemática esperada, o aumento da espessura adesiva leva a uma diminuição da carga da junta. Isso deve-se ao fato de que durante a fabricação das juntas, pequenos vazios e micro trincas são formados na camada adesiva, e estatisticamente, o número dessas falhas aumenta com a espessura da camada. Essas falhas acabam se tornando pontos fracos na junta, diminuindo sua resistência geral como pode ser visto em seus resultados

apresentados na Figura 11 com a diminuição da espessura (t) obteve-se resultados superiores em relação ao quanto de carga que a junta resiste [38].

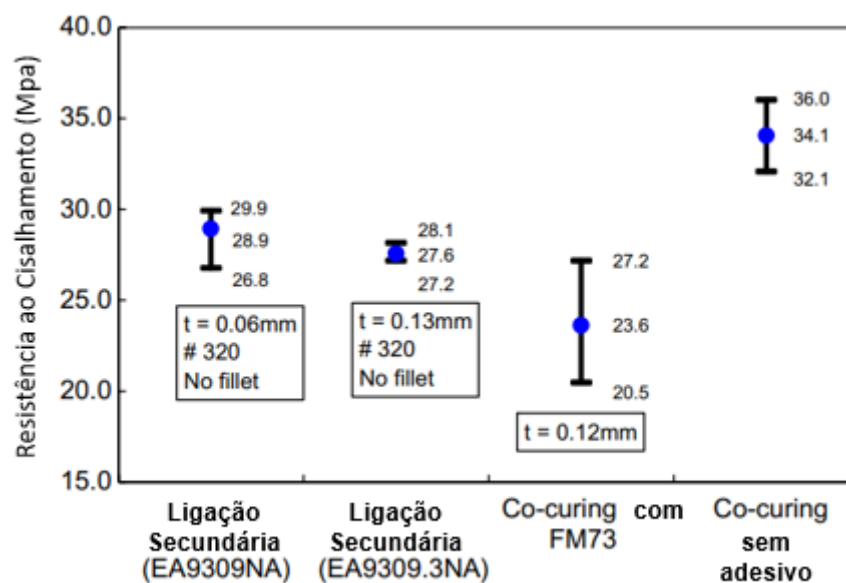
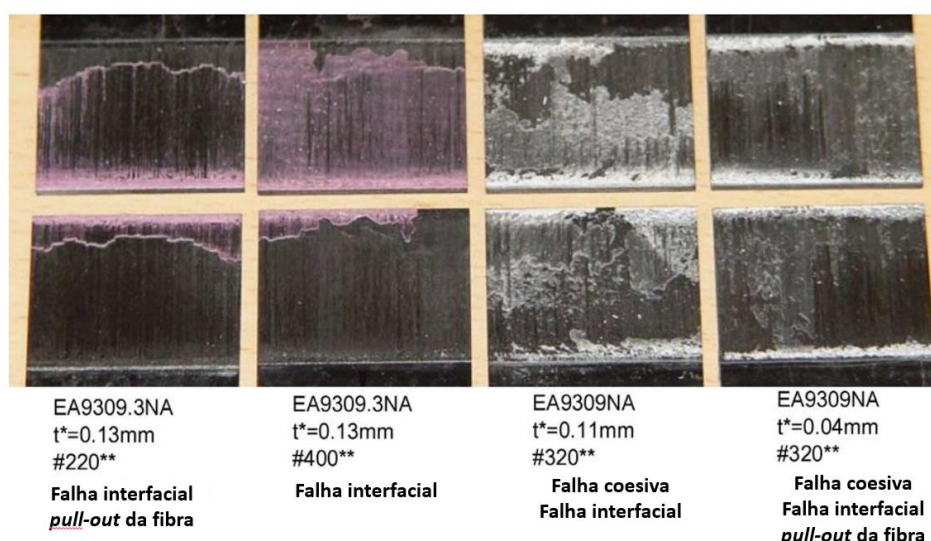


Figura 11 - Resistência à falha da amostra de junta (adaptado)  
Fonte: [38]

Além disso, a partir da Figura 12 é possível concluir também que adesivos usados em diferentes espessuras levariam à diferentes modos de falha. Logo, é importante considerar o efeito da espessura adesiva na qualidade da junta e em sua resistência final, a fim de garantir o melhor desempenho possível.



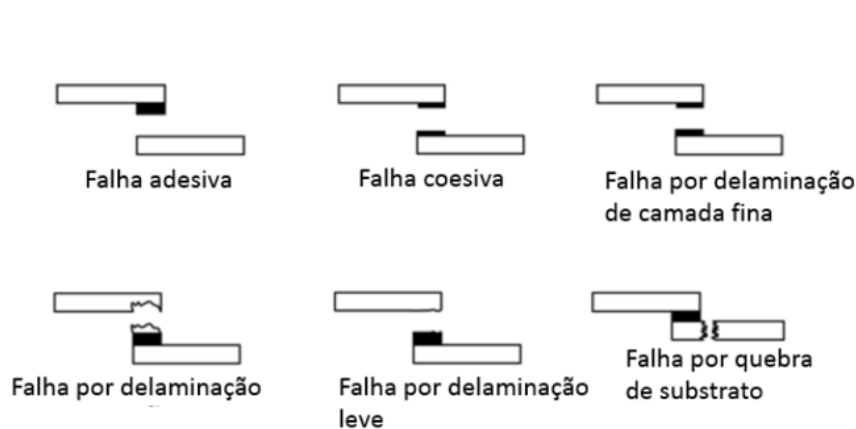
Nota \*: espessura da linha de adesão

\*\* : nº da lixa usada para abrasão na superfície

Figura 12 - Superfícies de falha típicas de corpos de prova com adesivo (adaptado)  
Fonte: [38]

### 2.8.5 Tipos de Falha das Juntas Adesivas

O tipo de falha que ocorre nas juntas coladas é regido pelas propriedades do adesivo e do aderente, geometria da junta e pela qualidade interfacial adesivo/aderente. Conseqüentemente, o modo de falha é de extrema importância para a capacidade final da junta [1]. Dessa forma, através de um detalhamento do modo de falha pode-se alcançar uma melhor compreensão sobre a propagação da trinca, concentradores de tensão e as propriedades que afetam o desempenho da junta.



**Figura 13 - Possíveis modos de falha em junta coladas com aderentes de materiais compósitos**

Fonte: [39]

Sobre os tipos de falhas em juntas coladas, a falha por delaminação é categorizada como uma falha no aderente e é caracterizada pela remoção, parcial ou completa, de camadas à medida que a fratura avança no espaço interlaminar de adesão do material compósito ao invés de se propagar no adesivo ou na interface adesivo/aderente. A falha na interface aderente/adesivo é categorizada por falha adesiva e a falha na lâmina adesiva é categorizada por uma falha coesiva denominadas falha por delaminação leve (*light fiber tear* (LFT)) e falha por delaminação de camada fina (*thin layer cohesive failure* (TLC)). A LFT é categorizada por uma falha com uma camada de maior espessura de adesivo de um lado e do outro uma fina superfície de resina e poucas fibras removidas da interface. A TLC caracteriza-se por uma camada de maior espessura de adesivo em um lado e uma camada bem fina de adesivo do outro lado após a falha. Além disso, é válido ressaltar

que é comum ocorrer mais de um dos tipos de falha no corpo de prova após a realização do teste [29].

Em relação aos adesivos em juntas coladas, sabe-se que o primeiro critério para a escolha de um adesivo é a possibilidade de ele criar um vínculo adequado entre os materiais escolhidos. Além disso, outro fato importante de ser ressaltado é a temperatura de processamento, a qual pode ser um limitante para o trabalho com fibras naturais.

A sequência de empilhamento das fibras também exerce influência na junta colada, especialmente nas propriedades de rigidez e de absorção de água em compósitos híbridos reforçados com fibras naturais [40]. Além disso, a sequência de empilhamento em materiais compósitos é um assunto pouco abordado na literatura [41, 42]. Posicionar as camadas sintéticas nas posições externas promove uma maior performance das juntas coladas, pois as camadas externas estarão sobre maior compressão e tensão [30]. Isso é crucial para retardar o início da falha por delaminação. Além disso, os efeitos na natureza hidrofóbica também podem ser restringidos pelo posicionamento de fibras sintéticas nas camadas externas [30, 43, 44].

## 2.9 ANÁLISE EXPERIMENTAL DE JUNTAS ADESIVAS DE COMPÓSITOS HÍBRIDOS NA LITERATURA

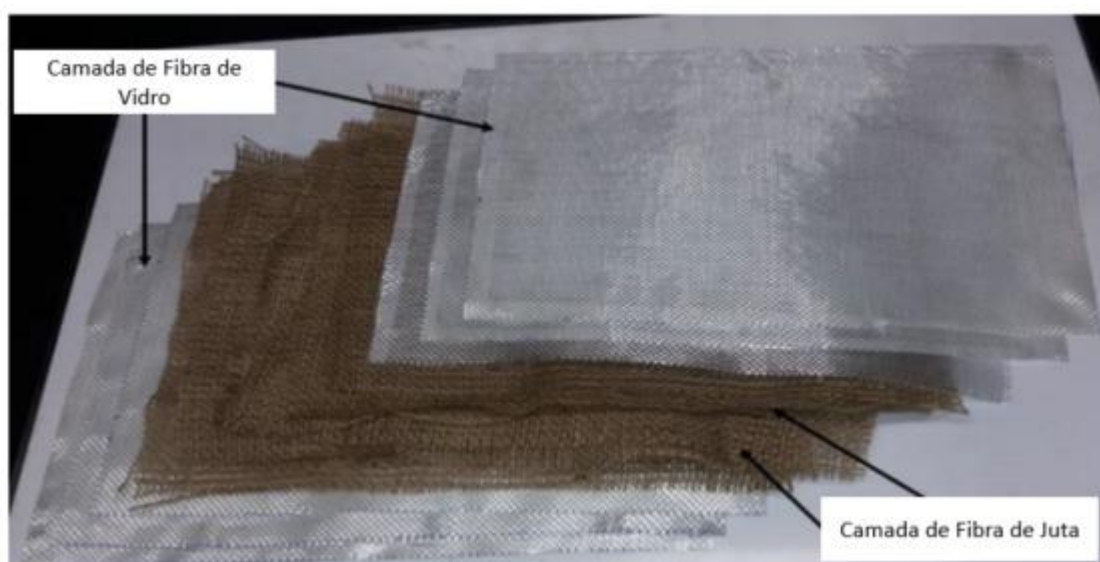
de Queiroz, Banea et al. realizaram uma investigação experimental de juntas adesivas feitas de materiais compósitos híbridos poliméricos reforçados com fibras sintéticas de vidro e fibras naturais de juta interlaminares para a indústria automotiva. O objetivo foi verificar o efeito do número de lâminas necessárias de fibra de vidro para atingir uma performance correspondente a uma junta totalmente sintética de fibra de vidro, possibilitando uma redução de custos e uma maior sustentabilidade [29].

A escolha pela utilização da fibra de juta baseia-se no fato dela atingir propriedades de resistência de cerca de 1/8 a 1/4 quando comparadas as fibras de vidro do tipo E [32, 43]. Além disso, a fibra de juta apresenta uma redução de aproximadamente 50% de densidade da fibra de vidro e um preço por peso de cerca de 1/9 da fibra de vidro [32, 44, 45]. Sendo assim, uma excelente oportunidade para uma redução de massa do componente de aplicação e redução de custos.

Os autores utilizaram o tipo de junta SLJs (*Single-lap joints*) com a fabricação com o adesivo estrutural Betamate™ 2096, utilizaram a resina HEX 135 SLOW e tecido de fibra de juta e fibra bidirecional de vidro utilizados como reforço.

Os corpos de prova foram fabricados através da técnica de laminação manual e moldagem por compressão a quente por meio de um molde de aço e uma prensa hidráulica de placa aquecida com tempo de cura recomendado pelos fabricantes.

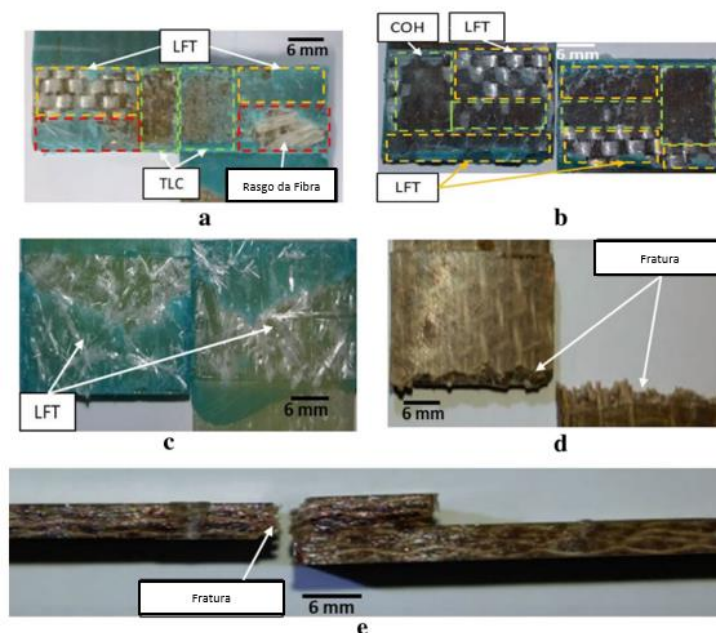
Foram fabricados um corpo de prova de fibra natural puro com fibra de juta (JFRP), um com somente fibra sintética (GFRP) e dois corpos de provas híbridos com 5 lâminas de juta envolvidas por 2 ou 3 lâminas de fibra de vidro de cada lado e de forma simétrica (G2J5G2) e (G3J5G3), conforme a Figura 14:



**Figura 14 - Sequência de empilhamento das fibras naturais e sintéticas do G3J5G3**  
Fonte: Queiroz et al. 2021 (Adaptado)

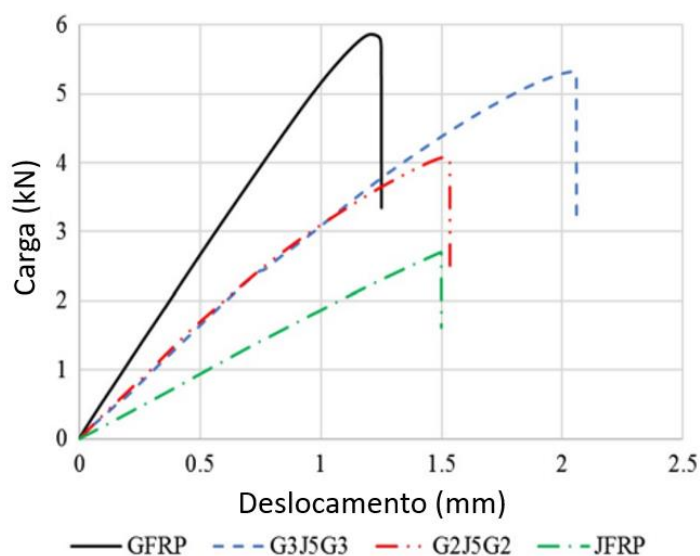
Em relação aos métodos de teste, os corpos de prova foram testados utilizando a INSTRON 5966 e os resultados foram categorizados de acordo com a norma ASTM 5573.

Em relação aos resultados, percebeu-se uma grande diferença entre o GFRP e o JFRP, em que a falha do tipo *light fiber tear* predominou no GFRP. Enquanto o JFRP, por ser mais frágil e por possuir menos capacidade de rotacionar para suportar a resistência a tração no teste, conforme o esperado, falhou catastróficamente cedo, apresentando o tipo de falha no aderente categorizada como *stock-break*.



**Figura 15 - Representação dos tipos de falha nos corpos de prova; a) G3J5G3; b) G2J5G2; c) GFRP; d) JFRP (vista superior) e e) JFRP (vista lateral) (adaptado)**  
**Fonte: Queiroz et al. 2021**

Em relação aos compósitos híbridos, os autores verificaram que através do aumento no número de camadas sintéticas de 2 para 3, foi possível atingir um aumento de aproximadamente 28% e também foi possível evitar a falha por delaminação. Além disso, o G3J5G3 atingiu um desempenho similar ao corpo de prova sintético de fibra de vidro conforme representado no gráfico na Figura 16:



**Figura 16 - Representação da curva tensão deformação em função do material do aderente (adaptado)**  
**Fonte: Queiroz et al. 2021**

Sujon et al. realizou uma investigação experimental das propriedades mecânicas e de absorção de água na sequência em empilhamento e na orientação das fibras em compósitos híbridos epóxi de juta/carbono [30].

Para a fabricação dos corpos de prova os autores não realizaram tratamento químico e utilizaram resina epóxi, a qual apresenta melhores propriedades do que outras resinas termo-endurecíveis devido ao baixo encolhimento, alta resistência adesiva, excelente resistência mecânica e forte resistência contra corrosão.

O processo de fabricação utilizado foi através da infusão de resina à vácuo com a resina epóxi LY 556 e o adesivo endurecedor Araldite HY951.

Os autores fabricaram 12 configurações diferentes com 10 camadas em cada, sendo sempre 6 camadas de fibra de juta e 4 camadas de fibra de carbono, conforme mostra a Figura 17:

Símbolo	Sequência de Empilhamento	Orientação da Fibra
S1	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	J <sub>3</sub> C <sub>4</sub> J <sub>3</sub>
S2	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	J <sub>2</sub> C <sub>2</sub> J <sub>2</sub> C <sub>2</sub> J <sub>2</sub>
S3	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	C <sub>2</sub> J <sub>3</sub> C <sub>2</sub> J <sub>3</sub>
S4	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	C <sub>2</sub> J <sub>6</sub> C <sub>2</sub>
S5	0 45 0 45 0 45 0 45 0 45	J <sub>3</sub> C <sub>4</sub> J <sub>3</sub>
S6	0 45 0 45 0 45 0 45 0 45	J <sub>2</sub> C <sub>2</sub> J <sub>2</sub> C <sub>2</sub> J <sub>2</sub>
S7	0 45 0 45 0 45 0 45 0 45	C <sub>2</sub> J <sub>3</sub> C <sub>2</sub> J <sub>3</sub>
S8	0 45 0 45 0 45 0 45 0 45	C <sub>2</sub> J <sub>6</sub> C <sub>2</sub>
S9	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	J <sub>3</sub> C <sub>4</sub> J <sub>3</sub>
S10	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	J <sub>2</sub> C <sub>2</sub> J <sub>2</sub> C <sub>2</sub> J <sub>2</sub>
S11	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	C <sub>2</sub> J <sub>3</sub> C <sub>2</sub> J <sub>3</sub>
S12	0 90 0 90 0 90 0 90 0 90	C <sub>2</sub> J <sub>6</sub> C <sub>2</sub>

Fibra de Carbono     
 Fibra de Juta

**Figura 17 - Diferentes configurações dos compósitos híbridos e símbolos utilizados como referência (adaptado)**  
**Fonte: Sujon et al. 2020.**

Para a análise experimental, os autores realizaram os testes de tração, flexão em 3 pontos, impacto e de absorção de água segundo a norma ASTM.

Em relação aos resultados, no teste de tração os compósitos com as fibras orientadas em uma única direção apresentaram os melhores resultados por estarem posicionadas na direção de carregamento. Além disso, adicionar fibras de juta centralmente dificulta a interação do carbono e também aumenta o deslocamento e a delaminação provocando uma queda na resistência à tração conforme ilustrado na

Figura 18. Isso ocorre por causa da natureza quebradiça da juta, consequentemente o posicionamento da fibra de carbono no centro melhorou a interação [1, 2].

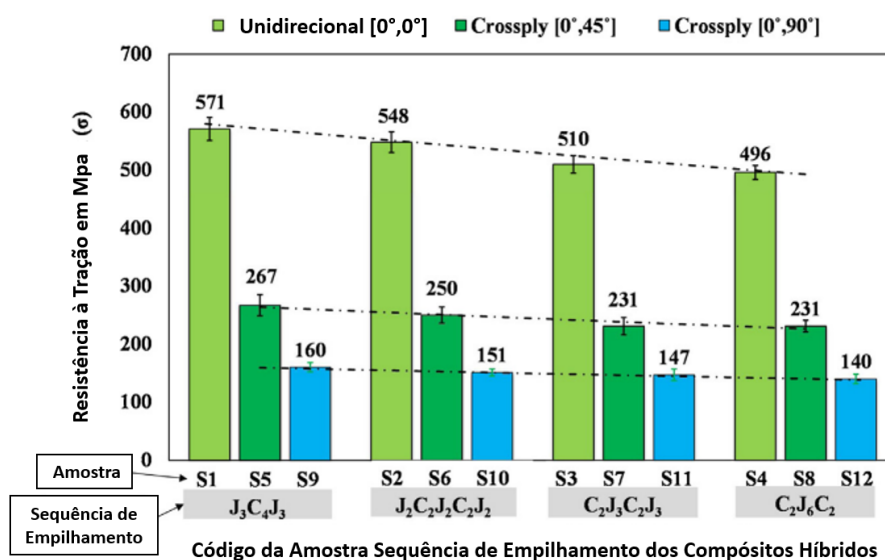


Figura 18 - Gráfico com os resultados do teste de tração (adaptado)  
Fonte: Sujon et al. 2020.

Em relação ao teste de flexão os melhores resultados também foram encontrados nas fibras unidirecionais. Isso ocorre devido ao fato de que as fibras longas e contínuas na direção unidirecional agiam como portadores de carga e a tensão era uniforme e efetivamente transferida dentro da matriz. Consequentemente, a carga final para falha é aumentada. Ressalta-se que no caso *cross-ply* a carga é recebida com fibras curtas e descontínuas, metade das fibras são orientadas na direção de carregamento.

Entretanto, no teste de flexão, conforme mostrado na Figura 19 a sequência de empilhamento apresenta uma diferença para o teste de tração. Isso ocorre pois na parte superior e inferior o corpo de prova está em compressão e tração máximas, consequentemente a sequência de empilhamento exerce influência. Dessa forma, quando a camada de carbono é posicionada em camadas externas a resistência a flexão aumentou.



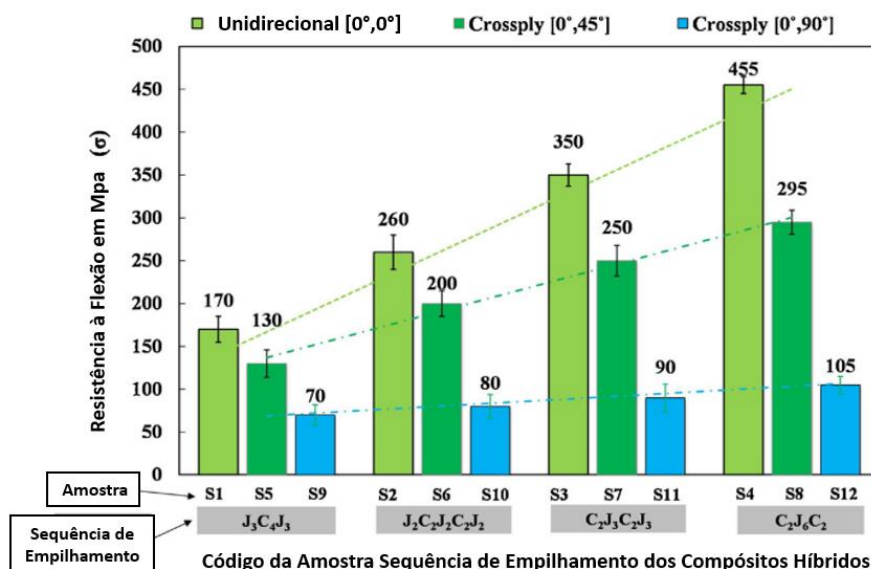


Figura 19 - Gráfico com os resultados do teste de flexão em 3 pontos (adaptado)

Fonte: Sujon et al. 2020.

No teste de impacto, conforme a Figura 20, os resultados dependem muito da orientação da fibra, em que o alinhamento da fibra unidirecional ajudou mais na absorção do impacto do que na orientação angular e bidirecional. Além disso, as camadas de empacotamento não exerceram muita influência.

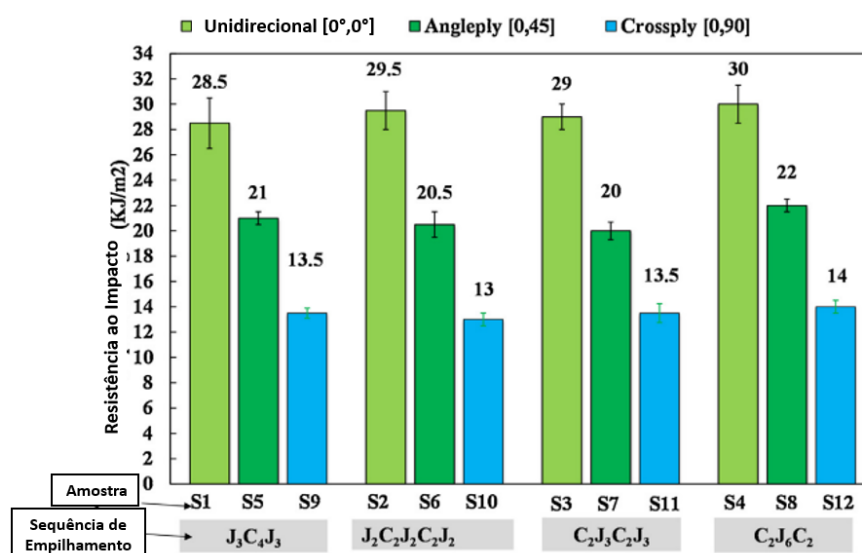


Figura 20 - Gráfico com os resultados do teste de impacto (adaptado)

Fonte: Sujon et al. 2020.

Inicialmente todos os corpos de prova absorvem muita água até atingirem a saturação. A fibra de juta apresenta uma natureza hidrofílica e um alto teor de celulose que contribui para uma maior absorção de água [1, 2]. Já a fibra de carbono apresenta

um baixo teor de absorção e água devido à natureza hidrofóbica [46]. Dessa forma, o posicionamento das fibras de carbono nas camadas externas funciona como um “envelope” aumentando a resistência à absorção de água, conforme mostra a Figura 21.

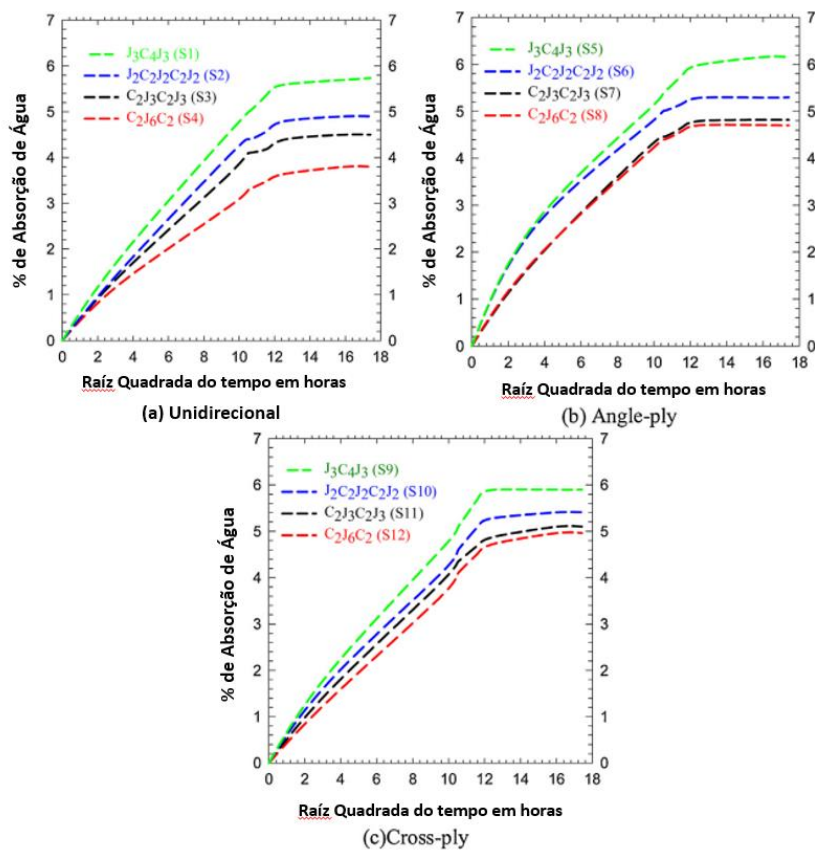


Figura 21 - Gráfico com os resultados de absorção de água (adaptado)  
Fonte: Sujon et al. 2020.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização de um projeto de juntas coladas e de caracterização mecânica, torna-se necessário a análise experimental do material com o objetivo de aferir as propriedades mecânicas e fomentar dados para comparação com a literatura. Neste projeto, foi feita a fabricação através da laminação manual de materiais compósitos de fibra de juta, fibra de carbono e híbrido de fibra de carbono com fibra de juta. Além disso, foram realizados ensaios de tração, flexão, impacto e de juntas coladas para caracterização mecânica do material. Neste capítulo foram detalhados os materiais utilizados durante a análise experimental do projeto, as etapas para a fabricação dos corpos de prova e o processo para a realização dos ensaios.

#### 3.1 FIBRAS DE JUTA E DE CARBONO

Foram utilizadas mantas de fibra sintética de carbono RC203 fornecida pela *Barracuda Advanced Composites* (Rio de Janeiro, Brasil) e a manta de fibra natural de juta P9 fornecida pela Sisasul (São Paulo, Brasil) para a realização desta pesquisa. As mantas de fibra bi-direcional de carbono e fibra plain weave de juta utilizadas podem ser visualizadas na Figura 22.



Figura 22 - Mantas de fibra sintética de carbono e fibra natural de juta

### 3.2 RESINA

Para o processo de fabricação dos corpos de prova foi utilizada uma resina epóxi de dois componentes, HEX 135 SLOW, fornecida pela *Barracuda Advanced Composites* (Rio de Janeiro, Brasil), conforme mostra a Figura 23. De acordo com o fabricante, a resina apresenta uma proporção de processamento por peso de resina e endurecedor de 100:33 e um tempo de cura de 8 horas a 70°C. A Tabela 7 indica as propriedades mecânicas da resina e a ficha técnica encontra-se no Anexo A deste trabalho.



**Figura 23 - Resina HEX 135 SLOW**  
Fonte: E-Composites (2023)

<b>Tabela 7 - Propriedades da resina HEX 135 Slow</b>		
<b>Propriedade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	1,10 – 1,20
Resistência à flexão	MPa	100 – 120
Módulo de Elasticidade	GPa	2,8 – 3,2
Resistência à tração	MPa	65 – 75
Resistência a compressão	MPa	80 – 100
Alongamento de Ruptura	%	7,0 – 10,0

**Fonte: E-Composites (2023)**

### 3.3 ADESIVOS

Para a fabricação das juntas coladas foram utilizados dois tipos de adesivos para comparação dos resultados experimentais. Foi utilizado um adesivo dúctil, o BETAMATE 2096, e um adesivo frágil, o AR345.

De acordo com a ficha técnica que se encontra no ANEXO B deste trabalho, o BETAMATE 2096 (Figura 24), fornecido pela *DuPont*, é um adesivo estrutural epóxi de dois componentes que apresenta uma ampla utilização na indústria automotiva. Conforme orientações do fabricante, o processo de cura desse adesivo se dá através da exposição dos componentes A e B em uma proporção 2:1 a uma temperatura de 60°C durante um período de 2 horas. A Tabela 8 apresenta as propriedades mecânicas do BETAMATE 2096.



**Figura 24 - BETAMATE 2096**  
**Fonte: Dow Automotive (2011)**

**Tabela 8 - Propriedades do adesivo BETAMATE 2096.**

<b>Propriedade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Densidade (23°C)	g/cm <sup>3</sup>	1,12
Alongamento	%	9
Módulo de Young	GPa	1700
Tensão de Ruptura	(MPa)	29
Razão de Mistura dos Componentes	-	2:1

**Fonte: Dow Automotive (2011)**

Além do BETAMATE 2096, também foi utilizado o adesivo epóxi AR345 ilustrado na Figura 25, o qual consiste em uma pasta tixotrópica e foi desenvolvido para colagem de materiais metálicos e compósitos. De acordo com o fabricante o processo de cura ocorre através de uma mistura em uma proporção por peso de 100:45 entre os componentes A e B respectivamente. A Tabela 9 apresenta as propriedades adesivo epóxi AR345. A ficha técnica do adesivo encontra-se no ANEXO C deste documento.



**Figura 25 - Adesivo AR-345**  
**Fonte: E-Composites (2023)**

**Tabela 9 - Propriedades do Adesivo AR-345**

<b>Propriedade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
Resistência à tração	MPa	53,09
Resistência ao alongamento	%	4,3
Módulo de Tração	MPa	3097,75
Resistência à compressão	MPa	90,32
Resistência à flexão	MPa	95,84
Razão da mistura dos componentes	-	100:45

**Fonte: E-Composites (2023)**

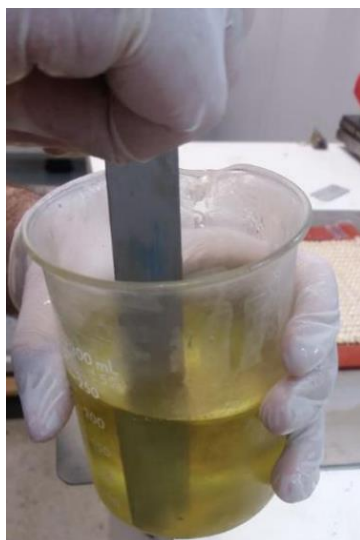
### 3.4 FABRICAÇÃO DOS COMPÓSITOS

Inicialmente as mantas de fibras de Juta e Carbono foram cortadas em um tamanho de 22cmx13cm como visto na Figura 22. Após o corte, as mantas fibras de Juta foram levadas ao forno (Figura 26) à 100°C durante 10 minutos para remoção de umidade, pois como já mencionado, as fibras naturais retém água conforme mencionado no tópico 162.2 e conseqüentemente, após essa secagem ocorrerá a redução de massa.



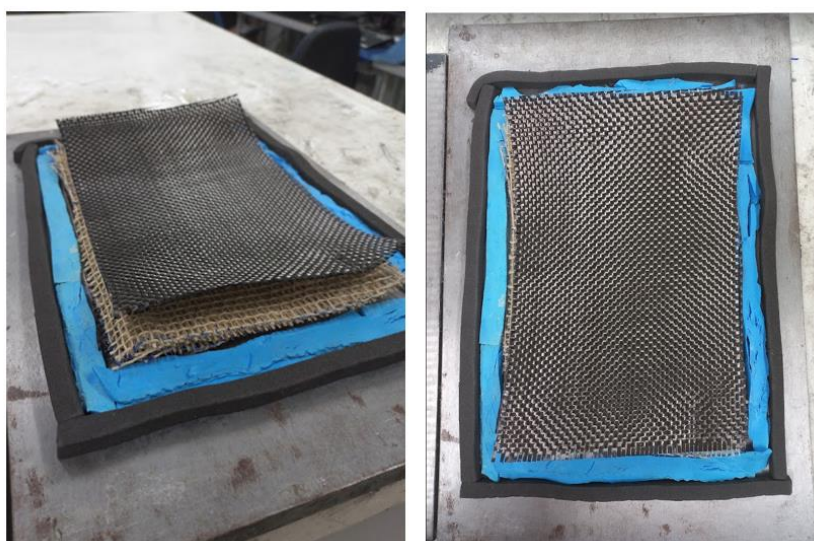
**Figura 26 - Forno usado no LADES para remoção da umidade da Fibra**

Posteriormente foi realizada a medição da massa das fibras que seriam laminadas através de uma balança eletrônica para o cálculo da massa de resina e de endurecedor necessária para laminação. Segundo o fabricante, a resina HEX 135 SLOW deve ser utilizada em uma mistura na proporção de 100:33 de resina e endurecedor. O processo de mistura foi realizado manualmente até que os componentes estivessem homogeneizados. Esse processo está ilustrado na Figura 27.

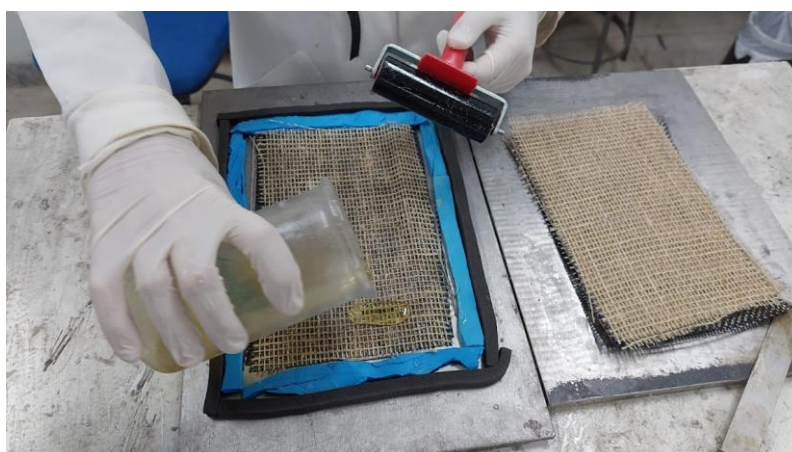


**Figura 27 - Homogeneização da resina e endurecedor**

O processo utilizado para fabricação dos corpos de prova foi o de *hand lay up*, o qual consiste na sobreposição das mantas sobre uma placa metálica dentro de um molde de silicone e na laminação manual utilizando resina, buscando ser o mais homogêneo possível e esse processo está demonstrado na Figura 28 e Figura 29. A utilização molde de silicone tem o objetivo não permitir que uma grande quantidade de resina se perca durante o processo e consequentemente proporcione uma maior homogeneidade para a mistura. Além disso, é válido ressaltar a Figura 30, a qual representa que todo esse processo foi realizado utilizando o EPI apropriado.

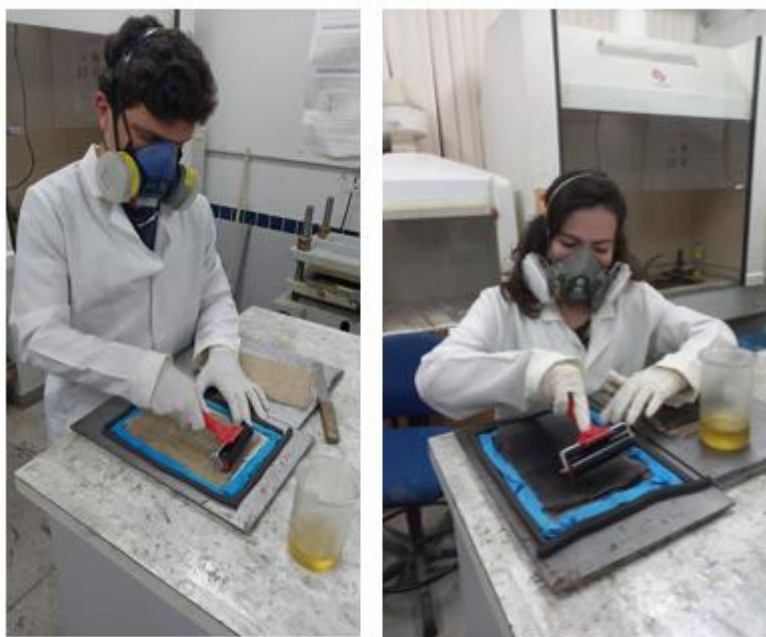


**Figura 28 - Sobreposição das mantas de juta e carbono no molde**



**Figura 29 - Processo de hand lay up do compósito**





**Figura 30 - EPI utilizado durante o processo de laminação**

Após a finalização do processo de laminação, foi utilizada a prensa hidráulica de pratos quentes Solab SL-20 para o processo de cura das placas dos compósitos. As placas foram inseridas cuidadosamente na prensa e deixadas na prensa em uma temperatura de 70°C por cerca de 8 horas para finalização do processo de cura. A prensa utilizada foi fornecida pelo LADES e pode ser visualizada na Figura 31. Após o período de cura, o molde foi retirado da prensa e resfriado em temperatura ambiente. A placa já retirada do molde e finalizada após o processo de cura pode ser vista na Figura 32.



**Figura 31 - Prensa Solab SL-20**



**Figura 32 - Placa manufacturada do compósito**

A placa manufacturada foi cortada no próprio LADES de forma manual através de uma retífica e conforme a norma ASTM D-1002 [47] com o objetivo de fabricação de corpos de prova para a realização de ensaio de flexão, tração, juntas coladas e de impacto. Parte dos corpos de prova após o corte podem ser visualizados na Figura 33.



**Figura 33 - Parte dos substratos cortados**

Sobre a sequência de empilhamento, foram fabricadas placas de compósito de fibra natural de juta, sintética de fibra de carbono e 4 placas compósitos híbridos de fibra de juta com fibra de carbono simétricos e assimétricos. Foi elaborada a seguinte nomenclatura em função do substrato utilizado e da sequência de empilhamento para identificação dos compósitos utilizados neste trabalho:

- JUTA – Substrato natural de fibra de Juta
- CFRP – Substrato sintético de fibra de carbono
- C1 – Substrato híbrido simétrico de fibra de carbono e fibra de juta com uma camada de fibra de carbono em ambos os lados do substrato.
- C2 - Substrato híbrido simétrico de fibra de carbono e fibra de juta com duas camadas de fibra de carbono em ambos os lados do substrato.
- AC1 - Substrato híbrido assimétrico de fibra de carbono e fibra de juta com uma camada de fibra de carbono em apenas um dos lados do substrato.
- AC2 - Substrato híbrido assimétrico de fibra de carbono e fibra de juta com duas camadas de fibra de carbono em apenas um dos lados do substrato.

Na Figura 34 é uma representação da sequência das camadas de empilhamento nos corpos de prova fabricado ilustrado no *software* Onshape.

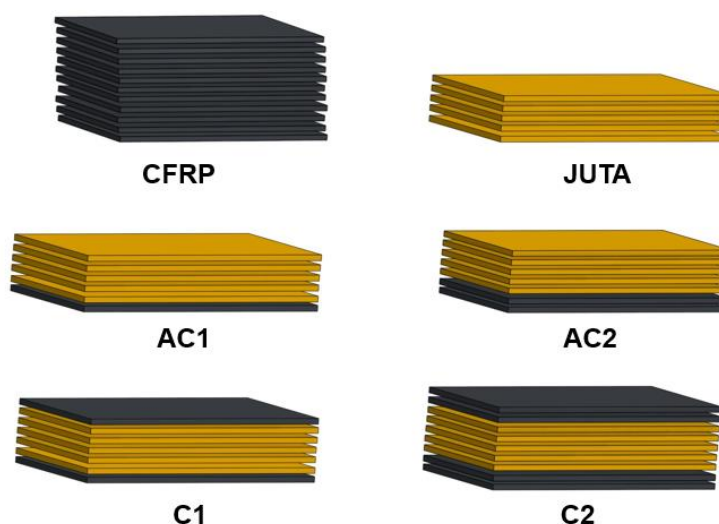
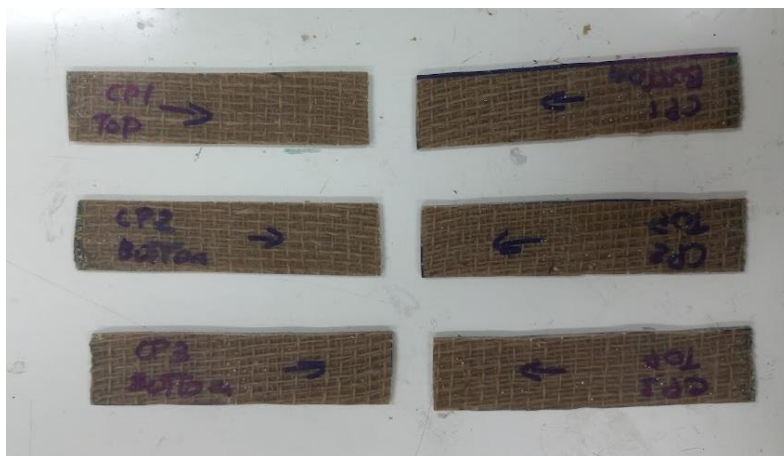


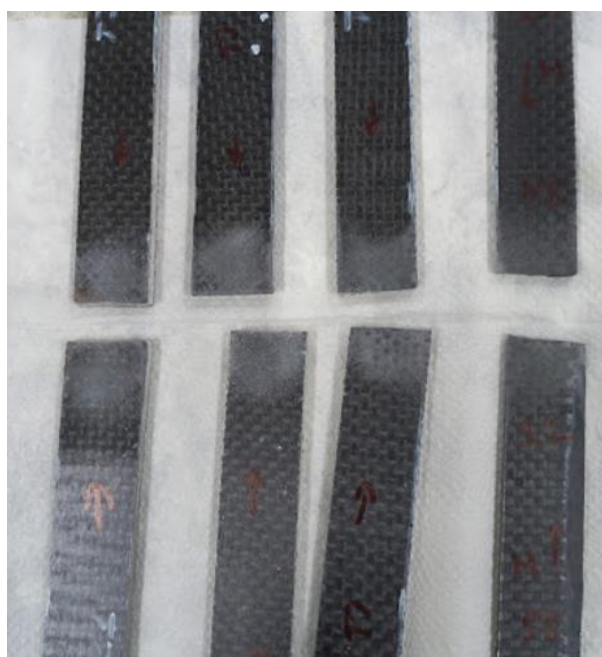
Figura 34 - Representação das camadas de empilhamento

### 3.5 FABRICAÇÃO DAS JUNTAS COLADAS

Inicialmente, para facilitar a identificação dos substratos e do adesivo utilizado, foi escrita a nomenclatura do corpo de prova no próprio material antes da preparação da superfície como pode ser visto na Figura 35. Posteriormente, foi realizada uma abrasão manual com lixa 100 em um padrão de direções opostas em 45 graus com o objetivo de melhorar a interação adesivo/aderente [35]. Além disso, à fim de retirar impurezas químicas da superfície, a área do local que sofreu a abrasão foi limpa com a utilização de acetona 99% [36]. O substrato após a preparação da superfície pode ser visualizado na Figura 36.



**Figura 35 - Identificação dos corpos de prova antes da preparação da superfície**



**Figura 36 - Substratos após a preparação da superfície**

Foram utilizados dois tipos de adesivos estruturais de dois componentes para a fabricação das juntas coladas. O adesivo dúctil, o BETAMATE 2096 e adesivo frágil, o AR345.

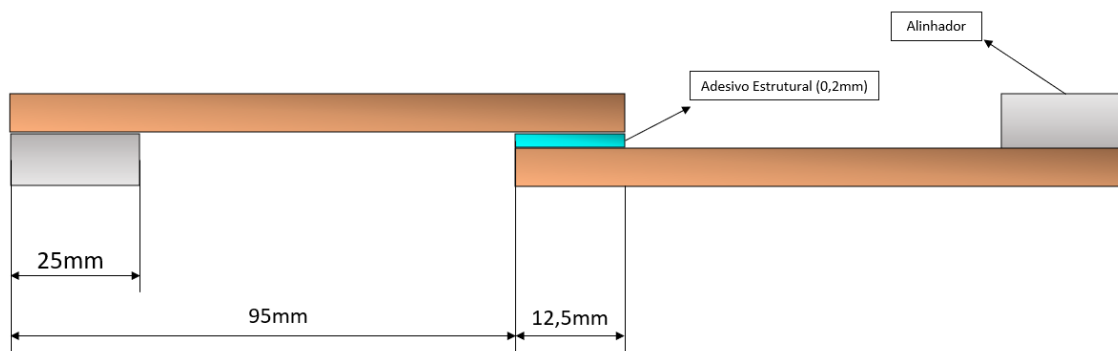
Para a identificação dos substratos com o adesivo utilizado na junta colada de cada substrato, foi realizada a identificação conforme a Tabela 10.

**Tabela 10 - Identificação do substrato por adesivo**

<b>AR345</b>	<b>BETAMATE 2096</b>
CFRP (A)	CFRP (B)
JUTA (A)	JUTA (B)
C1 (A)	C1 (B)
C2 (A)	C2 (B)
AC1 (A)	AC1 (B)
AC2 (A)	AC2 (B)

Por praticidade no processo de fabricação e por apresentar mais estudos na literatura, optou-se pela configuração *single-lap joints* (SJLs) na fabricação das juntas coladas. Essa configuração pode ser visualizada na Figura 37. Foi utilizado um molde e espaçadores metálicos de 0,2mm, ambos fornecidos pelo LADES, com o objetivo de realizar o controle dimensional para a atingir uma espessura de 0,2mm de camada adesiva.

Além disso, é válido ressaltar que o nos substratos assimétricos o adesivo foi utilizado no lado da fibra de carbono devido ao fato de a fibra sintética de carbono apresentar uma maior resistência em relação à fibra natural de juta. A Figura 37 representa a configuração de sobreposição simples onde foi usado um espaçador de 0,2mm como meio de realizar o controle dimensional da espessura dos adesivos que foram adicionados. A Figura 38 apresenta a junta colada no molde com o substrato superior e inferior após aplicação do adesivo.



**Figura 37 - Configuração SJLs**



**Figura 38 – Representação da Junta colada no molde após a aplicação do adesivo BETAMATE 2096**

Após a finalização da montagem da junta, o molde foi inserido na prensa hidráulica de pratos quentes SL 20. Conforme as orientações do fabricante, o molde ficou durante 2 horas em uma temperatura de 60°C para finalização do processo de cura. Ao término do período de cura, o molde com a junta colada foi resfriado lentamente em temperatura ambiente. Posteriormente, a junta colada foi retirada do molde, conforme ilustra a Figura 39.



Figura 39 - Junta Colada após o processo de cura

### 3.6 ENSAIOS REALIZADOS

Em relação aos ensaios realizados, foi utilizada a Máquina de Ensaio Mecânicos de Parafusos INSOTRON® 5966, a qual está localizada no LADES/CEFET-RJ. Os ensaios de tração, flexão e juntas coladas foram realizados em temperatura ambiente.

#### 3.6.1 Ensaio de Tração

Conforme ilustra a Figura 40, foi utilizado um extensômetro para obter os dados de deformação real do corpo de prova. Esse ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM D 3039 [48] e foi utilizada uma célula de carga de 10kN com uma velocidade de 1mm/mfin.



Figura 40 - Ensaio de tração do substrato C2

### 3.6.2 Ensaio de Flexão

O ensaio de flexão em 3 pontos está ilustrado na Figura 41 e foi realizado conforme a norma ASTM D 7264. Foi utilizada uma célula de carga de 1kN e uma velocidade de 1m/min.



Figura 41 - Ensaio de flexão do substrato AC1



Em relação ao ensaio de flexão dos substratos assimétricos, como a fibra de carbono é uma fibra sintética que apresenta uma maior resistência à tração do que a fibra natural de juta, optou-se por colocar a camada de juta na parte superior, a qual está em contato direto com a célula de carga. Isso deve-se ao fato de que a parte superior do corpo de prova em um ensaio de flexão é a qual estará submetida a uma maior compressão e a parte inferior a um maior estado de tensão.

### 3.6.3 Ensaio de Impacto

Para a realização do ensaio de impacto, foi utilizada a máquina de impacto WPS 30 (Leipzig, Alemanha) que está localizada no laboratório LAMAT/CEFET-RJ. Para o projeto atual, foi utilizado o martelo de energia de 30 kgf e erro de 0,0075 kgf, Figura 42. Para a fabricação dos corpos de prova, foram utilizados corpos de provas de 80x13mm conforme a norma ASTM D 4812. Além disso, para os compósitos assimétricos, o lado de juta ficou em contato com o punção (compressão) enquanto o lado com carbono ficou sob tração (abaixo) devido às características de resistência superiores quando comparado à fibra de juta.



**Figura 42 - Máquina de impacto utilizada**

### 3.6.4 Ensaio de Tração de Juntas Coladas

O ensaio de juntas coladas foi realizado conforme a norma ASTM D 1002/5868 e em trabalhos recentemente realizados [29, 47, 49]. Utilizou-se uma célula de carga de 10kN com uma velocidade de 1mm/min. A Figura 43 apresenta a realização desse ensaio no laboratório.



**Figura 43 - Ensaio de Juntas coladas do substrato AC1**

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo será apresentado os resultados dos ensaios de tração, flexão, impacto e de juntas coladas para caracterização mecânica de todos os materiais fabricados. Além disso, será apresentado também a comparação com tratamento estatístico do percentual atingido das características em comparação com o substrato de juta pura e também uma comparação da força de ruptura de juntas coladas para os dois tipos aderentes utilizados nesse trabalho.

### 4.1 ENSAIO DE TRAÇÃO

Posteriormente aos ensaios de tração, os dados provenientes do mesmo foram tratados e modelados em um gráfico de tensão pelo deslocamento para cada uma das sequências de empilhamento. Os resultados podem ser vistos na Figura 44.

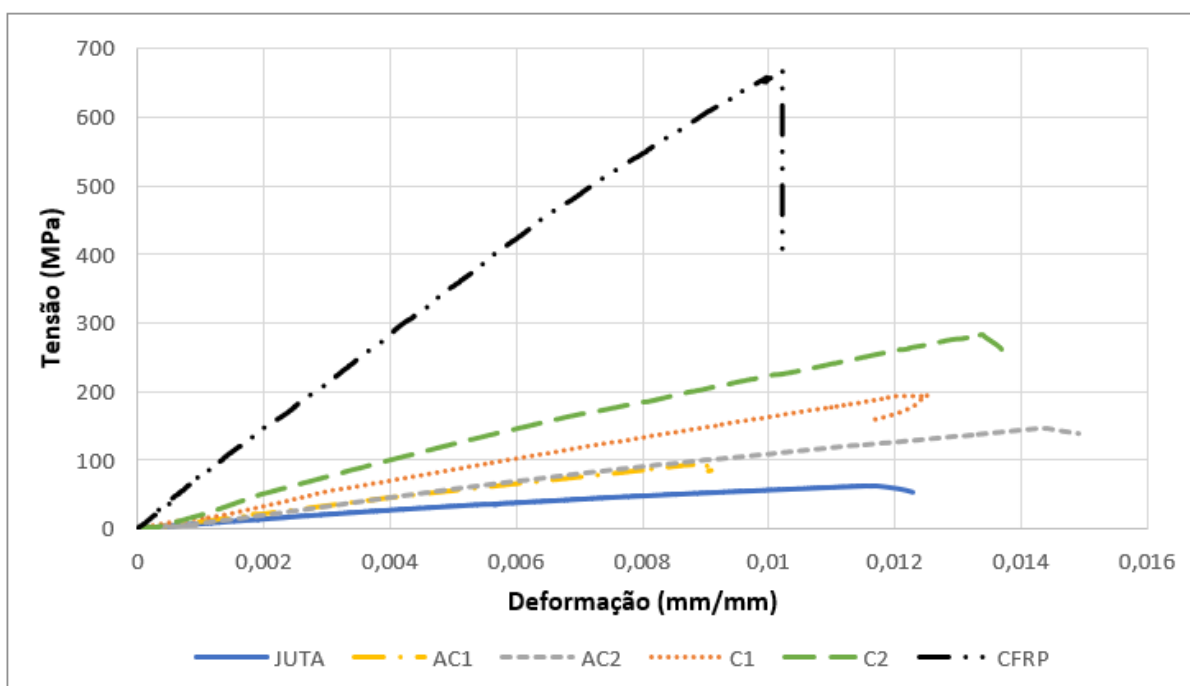


Figura 44 - Curvas Tensão-Deformação representativas como função da arquitetura

Além disso, para efeito comparativo foi realizado o tratamento estatístico para a resistência à tração e módulo de elasticidade dos ensaios de tração. Esses resultados podem ser vistos na Figura 45 e Figura 46.

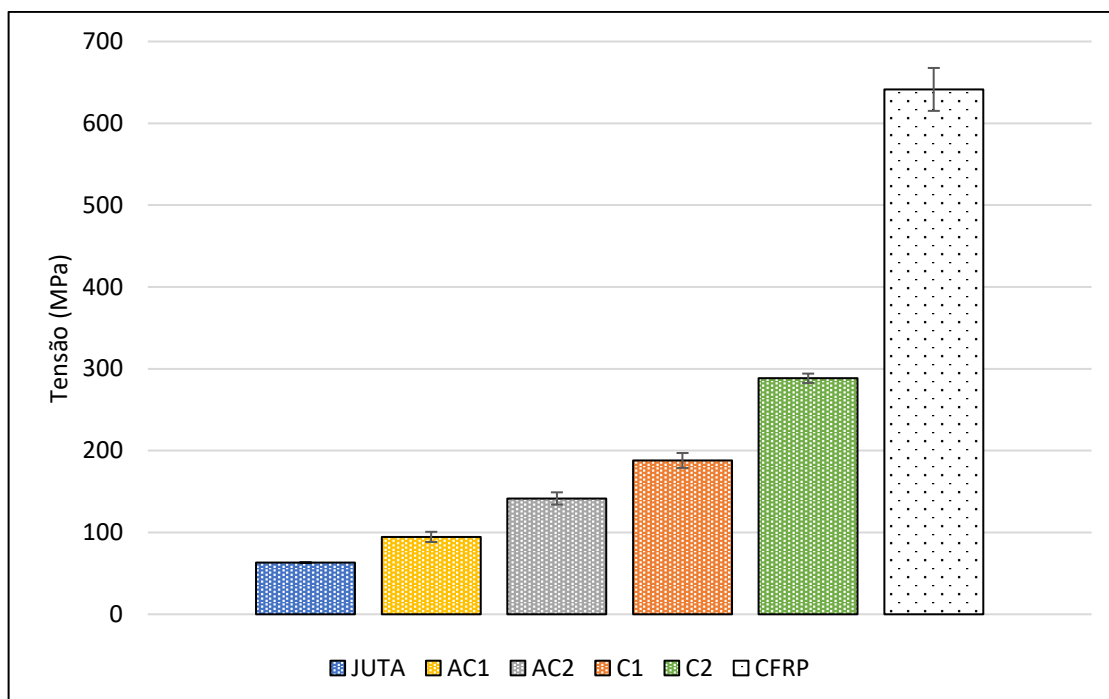


Figura 45 – Tensão média com desvio padrão como função da arquitetura

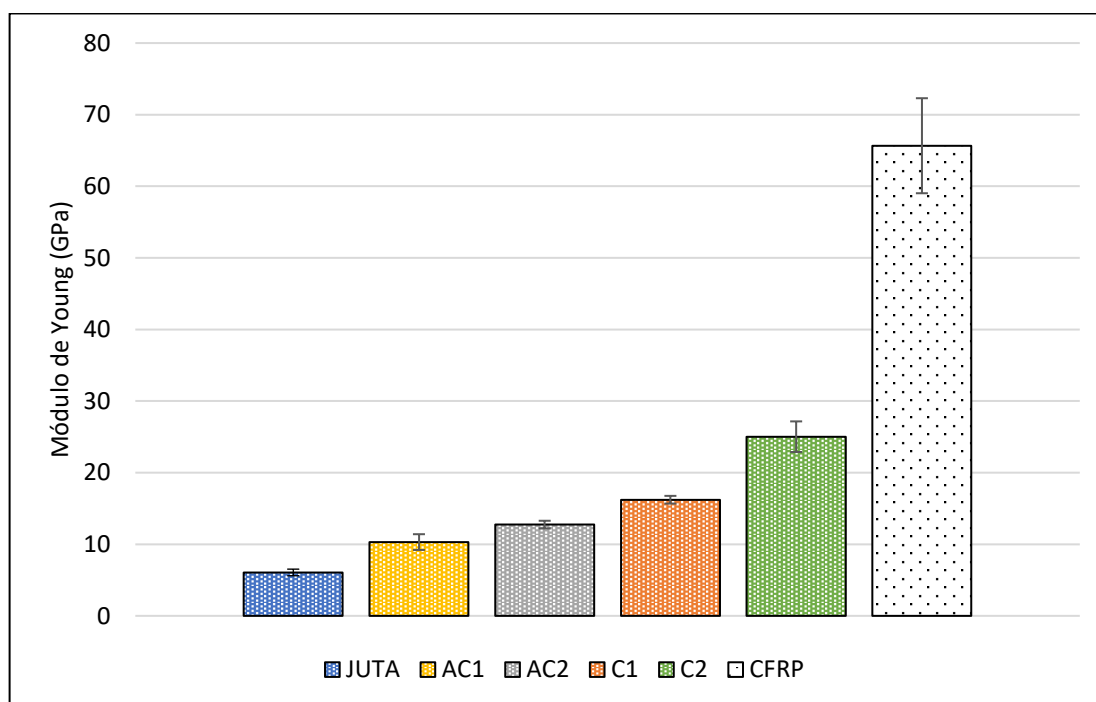


Figura 46 - Módulo de elasticidade com desvio padrão como função da arquitetura

A tensão de ruptura e o módulo de Young em função dos substratos utilizados podem ser vistos na Tabela 11.

**Tabela 11 - Resultados do Substratos após Ensaio de Tração**

<b>Substrato</b>	<b>Tensão (MPa)</b>	<b>Módulo de Young (GPa)</b>	<b>Deformação (mm/mm)</b>
<b>JUTA</b>	63,13 ± 0,79	6,07 ± 0,46	0,012 ± 0,001
<b>AC1</b>	94,56 ± 6,24	10,31 ± 1,10	0,010 ± 0,001
<b>AC2</b>	141,56 ± 7,49	12,75 ± 0,54	0,016 ± 0,006
<b>C1</b>	188,01 ± 9,10	16,22 ± 0,54	0,012 ± 0,001
<b>C2</b>	288,43 ± 5,70	25,02 ± 2,14	0,012 ± 0,003
<b>CFRP</b>	641,44 ± 26,22	65,66 ± 6,64	0,011 ± 0,002

#### 4.1.1 Efeito da Hibridização

Através dos resultados obtidos no ensaio de tração, é possível inferir algumas informações importantes sobre os substratos analisados. Conforme o esperado, a Figura 45 demonstra o efeito da hibridização e do número de camadas sintéticas de carbono nas propriedades de tração para cada substrato. É possível perceber uma tendência de aumento quase-linear da resistência a tração e do Módulo de Elasticidade quando se compara os compósitos híbridos com o de JUTA.

A partir da Tabela 11 é possível concluir alguns resultados. Os compósitos híbridos assimétricos AC1 e AC2 apresentaram um aumento na tensão de ruptura de cerca de 50% e 124% respectivamente quando comparados com o de JUTA. Já os híbridos simétricos, o C1 apresentou um aumento de cerca de 198% enquanto o C2 apresentou a melhor variação na tensão de escoamento, sendo cerca de 357% quando comparada com a JUTA.

O Módulo de Young apresenta uma tendência similar de aumento conforme aumenta-se o número de camadas sintéticas de carbono, apresentando valores percentuais de 70% e 110% superior ao da fibra de JUTA para os assimétricos AC1 e AC2 respectivamente e para os simétricos, atingindo uma variação superior de 167% e 313% para o C1 e C2 respectivamente.

Essa variação deve-se ao fato de que, conforme aumenta-se o número de camadas sintéticas no substrato, conseqüentemente há um aumento na rigidez dos substratos por causa das características de alta resistência da fibra de carbono conforme mencionado no tópico 2.3 e da redução do efeito de natureza quebradiça da fibra de juta [30, 50].

Além disso, por causa da falha frágil do núcleo de juta, os valores de deformação encontrados foram muito próximos e não apresentaram uma variação significativa.

#### 4.1.2 Efeito da Simetria

Os resultados apresentados na tensão não apenas mostraram o efeito positivo do aumento do número de camadas de carbono como também da sua organização. O substrato C1 que é composto de uma camada de fibra de carbono em cada lado teve um ganho de aproximadamente 99% na resistência comparado com o assimétrico AC1. Já o substrato C2 composto por duas camadas de fibra de carbono em cada lado do substrato atingiu um ganho de aproximadamente 104% comparado com o AC2 demonstrando uma tendência de aumento quanto mais se adicionado estas camadas de carbono de maneira simétrica.

Esta mesma tendência ocorreu no Módulo de Young. O substrato C1 obteve um ganho de aproximadamente de 57% sobre o AC1 enquanto o C2 alcançou 96% de ganho em relação ao AC2.

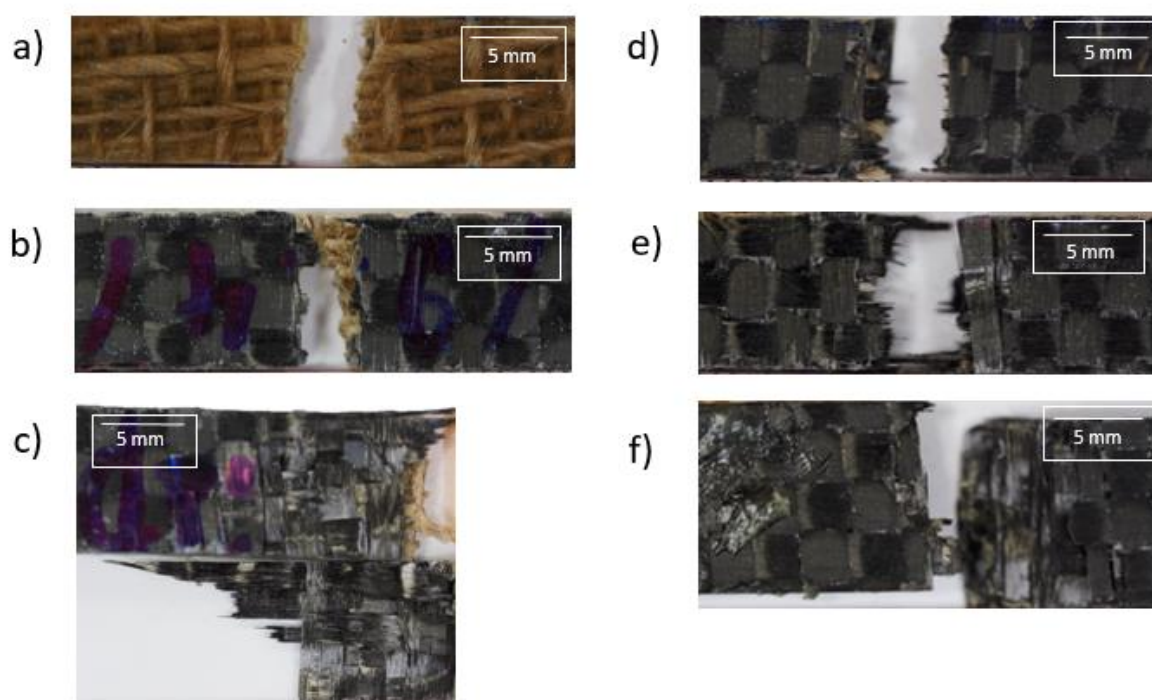
Essa variação deve-se ao fato de que os substratos que possuem uma sequência de empilhamento assimétrica tendem como resultado uma má distribuição da tensão, conseqüentemente falham ao serem submetidos às cargas menores. Diferentemente, um compósito organizado simetricamente consegue atingir valores maiores de tensão de ruptura mesmo possuindo as mesmas características de fabricação, por causa de uma melhor distribuição de tensão no substrato.

#### 4.1.3 Mecanismo de Falha

Os mecanismos de falha do ensaio de tração estão representados na Figura 47. Como pode ser visto nas imagens dos substratos, a Figura 48a representando a JUTA por ter propriedades inferiores ao carbono e ser uma fibra natural, apresentou predominantemente uma falha frágil.

A partir da Figura 48b à Figura 48e, foi possível realizar a análise dos espécimes híbridos revelou que a falha predominante ocorreu de maneira frágil e catastrófica no núcleo composto por juta, composto por cinco camadas. Essa falha é

coerente com as propriedades mecânicas inferiores esperadas das fibras de juta em comparação com as fibras de carbono. A falha frágil do núcleo resultou em uma rápida transferência de carga para o envelope composto por fibras sintéticas. Conseqüentemente, isso levou a falhas parciais ou completas e delaminação das camadas superiores e inferiores de carbono. Já o CFRP que está representado na Figura 48f apresentou um modo de falha predominantemente frágil, isto também é observado no comportamento do ensaio do corpo de prova conforme ilustrado na Figura 44 .



**Figura 47 - Modos de falha representativos do ensaio de tração: a) Juta, b) AC1, c) AC2, d) C1, e) C2, f) CFRP**

## 4.2 ENSAIO DE FLEXÃO

Após os ensaios de flexão, foi realizado o tratamento dos dados para cada uma das sequências de empilhamento. Os resultados podem ser vistos na Figura 48. Além disso, também realizado o cálculo do desvio padrão para a resistência à flexão e módulo de flexão dos ensaios de flexão. Esses resultados podem ser vistos na Figura 49 e Figura 50.

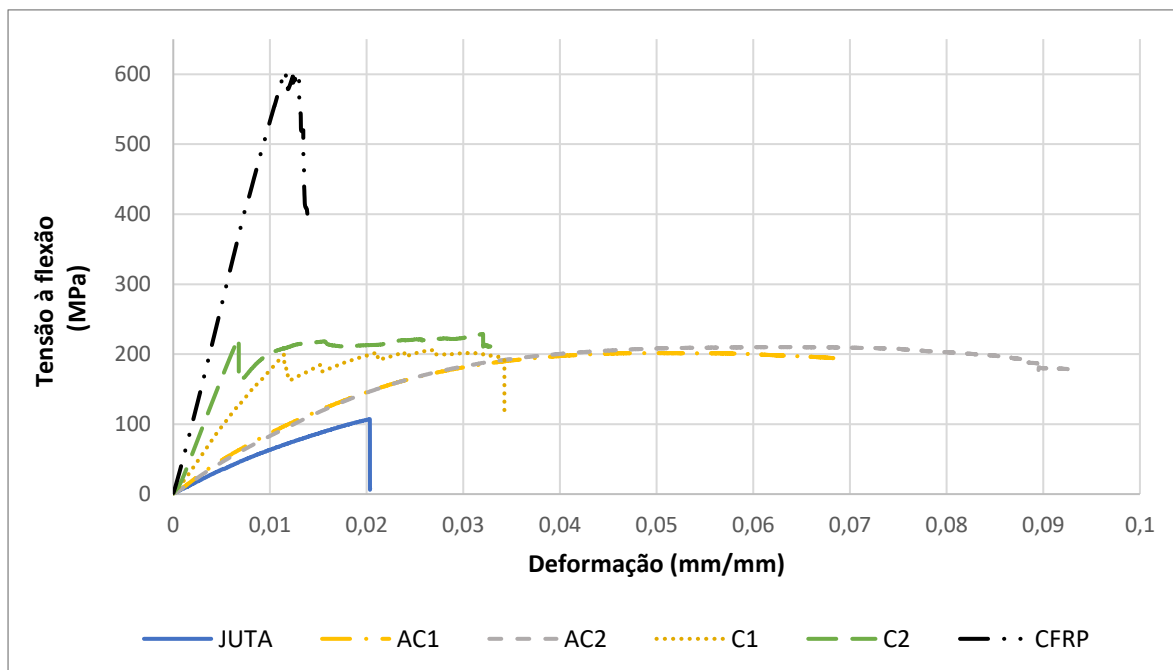


Figura 48 - Curvas Tensão à flexão-deformação representativas como função da arquitetura

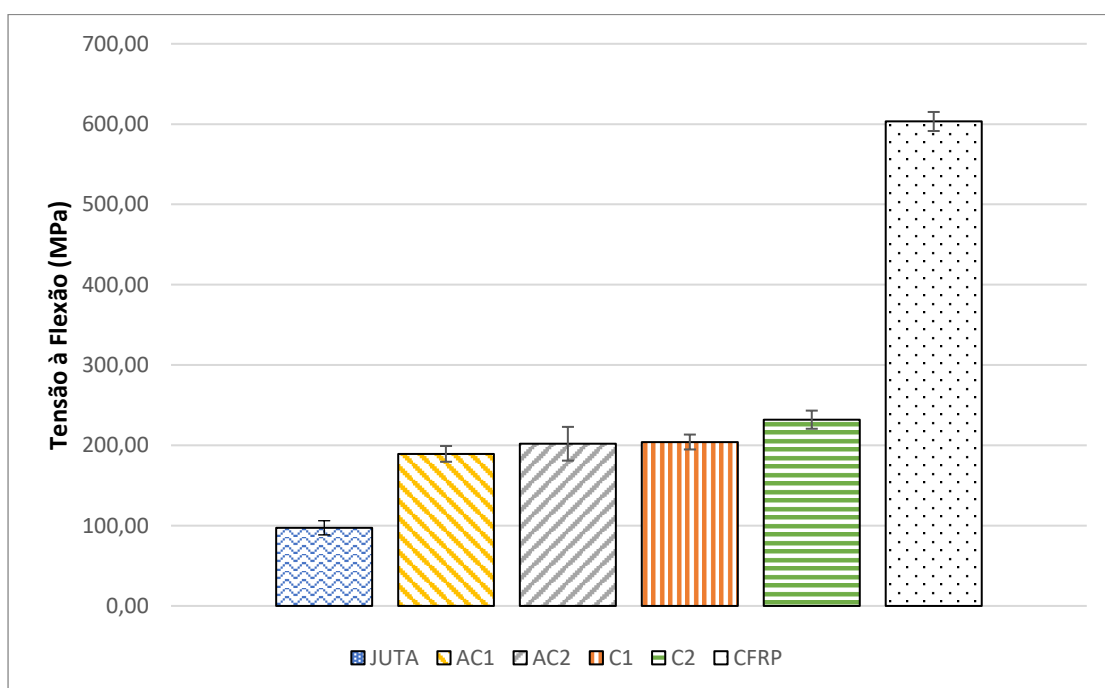


Figura 49 - Tensão média com desvio padrão como função da arquitetura



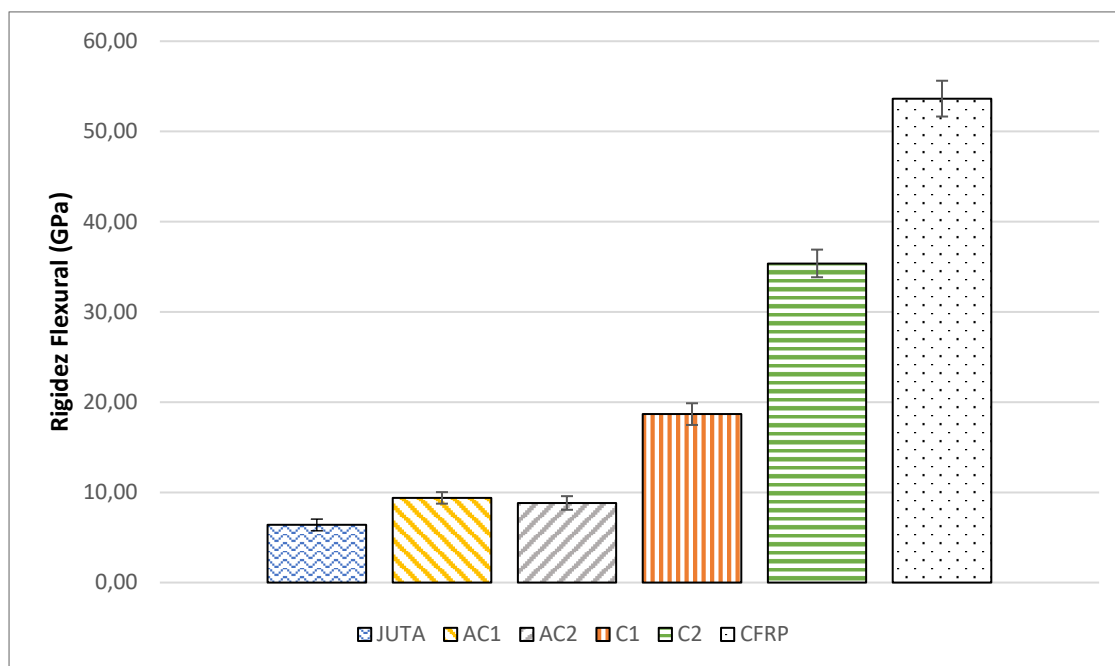


Figura 50 - Rigidez Flexural com desvio padrão como função da arquitetura

A tensão de ruptura à flexão e o módulo de elasticidade em flexão por substrato podem ser vistos na Tabela 12.

Tabela 12 – Resultados dos Substratos após ensaio de Flexão

Substrato	Tensão à Flexão (MPa)	Resistência à Flexão (GPa)	Alongamento Flexural (%)
JUTA	97,27 ± 8,83	6,39 ± 0,65	2,20
AC1	189,34 ± 9,81	9,39 ± 0,64	6,41
AC2	201,96 ± 21,01	8,82 ± 0,76	9,04
C1	204,12 ± 9,26	18,67 ± 1,20	3,15
C2	231,92 ± 11,32	35,37 ± 1,53	3,70
CFRP	603,25 ± 11,32	53,64 ± 1,98	1,75

#### 4.2.1 Efeito da Hibridização

Através da análise dos resultados do ensaio de flexão, verificou-se uma progressão quase constante no aumento da resistência à flexão ao comparar os casos híbridos com a JUTA. A título de ilustração, para o AC1 que apresenta uma camada de carbono, constatou-se um aumento de 95% na tensão à flexão em comparação com o substrato de JUTA. Para os substratos AC2 e C1, os quais apresentam duas camadas de carbono, apresentaram valores médios próximos de cerca de 108% e

110% de variação percentual superior à JUTA. O destaque foi para o substrato C2 que apresentou um valor médio de 138% superior ao de JUTA e semelhante ao que foi observado por Sujon et al. (2020), em que o maior valor de resistência a flexão encontrado foi para o compósito híbrido de juta com 2 camadas de carbono em cada lado externo na sequência de empilhamento.

Em relação ao Módulo de Elasticidade em Flexão, os resultados dos substratos híbridos apresentaram uma tendência linear de aumento no valor médio em função do número de camadas de carbono de cada substrato e da simetria exceto para o substrato AC1 e AC2, nos quais não foi constatado variação estatisticamente significativa entre os casos.

Em relação aos substratos simétricos, percebe-se uma grande influência do número de camadas de carbono, o C1 apresentou um valor médio de cerca de 192% de variação superior ao da Juta e o C2 sendo a maior, apresentou uma variação de cerca de 454%.

#### 4.2.2 Efeito da Simetria

Quando é analisado o resultado do ganho na resistência à flexão, é observado o mesmo comportamento apresentado nos ensaios de tração, porém não de forma tão acentuada como ocorreu no caso anterior. O substrato C1 obteve um aumento de aproximadamente 8% comparado com o AC1. Enquanto o substrato C2 obteve um aumento de 15% de resistência comparado com o AC2. Dessa forma, nota-se que conforme há o aumento do número de camadas de carbono no corpo de prova de maneira organizada e simétrica, há um ganho na sua propriedade.

Já no módulo de elasticidade, percebe-se que o impacto da organização das camadas sobre essa característica é mais enfatizado. O substrato C1 obteve um ganho 99% maior que o AC1. Já o substrato C2 atingiu o seu módulo de elasticidade 301% maior que o AC2. Mais uma vez, o ensaio realizado nesses corpos de prova demonstra uma ascensão das propriedades quando fabricado de maneira simétrica, correspondendo a uma melhor distribuição das tensões e as qualidades provindas do carbono.

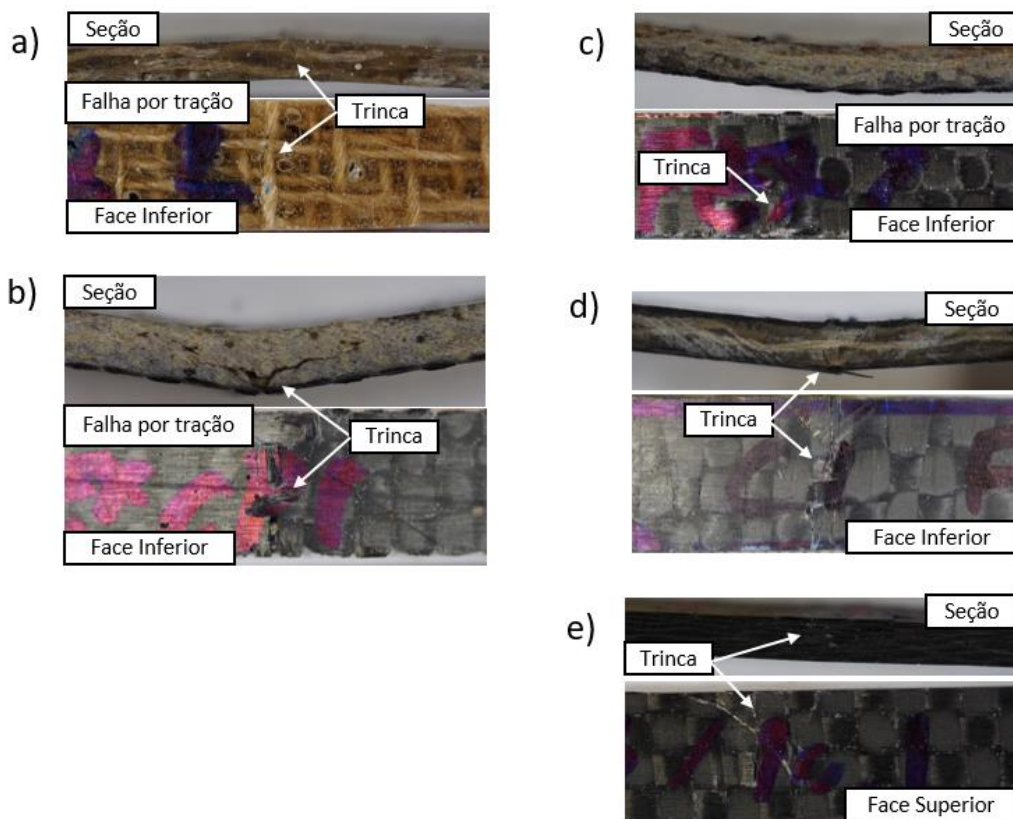
Além disso, outro fato que é importante mencionar é o alongamento flexural para os compósitos assimétricos, em que através da Figura 48, que representa a curva

tensão deformação do ensaio em flexão, e dos valores percentuais de alongamento na Tabela 12, os maiores valores encontrados foram para os substratos assimétricos AC1 e AC2 que atingiram um alongamento de 6,41% e 9,41%. O mais próximo dos assimétricos foi o C2 que atingiu um alongamento de 3,7%. Isso ocorre por causa do posicionamento do compósito híbrido no ensaio de flexão em 3 pontos. As camadas de compósito sintético de carbono foram posicionadas na parte inferior e as camadas de fibra natural de juta foram posicionadas da camada superior. Conforme mencionado no tópico 4.1, durante o ensaio de tração a parte superior do corpo de prova vai estar em compressão e a parte inferior em tração. Como a fibra de carbono apresenta altos valores de resistência a tração e rigidez em comparação com à juta como demonstrado no tópico 2.3, optou-se por essa sequência de empilhamento.

#### 4.2.3 Mecanismo de Falha

As fotos representativas do modo de falha dos substratos no ensaio de flexão podem ser visualizadas na Figura 51. O substrato de JUTA e o híbrido AC1 representados na Figura 51a e Figura 51b respectivamente apresentam um tipo de falha mista com falha por tração (parte inferior) com a formação de uma trinca interlaminar visível ao longo da seção. Destaca-se que para o caso do AC1 a falha ocorreu na interface sintética assimétrica por tração (parte inferior). Induzindo primeiramente a falha por tração na camada de carbono primeiramente do que por compressão na camada de juta (superior).

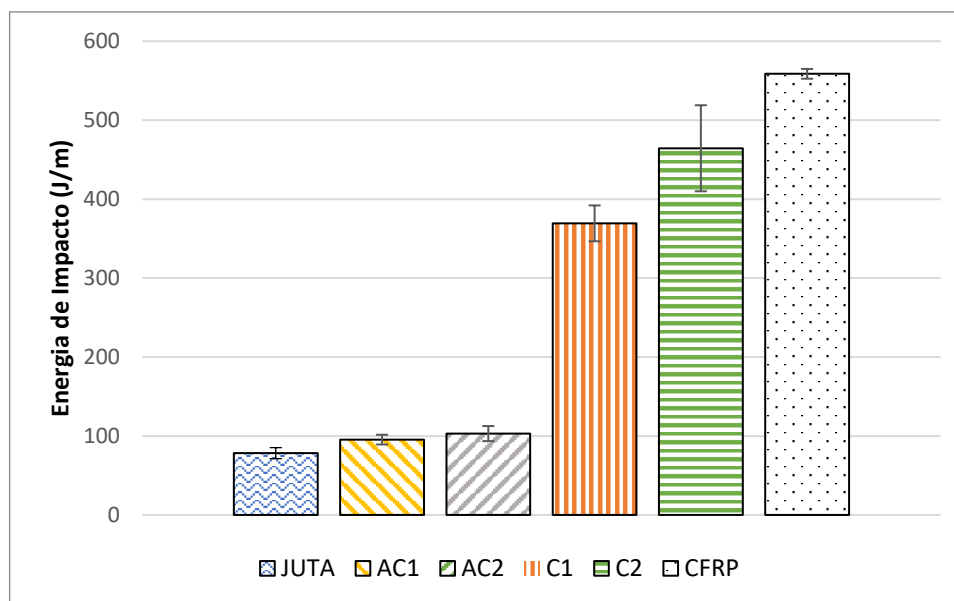
Em relação aos substratos AC2, C1 e C2, representados na Figura 51c e Figura 51d, o modo de falha dominante visível pela análise dos corpos de prova foi a falha trativa na camada inferior, sendo que entre os substratos simétricos C1 e C2 a diferença no modo de falha pouco significativa. Já no substrato CFRP, representado na Figura 51e o modo de falha dominante visível pela análise foi a falha compressiva na camada superior. Percebe-se através dessa análise a influência do número de camadas de carbono no modo de falha, em que se torna determinante para a falha na interface sintética que envolve o núcleo. Isso deve-se ao fato de que a resistência à tração do CFRP é geralmente maior do que a resistência à compressão.



**Figura 51 - Modos de falha representativos do ensaio de flexão: a) Juta, b) AC1, c) AC2, d) C1 e C2, e) CFRP**

### 4.3 RESULTADOS DO ENSAIO DE IMPACTO

Após a realização do ensaio de impacto, os dados foram tratados em função da energia de impacto média para cada substrato conforme ilustra a Figura 52.



**Figura 52 - Energia de Impacto Média para cada substrato**

A variação da energia de impacto por tipo de substrato está apresentada na Tabela 13.

**Tabela 13 - Energia de impacto por substrato**

Substrato	Energia de Impacto (J/m)
JUTA	78,26 ± 6,97
AC1	95,38 ± 6,17
AC2	103,02 ± 9,56
C1	369,32 ± 22,70
C2	464,42 ± 54,48
CFRP	558,71 ± 6,19

#### 4.3.1 Efeito da Hibridização

Em relação aos resultados da energia de impacto média percebe-se pouca diferença entre os substratos de juta e os substratos assimétricos, atingido uma variação percentual de cerca de 22% a 32% da energia de impacto quando comparada a JUTA pura. Já os simétricos atingiram uma variação de 372% e de 493% através da hibridização. Conforme esperado o CFRP apresenta os maiores valores de impacto por causa da natureza de alta resistência da fibra sintética de carbono, apresentado uma energia de impacto média de 558,71 J/m.

O método de hibridização também se mostrou eficaz para os resultados do ensaio de impacto. Em relação aos substratos simétricos dos compósitos híbridos,

fica evidente na Tabela 13 a evolução do percentual da energia de impacto atingida por eles em comparação com a JUTA pura e com os compósitos assimétricos atingido cerca de 66% e 83% da energia de impacto do CFRP para o C1 e C2 respectivamente. Isso vai ao encontro da literatura, em que através da hibridização é possível melhorar substancialmente a energia de fratura do compósito [51-53].

#### 4.3.2 Efeito da Simetria

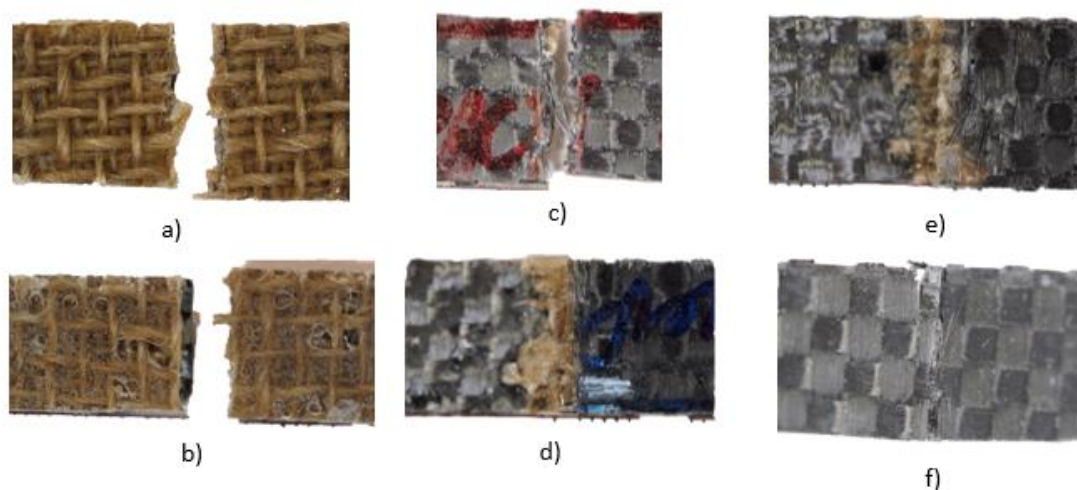
Através da análise dos resultados, percebe-se uma alta variação percentual entre os assimétricos e simétricos. O C1 atingiu uma variação positiva de 287% em relação ao AC1 e o C2 de 351% em relação ao AC2. Isso ocorre pois para o compósito assimétrico, o posicionamento das fibras sintéticas contribui para uma maior resistência ao impacto e a capacidade de absorção de energia, mas por outro lado as fibras naturais posicionadas também posicionadas na parte externa contribuem para uma menor energia de impacto por causa comportamento frágil e quebradiço, favorecendo a propagação de trincas.

#### 4.3.3 Mecanismo de falha

As fotografias do modo de falha após o ensaio de impacto são ilustradas na Figura 53. Os substratos de JUTA e AC1 representados na Figura 53a e Figura 53b demonstraram um modo de falha frágil catastrófico, com a ruptura completa do corpo de prova durante o ensaio.

Por outro lado, os compósitos híbridos AC2 e os compósitos simétricos C1 e C2 representados na Figura 53c, Figura 53d e Figura 53e apresentaram falha no corpo de prova, acompanhada de delaminação no lado sintético, indicando a formação de uma trinca frágil próxima à interface natural/sintética. Conforme o esperado, observa-se que o aumento no número de camadas de carbono resulta em uma maior resistência, levando a uma redução na área de impacto devido à elevada resistência da fibra sintética.

Já o CFRP representado na Figura 53f exibiu uma pequena zona de fratura decorrente do ensaio de impacto, a qual foi significativamente menor em comparação com os substratos híbridos.



**Figura 53 - Modos de falha representativos do ensaio de impacto: a) Juta, b) AC1, c) AC2, d) C1, e) C2, f) CFRP**

#### 4.4 RESULTADOS DO ENSAIO DE JUNTAS ADESIVAS

Após os ensaios de juntas adesivas, foi realizado o tratamento dos dados para cada uma das sequências de empilhamento com o adesivo estrutural BETAMATE 2096 e para o AR345. Os resultados podem ser vistos na Figura 54 e Figura 55. Posteriormente, foi realizado o cálculo do desvio padrão para o carregamento máximo de cada um dos substratos. Esses resultados podem ser vistos na Figura 56 e Figura 57.

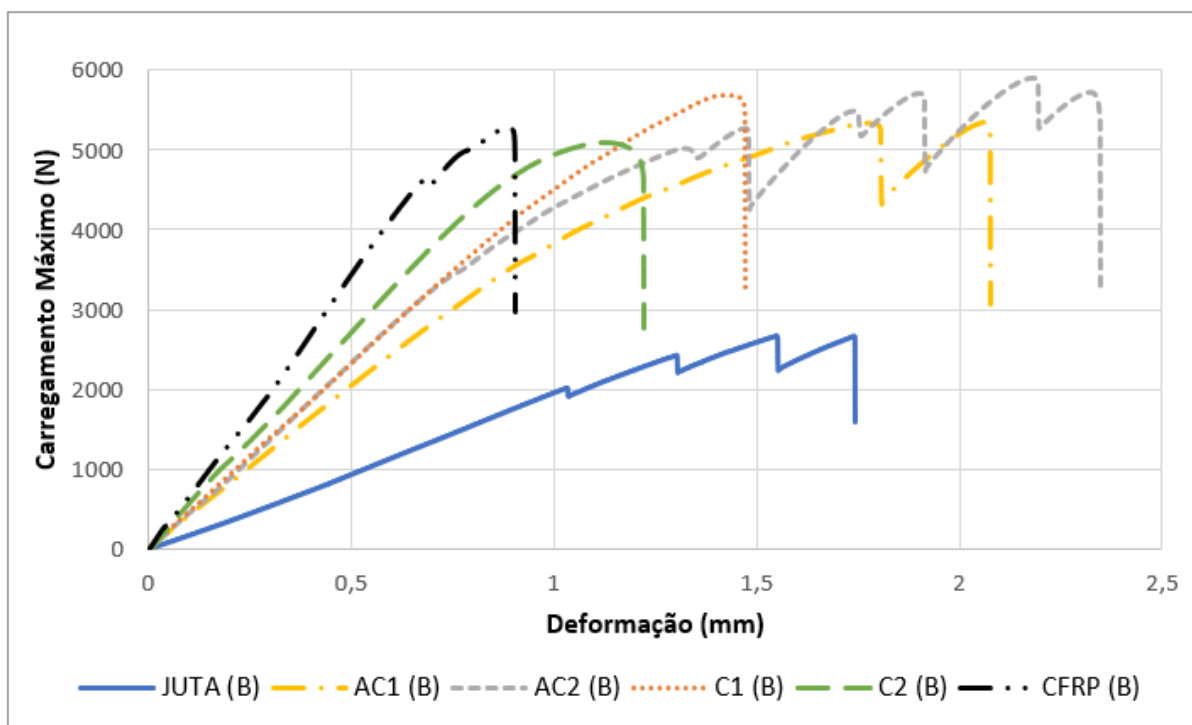


Figura 54 - Curva Força-Deslocamento do ensaio de juntas adesivas (BETAMATE 2096)

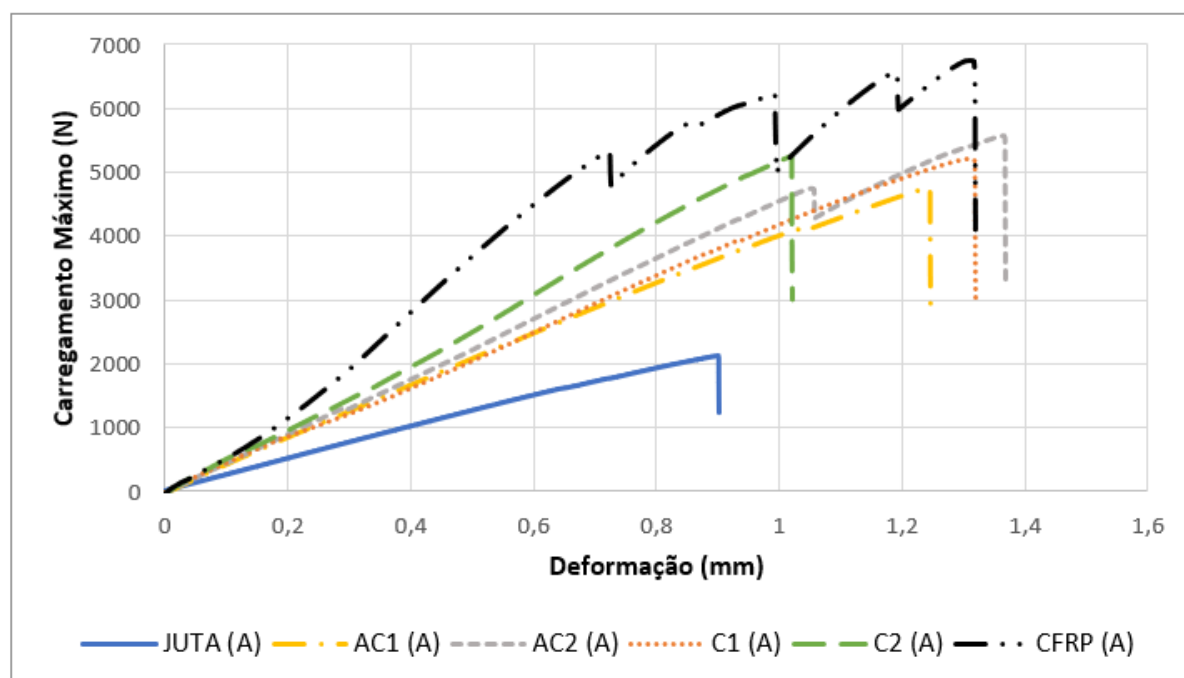


Figura 55 - Curva Força-Deslocamento do ensaio de juntas adesivas (AR345)

Através da comparação dos gráficos das curvas força-deslocamento representadas na Figura 54 e Figura 55, fica evidente a natureza dúctil do adesivo BETAMATE em comparação com a natureza rígida do adesivo AR345. No primeiro caso, os substratos que utilizaram o BETAMATE em geral apresentaram uma



deformação maior antes da ruptura em comparação com os corpos de prova com AR345.

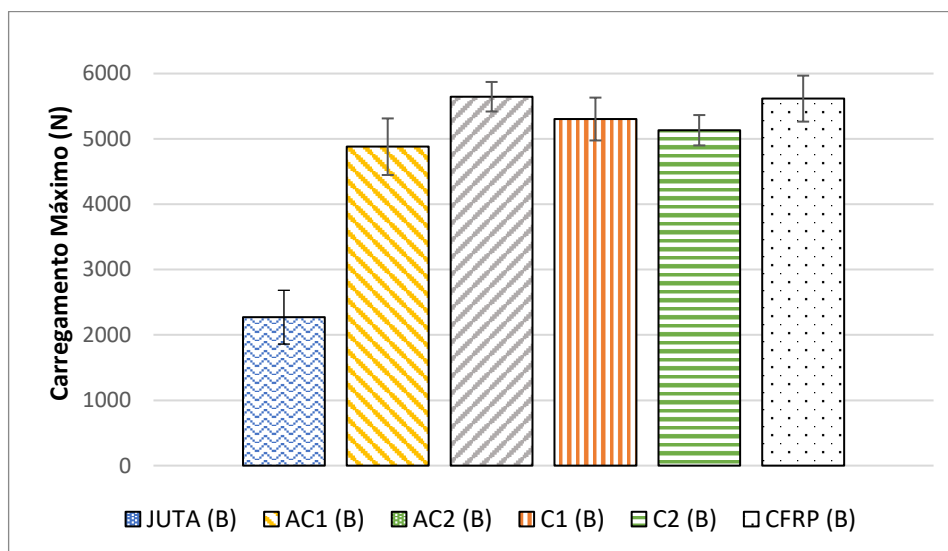


Figura 56 - Desvio padrão do da carga máxima do ensaio de juntas adesivas (BETAMATE 2096)

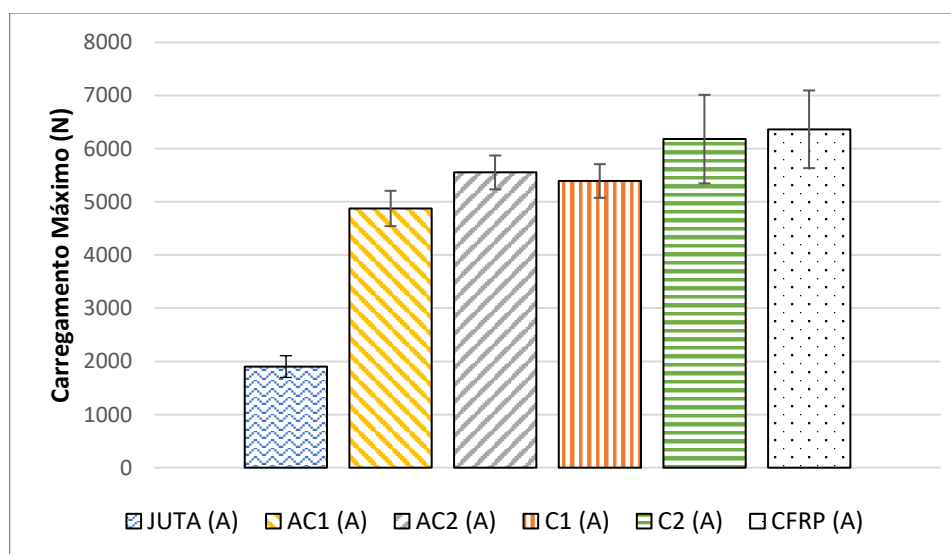


Figura 57 - Desvio padrão do da carga máxima do ensaio de juntas adesivas (AR345)

A variação da força de ruptura por adesivo e por tipo de substrato pode ser visualizada na Tabela 14 e Tabela 15.

Tabela 14 - Força de Ruptura e deslocamento da junta com AR345

Junta	AR345
-------	-------

	<b>Força de Ruptura (kN)</b>	<b>Deslocamento (mm)</b>
<b>JUTA</b>	1,90 ± 0,20	0,87 ± 0,03
<b>AC1</b>	4,88 ± 0,33	1,29 ± 0,12
<b>AC2</b>	5,55 ± 0,32	1,59 ± 0,34
<b>C1</b>	5,39 ± 0,32	1,38 ± 0,12
<b>C2</b>	6,18 ± 0,83	1,37 ± 0,35
<b>CFRP</b>	6,37 ± 0,73	1,21 ± 0,30

**Tabela 15 - Força de Ruptura e deslocamento da junta com BETAMATE 2096**

<b>Junta</b>	<b>BETAMATE 2096</b>	
	<b>Força de Ruptura (kN)</b>	<b>Deslocamento (mm)</b>
<b>JUTA</b>	2,27 ± 0,41	1,56 ± 0,25
<b>AC1</b>	4,88 ± 0,43	1,64 ± 0,38
<b>AC2</b>	5,65 ± 0,23	2,04 ± 0,29
<b>C1</b>	5,30 ± 0,33	2,32 ± 1,04
<b>C2</b>	5,13 ± 0,23	1,18 ± 0,04
<b>CFRP</b>	5,62 ± 0,35	1,25 ± 0,30

Conforme esperado, a junta adesiva de juta pura apresentou os menores valores de força de ruptura quando comparada a outros substratos. Através da análise dos resultados apresentados na Figura 56 e Figura 57, percebe-se o comportamento característico similar do valor da resistência à tração das juntas ao se comparar casos híbridos com a utilização de JUTA e com valores médios de carga de ruptura muito próximos ao do CFRP.

#### 4.4.1 Adesivo AR345

##### 4.4.1.1 Efeito da hibridização

As juntas do AC1 com o adesivo rígido AR345 apresentaram uma variação positiva de 156% do carregamento de ruptura em relação à JUTA e de 192% observada para o AC2, apresentando uma alta variação com a adição das camadas sintéticas.

Já para o C1, ele apresentou uma variação positiva de 183%, sendo um valor um pouco menor do que o do AC2, isso deve-se ao fato da simetria da junta em que

apesar de ambos apresentarem duas camadas sintéticas de carbono, a organização do AC2 foi favorável entre esses dois e será abordada com mais detalhes no tópico 4.4.1.2.

O melhor resultado foi o do C2, o qual apresentou uma variação positiva da hibridização de cerca de 225% comparada a JUTA e atingindo uma variação de aproximadamente 3% caso comparado ao CFRP.

A melhora na eficiência das juntas através da hibridização da fibra de juta com a fibra de carbono está relacionada com os resultados encontrados na literatura, em que a técnica de hibridização apresenta resultados muito positivos na melhora da performance de juntas adesivas de compósitos naturais [54].

Consequentemente, indo ao encontro de Banea, M., et al. (2018) através da performance atingida do C2 em comparação com o CFRP, fica evidente o fato de que um aumento de espessura através de um aderente puramente sintético de carbono não apresenta resultados muito significativos em comparação com um híbrido de juta com fibras sintéticas, pois a performance atingida pelo C2 apresentou pouca diferença. Dessa forma, a redução de massa e custo através da hibridização torna-se uma excelente opção sem perder a performance da junta caso comparada ao CFRP.

#### 4.4.1.2 Efeito da Simetria

Foi possível notar, a partir do uso do adesivo AR345 uma variação positiva no carregamento, devida à boa aderência que as camadas do substrato tiveram com o adesivo. O substrato C1 alcançou um aumento de 10,5% na resistência comparado com o substrato assimétrico AC1. Já o substrato C2 apresentou um ganho de 11,35% em relação ao AC2, o que demonstra que o efeito da distribuição de tensão uniforme ao longo do corpo de prova.

Um fato que chama atenção neste ensaio é que, o C2, composto por 4 camadas de carbono apresentou uma resistência à força de ruptura equivalente a 97% do valor do resultado do substrato composto por apenas fibra de carbono composta por 11 camadas. Esse valor se aproxima ainda mais quando se considera o desvio padrão. Dessa forma, vale ressaltar um ótimo comportamento de um compósito híbrido que atingiu o mesmo patamar que uma fibra 100% sintética. Uma vantagem

que numa aplicação, o híbrido seria a melhor escolha, principalmente pelo seu custo comparado com o CFRP.

#### 4.4.2 Adesivo BETAMATE 2096

##### 4.4.2.1 Efeito da Hibridização

Semelhantemente aos resultados do AR345, a utilização do BETAMATE 2096 na hibridização das juntas adesivas apresentou bons resultados na melhoria da eficiência da junta.

Além disso, o BETAMATE 2096 é um adesivo de natureza de maior ductilidade em comparação com AR345. Conseqüentemente, por ser capaz de absorver com mais eficácia as tensões de pico nas bordas da área aderida, evita-se falhas prematura [55]. Fato que é visualizado através da Figura 54.

Por exemplo, o AC1 apresentou uma eficiência cerca de 115% superior a JUTA, enquanto o AC2 apresentou a melhor eficiência para os aderentes utilizando o BETAMATE 2096, sendo de cerca de 148% superior à JUTA.

Em relação ao C1 e C2, esses apresentaram uma variação positiva em comparação com a junta de cerca de 133% e 126% respectivamente.

Novamente, através da hibridização é possível atingir altos resultados de performance para a junta adesiva, atingindo valores muito próximos do CFRP tanto para os assimétricos como também para os simétricos.

##### 4.4.2.2 Efeito da Simetria

No caso da utilização do adesivo BETAMATE 2096, não ocorreram variações significativas ao se comparar o ganho da eficiência dos simétricos com os assimétricos. Os simétricos C1 e C2 atingiram uma variação percentual na tensão de ruptura de cerca de 8,6% e 9,2% quando comparados ao AC1 e AC2 respectivamente.

Não houve falhas adesivas em nenhum dos casos, indicando que todas as interfaces adesivo-aderente foram bem-sucedidas. Os padrões com pouca variação percentual significativa observados estão relacionados às propriedades mecânicas

dos materiais aderentes, como a rigidez flexural significativa durante a tendência de rotação da sobreposição, e também às propriedades do adesivo. Nesse sentido, a ductilidade do adesivo desempenha um papel fundamental na redistribuição das tensões, diminuindo a concentração de tensões localizadas que poderiam resultar em falhas de cisalhamento ou destacamento.

Comparando o melhor caso que foi obtido (AC2), houve uma melhora na eficiência equiparável em 100% em relação ao CFRP o que demonstra que casos com compósitos híbridos para este adesivo são capazes de atingir resultados tão bons quanto um compósito sintético como o CFRP. Considerando a relação custo-benefício, o caso AC2 apresenta-se como a opção mais indicada para aplicação, uma vez que alcançou resultados comparáveis.

#### 4.4.3 Efeito do Tipo do Adesivo

Nesse tópico será apresentada a comparação por substrato da influência de cada adesivo. A comparação do percentual entre os adesivos AR345 e o BETAMATE 2096 está apresentada na Tabela 16. Os substratos tiveram, de modo geral um ganho maior da resistência ao serem fabricados com o adesivo AR345 do que o BETAMATE. Isto pode ser verificado ao compararmos separadamente cada substrato com diferentes adesivos.

**Tabela 16 - Ganho do adesivo AR345 em relação ao BETAMATE 2096**

<b>Junta</b>	<b>Ganho do AR345 em relação ao BETAMATE 2096</b>
<b>JUTA</b>	-16,3%
<b>AC1</b>	-0,1%
<b>AC2</b>	-1,6%
<b>C1</b>	1,7%
<b>C2</b>	20,4%
<b>CFRP</b>	13,3%

Em relação aos resultados é importante destacar que o substrato de juta puro sofreu a falha no aderente para ambos os casos, conseqüentemente o adesivo não foi fator determinante. Além disso, o mesmo, como apresentado na Tabela 16 sofreu

uma variação negativa de 16%. Esse valor significativo é resultado do adesivo frágil criar concentradores de tensão nas bordas da sobreposição.

Entre os substratos AC1, AC2 e C1 percebe-se uma variação muito pequena no valor médio do carregamento de ruptura para cada adesivo. Já o C2 e o CFRP apresentaram valores médios superiores para o AR345 em comparação com o BETAMATE 2096 sendo de 20,4% e 13,3% respectivamente.

Sabe-se que o AR345 possui uma rigidez maior em comparação com o BETAMATE 2096. Dessa forma, essa característica pode permitir uma melhor transferência de carga entre as camadas do compósito e conseqüentemente proporcionar uma diminuição na interface da união [55]. Essa característica é intensificada pela adição de mais de uma camada de carbono no lado da união aderente e adesivo. Os casos AC1 e C1 apresentam somente uma camada de carbono na união, diferentemente do C2. Dessa forma, através da adição de uma camada de carbono na área adesiva, que apresenta elevada resistência em comparação à junta, a melhor transferência de carga entre as camadas ao lado da união adesivo é aderente é favorecida e com o aumento do número de camadas sintéticas.

Entretanto, os substratos AC2 e C2 apresentam duas camadas de carbono em contato a área adesiva e possuem resultados diferentes para os dois tipos de adesivo. A disparidade observada pode ser justificada pelas assimetrias presentes no compósito, nas quais a ausência de camadas de carbono em um dos lados externos resulta em uma distribuição desigual da carga durante a transferência de carga pela aplicação do adesivo. Essa assimetria compromete a eficiência da transferência de carga, resultando em um desempenho ligeiramente inferior quando comparado ao uso de um adesivo dúctil.

#### 4.4.4 Análise do Modo de Falha das Juntas Adesivas

Neste tópico será apresentado as fotografias dos modos de falhas para cada grupo das juntas adesivas. Conforme mencionado no tópico 2.8.5, as possíveis falhas nas juntas coladas de materiais compostos podem se manifestar de diferentes maneiras: no aderente, como a falha da fibra, a falha da fibra em camadas mais leves, a falha coesiva em camadas finas ou a falha por quebra do próprio aderente; na

interface entre o material de aderência e o adesivo, resultando em falha adesiva; ou ainda no interior da camada adesiva, caracterizando uma falha coesiva.

Através da análise dos modos de falha, percebe-se que somente a junta adesiva de JUTA apresentou a falha por delaminação no aderente para ambos adesivos, isso deve-se ao fato da natureza frágil da fibra de juta e está representada na Figura 58 e Figura 59. Torna-se claramente perceptível a remoção integral da camada substrato devido à progressão da fratura no espaço de aderência do material compósito do aderente. Isso significa que o substrato de JUTA possui uma capacidade reduzida de girar sua borda para compensar o aumento da tensão de descolamento resultante da carga excêntrica durante um teste de tração em juntas simples sobrepostas (SLJ).

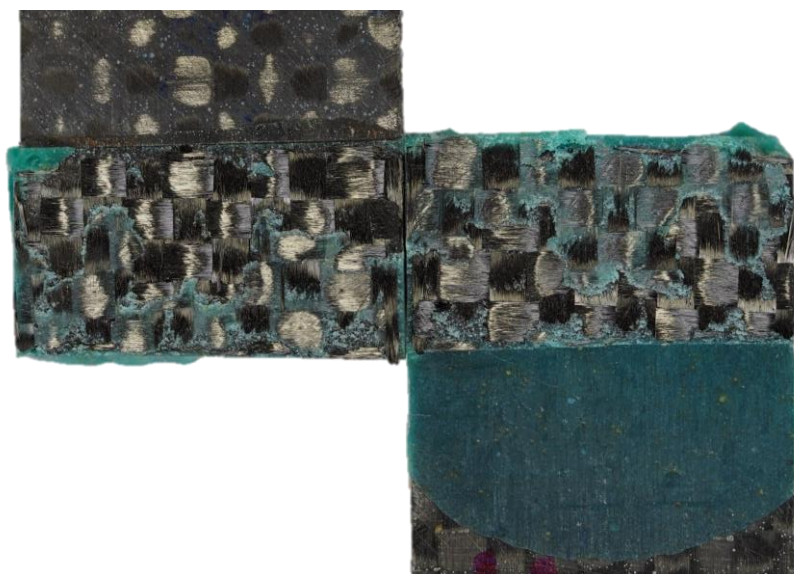


**Figura 58 - Superfície de ruptura das juntas colada de JUTA - BETAMATE 2096**



**Figura 59 - Superfície de ruptura das juntas colada de JUTA - AR345**

A Figura 60 e a Figura 61 apresentam o modo de falha representativo dos substratos AC1. Através da análise das imagens obtidas, é possível constatar que, para ambos os adesivos investigados, ocorreu um modo de falha mista na interface entre o adesivo e o aderente. Essa falha mista se caracteriza pela presença de áreas coesivas e de delaminação de camada fina (TLC), em que uma camada de adesivo de maior espessura é observada em um lado, enquanto no outro lado há uma camada de adesivo muito fina após a falha.



**Figura 60 - Superfície de ruptura das juntas colada do AC1 - BETAMATE 2096**



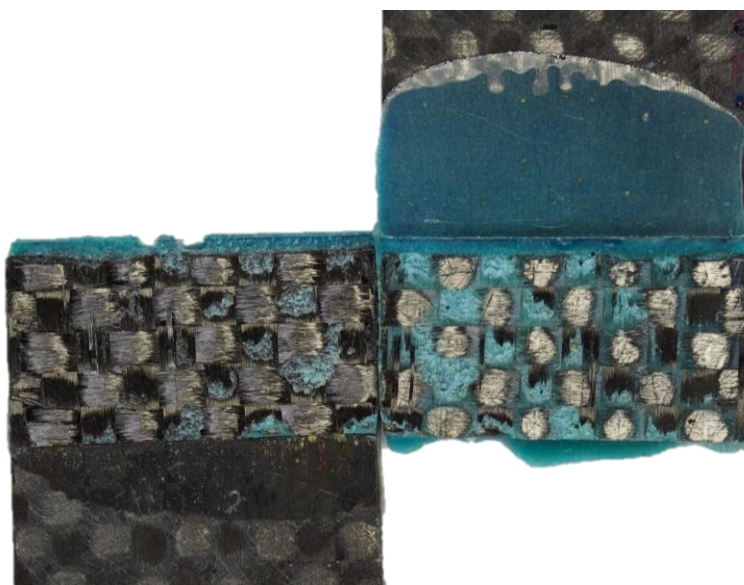
**Figura 61 - Superfície de ruptura das juntas colada do AC1 - AR345**

O substrato AC2 também apresenta falhas mistas, indo ao encontro do que foi mencionado no tópico 2.8.4, indicando que é comum ocorrer mais de um tipo de falha nos corpos de prova após a realização dos testes. [29]. Percebe-se uma falha mista LFT/TLC.

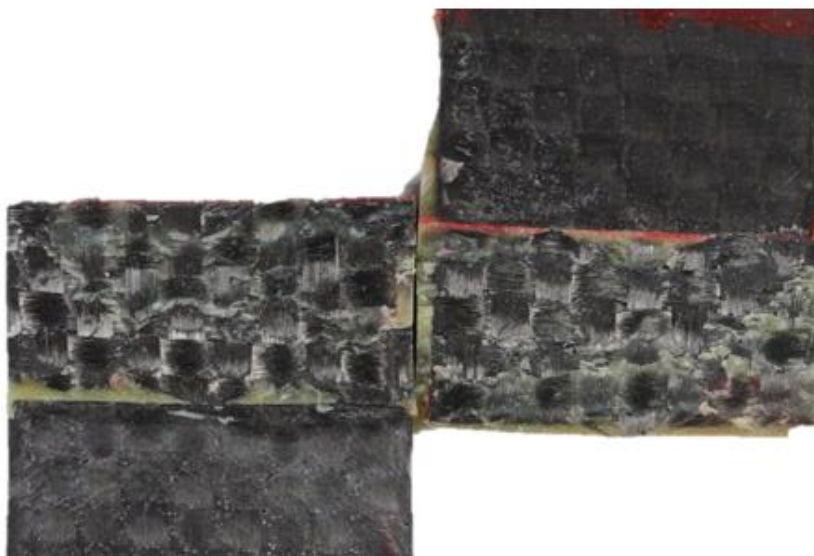


Para o adesivo BETAMATE 2096 que está representado na Figura 62, percebe-se uma predominância do modo de falha de delaminação de camada fina. Isso deve-se ao fato de que é possível observar uma discrepância na espessura do adesivo presente na junta adesiva. Enquanto um lado apresenta uma camada de adesivo de maior espessura, o outro lado exibe uma camada notavelmente mais fina.

Já com o adesivo AR345, o substrato AC2 representado na Figura 63 apresenta uma predominância do modo de falha por delaminação leve, por causa de uma camada de adesivo mais espessa em um lado e uma fina superfície de resina com poucas fibras removidas do outro lado.

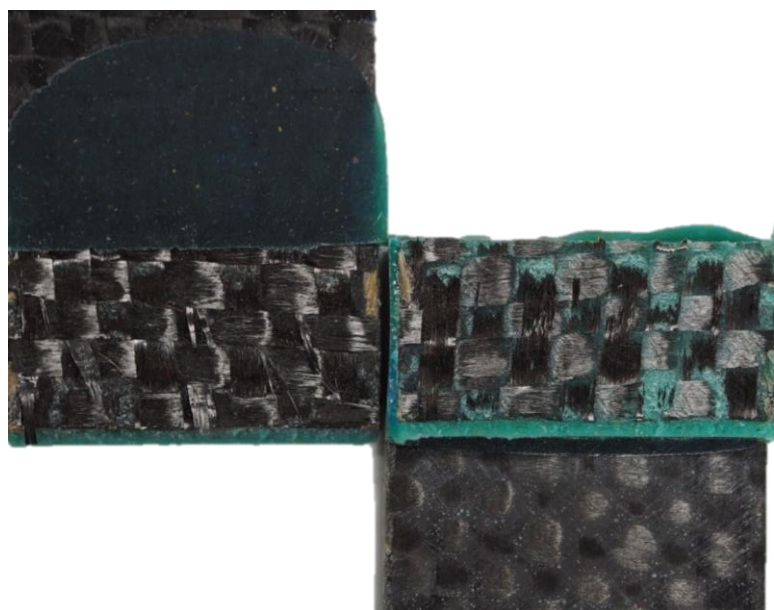


**Figura 62 - Superfície de ruptura das juntas colada do AC2 - BETAMATE 2096**



**Figura 63 - Superfície de ruptura das juntas colada do AC2 - AR345**

A Figura 64, Figura 65, Figura 66 e Figura 67 representam as fotografias dos corpos de prova após a falha dos substratos simétricos C1 e C2 para ambos adesivos. Todos os casos dos simétricos apresentaram um modo de falha mista de delaminação de camada fina com predominância de delaminação leve. Isso fica evidente através da observação uma camada de adesivo com maior espessura em um dos lados, enquanto no outro lado se evidencia uma superfície de resina extremamente fina e poucas fibras removidas da interface.



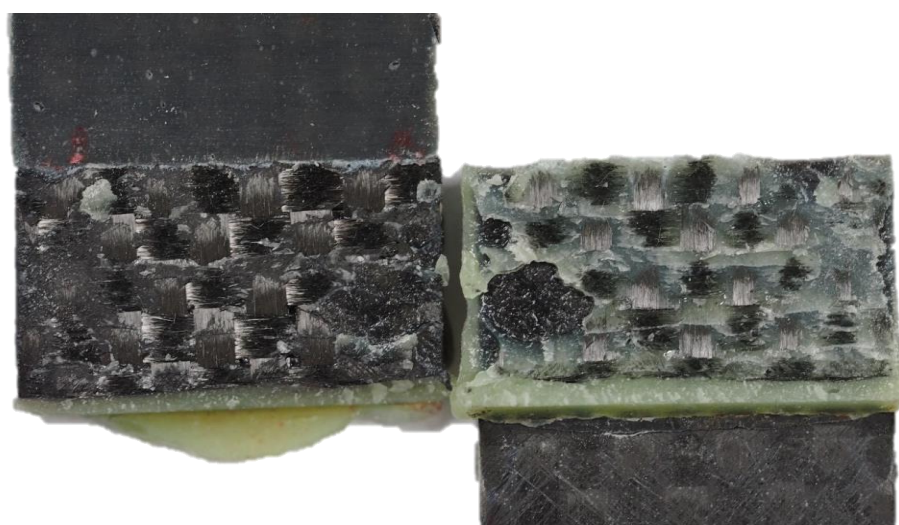
**Figura 64 - Superfície de ruptura das juntas colada do C1 - BETAMATE 2096**



**Figura 65 - Superfície de ruptura das juntas colada do C1 - AR345**



**Figura 66 - Superfície de ruptura das juntas colada do C2 - BETAMATE 2096**



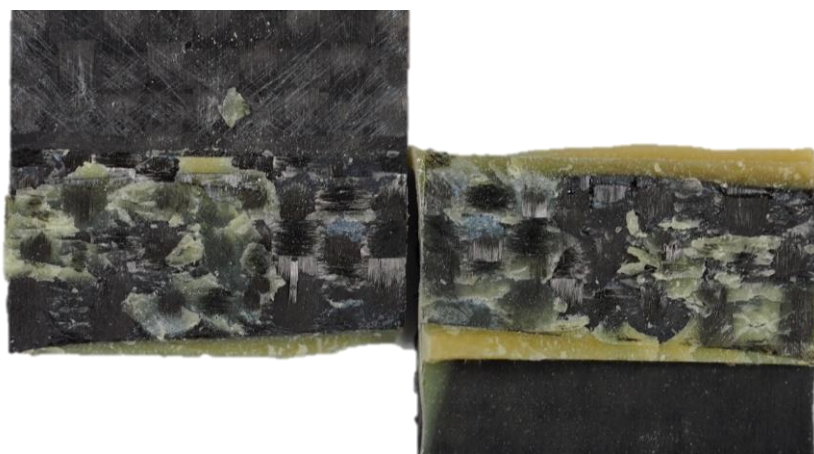
**Figura 67 - Superfície de ruptura das juntas colada do C2 - AR345**

Em relação ao CFRP, novamente percebe-se um modo de falha misto TLC com LFT para ambos adesivos. Na análise realizada através da Figura 68 e Figura 69, pôde-se constatar a presença de um modo de falha misto no corpo de prova, manifestando-se com as características de LFT e TLC. Observou-se uma falha onde se evidenciou uma camada de adesivo mais espessa em um dos lados, em conjunto com uma superfície de resina fina e uma remoção limitada de fibras da interface. Além disso, também foi identificada uma configuração onde se verificou uma camada de adesivo mais espessa em um lado e uma camada notavelmente mais fina no outro

lado após a falha, caracterizando a manifestação do modo de falha TLC. Essa combinação de características revela a complexidade e a interação de diferentes mecanismos de falha nesse corpo de prova, além de ressaltar a tendência de falhas mistas em juntas de compósitos.



**Figura 68 - Superfície de ruptura das juntas colada do CFRP - BETAMATE 2096**



**Figura 69 - Superfície de ruptura das juntas colada do CFRP - AR345**

## 5. CONCLUSÃO

Neste trabalho realizou-se a análise do efeito da hibridização natural/sintética da na caracterização mecânica e na eficiência de juntas adesivas unidas com diferentes tipos de adesivos estruturais para aplicação automotiva.

O núcleo de 5 camadas de fibra natural de juta foi mantido e realizou-se a variação do reforço sintético de fibra de carbono de forma simétrica e assimétrica atuando como envelope para o núcleo.

Foram realizados ensaios de tração, flexão, impacto de juntas adesivas nos laboratórios do CEFET-RJ. Os adesivos usados foram o adesivo estrutural de dois componentes BETAMATE 2096 fornecido pela *DuPont* e a Resina Epóxi também de dois componentes AR345 fornecido pela *E-Composites*.

Os substratos foram fabricados e as superfícies de rupturas observadas. Pode-se tirar as seguintes conclusões:

- A incorporação das fibras de carbono nos compósitos híbridos de juta resultou em um aumento notável na resistência à tração. Vale ressaltar que a organização simétrica das camadas de carbono demonstrou o melhor desempenho, proporcionando uma resistência superior aos materiais analisados.
- A utilização de fibras sintéticas de carbono nos compósitos híbridos de juta resultou em um aumento considerável na resistência à flexão, sendo que a sequência de empilhamento simétrica das camadas proporcionou a melhor eficiência em termos de resistência.
- A adição de fibras de carbono aos compósitos híbridos de juta resultou em um aumento significativo na energia de impacto, sendo os compósitos híbridos que apresentam um envelope simétrico os mais eficazes, com variações percentuais de até 493% em relação à juta pura.
- Os compósitos híbridos com fibra de juta e fibras sintéticas mostraram melhorias significativas na eficiência das juntas, atingindo resistência semelhante ao CFRP com redução de massa e custo. O adesivo BETAMATE 2096, mais dúctil, absorveu tensões e evitou falhas prematuras. O compósito híbrido simétrico C2 com AR345 foi o caso mais indicado, oferecendo desempenho próximo ao CFRP com menor custo e maior sustentabilidade.

- Os modos de falha, forma geral têm a tendência de resultar em falhas mistas em juntas de compósitos apresentando a tensão de arrancamento maior nas pontas com a propagação da trinca se intercalando entre as camadas dos corpos de provas, apresentando visualmente um formato de “zigue-zague” de adesivo e parte de uma camada que foi arrancada.

Como sugestão de trabalhos futuros, destaca-se a realização de análises para uma melhor compreensão da absorção de umidade com o objetivo de se avaliar o efeito das condições ambientais nas propriedades de resistência do material em diferentes aplicações para cada um dos substratos deste trabalho.

Além disso, sugere-se a análise caracterização mecânica e de juntas adesivas para substratos híbridos com fibra de carbono com outras fibras naturais como: Curauá, sisal, algodão de forma simétrica e assimétrica para comparação com o híbrido de juta com carbono.

Por fim, como trabalho futuro também sugere-se o estudo da vida útil destes compósitos a fim de uma maior compreensão para aplicação destes materiais na indústria automotiva.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Neto, J., et al., *A review of recent advances in hybrid natural fiber reinforced polymer composites*. Journal of Renewable Materials, 2022. **10**(3): p. 561.
2. Gholampour, A. and T. Ozbakkaloglu, *A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications*. Journal of Materials Science, 2020. **55**(3): p. 829-892.
3. Al-Maharma, A.Y. and N. Al-Huniti, *Critical Review of the Parameters Affecting the Effectiveness of Moisture Absorption Treatments Used for Natural Composites*. Journal of Composites Science, 2019. **3**(1): p. 27.
4. Pickering, K.L., M.G.A. Efendy, and T.M. Le, *A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016. **83**: p. 98-112.
5. M.R, S., et al., *A comprehensive review of techniques for natural fibers as reinforcement in composites: Preparation, processing and characterization*. Carbohydrate Polymers, 2019. **207**: p. 108-121.
6. Kalia, S., B. Kaith, and I. Kaur, *Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites—a review*. Polymer Engineering & Science, 2009. **49**(7): p. 1253-1272.
7. Kersting, D.d.F., *Avaliação de resinas Epóxi para fabricação de materiais compósitos pelo processo de pultrusão*. 2004.
8. Faruk, O., et al., *Progress report on natural fiber reinforced composites*. Macromolecular Materials and Engineering, 2014. **299**(1): p. 9-26.
9. Vrchota, J., et al., *Sustainability Outcomes of Green Processes in Relation to Industry 4.0 in Manufacturing: Systematic Review*. Sustainability, 2020. **12**(15): p. 5968.
10. Sekar, V., et al., *Additive Manufacturing: A Novel Method for Developing an Acoustic Panel Made of Natural Fiber-Reinforced Composites with Enhanced Mechanical and Acoustical Properties*. Journal of Engineering, 2019. **2019**: p. 4546863.
11. Kerni, L., et al., *A review on natural fiber reinforced composites*. Materials Today: Proceedings, 2020. **28**: p. 1616-1621.
12. Li, M., et al., *Recent advancements of plant-based natural fiber-reinforced composites and their applications*. Composites Part B: Engineering, 2020. **200**: p. 108254.
13. Assis, F.S.d., *Comportamento balístico de blindagem multicamadas com compósitos de poliéster reforçados com fibra de juta*. 2016.
14. Silva, I.d., *Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas de juta*. Universidade Estadual do Norte Fluminense—UENF. Centro de Ciências e Tecnologia. Tese de Doutorado. 110f, 2014.
15. Neto, J.R., L.H.d. Carvalho, and E.M. Araújo, *Influência da adição de uma carga nanoparticulada no desempenho de compósitos poliuretano/fibra de juta*. Polímeros, 2007. **17**: p. 10-15.
16. Souto, F., V. Calado, and N. Pereira Junior, *Fibras de carbono a partir de lignina: uma revisão da literatura*. Matéria (Rio de Janeiro), 2015. **20**: p. 100-114.

17. Silva, R.W.N. and H. Giannini, *AS VANTAGENS DA FIBRA DE CARBONO EM RELAÇÃO AO AÇO NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA*.
18. *Official Website - Mercedes - AMG*. 12 03 2023]; Available from: <https://www.mercedesamgf1.com/car/2023-car>.
19. Mohd Nurazzi, N., et al., *A Review: Fibres, Polymer Matrices and Composites*. Pertanika Journal of Science & Technology, 2017. **25**(4).
20. Carneiro, L.A.V. and A. Teixeira, *Propriedades e características dos materiais compósitos poliméricos aplicados na Engenharia de Construção*. Revista Militar de Ciência e Tecnologia, 2008. **25**: p. 1-13.
21. Ramakrishnan, T., et al., *Study of numerous resins used in polymer matrix composite materials*. Advances in Materials Science and Engineering, 2022. **2022**.
22. Lopes, B.J., *Desenvolvimento e Caracterização de Compósitos Termoplásticos Reforçados por Fibra de Carbono*. PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2018.
23. Santana, F.d.A., *Estudo do processamento de compósitos termoplásticos a partir de pré-impregnados peek/fibra de carbono por moldagem por compressão a quente*. 2010.
24. Xu, J., et al., *On the machining behavior of carbon fiber reinforced polyimide and PEEK thermoplastic composites*. Polymer Composites, 2020. **41**(9): p. 3649-3663.
25. Uchida, C.N., *Os desafios do uso da resina de PET reciclado na indústria de alimentos e bebidas*. 2021.
26. Jr, S., B. Jr, and M. Hemkemeier, *Environmental aspects of the replacement of fiber glass components by abs (acrylonitrile butadiene styrene) in a bus manufacturing company*. Ciencia y Engenharia/ Science and Engineering Journal, 2014. **23**: p. 33-38.
27. Neto, J.A.B.P., *Estudo paramétrico de juntas adesivas em material compósito*. 2011.
28. Domingues, N.R.E., *Estudo da resistência de juntas adesivas em L entre alumínio e material compósito*. 2015, Instituto Politecnico do Porto (Portugal).
29. de Queiroz, H.F.M., M.D. Banea, and D.K.K. Cavalcanti, *Adhesively bonded joints of jute, glass and hybrid jute/glass fibre-reinforced polymer composites for automotive industry*. Applied Adhesion Science, 2021. **9**(1): p. 2.
30. Sujon, M.A.S., M.A. Habib, and M.Z. Abedin, *Experimental investigation of the mechanical and water absorption properties on fiber stacking sequence and orientation of jute/carbon epoxy hybrid composites*. Journal of Materials Research and Technology, 2020. **9**(5): p. 10970-10981.
31. Budhe, S., et al., *An updated review of adhesively bonded joints in composite materials*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017. **72**: p. 30-42.
32. de Araujo Alves Lima, R., et al., *Effect of surface treatments on interfacial properties of natural intralaminar hybrid composites*. Polymer Composites, 2020. **41**(1): p. 314-325.
33. Almeida, N.M.B.d., *Estudo estrutural de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de juta*. 2012.



34. Kumar, R., et al., *Industrial applications of natural fibre-reinforced polymer composites – challenges and opportunities*. International Journal of Sustainable Engineering, 2019. **12**(3): p. 212-220.
35. Banea, M.D. and L.F. da Silva, *Adhesively bonded joints in composite materials: an overview*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2009. **223**(1): p. 1-18.
36. de Queiroz, H.F.M. and D. Velloso, *Análise de Juntas Coladas de Compósitos de Fibras Naturais*. 2018.
37. Neto, A.S., *Estudo de tensões e modos de falha no desenvolvimento de adesivos nanomodificados e juntas coladas*. 2016.
38. Kim, K.-S., et al., *Failure mode and strength of uni-directional composite single lap bonded joints with different bonding methods*. Composite Structures, 2006. **72**(4): p. 477-485.
39. ASTM, *Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced Plastic (FRP) Joints*. 2012.
40. Aktaş, A., M. Aktaş, and F. Turan, *The effect of stacking sequence on the impact and post-impact behavior of woven/knit fabric glass/epoxy hybrid composites*. Composite Structures, 2013. **103**: p. 119-135.
41. Aranno, T.M., et al., *Fabrication, experimental investigation of jute fiber reinforced epoxy composites and hybrid composites*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019. **628**(1): p. 012011.
42. Margabandu, S. and S. Subramaniam, *Experimental evaluation and numerical validation of bending and impact behaviours of hybrid composites with various stacking arrangements*. Materials Research Express, 2019. **6**(12): p. 125305.
43. Ku, H., et al., *A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites*. Composites Part B: Engineering, 2011. **42**(4): p. 856-873.
44. Pereira, A.L., et al., *Mechanical and thermal characterization of natural intralaminar hybrid composites based on sisal*. Polymers, 2020. **12**(4): p. 866.
45. Neto, J., et al., *Effect of chemical treatment on the thermal properties of hybrid natural fiber-reinforced composites*. Journal of Applied Polymer Science, 2019. **136**(10): p. 47154.
46. Dhakal, H.N., et al., *Development of flax/carbon fibre hybrid composites for enhanced properties*. Carbohydrate Polymers, 2013. **96**(1): p. 1-8.
47. Standard, A., *D1002. Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal)*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999.
48. ASTM, A., *D3039 Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2017.
49. ASTM, D., *5868 “Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding”*. Annu. Book ASTM Stand, 2008.
50. Sezgin, H. and O.B. Berkalp, *The effect of hybridization on significant characteristics of jute/glass and jute/carbon-reinforced composites*. Journal of Industrial Textiles, 2017. **47**(3): p. 283-296.

51. Meliande, N.M., et al., *ENSAIO DE IMPACTO CHARPY DE COMPÓSITOS LAMINADOS HÍBRIDOS DE EPÓXI REFORÇADO COM TECIDO DE ARAMIDA E MANTA DE CURAUÁ PARA CAPACETE BALÍSTICO*.
52. Cavalcanti, D.K.K., *CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS HÍBRIDOS COM REFORÇOS DE FIBRAS NATURAIS*. 2018, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.
53. Cavalcanti, D.K.K., et al., *Mechanical characterization of intralaminar natural fibre-reinforced hybrid composites*. *Composites Part B: Engineering*, 2019. **175**: p. 107149.
54. de Queiroz, H.F.M. and M.D. Banea, *Methods to increase the mechanical performance of composite adhesive joints: An overview with focus on joints with natural fibre composite adherends*. *Journal of Composite Materials*, 2022. **56**(26): p. 3993-4010.
55. Banea, M.D., et al., *Effect of material on the mechanical behaviour of adhesive joints for the automotive industry*. *Journal of adhesion science and Technology*, 2017. **31**(6): p. 663-676.

ANEXO A

## **Folha de Dados Técnicos da Resina**

### Descrição

Resina de laminação HEX 135, aprovada pelo German Lloyd. Não contém solventes e enchimentos e está disponível para diferentes pot life. O sistema é utilizado para o processamento de fibras de vidro, carbono e aramida, apresentando alta capacidade de carga estática e dinâmica. Este sistema tem propriedades adesivas muito boas com madeira e outros materiais.

O intervalo de vida do pote é entre aprox. 25 min. e mais de 60 min. Isso permite uma seleção do sistema ideal para todos os métodos de processamento. Após a pré-cura à temperatura ambiente, os componentes fabricados são viáveis e desmoldáveis. As propriedades finais, no entanto, só serão obtidas após a pós-cura a temperaturas superiores a 40 ° C.

À temperatura ambiente, os endurecedores rápidos são processáveis e desmoldáveis após 6 - 12 horas, enquanto os endurecedores lentos têm períodos de cura de 2 - 4 dias à temperatura ambiente.

Os laminados produzidos com este sistema resultam em superfícies de alto brilho e não pegajosas, mesmo com condições de cura desfavoráveis, e. g. temperaturas mais baixas e / ou alta umidade. A viscosidade de mistura garante uma impregnação rápida e completa das fibras de reforço, no entanto, a resina não escorre dos tecidos em superfícies verticais.

Devido às características químicas deste sistema, não esperamos problemas de compatibilidade (por exemplo, bolhas, rasgões ou alterações de cor), quando é processado com gelcoats. No entanto, testes abrangentes são indispensáveis.

Resinas epóxi são líquidos super resfriados, portanto a cristalização é imanentemente possível. Em um estágio inicial, a cristalização é visível como uma turvação e pode progredir para um estágio, onde a resina se torna um sólido semelhante à cera. A cristalização pode ser revertida pelo aquecimento lento do produto a aprox. 40 ° C - 60 ° C. Este fenômeno físico é reversível e não é restrição à qualidade. De fato, uma alta pureza do material aumentará a tendência à cristalização.

Embora seja improvável que a **HEX135** cristalize a baixas temperaturas, são recomendadas condições de armazenamento de 15 - 30 ° C e baixa umidade. Após a distribuição do material, os recipientes devem ser novamente fechados com cuidado, para evitar contaminação ou absorção de água. Todos os endurecedores de amina mostram uma reação química quando expostos ao ar, conhecidos como "corando". Esta reação é visível como cristais de carbamida branca, o que poderia tornar os materiais inutilizáveis.

Os materiais têm uma vida útil de no mínimo 2 anos, quando armazenados em seus recipientes originalmente selados. Devido a matérias-primas selecionadas, esperamos apenas pequenos problemas em relação à irritação da pele e alergias durante o processamento. As normas de segurança industrial relevantes para o manuseio de resinas e endurecedores epoxi em nossas instruções para processamento seguro devem ser observadas.

Aprovação	DNV-GL SE (Germanischer Lloyd) 30'
Aplicação	Pás de turbinas eólicas, construção de Barcos, laminação e colagem de madeiras, aplicações esportivas de alta performance; construções de moldes e ferramentas.
Temperatura de Operação	-60°C até +50°C sem tratamento de temperatura -60°C até +80°C depois do tratamento com temperatura
Processamento	À temperaturas entre 15°C e 50°C
Características	Geltime de aproximadamente 25 min a 60 min.
Armazenagem	Validade de 24 meses

	Unidade	HEX135
Densidade <sup>1)</sup>	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,14 - 1,18
Viscosidade <sup>1)</sup>	[mPa.s]	2.300 - 2.900
Index de Refração <sup>1)</sup>		1,558 - 1,562

	Unidade	FAST	SLOW
Densidade <sup>1)</sup>	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,03 - 1,07	0,94 - 0,98
Viscosidade <sup>1)</sup>	[mPa.s]	150 - 300	50 - 50
Index de Refração <sup>1)</sup>		1,564 - 1,570	1,450 - 1,470
Geltime	[min]	Aprox. 25 min	Aprox. 60 min
Tg <sub>pot</sub>	[°C]	80 - 90 °C unconditioned 65 - 75°C conditioned 3)	

Condições de medição:  
 1) medida a 25 °C  
 2) amostra de 100g em banho-maria a 30 °C  
 3) condicionada a 40 °C / 90% r.H.

HEX135: Todos os agentes de cura	
Proporção por peso	100 : 33
Proporção por volume	100 : 39

A proporção de mistura indicada deve ser observada com muito cuidado. Adicionar mais ou menos agentes de cura não resultará em uma reação mais rápida ou mais lenta - mas em cura incompleta que não pode ser corrigida de forma alguma. Resina e agente de cura devem ser misturados muito bem. Misture até que nenhuma nuvem seja visível no recipiente de mistura. Preste especial atenção às paredes e ao fundo do recipiente de mistura.

Todos os agentes de cura têm cor azul para distinguir entre resina e agentes de cura e para facilitar a identificação de um processo de mistura correto. Embora seja improvável, são possíveis desvios de cor (por exemplo, devido à radiação UV após maior exposição à luz do sol), mas, no entanto, não têm efeito sobre o processamento e as propriedades finais do material.

Condições de medição: amostra de 100g em banho-maria a 30 ° C

A temperatura de processamento ideal está na faixa de 20 ° C a 35 ° C. Temperaturas mais altas são possíveis, mas encurtarão a vida útil. Um aumento de temperatura de 10 ° C reduzirá para metade a vida útil. A água (por exemplo, umidade elevada ou contido em enchimentos adicionais) provoca uma aceleração da reacção da resina / agente de cura. Não se sabe que temperaturas diferentes durante o processamento têm impacto significativo nas propriedades mecânicas do produto curado.

Não misture grandes quantidades - particularmente de sistemas altamente reativos - em altas temperaturas de processamento. Como a dissipação de calor no recipiente de mistura é muito lenta, o conteúdo será aquecido rapidamente pelo calor da reacção (reacção do agente resinscurante exotérmico). Isto pode resultar em temperaturas superiores a 200 ° C no recipiente de mistura, o que pode provocar uma queima intensiva de fumo na massa de resina.

Propriedade	Unidade	Valor
Densidade - DIN EN ISO 1183-1	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,10 - 1,20
Resistência à flexão - DIN EN ISO 178	[MPa]	100 -120
Módulo de elasticidade - DIN EN ISO 178	[GPa]	2,8 - 3,2
Resistência à tração - DIN EN ISO 527-2	[MPa]	65 - 75
Resistência a compressão - DIN EN ISO 604	[MPa]	80 - 100
Alongamento na Ruptura - DIN EN ISO 527-2	%	7,0 - 10,0
Força de Impacto - ISO 179-1	[kJ/m <sup>2</sup> ]	60 - 80
Absorção de água a 23°C - DIN EN ISO 175	24h [%]	0,10 - 0,50
	7d[%]	0,20 - 0,80
Cura: 8h a 70°C		

ANEXO B

## **Folha de Dados Técnicos do Adesivo BETAMATE 2096**



**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:

<b>application speed</b>	Up to 300 mm/s
<b>temperatures:</b> follower plate follower plate - doser	<b>recommended:</b> 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:**

<b>Basis</b>	component A: epoxy resin / component B: polymeric amines
<b>Colour</b>	A: blue / B: white
<b>Density (23°C)</b>	1.12 g/ml
<b>Mixing Ratio</b>	A:B = 2:1
<b>Viscosity/Yield Point</b> (23°C, Bohlin, Casson)	component A: 140 Pas / 2Pa component B: 2 Pas / 270 Pa
<b>Time to Handle</b>	approx. 1 hour
<b>Curing Condition</b>	ambient temperature: after 2 days 90% of end toughness temperatures up to 180 °C feasible
<b>Standard Curing</b>	60°C / 2 hours, 2 or 7 days at room temperature (Drive away strength after approx. 10 hours)
<b>Tensile Strength (DIN EN ISO 527-1)</b>	29 MPa
<b>Elongation at Break</b> (DIN EN ISO 527-1)	approx. 9 %
<b>E-Modulus (DIN EN ISO 527-1)</b>	1700 MPa
<b>Lap Shear Strength (DIN EN 1465)</b> (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
<b>T-Peel Strength (DIN EN ISO 11339)</b> (H340 LAD + Z Daimler 0.8 mm) (Adhesive layer thickness: 0.2 mm Bonded area: 25x100 mm)	6 N/mm
<b>Impact Peel Strength (ISO 11343)</b> (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
<b>Bonding Surface Preparation</b>	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  $40 - 50^{\circ}\text{C}$  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.  $15^{\circ}\text{C}$ .

**cleaning**

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  $30^{\circ}\text{C}$  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><b>The Dow Chemical Company</b>  <b>Customer Information Group Europe</b></p> <p>Phone +800 3 6946367            Phone +32 3 450 2240            Italia 800 783 825            Fax +32 3 450 2815</p>	<p><b>Dow Automotive Systems</b>  <b>World Head Quarter</b></p> <p>1250 Hamon Road            Auburn Hills, MI 48326            USA            Tel. +1 248 391 63 00            Fax +1 248 391 64 17</p>	<p><b>Dow Automotive Systems</b></p> <p>Dow Deutschland            Anlagengesellschaft GmbH            Am Kronberger Hang 4            65824 Schwalbach            Germany            Tel: +49 6196 666 0            Fax: +49 6196 666 444</p>	<p><b>Dow Automotive Systems</b></p> <p>Dow Europe GmbH            Bachobelstrasse 3            8810 Horgen            Switzerland            Tel. +41 44 728 21 11            Fax. +41 44 728 2935</p>
<p><b>Dow Automotive Systems</b></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><b>Dow Automotive Systems</b></p> <p>Dow Chemical Ibérica, S.L.            Ribera del Loira, 4-6 - Planta            4ª (Edificio IRIS)            28042 Madrid            Spain            Tel. + 34 91 740 7900            Fax. + 34 91 740 7785</p>	<p><b>Dow Automotive Systems</b></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><b>Dow Automotive Systems</b></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 C

**Folha de Dados Técnicos do Adesivo AR345**

## Descrição

O adesivo epoxy AR345 é um sistema de resina epoxy fornecido como pasta tixotrópica, desenvolvida para colagem de materiais compostos e metais.

## Propriedades Físicas

Propriedade	Teste	Unidade	Valor
Cor	Visual	-	Verde
Dureza Shore C	ASTM D-2240	-	84
Resistência à tração	ASTM D-638	MPa	53,09
Módulo de tração	ASTM D-638	MPa	3095,75
Resistência ao alongamento	ASTM D-638	%	4,3
Resistência à compressão	ASTM D-695	MPa	90,32
Resistência à flexão	ASTM D-790	MPa	95,84
Módulo de flexão	ASTM D-790	MPa	2950,96
HDT - Cura a temperatura ambiente	ASTM D-648	°C	58
HDT - Temperatura de pós-cura	ASTM D-648	°C	98
Impacto Izod	ASTM D-256	kJ/m <sup>2</sup>	2,69
Resistência ao cisalhamento a 25°C	ASTM D-3165	MPa	28,30
Resistência ao cisalhamento 5h a 70°C	ASTM D-3165	MPa	29,79
Contração Linear	ASTM D-2566	mm/mm	<0,001

## Propriedades de Manuseio

Propriedade	Teste	Unidade	Valor
Cor da Resina	Visual	-	Amarelo
Cor do endurecedor	Visual	-	Azul
Densidade da Resina	ASTM E-201	Kg/m <sup>3</sup>	1066,5
Densidade do endurecedor	ASTM E-201	Kg/m <sup>3</sup>	982,6
Viscosidade da Resina a 25°C	Laray Vicometer	cps	106.000
Viscosidade do Endurecedor a 25°C	Laray Vicometer	cps	47.000
Viscosidade Mista a 25°C	Laray Vicometer	cps	61.000
Proporção da mistura por peso	Calculado	-	100A:45B
Taxa de mistura por volume	Calculado	-	2A : 1B
Gel time a 25°C (150g massa)	ASTM D-2471	minutos	65
Pot life a 25°C (150g massa)	ASTM D-2471	minutos	160

#### Armazenagem e Manuseio

O sistema de resina deve ser armazenado em local seco, entre 15 e 30°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 20°C durante a mistura.

#### Manuseio Seguro

Trabalhe com o produto em áreas ventiladas utilizando luvas, óculos de proteção e vestimentas apropriadas. Evite contato com a pele e os olhos. Evite contaminação da roupa e lave-as bem após o uso. Esse produto pode causar reações alérgicas cutâneas e respiratórias. Consulte as FISPQ (Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico) dos materiais, para precauções completas.