UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

FERNANDO MADUREIRA

FABRICAÇÃO E CONTROLE DE ESPESSURA DE JUNTAS COLADAS
SINGLE LAP JOINT: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS ADERENTES
E DO ADESIVO

São Carlos

2018

FERNANDO MADUREIRA

FABRICAÇÃO E CONTROLE DE ESPESSURA DE JUNTAS COLADAS
SINGLE LAP JOINT: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS ADERENTES
E DO ADESIVO

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Leite Ribeiro

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA.
A VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA-
SE DISPONÍVEL JUNTO AO
DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA
EESC-USP.

São Carlos

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

M183f Madureira, Fernando
 FABRICAÇÃO E CONTROLE DE ESPESSURA DE JUNTAS
 COLADAS SINGLE LAP JOINT: CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DOS
 ADERENTES E DO ADESIVO / Fernando Madureira; orientador
 Marcelo Leite Ribeiro. São Carlos, 2018.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
 em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em
 Aeronaves -- Escola de Engenharia de São Carlos da
 Universidade de São Paulo, 2018.

 1. Juntas Coladas. 2. Compósitos Laminados. 3.
 Adesivos. 4. Controle de Espessura. 5. Falha Coesiva.
 6. Correlação de Imagem. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **FERNANDO MADUREIRA**.

Título da dissertação: "Fabricação e controle de espessura de juntas coladas single lap joint: caracterização mecânica dos aderentes e do adesivo".

Data da defesa: 28/09/2018.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **Marcelo Leite Ribeiro**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Associado **José Ricardo Tarpani**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Profa. Dra. **Doina Mariana Banea**
(Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da
Fonseca/CEFET-RJ)

Resultado:

Aprovado

Aprovado

Aprovado

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

RESUMO

MADUREIRA, F. **Fabricação e controle de espessura de juntas coladas single lap joint**: Caracterização mecânica dos aderentes e do adesivo. 2018. 113 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Devido a suas vantagens comparadas aos métodos tradicionais de união mecânica, a utilização de juntas coladas estruturais só tende a crescer, entretanto, devido suas propriedades e modos de falha dependerem de diversos parâmetros (tratamento superficial, geometria, material, condições de trabalho, etc.) uma utilização mais ampla desta técnica ainda é restrita pela ausência de modelos de falhas confiáveis. O presente trabalho consiste na apresentação de métodos para fabricação de juntas coladas em material compósito e verificação da influência da espessura da camada adesiva na resistência de juntas simples coladas (*single lap joints*) submetidas à tração. São também apresentados métodos para fabricação dos aderentes, corpos de prova de adesivo puro para ensaios de caracterização e realização de ensaios mecânicos para obtenção das propriedades mecânicas tanto dos aderentes quanto do adesivo. As propriedades mecânicas dos aderentes e do adesivo foram obtidas através de ensaios realizados em uma máquina de tração universal com o auxílio da técnica de correlação digital de imagem, e a obtenção das energias críticas de resistência à fratura (G_{Ic} , G_{IIc}) da camada adesiva foram calculadas através de ensaios *Double Cantilever Beam* (DCB) e *End Notched Flexure* (ENF). Foram estudados métodos para gerar falha coesiva nas juntas adesivas, sendo que o melhor método encontrado foi o de tratamento superficial dos aderentes com jateamento abrasivo seguido pela limpeza superficial com acetona. O controle preciso da espessura da camada adesiva foi alcançado através do desenvolvimento de um dispositivo de fácil construção, compostos por suportes de madeira, hastes e linhas de nylon. Nos ensaios em juntas coladas foi constatado uma relação inversamente proporcional entre a espessura da camada adesiva e a resistência máxima suportada pela junta, ou seja, quanto maior a espessura do adesivo menor sua resistência. Os métodos aqui apresentados foram os resultados de vários meses de estudo e compreensão das normas e técnicas disponíveis na literatura, o aprimoramento das técnicas foram frutos de um ciclo compostos por fabricação, testes e análise de resultados.

Palavras-chave: Juntas Coladas, Compósitos Laminados, Adesivos, Controle de Espessura, Falha Coesiva, Correlação de Imagem.

ABSTRACT

MADUREIRA, F. Manufacture and thickness control of single lap joints: Mechanical properties characterization of adherents and adhesive. 2018. 113 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

Amongst the joining techniques, adhesively bonding joints are one of the most commonly applied nowadays. However, a lack of reliable failure criteria still exists, limiting in this way a more widespread application of adhesively bonded joints in principal load-bearing structural applications. An accurate strength prediction of the adhesively bonded joints is essential to decrease the amount of expensive testing at the design stage. This work consists to show methods for manufacturing single lap joints and to verify the adhesive thickness influence on the joint resistance. The manufacturing process of the composite adherends and adhesives for bulk tests was also covered. The mechanical properties of the adherends and bulk adhesive were performed on a universal testing machine with assistance of a digital image correlation (DIC) technique. The fracture toughness energy release rates (G_{Ic} , G_{IIc}) of the adhesive layer were obtained respectively through Double Cantilever Beam (DCB) and End Notched Flexure (ENF) tests. Cohesive failure was achieved by grit blasting the adherents followed by cleaning with acetone. A constant adhesive thickness was guaranteed by placing nylon fishing lines between the adherents. Single lap joints tests showed that the joint resistance decrease with increasing adhesive thickness.

Keywords: Bonded Joints, Digital Image Correlation, Cohesive Failure, Composite Structures, Thickness Control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-1 – Elementos estruturais unidos por adesivos	22
Figura 1-2 – Exemplos de distribuição de tensão a) Em juntas coladas b) Placas com furos circulares.....	23
Figura 2-1 – Diferença na resposta da deformação em laminados com diferentes orientações de fibras	27
Figura 2-2 – Características básicas de uma lâmina de compósito reforçado por fibra	28
Figura 2-3 – Principais tipos de tensões atuantes numa junta adesiva	30
Figura 2-4 – Exemplos de tipos de geometrias de juntas coladas	31
Figura 2-5 – Aperfeiçoamento na resistência de uma junta Single Lap Joint (SLJ)	32
Figura 2-6 – Principais tipos de falha de juntas simples coladas	32
Figura 2-7 – Influência da rugosidade da superfície do aderente na resistência de uma junta adesiva: (a) Maior resistência ao cisalhamento (b) Menor resistência ao cisalhamento	33
Figura 2-8 – Influência de contaminantes na superfície do aderente	33
Figura 2-9 – Falha de aderentes compósitos reforçados por fibra.....	34
Figura 2-10 – Exemplo de forças coesivas e de adesão	34
Figura 2-11 – Modos de sollicitação de uma trinca: (a) Modo de abertura: Modo I. (b) Modo de cisalhamento: Modo II. (c) Modo de Rasgamento: Modo III.....	36
Figura 2-12 – Perda de rigidez devido ao crescimento de trinca	36
Figura 2-13 – Representação dos ensaios <i>Double Cantilever Beam</i> e <i>End Notched Flexure</i> ..	38
Figura 2-14 – Representação esquemática do dispositivo MMB	38
Figura 2-15 – Características geométricas do ensaio <i>Double Cantilever Beam</i>	40
Figura 2-16 - Características geométricas do ensaio <i>End Notched Flexure</i> (ENF).....	43
Figura 2-17 – Deformação diferencial numa junta simples colada	45
Figura 2-18 – Distribuições de tensões na camada adesiva.....	45
Figura 2-19 – Representação gráfica de um modelo de zona coesiva.....	48
Figura 2-20 – Exemplo de malha coesiva: a) Modelo 2D – 4Nós; b) Modelo 3D – 8 Nós.	49
Figura 2-21 – Leis de tração separação disponíveis no software ABAQUS®.....	50
Figura 3-1 – Representação de corte da fibra de vidro unidirecional.....	56
Figura 3-2 – Marcações para o corte de fibra de vidro.....	56
Figura 3-3 – Placa de vidro para empilhamento das fibras	59
Figura 3-4 – Empilhamento e ferramentas utilizadas para corte e acomodação das lâminas ..	60

Figura 3-5 – Ordem de posicionamento das camadas auxiliares	61
Figura 3-6 – Sistema de compressão a vácuo	62
Figura 3-7 – Ciclo de cura.....	62
Figura 3-8 – Placa de fibra de vidro/Epóxi finalizada	63
Figura 3-9 – Corte e empilhamento das lâminas de carbono	64
Figura 3-10 – Placa de fibra de carbono prepreg	64
Figura 3-11 – Sentido de orientação das fibras	65
Figura 3-12 – Orientação de corte da placa +/- 45°	66
Figura 3-13 – Máquina e disco de corte.....	67
Figura 3-14 – Dimensões de TABS e corpos de prova de fibra de vidro/epóxi	68
Figura 3-15 – Dispositivo para controle de espessura	69
Figura 3-16 – Exemplo utilização do dispositivo	70
Figura 3-17 – Geometria das juntas coladas	71
Figura 3-18 – Posicionamento dos aderentes.....	72
Figura 3-19 – Remoção da linha e borda da placa	73
Figura 3-20 – Corte da placa para obtenção das juntas coladas.....	73
Figura 3-21 – Amostra finalizada de junta colada Single Lap Joint.....	73
Figura 3-22 – Dimensões do corpo de prova de resina epóxi	74
Figura 3-23 – Fabricação do molde de silicone	76
Figura 3-24 – Fabricação de amostras em resina epóxi	77
Figura 3-25 – Amostra de resina epóxi	77
Figura 3-26 – Dimensões dos corpos de prova para ensaios DCB (Modo I).....	79
Figura 3-27 – Dimensões dos corpos de prova para ensaios ENF (Modo II)	79
Figura 3-28 – Esquema de posicionamento das placas	80
Figura 3-29 – Representação da distância entre apoios e trinca inicial	81
Figura 3-30 – Exemplo de fabricação das placas para ensaios ENF e DCB	81
Figura 3-31 – Deposição de resina epóxi.....	82
Figura 4-1 – Características corpo de prova FV-EP Orientação [0°] (Fibras na direção 1)	86
Figura 4-2 – Tensão vs. Deformação FV-EP: Orientação[0°]	87
Figura 4-3 – Coeficiente de Poisson (ν_{12}) FV-EP: Orientação [0°]	88
Figura 4-4 – Características corpo de prova FV-EP Orientação [90°] (Fibras na direção 1) ..	89
Figura 4-5 – Tensão vs. Deformação FV-EP: Orientação[90°]	90
Figura 4-6 – Coeficiente de Poisson (ν_{23}) FV-EP: Orientação [90°]	90

Figura 4-7 – Características corpo de prova FV-EP Orientação $[+/-45^{\circ}]$ (Fibras nas direções 1-2).....	91
Figura 4-8 – Tensão vs. Deformação FV-EP: Orientação $[+/-45^{\circ}]$	92
Figura 4-9 – Módulo de cisalhamento G_{12}	93
Figura 4-10 – Tensão vs. Deformação Resina Epóxi.....	95
Figura 4-11 – Coeficiente de Poisson ν Resina Epóxi.....	96
Figura 4-12 – Características corpo de prova para o ensaio DCB.....	97
Figura 4-13 – Representação do ensaio de Modo I.....	98
Figura 4-14 – Ensaio Modo I: (a)Força vs. Deslocamento; (b) Curva de Resistência.....	99
Figura 4-15 – Demonstração de falha coesiva em ensaios DCB.....	99
Figura 4-16 – Características do corpo de prova ENF Modo II.....	100
Figura 4-17 – Corpo de prova em flexão: Ensaio ENF.....	101
Figura 4-18 – Ensaio Modo II: (a)Força vs. Deslocamento; (b) Curva de Resistência.....	102
Figura 4-19 – Demonstração de falha coesiva em ensaios ENF.....	102
Figura 4-20 – Características do corpo de prova Single Lap Joint.....	103
Figura 4-21 – Espessura da camada adesiva: 0,2 mm.....	104
Figura 4-22 – Espessura da camada adesiva: 0,4 mm.....	105
Figura 4-23 – Espessura da camada adesiva: 0,8 mm.....	105
Figura 4-24 – Comparação entre as forças e deslocamento máximos resistidos pelas juntas simples coladas em função da espessura da camada adesiva th	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Vantagens e desvantagens de uma junta colada.....	29
Tabela 3-1 – Método de seleção de espessura para fabricação das placas.....	54
Tabela 3-2 – Materiais utilizados para fabricação de placas de fibra de vidro	55
Tabela 3-3 – Dimensões recomendadas para corte das camadas auxiliares.....	57
Tabela 3-4 – Tipos mais comuns de processos de cura laboratoriais.....	61
Tabela 3-5 – Características das placas fabricadas em fibra de vidro/epóxi.....	65
Tabela 3-6 – Dimensões mínimas recomendadas para ensaios de tração em compósitos reforçados por fibra	67
Tabela 4-1 – Dimensões corpos de prova FV-EP Orientação [0°].....	87
Tabela 4-2 – Resultados ensaios de tração FV-EP Orientação [0°]	88
Tabela 4-3 – Dimensões médias corpos de prova FV-EP Orientação [90°]	89
Tabela 4-4 – Resultados ensaios de tração FV-EP Orientação [90°]	91
Tabela 4-5 – Dimensões médias corpos de prova FV-EP Orientação [+/-45°].....	91
Tabela 4-6 – Resultados ensaios de tração FV-EP Orientação [+/-45°]	93
Tabela 4-7 – Valores médios das propriedades mecânicas FV-EP	94
Tabela 4-8 – Resultados ensaios de tração: Resina Epóxi Ephoxal (RAL120/HAL115)	96
Tabela 4-9 – Propriedades Mecânicas Resina Epóxi Ephoxal (RAL120/HAL115)	96
Tabela 4-10 – Dimensões corpos de prova Modo I.....	97
Tabela 4-11 – Energia Resistência à Fratura do adesivo epóxi Ephoxal (RAL120/HAL115)	100
Tabela 4-12 – Dimensões corpos de prova Modo II	101
Tabela 4-13 – Energia de resistência à fratura do adesivo epóxi Ephoxal (RAL120/HAL115)	103
Tabela 4-14 Dimensões das juntas coladas	106
Tabela 4-15 – Resultados experimentais ensaio de tração em juntas simples coladas.....	107

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
1.1 OBJETIVOS.....	24
1.2 TÓPICOS ABORDADOS.....	25
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	27
2.1 UNIÕES ADESIVAS.....	29
2.2 MODOS DE FALHA DE JUNTAS COLADAS.....	32
2.3 MECÂNICA DA FRATURA: CRITÉRIOS DE RUPTURA	35
2.3.1 <i>Energia de resistência a fratura: Modo I</i>	39
2.3.2 <i>Energia de resistência a fratura: Modo II</i>	42
2.4 MECÂNICA DO CONTÍNUO: MÁXIMAS TENSÕES.....	44
2.5 MODELO DE ZONA COESIVA.....	47
3 METODOLOGIA.....	53
3.1 FABRICAÇÃO DE PLACAS DE FIBRA DE VIDRO-EPÓXI.....	54
3.1.1 <i>Corte da fibra de vidro</i>	55
3.1.1 <i>Corte das camadas auxiliares</i>	57
3.1.2 <i>Preparo da resina</i>	57
3.1.3 <i>Empilhamento</i>	58
3.1.4 <i>Processo de cura</i>	61
3.2 FABRICAÇÃO DAS PLACAS DE FIBRA DE CARBONO	63
3.3 FABRICAÇÃO DE CORPOS DE PROVA EM FIBRA DE VIDRO	65
3.3.1 <i>Juntas Coladas</i>	68
3.3.1.1 <i>Instruções para fabricação de juntas coladas</i>	71
3.4 FABRICAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE RESINA EPÓXI	74
3.4.1 <i>Molde de silicone</i>	74
3.4.2 <i>Corpos de prova de resina epóxi</i>	76
3.5 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA EM FIBRA DE CARBONO.....	78
3.5.1 <i>Corpos de prova para ensaios de Modo I e II</i>	78
3.5.2 <i>Instruções de fabricação</i>	80
3.6 MÉTODO DE CORRELAÇÃO DE IMAGENS.....	82

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO COMPOSITO FIBRA DE VIDRO/EPÓXI	85
4.2 RESINA EPÓXI	94
4.3 MODO I	97
4.4 MODO II	100
4.5 JUNTAS COLADAS	103
5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	109
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111

1 INTRODUÇÃO

Historicamente a união adesiva pode ser considerada uma das técnicas mais antigas para a junção de materiais, já utilizada desde os tempos do Antigo Egito na fabricação de mobílias em madeira folheada, no qual resinas vegetais eram utilizadas como material adesivo nas diversas camadas da mesma (Pocius, 2012). No entanto, seu avanço tecnológico só pode ser considerado significativo em meados do século passado, quando com o desenvolvimento de polímeros sintéticos foram criados novos tipos de adesivos mais resistentes, possibilitando então sua aplicação em estruturas nos mais diversos setores de tecnologia (aeronáutica, automobilística, esportiva, petrolífera, etc.).

Adesivos apresentam vantagens específicas comparadas aos métodos tradicionais de uniões mecânicas como solda, rebites e parafuso, dentre elas destacam-se a possibilidade de união de placas de pequena espessura, materiais distintos, maior resistência a corrosão galvânica, maior resistência à fadiga e melhor acabamento superficial (Skeist, 2012), se tornando um grande atrativo para as indústrias, que estão sempre à busca de aperfeiçoamentos estruturais.

Na indústria aeronáutica, uniões adesivas vêm sendo amplamente utilizadas na junção das camadas externas com o núcleo de estruturas sanduiches, reparos estruturais e em elementos submetidos a carregamentos secundários (não excluindo a sua utilização em algumas estruturas com carregamentos primários). A Figura 1-1 exemplifica os elementos estruturais unidos por adesivos num avião executivo, onde se observa que praticamente em toda aeronave esta técnica de união pode ser utilizada, principalmente na união de estruturas de material compósito polimérico.

Figura 1-1 – Elementos estruturais unidos por adesivos

Fonte: Imagem adaptada da internet¹

Atualmente os materiais compósitos poliméricos reforçado por fibra (FRP) são utilizados numa diversificada gama de elementos estruturais, como exemplo estruturas de aeronaves, iates, automóveis, equipamentos civis e militares. Destacam-se pela sua versatilidade de combinações de fibras e matrizes fornecendo inúmeras opções de design e fabricação de componentes (Hinton et al., 2004), sua alta resistência interligada com baixo peso se torna uma ótima característica para indústria aeronáutica onde a redução do peso da aeronave proporciona uma redução no gasto de combustível e aumento da carga paga.

Furações são muito comuns em estruturas aeronáuticas, entretanto, grande parte das estruturas em materiais compósitos sofrem com tal métodos de fixação, pois para união das partes é necessário à criação de um furo em sua estrutura. Com a presença de uma descontinuidade, além do surgimento de concentradores de tensão, ocorre também o rompimento de suas fibras, prejudicando sua integridade estrutural (Mallick, 1997). Para superar tal problema, a utilização de uniões adesivas vem a ser uma ótima solução possibilitando a distribuição uniforme de tensões entre um aderente e outro (Fig. 1.2).

¹ – Disponível em: <http://www.olympus-ims.com/en/resources/white-papers/multi-mode-adhesive-bond-testing/>
Acesso em abr. 2017.

Figura 1-2 – Exemplos de distribuição de tensão a) Em juntas coladas b) Placas com furos circulares

Fonte: Imagem adaptada da internet²

No ponto de vista da mecânica do dano e mecânica da fratura, a previsão da resistência de juntas coladas e FRP são de uma complexidade bem maior de que a dos metais. FRP são compostos por inúmeras fibras acopladas em lâminas que posteriormente são aglomeradas numa matriz polimérica resultando num material anisotrópico, no qual suas propriedades variam de acordo com o sentido de orientação das fibras. Por sua vez, as propriedades mecânicas de uma junta colada e por consequência sua resistência dependem também de diversos fatores como a escolha do material adesivo, material aderente, preparação da superfície, geometria da junta e condições ambientais de serviço (temperatura e umidade), o que torna a previsão de sua falha uma análise relativamente complexa (Banea e Da Silva, 2009).

Ao mudarmos do mundo dos metais para o mundo dos compósitos, nos deparamos com novas variáveis e novos comportamentos que para extrair o máximo desempenho em termos de resistência ou deformação, novos métodos e análises precisam ser estudados e avaliados. De acordo com Hinton et al (2004), embora muito desenvolvimento já tenha sido realizado desde o início das pesquisas com compósitos e juntas coladas, o grau de maturidade das ferramentas atuais para prever a máxima força, deformação e rigidez destes materiais, no caso geral, ainda necessitam um maior desenvolvimento.

De acordo com as ideias expostas, este trabalho tem como finalidade demonstrar um primeiro contato com materiais compósitos e juntas coladas, apresentando técnicas mais comuns de fabricação e de ensaios mecânicos para compreensão de seu comportamento quando submetidos à esforços de tração e cisalhamento bem como a análise de sua resistência à fratura.

2 - Disponível em: https://www.efatigue.com/glossary/?word=stress_concentration_factor – Acesso em Junho de 2018.

1.1 OBJETIVOS

Devido a suas vantagens comparadas aos métodos tradicionais de união mecânica, a utilização de juntas coladas em materiais compósitos só tende a crescer, entretanto, devido suas propriedades e modos de falha dependerem de diversos parâmetros (tratamento superficial, geometria, material, condições de trabalho, etc.) uma utilização mais ampla desta técnica ainda é restrita pela ausência de modelos de falhas confiáveis e métodos de ensaios não destrutíveis que garantam a qualidade da junta colada, fazendo com que por fatores de segurança seus projetos sejam superdimensionados elevando também os custos com ensaios experimentais.

O presente trabalho consiste na apresentação de métodos para fabricação de juntas simples coladas (*single lap joints*) para verificação da influência da espessura da camada adesiva na resistência da junta. Foram também abordadas técnicas de fabricação dos aderentes em compósitos e ensaios experimentais para obtenção das propriedades mecânicas tanto dos aderentes quanto do adesivo. As propriedades mecânicas dos aderentes e do adesivo foram obtidas através de ensaios realizados em uma máquina de tração universal com o auxílio da técnica de correlação digital de imagem, e a obtenção das energias de resistência à fratura (G_{Ic} , G_{IIc}) da camada adesiva foram calculadas através de ensaios *Double Cantilever Beam* (DCB) e *End Notched Flexure* (ENF). Devido as inúmeras configurações possíveis, os experimentos aqui estudados cobrem uma faixa restrita de materiais, configurações de lay-up e modos de falha. Porém, apresenta informações suficientes para compreensão do comportamento dos materiais compósitos e juntas coladas quando submetidos à esforços de tração e cisalhamento, possibilitando a obtenção de dados experimentais para futuros modelos numéricos.

1.2 TÓPICOS ABORDADOS

Conforme à quantidade de métodos de fabricação e ensaios utilizados, os assuntos aqui abordados foram divididos nos seguintes tópicos:

Parte 1: Métodos de Fabricação

1. Fabricação de placas de compósitos de fibra de vidro unidirecional-epóxi
 - a. Orientação 0°
 - b. Orientação 90°
 - c. Orientação $\pm 45^\circ$
2. Fabricação de placas em fibra de carbono unidirecional-epóxi (prepreg)
 - a. Orientação 0°
3. Fabricação de juntas coladas
4. Fabricação dos moldes para resina epóxi
5. Fabricação de corpos de prova de Resina Epóxi
6. Fabricação de corpos para ensaios DCB (Modo I)
7. Fabricação de corpos de prova para ensaios ENF (Modo II)

Parte 2: Ensaios experimentais

1. Obtenção das propriedades das placas de Fibra de Vidro-EP
 - a. Módulo de Elasticidade: E_{11}, E_{22}
 - b. Módulo de Cisalhamento: G_{12}
 - c. Coeficiente de Poisson: ν_{12}, ν_{23}
2. Obtenção das propriedades da resina epóxi (*Bulk Test*)
 - a. Módulo de Elasticidade
 - b. Módulo de Cisalhamento
 - c. Coeficiente de Poisson
3. Ensaios DCB: Modo I
 - a. Energia de resistência à fratura da camada adesiva: G_{Ic}
4. Ensaios ENF: Modo II
 - a. Energia de resistência à fratura da camada adesiva: G_{IIc}
5. Ensaio de juntas coladas (SLJ)

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo Hyer e White (1998) um compósito pode ser definido basicamente como um material multifásico no qual diferentes materiais são combinados para obtenção de um melhor desempenho e propriedades mecânicas do aqueles obtidos separadamente por cada um. Basicamente podemos separar a classe de compósitos em função de sua fase dispersa em dois grandes grupos: reforçados por fibras e reforçados por partículas, no qual devido a sua versatilidade de utilização em projetos estruturais os compósitos aqui estudados serão aqueles em que a fase dispersa se encontra na forma de uma fibra.

Os objetivos de projeto dos compósitos reforçados com fibras (FRP) visam obter um material com resistência e/ou rigidez elevadas em relação ao peso do material. FRP são na maioria compostos por diversas camadas de lâminas empilhadas formando um laminado. Muitas são as configurações possíveis de um laminado, dois laminados podem possuir o mesmo número e orientação de fibras, mas caso a ordem de empilhamento das lâminas sejam alteradas o material pode apresentar um comportamento completamente diferente (Figura 2-1):

Figura 2-1 – Diferença na resposta da deformação em laminados com diferentes orientações de fibras.

Fonte: Adaptado de (Hyer e White, 1998)

Da teoria da elasticidade sabe-se que a relação tensão-deformação no regime elástico de um material depende basicamente das seguintes propriedades: Relação de Poisson (ν_{ij}), Módulo de Elasticidade (E_i) e Módulo de Cisalhamento (G_{ij}). Ao analisarmos a mecânica de materiais reforçados com fibras diz-se que um material com propriedades únicas em cada um dos três eixos mutuamente ortogonais é chamado de material ortotrópico, portanto, uma lâmina é dita ser ortotrópica. Entretanto caso um FRP tenha suas lâminas empilhadas numa só direção, pode-se assumir que o material possui o mesmo comportamento nas direções 2 e 3 (Figura 2-2), como essas direções são perpendiculares à direção da fibra, assumir propriedades idênticas nessas direções é aceitável (Hyer e White, 1998). Assim, define-se uma lâmina como sendo ortotrópica e transversalmente isotrópica.

Figura 2-2 – Características básicas de uma lâmina de compósito reforçado por fibra

Fonte: Adaptado de (Hyer e White, 1998)

Para esta situação podemos assumir a seguinte relação entre as propriedades elásticas de um material compósito com fibras unidirecionais de mesmo material:

$$E_2 = E_3$$

$$\nu_{12} = \nu_{13}$$

$$G_{12} = G_{13}$$

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1 + \nu_{23})}$$

Percebe-se então que para um material transversalmente isotrópico, existirão apenas cinco propriedades independentes do material: $E_1, E_2, \nu_{12}, \nu_{23}$ e G_{12} .

2.1 UNIÕES ADESIVAS

Pode-se definir uma união adesiva como a técnica de união entre dois ou mais materiais, habitualmente referidos como aderentes (ou substratos) por meio de uma substância não metálica (adesivo), que, ao ser introduzida entre as superfícies dos aderentes, seja capaz de realizar a união dos mesmos e transmitir os esforços de um aderente para o outro (Brockmann *et al.*, 2008).

Devido aos custos e complexidade envolvidos na fabricação de grandes estruturas como sendo um componente único ou simplesmente por limitações geométricas, inúmeros produtos desenvolvidos pela indústria necessitam ser fabricados separadamente em componentes menores que posteriormente são unidos para a formação de uma estrutura completa. Para realizar a união destes componentes a opção mais comum utilizada são as conexões mecânicas como parafusos, rebites ou soldas, no entanto, devido as suas características particulares como versatilidade de uso e menor peso específico a união estrutural por adesivos se tornou muito comum nas últimas décadas, trazendo junto com esse crescimento a necessidade de um melhor estudo de seu comportamento.

Diversas são as vantagens da união por juntas adesivas, a Tabela 2-1 apresenta um resumo das suas principais vantagens e desvantagens:

Tabela 2-1 – Vantagens e desvantagens de uma junta colada

Vantagens
<ul style="list-style-type: none"> • A união é contínua, proporcionando uma distribuição uniforme de tensão entre os elementos. • Proteção à corrosão devido a fatores ambientais, agindo como uma camada protetora. • Maior resistência elétrica, proporcionando a união de metais distintos e diminuindo a corrosão galvânica. • Favorece a união de geometrias complexas, dando maior liberdade de design estrutural • Melhor acabamento superficial, proporcionando um visual regular e uniforme da superfície unida.

- Possibilita a união de materiais de pequena espessura.

Desvantagens

-
- Degradação das propriedades com a variação da temperatura.
 - Tempo de cura: Alguns adesivos necessitam de um certo tempo para cura completa, não sendo capaz de resistir à grandes esforços logo após sua aplicação.
 - Degradação de suas propriedades devido ao tempo e condições ambientais
 - Necessidade de tratamento superficial dos aderentes, pois superfícies contaminadas por óleo ou sujeira diminuem drasticamente a resistência da união adesiva.
 - Uniões permanentes, a classe de adesivos termorrígidos não possibilita a separação das peças previamente unidas sem danificar a estrutura.
-

Fonte: Adaptado de (Brockmann et al., 2008).

Para uma aplicação mais ampla de adesivos em estruturas primárias, uma análise de seu comportamento quando submetido a certos tipos de esforços, previsão de sua resistência e durabilidade devem estudados para que a mesma suporte os carregamentos aplicados e não falhe em serviço. Os carregamento mais comuns cujas uniões adesivas podem estar submetidas são esforços de tração, compressão, cisalhamento, rasgamento (*peel*) e clivagem, como visualizados na Figura 2-3:

Figura 2-3 – Principais tipos de tensões atuantes numa junta adesiva

Fonte: Imagem adaptada da internet³.

Ao se projetar uma junta, não se aconselha que o adesivo seja o elo fraco da união, esperando-se que o adesivo suporte o carregamento e que a falha ocorra fora da região do colada (*overlap*) (Broughton et al., 2002). Para minimizar o efeito de certos tipos de carregamento

3-Disponível em: <https://www.freemansupply.com/datasheets/adhesivesguide.pdf> - Acesso em Abril de 2018.

pode-se alterar a geometria da união adesiva como representado pela Figura 2-4, para que esforços de tração, clivagem e rasgamento (*peel*) sejam evitados ou minimizados, dando preferência para que o adesivo se mantenha num estado de cisalhamento ou compressão (Mallick, 1997). Porém, esta alteração geométrica deverá ser ponderada com os requisitos do projeto, pois ao alterarmos a geometria aumentamos também a complexidade e custo de fabricação envolvidos.

Figura 2-4 – Exemplos de tipos de geometrias de juntas coladas

Fonte: Adaptado de (Niu, 1992)

Single e Double Lap Joints (DLJ) são as configurações mais utilizadas devido sua simplicidade de montagem, menor custo de fabricação e disponibilidade de métodos analíticos para avaliação da distribuição de tensão na camada adesiva. Como demonstrado pela Figura 2-4 SLJ e DLJ são mais suscetíveis a falha ao peel devido assimetria do carregamento e diferença de rigidez entre os aderentes da junta. Entretanto caso o sentido do carregamento seja conhecido, uma simples alteração no design das juntas pode também alterar o tipo de esforço no qual ela está submetida, aumentando assim a resistência da mesma (Figura 2-5):

Figura 2-5 – Aperfeiçoamento na resistência de uma junta Single Lap Joint (SLJ)

Fonte: Imagem adaptada da internet².

2.2 MODOS DE FALHA DE JUNTAS COLADAS

Segundo Banea e Da Silva (2009) os principais modos de falha de uma junta, representados pela Figura 2-6, são determinados pela qualidade da união adesiva (Forças de adesão e Forças de coesão), geometria da junta colada e tipos de carregamento.

Figura 2-6 – Principais tipos de falha de juntas simples coladas

Fonte: Adaptado de (Banea e Da Silva, 2009)

Falhas adesivas são caracterizadas pela falha na interface adesivo/aderente, no qual o adesivo segue inteiramente unido a uma das faces do aderente. Este tipo de falha ocorre com cargas inferiores à carga máxima suportada pela junta, sendo sua causa atribuída a defeitos no processo de fabricação devido a um tratamento superficial de baixa qualidade, prejudicando o alcance máximo das forças de adesão. As forças de adesão são diretamente relacionadas as

condições superficiais do aderente como rugosidade e presença de contaminantes (óleo, sujeira). De acordo com a Figura 2-7, uma superfície rugosa possui mais “vales” e “picos” que aumentam a área de contato entre adesivo/aderente, proporcionando uma melhor resistência ao cisalhamento (Petrie, 2000).

Figura 2-7 – Influência da rugosidade da superfície do aderente na resistência de uma junta adesiva: (a) Maior resistência ao cisalhamento (b) Menor resistência ao cisalhamento

Fonte: Adaptado de (Petrie, 2000)

De acordo com a Figura 2-8 a limpeza da superfície do aderente também exerce grande influência na resistência da camada adesiva, a presença de contaminantes na superfície reduzem a molhabilidade do adesivo, diminuindo sua penetração no aderente e consequentemente reduzindo sua capacidade de adesão.

Figura 2-8 – Influência de contaminantes na superfície do aderente

Fonte: Adaptado de (Petrie, 2000)

No ponto de vista da resistência de um material, pode também ocorrer a falha estrutural do aderente. Em aderentes metálicos a falha do aderente devido à tensão longitudinal é a mais

comum, no qual ocorre o rompimento transversal do mesmo, por outro lado, se compósitos poliméricos reforçados por fibras são utilizados como aderentes, deve-se atentar mais a tensões de rasgamento nas extremidades do adesivo, pois estas tensões podem gerar falha por delaminação ou rompimento das fibras, como representado pela Figura 2-9:

Figura 2-9 – Falha de aderentes compósitos reforçados por fibra

Fonte: Adaptado de (Niu, 1992).

Por último temos que uma junta pode romper-se devido a falha coesiva, caracterizada pelo rompimento da camada adesiva, ou seja, é inerente a natureza química do material e sua habilidade de resistir certos tipos de carregamento na presença de uma trinca, no qual após a falha, traços do adesivo podem ser encontrados nas faces dos dois aderentes. A Figura 2-10 exemplifica esquematicamente a interação de forças coesivas e de adesão numa junta colada.

Figura 2-10 – Exemplo de forças coesivas e de adesão

Fonte: Adaptado de (RUDAWSKA, 2016)

Desta maneira percebe-se que muitas são as variáveis que caracterizam as propriedades de uma boa adesão, dentre elas podemos citar espessura dos aderentes e adesivos, comprimento da região a ser colada (*overlap*), geometria da junta (simples, dupla, etc.), tratamento superficial, materiais a serem unidos, propriedades mecânicas do adesivo e do aderente, sequência de empilhamento e orientação das fibras (no caso de aderentes em FRP) e fatores ambientais como umidade e temperatura (Budhe et al., 2017). Juntos, todos esses aspectos contribuem para a complexidade da análise dos máximos esforços suportados e escolha adequada do critério de falha.

2.3 MECÂNICA DA FRATURA: CRITÉRIOS DE RUPTURA

Na mecânica da fratura, a tenacidade à fratura descreve a capacidade de um material resistir à fratura na presença de uma trinca. De modo geral dois são os critérios utilizados para medir a severidade da presença de uma trinca em uma estrutura (Anderson, 2017):

- Definido pelo campo de tensões na ponta de uma trinca: representado pelo fator de intensidade de tensão K , ou pela resistência à fratura K_c , quando K atinge seu valor crítico.
- Definido por métodos energéticos: representado pela taxa de liberação de energia de deformação G , que pode ser definida como a quantidade de energia liberada pela propagação de uma trinca por unidade de área, ou pela energia crítica de resistência à fratura (G_c) que pode ser definida como valor limite de G antes da propagação de uma trinca.

De acordo com a abordagem energética, para materiais frágeis, a trinca se propaga quando a energia disponível no sistema é maior do que a energia necessária para criar duas novas superfícies de fratura. Para materiais dúcteis, outras formas de dissipação energética devem ser considerados (como a deformação plástica) para acompanhar corretamente o crescimento da trinca.

De acordo com a Figura 2-11, três são os modos no qual uma trinca pode ser solicitada. O Modo I é o modo de solicitação mais comum e é conhecido como modo de abertura, no qual ocorre a separação das faces de uma trinca sem que ocorra deslizamento entre elas. O Modo II é caracterizado pelo deslizamento das superfícies da trinca, no qual as mesmas deslizam uma sobre a outra no sentido oposto, e o Modo III identificado pelo rasgamento da superfície.

Figura 2-11 – Modos de solicitação de uma trinca: (a) Modo de abertura: Modo I. (b) Modo de cisalhamento: Modo II. (c) Modo de Rasgamento: Modo III.

Fonte: Adaptado de (Kinloch, 2012)

O cálculo de ambas energias de resistência à fratura (G_{Ic} e G_{IIc}) são fundamentadas na equação de Irwin-Kies (1964) baseada na perda de rigidez de um corpo de prova devido ao crescimento de uma trinca (Figura 2-12)

Figura 2-12 – Perda de rigidez devido ao crescimento de trinca

Fonte: Adaptado de Irwin e Wells (1965)

Dado um corpo contendo uma trinca inicial de tamanho (a), Irwin constatou que caso ocorra um crescimento infinitesimal (da) desta mesma trinca sem a ocorrência de um deslocamento dos braços do corpo de prova num ensaio de tração, então a energia liberada para o crescimento desta trinca podia ser relacionada ao tamanho da área triangular ($A_T \cong G da$) representada pelas linhas inclinadas do gráfico Força vs. Deslocamento (P vs. δ) da Figura 2-12. Irwin também constatou que área retangular ($A_R = d\delta P$) representada pelas linhas horizontais do mesmo gráfico era da ordem de 2 vezes o tamanho da área triangular (linhas inclinadas), ou seja:

$$A_T = \frac{A_R}{2} \rightarrow \text{ou } G \approx \frac{P}{2} \frac{d\delta}{da} \quad (1)$$

Seja P definido como uma força por uma largura unitária ($B = 1$), e a flexibilidade (*Compliance*) de um sistema definido por ($C = \delta/P$), então para um deslocamento infinitesimal ($d\delta$):

$$d\delta = dCP \quad (2)$$

Substituindo (2) em (1) obtêm-se a equação (3) também conhecida como equação de Irwin-Kies ou *Compliance Calibration Method* (CCM) (Kanninen e Popelar, 1985).

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (3)$$

Os ensaios mais utilizados para cálculo e obtenção das taxas de liberação de energia de deformação relacionadas ao Modo I (G_I) e ao Modo II (G_{II}) são o ‘*Double Cantilever Beam*’ (DCB) e o ‘*End Notched Flexure*’ (ENF) respectivamente. Para ambos ensaios utiliza-se um corpo de prova provido de uma trinca inicial, que após a aplicação de uma carga, relaciona-se o valor da carga aplicada com a variação de sua rigidez de acordo com o crescimento da trinca. No ensaio DCB o corpo de prova é tracionado pelas suas pontas, provocando a abertura da trinca e separação das superfícies. No ensaio ENF o corpo de prova é apoiado e flexionado através de uma carga central fazendo com que ocorra apenas o efeito de cisalhamento e propagação da trinca entre as superfícies da matriz ou camada adesiva. A Figura 2-13 representa esquematicamente os ensaios DCB e ENF:

Figura 2-13 – Representação dos ensaios *Double Cantilever Beam* e *End Notched Flexure*.

Fonte: Adaptado de (De Moraes et al., 2015).

Devido à presença das tensões de cisalhamento e peel na camada adesiva, a análise de fratura de juntas coladas pode também ser considerado um problema no Modo misto (I+II), ou seja, situação na qual a trinca é solicitada simultaneamente no Modo I e II. Para tal situação (Reeder e Rews, 1990) desenvolveram um dispositivo denominado ‘*Mixed-Mode Bending*’ (MMB) capaz de calcular as relações entre G_I e G_{II} de uma trinca quando solicitada em modo misto. A Figura 2-14 representa o dispositivo MMB, no qual o posicionamento do braço representado por c fornece relações do modo predominante (G_{II}/G_T^*). O Modo II pode também ser simulado configurando a distância de aplicação da força no centro do corpo de prova ($c = 0$) e o Modo I obtido através da remoção da barra superior e tração da extremidade que possui a falha.

$$*G_T = G_I + G_{II}$$

Figura 2-14 – Representação esquemática do dispositivo MMB

Fonte: Adaptado de (De Moraes et al., 2015)

No entanto, os métodos padronizados disponíveis baseados nesses testes são complexos e dependentes da medição em tempo real do comprimento de trinca durante os ensaios, o que pode levar a uma interpretação incorreta da real posição da ponta da trinca. Para contornar essas dificuldades, de Moura e de Moraes (2008) propuseram um método baseado na abertura equivalente da trinca, posteriormente denominado *Compliance-based Beam Method* (CBBM), desenvolvido com base na equação clássica de Irwin-Kies (Kanninen e Popelar, 1985) mais conhecida como *Compliance Calibration Method* (CCM) e na correção da teoria das vigas proposta por Wang e Williams (1992) denominada *Corrected Beam Theory* (CBT). O CBBM leva em consideração efeitos desprezados nos métodos anteriores como concentração de tensão próximas à ponta da trinca (*Fracture Process Zone* – FPZ) devido a existência de uma zona plástica e efeitos de rotação que não estão incluídas nas equações desenvolvidas pela teoria das vigas. Este método tem como objetivo calcular um comprimento de trinca equivalente evitando a medição em tempo real do comprimento da trinca durante ensaio, permitindo obter a energia crítica de resistência à fratura apenas através da curva P vs δ (Chaves et al., 2014).

2.3.1 Energia de resistência a fratura: Modo I

De acordo com De Moura et al. (2008) a energia de resistência à fratura ao Modo I pode ser obtida pelo método CBBM através do ensaio DCB (Figura 2-15), no qual o deslocamento δ do braço superior do corpo de prova devido a carga P pode ser descrito pelo teorema de Castigliano como:

$$\delta = \frac{8Pa^3}{E_f Bh^3} + \frac{12Pa}{5BhG_{13}} \quad (4)$$

Esta equação nos fornece uma aproximação da teoria das vigas e nos permite obter a flexibilidade ($C = \delta/P$) do corpo de prova:

$$C = \frac{8a^3}{E_f Bh^3} + \frac{12a}{5BhG_{13}} \quad (5)$$

Figura 2-15 – Características geométricas do ensaio *Double Cantilever Beam*

Fonte: Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading (De Moura, M., Campilho, R., et al., 2008).

No qual:

P	Carga Aplicada
δ	Deslocamento
B	Largura
L	Comprimento do corpo de prova
t	Espessura da camada adesiva
h	Espessura do aderente
a	Comprimento de trinca
a_0	Comprimento de trinca inicial
E_f	Módulo de Flexão
G_{ij}	Módulo de Cisalhamento

Sabe-se que para materiais compósitos em flexão o módulo de elasticidade E_1 não pode ser equiparado ao módulo de flexão E_f e que o desenvolvimento da teoria das vigas também não considera efeitos de deflexões e rotações que ocorrem na ponta da trinca ($|\Delta|$), bem como deformações plásticas (FPZ) referentes ao processo de fratura da matriz ou adesivo. Para evitar tais problemas, para o cálculo de G_{Ic} em materiais compósitos estes efeitos devem ser considerados e adicionados ao comprimento observado da trinca, obtendo um comprimento equivalente de trinca definido por ($a_{eq} = a + |\Delta| + FPZ$).

Para obtenção do módulo de flexão corrigido (E_{1f}), substitui-se a flexibilidade (C) e o comprimento de trinca (a) respectivamente pela flexibilidade inicial (C_0) (obtido através dos ensaios experimentais) e por uma correção ao tamanho inicial da trinca ($a_0 + |\Delta|$), manipulando a equação (5) obtêm-se:

$$E_{1f} = \left(C_0 - \frac{12(a_0 + |\Delta|)}{5BhG_{13}} \right)^{-1} \frac{8(a_0 + |\Delta|)^3}{Bh^3} \quad (6)$$

No qual a correção (Δ) devido a deflexões e rotações na ponta da trinca, demonstrada por Hashemi et al. (1990), pode ser calculada como:

$$\Delta = h \sqrt{\frac{E_{1f}}{11G_{13}}} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right] \quad (7)$$

Onde:

$$\Gamma = 1.18 \frac{\sqrt{E_{1f} E_2}}{G_{13}} \quad (8)$$

No qual para obtenção de E_f um processo iterativo deverá ser feito entre as equações de (6) à (8).

O comprimento equivalente de trinca (a_{eq}) pode ser obtido substituindo (a) por (a_{eq}) e (E_1) por (E_{1f}) em (5) resultando no seguinte polinômio:

$$\alpha a_{eq}^3 + \beta a_{eq} + \gamma = 0 \quad (9)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{1}{E_{1f} Bh^3}; \beta = \frac{12}{5BhG_{13}}; \gamma = -C \quad (10)$$

Solucionando este polinômio de terceiro grau (Eq.(9)) obtêm-se a seguinte expressão para o cálculo do comprimento de trinca equivalente:

$$a_{eq} = \frac{1}{6\alpha} A - \frac{2\beta}{A} \quad (11)$$

No qual:

$$A = \left(\left[-108\gamma + 12\sqrt{3\left(\frac{4\beta^3 + 27\gamma^2\alpha}{\alpha}\right)} \right] \alpha^2 \right)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

Portanto a energia de fratura no modo I pode agora ser obtida através da equação de Irwin-Kies (3) substituindo (a_{eq}) e (E_{1f}) em (5), derivando obtêm-se (13):

Irwin-Kies:

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (3)$$

Energia de resistência à fratura: Modo I:

$$G_{IC} = \frac{6P^2}{B^2h} \left(\frac{2a_{eq}}{E_{1f}h^2} + \frac{1}{5G_{13}} \right) \quad (13)$$

2.3.2 Energia de resistência a fratura: Modo II

O procedimento para obtenção de G_{IIc} segue o mesmo princípio dos métodos aplicados pra cálculo de G_{Ic} . Basicamente a geometria dos corpos de prova são as mesmas, com a diferença da aplicação do carregamento. O ensaio mais aceito atualmente para obtenção de G_{IIc} é o *End Notched Flexure* (ENF), representado pela Figura 2-16, que consiste de duas vigas bi-apoiadas unidas por uma camada adesiva (t) de espessura constante e provida de uma trinca inicial (a_0), no qual a aplicação de uma carga (P) provoca o deslocamento em flexão (δ) da viga, provocando o cisalhamento na camada adesiva.

Figura 2-16 - Características geométricas do ensaio *End Notched Flexure* (ENF)

Fonte: Adaptado de De Moura et al.(2009)

De acordo com De Moura et al. (2009) a energia de resistência à fratura ao Modo II também pode ser obtida pelo método CBBM através do ensaio ENF. Do teorema de Castigliano, o deslocamento do ponto de aplicação do carregamento pode ser definido por:

$$\frac{\delta}{P} = C = \frac{3a^3 + 2L^3}{8E_1 B h^3} + \frac{3L}{10G_{13} B h} \quad (14)$$

No qual o módulo de flexão E_{1f} pode ser calculado a partir da Eq. (14) substituindo a flexibilidade inicial C_0 obtida experimentalmente no local de C e o comprimento de trinca a por a_0 obtêm-se:

$$E_{1f} = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8Bh^3 C_{0corr}} \quad (15)$$

No qual C_{0corr} é reconhecido como uma correção da flexibilidade inicial, caracterizada pelo agrupamento dos termos relativos a flexibilidade inicial C_0 .

$$C_{0Corr} = C_0 - \frac{3L}{10BhG_{13}} \quad (16)$$

Analogamente, agrupando (11) em função da flexibilidade C durante a propagação, obtêm-se uma correção da flexibilidade do sistema C_{Corr} :

$$C_{Corr} = C - \frac{3L}{10BhG_{13}} \quad (17)$$

Um comprimento de trinca equivalente a_{eq} pode então ser obtido adicionando-se à correção Δ_{FPZ} ao comprimento real da trinca a na equação (14), resultando em:

$$a_{eq} = a + \Delta_{FPZ} = \left[\frac{C_{Corr}}{C_{0Corr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{C_{Corr}}{C_{0Corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{1/3} \quad (18)$$

Analogamente, a energia de fratura no modo II pode agora ser obtida através da equação de Irwin-Kies (3) substituindo (a_{eq}) e (E_{1f}) em (14), derivando obtêm-se (19):

Irwin-Kies

$$G_{IIC} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (3)$$

Energia de resistência à fratura: ModoII:

$$G_{IIC} = \frac{9P^2 a_{eq}^2}{16B^2 E_{1f} h^3} \quad (19)$$

2.4 MECÂNICA DO CONTÍNUO: MÁXIMAS TENSÕES

De forma resumida, a abordagem a ser tomada na análise dos carregamentos numa junta pode ser analítica através do desenvolvimento de equações matemática ou numérica por elementos finitos. Historicamente a forma analítica foi a primeira a ser abordada por pesquisadores, no qual os primeiros estudos buscavam analisar a máxima tensão atuante na junta adesiva através de sua distribuição ao longo da camada adesiva. Uma das primeiras pesquisas na área foi de Volkersen, seu estudo considerava que o adesivo deformava-se apenas por cisalhamento e o aderente apenas sob tensão. Nesta análise, como pode ser observado na Figura 2-17, no ponto A ocorre a máxima tensão no aderente, no qual a mesma reduz gradativamente até ser considerada nula na superfície livre (ponto B), conseqüentemente a deformação do aderente acompanha este efeito, sendo máxima em A e nula em B. Esta variação

na deformação no aderente provoca uma deformação cisalhante não uniforme da camada adesiva, sendo máximo nas extremidades da região colada e mínimo na região central (Volkersen, 1938).

Figura 2-17 – Deformação diferencial numa junta simples colada

Fonte: (Da Silva et al., 2009)

Entretanto, numa junta simples em consequência as deformações não uniformes do aderente e assimetria da linha resultante do carregamento, ocorre nos aderentes uma tendência à flexão fazendo com que surja uma tensão na direção através da espessura conhecida como tensão de arrancamento ou *peel* (Goland e Reissner, 1944). A Figura 2-18 representa o comportamento clássico das distribuições de tensões de cisalhamento e peel ao longo da região colada de uma junta:

Figura 2-18 – Distribuições de tensões na camada adesiva

Fonte: Adaptado de (Da Silva et al., 2009)

Apesar dos avanços do estudo na área, algumas limitações nos trabalhos de Volkersen e Goland e Reissner impossibilitavam uma análise mais profunda da junta. Como visto na Figura 2-18, as máximas tensões ocorrem nas extremidades da região colada, o que viola a condição de equilíbrio, também não consideravam variações de tensão na direção através da espessura do adesivo e deformações normais e cisalhantes na direção através da espessura do aderente. Posteriormente Hart-Smith aperfeiçoou os modelos de Goland e Reissner analisando em detalhes diversas geometrias para juntas coladas, considerando características não lineares de tensão/deformação do adesivo e aderente bem como efeitos térmicos resultantes do processo de cura (Hart-Smith, 1973).

Por se tratar de uma abordagem matemática, os métodos analíticos possuem a vantagem de ser uma opção rápida e de baixo custo para otimização de projetos de juntas coladas. Características geométricas e propriedades dos materiais podem ser facilmente alteradas para obtenção de resultados rápidos e precisos sobre o desempenho da junta, entretanto, sua utilização é mais indicada para juntas de simples geometria, assumindo algumas simplificações e para uma análise linear elástica. À medida que geometrias mais complexas, materiais compósitos e deformações plásticas são considerados no projeto de uma junta, seus desenvolvimentos matemáticos bem como definições de condições de contorno se tornam cada vez mais complexos, para tais condições uma abordagem numérica pelo método dos elementos finitos é mais apropriada.

Devido a sua versatilidade em analisar esforços em estruturas com praticamente qualquer tipo de geometria e levando em conta efeitos não lineares do material, o método dos elementos finitos (MEF) vem a ser uma ótima ferramenta para análise de juntas coladas. Com ela, todas as dificuldades inerentes dos métodos analíticos podem ser superadas e uma análise completa, levando em consideração efeitos de flexão e deformação do aderente, efeitos de borda e comportamentos não lineares do aderente e adesivo podem ser calculados simultaneamente numa simulação.

2.5 MODELO DE ZONA COESIVA

No projeto de uma junta ideal seu objetivo é de que o adesivo seja capaz de suportar os esforços e transmitir os carregamentos, sendo a análise da falha coesiva a determinante para previsão da tensão máxima suportada pela junta. Entretanto, as cargas e tensões atuantes na camada adesiva dependem também do comportamento do aderente, portanto, a análise dos efeitos do carregamento numa junta deve ser feita de forma conjunta para que seja possível prever o carregamento máximo suportado pela mesma.

Atualmente, diversos pesquisadores investigam qual o melhor critério de falha a ser adotado, uma previsão correta da carga máxima suportada por uma junta é fundamental para redução dos gastos empregados com ensaios experimentais. De acordo com Odi e Friend (2004) vários são os critérios de falha utilizados para análise de juntas coladas, dentre eles podemos citar critérios baseados na mecânica do contínuo (máxima tensão ou deformação), mecânica da fratura e mecânica do dano (modelo de zonas coesivas).

Segundo o trabalho de De Moura, M. F. et al. (2008), as abordagens baseadas na mecânica do contínuo apresentam um obstáculo na aplicação dos critérios devido ao fato da existência de comportamentos singulares de tensão/deformação nas extremidades da junta, forçando com que haja um grande refinamento da malha nessas regiões. Para superar tais dificuldades do refinamento de malha, vários autores (Clark e McGregor, 1993), (Towse et al., 1997) e (Zhao et al., 2011), aplicaram o critério da zona finita, onde a análise de máxima tensão/deformação é feita a uma certa distância da extremidade da junta (região de tensões características). Este critério considera a falha da junta quando o adesivo estiver submetido às condições limites na nova região definida, porém, a escolha desta região depende de ensaios com materiais e juntas já caracterizadas anteriormente, o que restringe a sua utilização.

Critérios baseados na mecânica da fratura também possuem suas limitações, pois partem do princípio do material adesivo já possuir alguma descontinuidade inerente do seu processo de fabricação ou geradas em serviço. A determinação da localização e comprimento inicial desta trinca estão entre as limitações deste método, de maneira geral, pode-se afirmar que os critérios baseados na mecânica da fratura estão fundamentalmente direcionados para a propagação das trincas em vez da sua iniciação.

Os modelos de zonas coesivas permitem contornar as dificuldades inerentes aos dois métodos anteriores e explorar seus aspectos positivos. Assim, com a utilização de modelos coesivos é possível prever a iniciação do dano usando um critério de máximas tensões baseado na mecânica do contínuo e a sua propagação e ruptura através de um critério baseado na mecânica da fratura, tornando-se desnecessária a consideração de um defeito inicial e superando os problemas de dependência do refinamento de malha nas extremidades da junta (De Moura, M. F. et al., 2008). A Figura 2-19 representa graficamente o conceito do modelo de dano coesivo demonstrando a combinação do modelo da mecânica do contínuo e mecânica da fratura.

Figura 2-19 – Representação gráfica de um modelo de zona coesiva

Fonte: Adaptado de (Banea e Da Silva, 2009).

Uma das características mais importante da modelagem de zonas coesivas (CZM) é a sua capacidade prever o início do dano no material sem a necessidade da existência de uma trinca inicial, simulando sua propagação até que ocorra a fratura. Entretanto, é necessário o conhecimento prévio da região (ou zona) onde a falha está mais suscetível a ocorrer para

alocação dos elementos coesivos, porém, para a análise de juntas coladas esta região pode ser frequentemente localizada na camada adesiva (De Moura, M., Gonçalves, J., et al., 2008).

Outra grande vantagem do CZM é a sua possibilidade de implementação em softwares de elementos finitos, como o ABAQUS® que fornece ferramentas e bibliotecas de leis coesivas. No método de elementos finitos seu funcionamento parte do princípio da inserção de uma interface coesiva separada por uma espessura na região propícia a falha, no qual a mesma pode interagir com elementos rígidos ou deformáveis, simulando o dano através da deterioração progressiva de sua interface (Figura 2-20).

Figura 2-20 – Exemplo de malha coesiva: a) Modelo 2D – 4Nós; b) Modelo 3D – 8 Nós.

Fonte: Adaptado de (Burlayenko e Sadowski, 2008).

No caso bidimensional, a interface coesiva é composta por dois elementos de linha separados por uma espessura, e no caso tridimensional por duas superfícies separadas por uma espessura. Caso a zona coesiva represente uma camada adesiva com espessura finita, as propriedades mecânicas do material podem ser utilizadas diretamente para modelagem da resposta constitutiva do elemento coesivo (Systèmes, 2012).

O movimento relativo entre a parte superior e inferior do elemento coesivo na direção através da espessura representa o efeito de abertura ou fechamento da interface. Caso ocorra a movimentação das partes com referência ao plano médio, este movimento representará um efeito de cisalhamento longitudinal ou transversal. Alongamento e cisalhamento do elemento no plano médio estão associados à deformações de membrana (Burlayenko e Sadowski, 2008).

Para simulação da falha progressiva de uma camada adesiva, pode ser utilizada uma zona coesiva no qual o comportamento do dano é expresso por uma lei de tração-separação bilinear. A lei de tração-separação pode ser definida por três parâmetros coesivos: a máxima

tensão suportada pelo adesivo (σ_u), o deslocamento relativo à fratura (δ_u) e a sua resistência à fratura (G_c). Assim, durante a simulação, ao atingir o critério de máxima tensão é iniciado um processo de perda de resistência do elemento até a separação total da zona coesiva, governado pelos parâmetros da mecânica da fratura (De Moura, M., Gonçalves, J., et al., 2008).

Além das propriedades do adesivo, uma das principais características na análise de uma falha coesiva é o seu comportamento à fratura, que pode ser classificada como dúctil ou frágil, consequentemente a abordagem matemática e critérios de falha serão diferentes para cada caso. Adesivos epóxis são, em sua grande maioria, dúcteis, mas podem exibir também comportamentos frágeis em baixas temperaturas ou de acordo com sua composição química. Adesivos que rompem de maneira frágil possuem um comportamento linear-elástico até o ponto de colapsarem e tendem a falhar de forma repentina, sem exibição de efeitos de deformação plástica. Adesivos com características plásticas possuem comportamento elasto-plástico e geralmente suportam maiores carregamentos, geralmente exibindo um modo de falha progressiva. A escolha da lei de tração separação utilizada no modelo depende do comportamento do material à fratura. Adesivos rígidos são bem representados por uma lei triangular, já adesivos dúcteis são melhores representados por uma lei trapezoidal (Campilho et al., 2013).

No software ABAQUS® estão disponíveis em sua biblioteca três leis de tração-separação: triangular, linear-exponencial e trapezoidal (Figura 2-21).

Figura 2-21 – Leis de tração separação disponíveis no software ABAQUS®.

Fonte: Adaptado de (Campilho et al., 2013)

O comportamento linear elástico do CZM pode ser definido por uma matriz constitutiva elástica no qual relaciona tensão/deformação em tração e cisalhamento (Campilho et al., 2013):

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K} \boldsymbol{\delta} \quad (20)$$

No qual:

t_n	Tensão coesiva à tração
t_s	Tensão coesiva à cisalhamento
δ_n	Deformação coesiva normal
δ_s	Deformação coesiva cisalhante

Uma aproximação razoável aos termos da matriz de rigidez $[\mathbf{K}]$ para adesivos de pequena espessura é $K_{nn} = E$, $K_{ss} = G$ e $K_{ns} = 0$.

Para as três geometrias da lei tração-separação o início do dano ($t_{n,s} = t_{n,s}^0$) pode ser definido pelo seguinte critério quadrático de tensão :

$$\left\{ \frac{t_n}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1 \quad (21)$$

Após alcançar o ponto de iniciação do dano, o material entra em um processo de perda de rigidez devido à propagação dos danos internos. Este crescimento do dano pode ser comparado a taxa de liberação de energia de deformação ($G_{I,II}$) pela propagação da trinca, no qual a separação total da zona coesiva pode ser definida pelo seguinte critério de resistência a fratura (Systemes, 2012):

$$\frac{G_I}{G_{Ic}} + \frac{G_{II}}{G_{IIc}} = 1 \quad (22)$$

No qual:

G_{Ic}	Energia de resistência à fratura ao Modo I
G_{IIc}	Energia de resistência à fratura ao Modo II

3 METODOLOGIA

No meio científico a análise experimental é de extrema importância para validação dos modelos numéricos em elementos finitos pois muitas vezes as simplificações adotadas no modelo diferem do comportamento estrutural na prática. No mundo real diversas variáveis estão presentes que dificultam sua reprodução. O controle das variáveis, como temperatura, umidade, qualidade material, equipamentos e procedimentos experimentais são de extrema importância para uma reprodução aproximada das hipóteses adotadas, sendo muitas vezes de interesse alterar alguns parâmetros para verificar seus impactos nos resultados, fazendo com que os erros inerentes ao processo sejam minimizados e melhores resultados possam ser obtidos.

Neste capítulo serão apresentados métodos viáveis e concisos de fabricação para ensaios mais comuns em compósitos, como ensaios de tração, métodos de correlação de imagens, ensaios de Modo I e Modo II, controle de espessura em juntas coladas ou corpos de prova unidos por adesivo. Todos estes processos consistem em auxiliar e otimizar o tempo do pesquisador.

A primeira metodologia abordada será a fabricação da placas em compósitos de fibra de vidro-epóxi, no qual uma informação importante antes de iniciar o processo do corte das fibras é o conhecimento prévio da espessura desejada do corpo de prova para estimativa da quantidade de corte de tecido. Esta estimativa de espessura pode ser feita com base nas normas técnicas disponíveis, nos quais as mesmas fornecem recomendações dimensionais dos corpos de prova para diferentes tipos de ensaio. Com base nestas normas a Tabela 3-1 nos fornece as referências utilizadas nesta pesquisa e as respectivas espessuras recomendadas:

Tabela 3-1 – Método de seleção de espessura para fabricação das placas

Material	Orientação	Tipo de Ensaio	Norma ASTM	Espessura [mm]
Fibra de Vidro Unidirecional	0°	Tração	D3039-17	2,5
Fibra de Vidro Unidirecional	90°	Tração	D3039-17	5,0
Fibra de Vidro Unidirecional	$\pm 45^\circ$	Tração	D3518 – 01	2,5
Fibra de Vidro Unidirecional	0°	Tração: Juntas Coladas	D5868 - 14	2,5
Fibra de Carbono Unidirecional	0°	Cisalhamento (MODO I)	D5528-13	1,5
Fibra de Carbono Unidirecional	0°	Cisalhamento MODO II	D7905M-14	2,5

Fonte: Autor (2017)

3.1 FABRICAÇÃO DE PLACAS DE FIBRA DE VIDRO-EPÓXI

Para a fabricação das placas de fibra de vidro-epóxi, foi adotado um método de empilhamento manual (*hand lay-up*) seguido por um processo de infusão com resina epóxi camada à camada. Este método foi escolhido devido ser uns dos mais utilizados e por ser de fácil reprodução em pequena escala. Dentre as limitações desse método podemos destacar a precisão na orientação das fibras ao empilharmos as lâminas. A compactação das fibras e remoção do excesso de resina foi realizada por um sistema de pressão à vácuo e etapa de cura realizada com temperatura controlada em estufa. A seguir serão descritos com detalhe todos os processos utilizados para a fabricação da placa, desde o corte do tecido de fibra de vidro até etapa de cura, começando pelos materiais utilizados que podem ser conferidos na Tabela 3-2:

Tabela 3-2 – Materiais utilizados para fabricação de placas de fibra de vidro

Material	Tipo/Modelo	Fabricante
Fibra de Vidro	Unidirecional	TEXIGLASS
Resina Epóxi	EPHOXAL RAL	EPHOXAL
	120	
Endurecedor	EPHOXAL HAL	EPHOXAL
	115	
Fita Adesiva	Crepe	ADERE
Tesoura	P/ Tecido	Mondial
Estilete	Industrial	
Placa de vidro		
Antiaderente	Politetrafluoretileno	Teflon®
Borracha fixação	Map-Tape	MAP
Antiaderente	Pell-Ply	MAP
Tecido Absorção	MAP-Bleed	MAP
Tela perfurada	Plástica	
Manta Plástica	Resistente a temperaturas até 200°C	
Bomba de Vácuo		
Estufa		
Caneta	Tinta ponta fina (marca CD)	Pilot
Papelão		
Espátula	Plástica/Metal	
Rolo	Plástico	
Balança Digital	Modelo 3300	Marte Científica

Fonte: Autor (2018)

3.1.1 Corte da fibra de vidro

O processo de fabricação inicia-se com o corte do tecido de fibra de vidro. O tecido é aberto sobre a mesa e com o auxílio de uma fita crepe é fixado nas extremidades livres. Utilizando uma placa gabarito já pré-dimensionada com as dimensões desejadas, são feitas marcações no tecido com caneta de tinta e para evitar o desalinhamento das fibras durante o corte, cola-se fita crepe nas linhas pré-marcadas como indica a Figura 3-1. Nesta etapa a dimensão máxima da placa estará limitada ao tamanho da superfície onde a mesma será montada, ou limitada às dimensões máximas da estufa. Para este trabalho foi utilizada uma placa gabarito com as dimensões de 38x38 cm.

Figura 3-1 – Representação de corte da fibra de vidro unidirecional

Fonte: Autor (2017)

O corte da fibra pode ser realizado com objetos cortantes comuns como estilete ou tesoura, sendo o segundo menos indicado por perder o “fio” de corte com frequência. Ao final do corte é recomendada a permanência da fita crepe colada na fibra de vidro como representado pela Figura 3-2, este procedimento irá garantir um melhor manuseio das lâminas após o corte.

Figura 3-2 – Marcações para o corte de fibra de vidro

Fonte: Autor (2017)

3.1.1 Corte das camadas auxiliares

Após o corte da fibra de vidro, inicia-se a etapa de corte das camadas que auxiliarão a qualidade e acabamento da placa de compósito. A dimensão do corte de cada um dos materiais dependerá de duas dimensões de referência: a das lâminas de fibra de vidro e da superfície onde as lâminas serão empilhadas. Para uma superfície de vidro plana de dimensões 55x45 cm selecionada para empilhamento das lâminas, pode-se utilizar a Tabela 3-3 como referência dimensional de corte para cada um dos tecidos auxiliares:

Tabela 3-3 – Dimensões recomendadas para corte das camadas auxiliares

Material	Função	Dimensão de Referência	Dimensão de Corte
Teflon	Antiaderente	Superfície de empilhamento – 2cm	53x43 cm
Pierced Ply	Antiaderente e Passagem de Gases e Resina	Dimensão das Lâminas + 2 cm	40x40 cm
Peel Ply	Antiaderente e Passagem de Gases e Resina	Dimensão das Lâminas + 2 cm	40x40 cm
MAP-Bleed	Absorção do excesso de resina.	Dimensão das Lâminas + 2 cm	40x40 cm
Tela Plástica	Passagem de gases	Dimensão das Lâminas + 2 cm	40x40 cm
Manta Plástica	Pressurização do sistema	Superfície de empilhamento + 4 cm	59x49 cm

Fonte: Autor (2018)

3.1.2 Preparo da resina

Para constituição da matriz foi utilizado resina epóxi da fabricante EPHOXAL, com resina de nome comercial Ephoxal RAL 120 e endurecedor Ephoxal HAL 115, as proporções recomendadas pelo fabricante são de 100% em massa de Resina epóxi para 15% em massa de catalisador (endurecedor). A quantidade de resina utilizada para fabricação do compósito foi estimada utilizando a proporção em massa de 60% de fibra de vidro para 40 % de resina epóxi. A pesagem foi feita utilizando uma balança digital da fabricante Marte Científica modelo 3300, indicando uma massa de 900 g de fibra de vidro e sendo assim possível o cálculo da massa de resina epóxi. O tempo de gel desta resina epóxi é em torno de 50 min., portanto, é importante que o material já esteja previamente cortado e organizado antes de adicionar o endurecedor na

resina. A mistura deve ser realizada lentamente, preferencialmente com um bastão de vidro limpo, para evitar que partículas de sujeira contaminem a resina.

3.1.3 Empilhamento

A etapa de empilhamento das fibras inicia-se pela limpeza da superfície onde a placa será montada, recomenda-se para este fim uma placa plana e lisa para melhor acabamento superficial. Placas metálicas de pequena espessura devem ser evitadas pelo fato de serem mais sensíveis a dilatação térmica, podendo ocasionar um efeito de flambagem na placa de compósito após a cura. A utilização de superfícies rugosas podem acarretar num maior retrabalho para preparação superficial na colagem de *Tabs* ou fabricação de uniões coladas e maior dificuldade para desmoldagem da placa. Para empilhamento das lâminas foi selecionado uma placa plana retangular de vidro temperado com dimensões 55x45 cm (superior ao das lâminas cortadas), o procedimento de limpeza foi feito com um pedaço de tecido embebido em acetona. Após a limpeza, aplica-se MAP-TAPE numa largura de aproximadamente 1,5 cm, nas extremidades da superfície onde a placa será montada como indicado pela Figura 3-3.

O MAP-Tape é uma espécie de adesivo dupla face, comumente chamada de bam-bam, cuja função é de fixar a bolsa de vácuo criando um sistema fechado e propício para criação de vácuo, por isso, qualquer imperfeição/lacuna ou sujeira sobre ele deve ser evitado. Após término do processo o mesmo poderá ser reutilizado para uma nova fabricação, desde que armazenado num recipiente fechado livre de contaminação externa.

Para facilitar a limpeza da superfície após o final da fabricação, foi aplicada uma camada de cera veicular na superfície do vidro, sua função é agir como uma espécie de desmoldante, afim de remover com maior facilidade vestígios de resina remanescentes da etapa de cura.

O empilhamento inicia-se pela aplicação de uma lâmina de Teflon por cima da superfície do vidro, o mesmo é utilizado para evitar que a placa de compósito cole na placa de vidro, auxiliando na etapa de desmoldagem. Caso no processo de cura seja utilizado um sistema de vácuo, recomenda-se construir a placa na Região I e deixar uma região livre (Região II) para posicionamento da mangueira de vácuo (Fig. 3-3):

Figura 3-3 – Placa de vidro para empilhamento das fibras

Fonte: Autor (2018)

O empilhamento das lâminas, de acordo com a Figura 3-4, foi feito por sobreposição manual (*hand lay-up*). As lâminas são empilhadas uma a uma na orientação desejada e entre uma camada e outra, uma quantidade pequena de resina é depositada sobre a lâmina. Com o auxílio de uma espátula plástica a resina é distribuída cuidadosamente sobre a superfície da lâmina, e depois com um rolo plástico pressionada levemente para penetração da resina nas fibras e evitar formação de bolhas na matriz. Esta etapa deve ser procedida com muita cautela afim de evitar o desalinhamento das fibras.

Figura 3-4 – Empilhamento e ferramentas utilizadas para corte e acomodação das lâminas

Fonte: Autor (2018)

Após o empilhamento das lâminas e aplicação da resina, inicia-se a etapa final do processo. Esta etapa consiste no posicionamento das camadas de tecidos que irão auxiliar a passagem de gases emitidos durante o processo de cura e no desmolde da placa. A Figura 3-5 exemplifica cada um dos materiais utilizados, que devem ser aplicados na seguinte sequência:

1. Teflon (Por sobre o vidro)
2. Fibra de Vidro (empilhada+resina)
3. Pierced Ply
4. Peel Ply
5. Map-Bleed
6. Tela Plástica
7. Manta Plástica (Bolsa de Vácuo)

Figura 3-5 – Ordem de posicionamento das camadas auxiliares

Fonte: Autor (2018)

3.1.4 Processo de cura

Após inseridos todos os tecidos auxiliares, é necessário isolar o sistema com a manta plástica. Basicamente o processo de cura da resina poderá ser realizado de 3 maneiras:

Tabela 3-4 – Tipos mais comuns de processos de cura laboratoriais

Modo	Tipo	Duração
1	Temperatura Ambiente	$\approx 24h$
2	Estufa	$< 5h$
3	Pratos quentes	$< 5h$

Fonte: Autor (2018)

Caso o processo de cura seja realizado a temperatura ambiente ou em estufa, a manta plástica terá a função de criar um sistema de vácuo, criando uma pressão uniforme sobre a placa e succionando a resina em excesso que será absorvida pelo *bleeder*, contudo é preciso a instalação de um sistema de conexões entre a parte interna e externa, ligadas à uma bomba de vácuo como indica a Figura 3-6. Após isolamento do sistema com a manta plástica, a bomba de vácuo é ligada e possíveis vazamentos na fita adesiva devem ser tampados exercendo uma pressão no local de vazamento, conferindo assim uma pressão uniforme e constante sob a placa.

Figura 3-6 – Sistema de compressão a vácuo

Fonte: Autor (2017)

Feito o isolamento do sistema a placa foi introduzida numa estufa para o processo de cura. Devido à ausência de um ciclo de cura fornecido pelo fabricante da resina, foi adotado um ciclo padrão utilizado pelo laboratório que consiste numa rampa de temperatura de 90° durante 2h com uma etapa de pós cura de 120° por mais 2h no qual a rampa completa pode ser visualizada na Figura 3-7:

Figura 3-7 – Ciclo de cura

Fonte: Autor (2017)

Terminado o ciclo de cura, por questão de segurança foi aguardado a placa atingir temperatura ambiente antes de prosseguir com o desmolde. A placa finalizada e com as marcações para o corte dos corpos de prova pode ser visualizada na Figura 3-8:

Figura 3-8 – Placa de fibra de vidro/Epóxi finalizada

Fonte: Autor (2018)

3.2 FABRICAÇÃO DAS PLACAS DE FIBRA DE CARBONO

Para fabricação das placas de fibra de carbono utilizadas na caracterização das energias de resistência à fratura (Modo I e II), foram utilizadas fibras de carbono unidirecional pré-impregnada com resina epóxi (Prepreg) com espessura de 0,34 mm fornecidos pelo fabricante TEXIGLASS. O processo de fabricação das placas em fibra de carbono seguem as mesmas etapas descritas nos tópicos anteriores, com a diferença de que para o tecido prepreg não é necessário o preparo e infusão das fibras com resina epóxi.

As lâminas foram extraídas do rolo de prepreg, utilizando como molde uma placa gabarito já pré-dimensionada com dimensões 35x35cm e sendo o corte realizado com um estilete industrial. Devido a presença de resina no tecido se torna mais difícil desarrumar as orientações das fibras, não sendo necessária a sua fixação com fita crepe durante o corte. Após o corte as lâminas foram empilhadas manualmente com orientação das fibras a 0°, compactando com um rolo cilíndrico à cada nova camada depositada, como indica a Figura 3-9

Figura 3-9 – Corte e empilhamento das lâminas de carbono

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Após empilhamento foram inseridos as camadas auxiliares que irão contribuir na absorção do excesso de resina, passagem de gases e facilitar no desmolde da placa (Fig.3.5). O sistema foi selado com a bolsa de vácuo (manta plástica), sendo aplicada uma pressão de aproximadamente 100 kPa. A cura foi realizada em estufa com rampa de temperatura de 90°C durante 2h com etapa pós cura de 120°C por mais 2h. A placa finalizada pode ser visualizada na Figura 3-10:

Figura 3-10 – Placa de fibra de carbono prepreg

Fonte: Elaborado pelo Autor (2018)

3.3 FABRICAÇÃO DE CORPOS DE PROVA EM FIBRA DE VIDRO

A caracterização das principais propriedades mecânicas de um compósito de fibra de vidro unidirecional podem ser obtidas através de ensaios de tração, mas para uma caracterização mais completa amostras com diferentes orientações de fibra devem ser ensaiadas. Neste trabalho foram fabricadas amostras com três orientações distintas: 0° , 90° e $\pm 45^\circ$, no qual podem ser visualizadas na Figura 3-11:

Figura 3-11 – Sentido de orientação das fibras

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

O processo de fabricação das placas para obtenção dos corpos de prova seguem os procedimentos descritos no Capítulo 3.2. No total foram fabricadas três placas, sendo a variável distinta entre elas a espessura e a orientação das fibras como observado na Tabela 3-5:

Tabela 3-5 – Características das placas fabricadas em fibra de vidro/epóxi

Placa	Orientação	Número de Camadas	Espessura da Placa	Simbologia
1	0°	16	2,5	$[0^\circ]_{16}$
2	90°	32	5,0	$[90^\circ]_{32}$
3	$\pm 45^\circ$	16	2,5	$[+45, -45]_{4s}^*$

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

*s: simétrico

As placas 1 e 2 possuem métodos similares de fabricação caracterizado pelo empilhamento sequencial das lâminas no mesmo sentido da fibra, sendo a principal diferença entre elas o sentido de corte dos corpos de prova, no qual na placa número 2 o corte ocorre a 90° em relação à orientação das fibras. A fabricação da placa de $\pm 45^\circ$ difere das anteriores pela sequência de empilhamento de suas lâminas, na placa número 3 o empilhamento é feito alternando a orientação das fibras entre 0° e 90° camada à camada, espelhando a sequência de acordo com o número de camadas desejada. A norma ASTM D3518 (2013) recomenda que para ensaios de cisalhamento em compósitos de fibra unidirecional a sequência de empilhamento seja de $[+45^\circ, -45^\circ]_{ns}$, no qual $4 \leq n \leq 6$. Para obtenção de corpos de orientação $\pm 45^\circ$, uma placa de menor dimensão deverá ser extraída da placa 3, realizando um corte de 45° na placa, como indica a Figura 3-12:

Figura 3-12 – Orientação de corte da placa $\pm 45^\circ$

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

As dimensões dos corpos de prova seguiram as recomendações da norma ASTM D3039 (2017) para os corpos de prova de orientação 0° e 90° e da norma ASTM D3518 (2013) para orientação de $\pm 45^\circ$, como indica a Tabela 3-6:

Tabela 3-6 – Dimensões mínimas recomendadas para ensaios de tração em compósitos reforçados por fibra

Orientação da Fibra	Largura [mm] (W)	Comprimento [mm] (L)	Espessura [mm] (t)
0° Unidirecional	15	250	1,0
90° Unidirecional	25	175	2,0
+/-45°	25	200	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

O corte das amostras foi realizado numa serra circular de bancada da Fabricante Ferrari, modelo SCI – 254, com disco de corte diamantado da MTX®, no qual pode ser visualizado na Figura 3-13:

Figura 3-13 – Máquina e disco de corte

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Para garantir que a falha ocorresse fora da região da garra, foram colados TABS nas amostras de 0° e 90°, extraídos das respectivas placas, conferindo após o corte as seguintes dimensões aos corpos de prova conforme a Figura 3-14:

Figura 3-14 – Dimensões de TABS e corpos de prova de fibra de vidro/epóxi

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Afim de proporcionar melhor adesão, as superfícies dos Tabs e dos corpos de prova foram previamente lixadas com lixa de granulometria 400, limpos com álcool isopropílico e colados com adesivo do tipo cianoacrilato. A cura foi realizada a temperatura ambiente, sendo aplicada uma leve pressão com grampos na região colada.

3.3.1 Juntas Coladas

A geometria adotada para fabricação das juntas coladas foi de juntas de sobreposição simples. Esta configuração foi escolhida devido ser uma das mais simples e mais fáceis de serem reproduzidas, sendo o maior limitante em sua fabricação o controle da espessura da camada adesiva. Para contornar tal dificuldade foi desenvolvido um dispositivo simples e de fácil construção, capaz de controlar com precisão a espessura da camada adesiva. O dispositivo é constituído de dois blocos de madeira no qual pregos, ou qualquer outro tipo de haste são

fixados nas faces dos blocos e em seguida linhas de nylon são amarradas paralelamente entre as hastes opostas, como visualizado na Figura 3-15:

Figura 3-15 – Dispositivo para controle de espessura

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

No dispositivos os pregos possuem a função de controlar o overlap da junta colada e servir de apoio para fixação das linhas. As linhas por sua vez ficarão entre uma placa aderente e outra, tendo a função de controle da espessura da camada adesiva e contenção do adesivo dentro da região de overlap. A Figura 3-16 representa uma visão global do dispositivo na fabricação de uma placa de junta de sobreposição simples.

Figura 3-16 – Exemplo utilização do dispositivo

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

As linhas de nylon utilizadas foram do tipo linha de pesca, versatilizando a utilização do dispositivo para fabricação de juntas adesivas nas mais diversas espessuras. Para averiguar a influência da espessura da camada adesiva na resistência à tração de uma junta, neste trabalho foram fabricadas juntas coladas com três espessuras diferentes: 0,2, 0,4 e 0,8 mm. Os aderentes foram fabricados em fibra de vidro unidirecional e resina epóxi, com empilhamento $[0^\circ]_{16}$ resultando numa espessura final de 2,4 mm. Como adesivo foi utilizado adesivo epóxi (Ephoxal RAL 120/Ephoxal HAL 115). A cura foi realizada à temperatura ambiente por 24 h sob uma pressão de 0,5 bar numa prensa hidráulica produzida pelo fabricante SKAY. As dimensões das juntas coladas seguiram as recomendações da norma ASTM D5868 (2014) no qual pode ser visualizada na Figura 3-17. Ao final foram produzidos 12 corpos de prova, sendo 3 amostras para cada espessura analisada.

Figura 3-17 – Geometria das juntas coladas

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

3.3.1.1 Instruções para fabricação de juntas coladas

Para produção dos aderentes superiores e inferiores uma placa de fibra de vidro/epóxi foi particionada com um corte à 90° em relação a orientação das fibras. Com o propósito de produzir uma falha coesiva, primeiramente foi necessário um tratamento superficial nos aderentes na região a ser colada. Dentre os processos abrasivos existentes foi escolhido a técnica de jateamento abrasivo, sendo este um dos mais recomendados por pesquisadores para tratamento superficial de compósitos reforçados por fibra de vidro (Banea e Da Silva, 2009).

De acordo com Figura 3-18 a fabricação da junta inicia-se pelo posicionamento do aderente inferior junto com um apoio de mesma espessura que o aderente sob um bloco metálico. Para garantir a mesma espessura do apoio, recomenda-se a utilização de retalhos da placa.

Figura 3-18 – Posicionamento dos aderentes

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Definidos a espessura da linha e comprimento do overlap (distância entre pinos 1 e 2), amarra-se a linha nos pinos 1 à 4 e em seguida posiciona-se o dispositivo sob o aderente inferior na região onde será o overlap, deixando uma extremidade livre de aproximadamente 1 cm. Posicionam-se duas lâminas de Teflon sob o aderente inferior por debaixo e paralelamente a linha, uma lâmina antes do pino 1 e outra após o pino 2, para evitar a adesão entre os aderentes nesta região. Aplica-se o adesivo vagarosamente na região entre os pinos 1 e 2 e por final posiciona-se o aderente superior. Caso ocorra a formação de bolhas na camada adesiva as mesmas deverão ser removidas com auxílio de uma seringa ou espátula. Para promover uma melhor adesão entre os aderentes recomenda-se que a cura seja realizada sob pressão em estufa, pratos quentes ou temperatura ambiente.

Após finalizada a cura deve-se remover as extremidades remanescentes da placa junto com a linha utilizada no processo de fabricação, como exemplifica a Figura 3-19. O processo deve ser feito com muita cautela afim de não danificar os aderentes.

Figura 3-19 – Remoção da linha e borda da placa

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Após a remoção das extremidades as juntas coladas estão prontas para serem extraídas da placa, realizando os cortes no sentido da fibra na largura desejada como indica a Figura 3-20, obtendo assim uma junta colada como a representada pela Figura 3-21.

Figura 3-20 – Corte da placa para obtenção das juntas coladas

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 3-21 – Amostra finalizada de junta colada Single Lap Joint

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

3.4 FABRICAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE RESINA EPÓXI

Pelo fato da resina epóxi (Ephoxal RAL 120/HAL 115) ser a constituinte de aproximadamente 40% das placas de fibra de vidro e por ser também utilizada como adesivo nas juntas coladas, a obtenção de suas propriedades torna-se necessária para conhecimento de seus limites de resistência e deformação.

Nos próximos tópicos serão apresentados os métodos utilizados neste trabalho para fabricação de corpos de prova de resina pura (*bulk specimen*) para obtenção das propriedades elásticas da resina epóxi.

3.4.1 Molde de silicone

A primeira etapa na fabricação dos corpos de prova (CDP's) de resina epóxi é a fabricação de seu molde. De acordo com a ASTM D638 (2014), a geometria mais apropriada do molde é o formato *Dog-bone* no qual favorece que a falha ocorra fora da garra na região mais estreita da amostra. Para obtenção de tal geometria foi selecionada uma matriz de alumínio usinada num formato *Dog-bone* tipo I, baseado na norma com dimensões de acordo com a Figura 3-22:

Figura 3-22 – Dimensões do corpo de prova de resina epóxi

Fonte: Adaptado de ASTM D638 (2014)

A fim de garantir um melhor acabamento superficial do molde e consequentemente do corpo de prova, a matriz foi lixada com lixas d'água com granulometria nas sequências 220, 400 e 600, sendo utilizados os seguintes materiais para fabricação do molde:

- Silicone líquido
- Catalisador
- Matriz metálica
- Cola Branca
- Suporte para retenção do silicone
- Desmoldante
- Lixas d'água

Para manter a qualidade superficial do molde e melhor aderência à matriz foi selecionada uma superfície de vidro temperado de face plana e lisa. A superfície de vidro e a matriz devem ser limpas com acetona para remoção de impurezas que possam contaminar o molde. Após a limpeza, fixa-se a matriz na superfície com cola branca, e em seguida aplica-se desmoldante nas faces externas da matriz, na superfície de vidro e nas faces internas do suporte para retenção do silicone. Para o cálculo do volume de silicone, utiliza-se a área interna do suporte para retenção como base, e como altura a espessura da matriz. Recomenda-se aplicar um volume um pouco maior que o calculado para que o silicone seja suficiente para cobrir toda a matriz. A proporção utilizada de silicone/catalisador recomendada pelo fabricante é de 100% em volume de silicone para 2,5% em massa de catalisador. De acordo com a Figura 3-23, fixa-se com cola branca o suporte para retenção do silicone e após preparada a mistura silicone/catalisador, despeja-se vagarosamente a mistura de silicone até cobrir toda a matriz. No total foram fabricadas 3 matrizes, no qual o tempo de cura do molde foi de 24h à temperatura ambiente.

Figura 3-23 – Fabricação do molde de silicone

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

3.4.2 Corpos de prova de resina epóxi

Inicia-se o processo de fabricação dos corpos de prova com a preparação da resina epóxi. A resina epóxi utilizada foi a mesma empregue na fabricação das placas de fibra de vidro. O volume calculado de resina deverá ser aproximadamente o volume da matriz metálica e a mistura resina/endurecedor deverá ser feita lentamente afim de evitar a formação de bolhas. Caso ocorra o surgimento de bolhas, a mistura deverá ser inserida numa dessecadora afim de eliminar os gases presentes na mesma. Tais bolhas formam vazios no corpo de prova, inviabilizando a amostra. A resina deve ser depositada lentamente, num só sentido até que complete todo o volume do molde. Para evitar o efeito de “rexupe” e formação de vazios na amostra, aplica-se uma lâmina plástica não aderente por sobre o molde, desenrolando-a no sentido da esquerda para direita de acordo com a Figura 3-24:

Figura 3-24 – Fabricação de amostras em resina epóxi

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Nesta etapa poderá ocorrer o vazamento do excesso de resina e caso seja visível vazios na amostra, a lâmina plástica deverá ser retirada e aplicada novamente.

A cura das amostras foi realizada à temperatura ambiente por um período de 24h, mas recomenda-se o aguardo de 72h antes da realização dos ensaios pois o corpo de prova poderá apresentar deformações plásticas excessivas devido à uma cura incompleta. A Figura 3-25 exemplifica o aspecto de uma amostra pronta para o ensaio.

Figura 3-25 – Amostra de resina epóxi

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

3.5 FABRICAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA EM FIBRA DE CARBONO

Ensaio para caracterização das energias de resistência à fratura são predominantemente regidos por efeitos de flexão, portanto, por suportarem maiores cargas em flexão para tais ensaios é recomendado o uso de corpos de prova fabricados em fibras com alto valor de rigidez, como a fibra de carbono. Esta recomendação não impede o uso de materiais com valores de rigidez menores como a fibra de vidro, mas implica na fabricação de amostras com um número maior de lâminas, resultando em CDPs mais espessos (ASTM D5528-13).

Nos próximos tópicos serão demonstrados os processos de fabricação de corpos de prova para juntas coladas submetidas a esforços em Modo I e II, utilizados para obtenção das respectivas energias de resistência à fratura do adesivo.

3.5.1 Corpos de prova para ensaios de Modo I e II

Atualmente ainda não há um consenso no meio científico em qual seria o melhor método para obtenção das energias de resistência à fratura de adesivos submetidos a esforços no modos I e II, porém, os métodos mais aceitos e utilizados no momento são os ensaios *Double Cantilever Beam* (DCB) para modo I e *End notched flexure* (ENF) para modo II (De Moura, M., Campilho, R., et al., 2008; De Moura et al., 2009)

Neste trabalho utiliza-se como referência as normas ASTM D5528 (2013) e ASTM D7905 (2014) modificadas para construção de juntas adesivas submetidas respectivamente a esforços no Modo I e II.

Basicamente o processo de fabricação dos corpos de prova para Modo I e II são idênticos, com a diferença que para CDP's submetidos à modo I, ao final do processo dobradiças ou blocos devem ser fixados nas extremidades dos CDP's.

Os corpos de prova utilizados nesta pesquisa foram extraídos de placas prepreg de fibra de carbono unidirecional. Foram fabricadas duas placas de mesma espessura com lâminas empilhadas manualmente com orientação $[0^\circ]$. O processo de cura foi realizado a uma temperatura de 90°C por 2h e pós cura de 120°C por mais 2h. As placas foram então unidas

com adesivo epóxi (Ephoxal RAL 120/HAL 115) e para proporcionar uma melhor união adesiva as placas foram previamente tratadas superficialmente com jateamento de areia. Uma trinca inicial foi obtida com a inserção de uma lâmina de teflon com espessura de $10\ \mu\text{m}$. A cura do adesivo foi realizada à temperatura ambiente sob uma força de 500 kg numa prensa hidráulica e uma espessura de 0,3 mm da camada adesiva foi garantida utilizando linhas de nylon de mesma espessura. Ao final do processo foram produzidos corpos de prova para ensaios de Modo I (Figura 3-26) e modo II (Figura 3-27) com as respectivas dimensões:

Figura 3-26 – Dimensões dos corpos de prova para ensaios DCB (Modo I)

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 3-27 – Dimensões dos corpos de prova para ensaios ENF (Modo II)

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

3.5.2 Instruções de fabricação

Devido as semelhanças dos processos de fabricação, uma instrução geral será descrita destacando-se particularidades na fabricação quando houver.

Como representado pela Figura 3-28 a fabricação dos corpos de prova para ensaios de Modo I e II inicia-se pelo posicionamento da placa inferior num bloco de apoio, acrescentando em seguida uma lâmina de teflon ou material não aderente por cima da placa.

Figura 3-28 – Esquema de posicionamento das placas

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

O inserto de teflon tem como finalidade a criação de uma descontinuidade no meio do corpo de prova, portanto sua largura deverá ser do tamanho da trinca inicial desejada. Para ensaios de modo I o recomendado pela norma ASTM D5528 (2013) é que o tamanho da trinca inicial satisfaça a seguinte condição:

$$a_0 \leq 0,042 \sqrt{\frac{h^3 E_{11}}{G_{Ic}}}$$

Já para ensaios de modo II recomenda-se que para produzir um crescimento estável da trinca, a mesma deverá ter comprimento igual à 70% da distância (L) entre apoios (Carlsson et al., 1986) como representado pela Figura 3-29:

Figura 3-29 – Representação da distância entre apoios e trinca inicial

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Posicionada a lâmina de teflon a largura de cada corpo de prova poderá ser determinada através do espaçamento entre as hastes do suporte de madeira (Figura 3-30). A espessura da camada adesiva é então definida pela espessura do fio de nylon, no qual é fixado paralelamente entre as hastes no sentido da fibra, como representado pela Figura 3-30:

Figura 3-30 – Exemplo de fabricação das placas para ensaios ENF e DCB

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Em seguida deposita-se a camada adesiva vagarosamente sobre a placa, fora da região com teflon como representado pela Figura 3-31. Caso ocorra formação de bolhas ou vazios as mesmas deverão ser removidas.

Figura 3-31 – Deposição de resina epóxi

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Por fim posiciona-se a placa superior sobre o conjunto (Figura 3-28), e inicia-se o processo de cura da camada adesiva. Recomenda-se que para uma melhor aderência seja exercida uma pressão sobre a placa superior durante o processo de cura.

Ao final do processo amostras devem ser extraídas das placas unidas, realizando o corte por cima da linhas existentes, no qual as mesmas servem como guia para o corte. Para corpos de prova utilizados em ensaios de modo I, dobradiças ou blocos metálicos devem ser fixados nas faces externas da amostra, na região da trinca inicial (Figura 3-26).

3.6 MÉTODO DE CORRELAÇÃO DE IMAGENS

Ao realizarmos ensaios de tração com corpos de prova possuindo grande rigidez, nem sempre podemos confiar nos valores de deslocamento medidos diretamente pelo travessão da máquina. Durante um ensaio, os valores de deslocamento fornecidos pela máquina podem vir

acrescidos de pequenos efeitos não lineares devido à deformação dos componentes da máquina (*machine compliance*), podendo levar à medidas imprecisas e sendo assim necessário a correção deste efeitos nos resultados (Kalidindi et al., 1997). Tais efeitos podem ser contornados com a utilização de extensômetros fixados diretamente no corpo de prova, porém, tal método possui diversas limitações como custo, tempo gasto para preparação e fixação na amostra e restrições quanto a capacidade de medir deformações pontuais (Nguyen et al., 2017). Para superar tais dificuldades, neste trabalho utiliza-se a técnica de correlação digital de imagens para obtenção de medidas de deformação e deslocamento dos ensaios utilizando o software GOM Correlate para processamento das imagens. Tal técnica possui a vantagem de obter valores precisos tanto para um campo de deformações quanto para deformações pontuais, sem a necessidade de haver contato com o objeto a ser ensaiado (Kwon et al., 2013).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos próximos tópicos serão apresentados os ensaios realizados para obtenção das propriedades mecânicas do material compósito de fibra de vidro unidirecional com matriz polimérica de resina epóxi, propriedades mecânicas e energia de resistência à fratura de um adesivo epóxi e características mecânicas de juntas simples coladas. Todos os ensaios foram realizados numa máquina de ensaio universal INSTRON 5985 acoplada com uma célula de carga de 250 kN.

Em todos os ensaios de tração realizados para obtenção das propriedades mecânicas dos materiais, para evitar medidas incorretas de deformação dos corpos de prova devido a soma de efeitos externos (influência da rigidez da máquina, deformação e deslocamento das cunhas da garra), a deformação das amostras foram obtidas através do método de correlação de imagens, utilizando o software GOM Correlate para interpretação das imagens. Para utilização de tal método as amostras foram pintadas de branco e borrifadas com pequenos pontos pretos com o auxílio de uma tinta spray. O objetivo deste procedimento é criar um campo de deformação na superfície da amostra, relacionando o posicionamento final dos pontos com a sua posição inicial. Durante o ensaio foram tiradas fotos de 5 em 5 segundos utilizando uma máquina fotográfica Canon EOS T6i acoplada com uma lente Macro Sigma AF 180mm F3.5. Posteriormente para este intervalo de tempo, foram relacionadas as respectivas forças com a deformação obtida pelo software GOM.

4.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO COMPOSITO FIBRA DE VIDRO/EPÓXI

Por se tratar de uma material ortotrópico e transversalmente isotrópico, para caracterização completa das suas propriedades elásticas podemos dividir os ensaios em 3 tipos:

- Fibra de vidro com orientação 0° -
 - Obtenção do Módulo de Elasticidade: E_{11}
 - Coeficiente de Poisson: ν_{12}
- Fibra de vidro orientação 90°
 - Obtenção do Módulo de Elasticidade: E_{22}
 - Coeficiente de Poisson: ν_{23}
- Fibra de vidro orientação $\pm 45^\circ$
 - Obtenção do Módulo de Cisalhamento: G_{12}

Seguindo os procedimentos da ASTM D3039 (2017), para obtenção do módulo de elasticidade E_1 e coeficiente de Poisson ν_{12} , foram ensaiados 10 corpos de prova (orientação 0°) com geometria representa pela Figura 4-1 e suas respectivas dimensões informadas na Tabela 4-1. Os corpos de prova (CDP) foram submetidos à tração no sentido das fibras com uma velocidade programada de deslocamento do travessão de 2 mm/min.

Figura 4-1 – Características corpo de prova FV-EP Orientação $[0^\circ]$ (Fibras na direção 1)

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tabela 4-1 – Dimensões corpos de prova FV-EP Orientação [0°]

CDP	Comprimento L (mm)	Largura w (mm)	Espessura t (mm)	Area (wxt) (mm ²)
1	250	15,98	2,23	35,70
2	250	15,50	2,20	34,10
3	250	16,23	2,20	35,71
4	250	15,18	2,23	33,91
5	250	15,90	2,23	35,51

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

As curvas Tensão vs. Deformação e as relações entre as deformações na direção 1 e 2 podem ser visualizadas respectivamente nas Figura 4-2 e Figura 4-3. Os resultados dos ensaios são informados na Tabela 4-2.

Figura 4-2 – Tensão vs. Deformação FV-EP: Orientação[0°]

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tabela 4-2 – Resultados ensaios de tração FV-EP Orientação [0°]

CDP	Força Máxima [kN]	Tensão Máxima [MPa]	Deformação Máxima	E_{11} [GPa]	ν_{12}
1	31	870	2,07%	43	0,18
2	31	918	2,08%	45	0,15
3	32	879	2,26%	43	0,13
4	28	820	1,85%	44	0,18
5	31	862	1,96%	44	0,17

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 4-3 – Coeficiente de Poisson (ν_{12}) FV-EP: Orientação [0°]

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Para obtenção do módulo de elasticidade E_2 e coeficiente de Poisson ν_{23} foram ensaiados 6 corpos de prova com orientação 90° com sua geometria representada pela Figura 4-4 e suas respectivas dimensões informadas na Tabela 4-3. Os corpos de prova foram submetidos à tração no sentido 2 com velocidade do travessão de 1 mm/min.

Figura 4-4 – Características corpo de prova FV-EP Orientação [90°] (Fibras na direção 1)

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tabela 4-3 – Dimensões médias corpos de prova FV-EP Orientação [90°]

CDP	Comprimento L (mm)	Largura w (mm)	Espessura t (mm)	Área (wxt) A (mm ²)
1	190	25,90	5,05	130,80
2	190	25,05	4,83	121,01
3	190	25,40	4,83	122,76
4	190	26,70	4,77	127,27
5	190	26,70	4,73	126,38
6	190	26,27	4,62	121,26

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

A curva Tensão vs. Deformação pode ser visualizada na Figura 4-5. Nota-se que devido à orientação das fibras ser de 90° em relação ao sentido do carregamento o comportamento do material se altera, sendo a curva composta agora por duas regiões lineares. A primeira curva no início da Figura 4-5 indica a região linear elástica do material, que após atingir o limite elástico, deforma-se plasticamente, diminuindo drasticamente a rigidez do material e resistindo à tensões bem menores do que os CDP com orientação 0°. Os resultados dos ensaio são informados na Tabela 4-4.

Figura 4-5 – Tensão vs. Deformação FV-EP: Orientação[90°]

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Para obtenção do coeficiente de Poisson (ν_{23}) foi necessário a instalação de uma segunda câmera, sincronizada com a primeira para obter simultaneamente fotos na direção 2 e direção 3. Observa-se pela Figura 4-6 uma dispersividade dos dados, tal comportamento pode ser justificado pela baixa resolução da segunda câmera relacionado com a pequena espessura do corpo de prova, reduzindo a capacidade do software de processar corretamente as imagens e obter um campo de deslocamento mais detalhado. Devido a este problema a leitura da deformação dos corpos de prova 1 e 2 foram descartadas.

Figura 4-6 – Coeficiente de Poisson (ν_{23}) FV-EP: Orientação [90°]

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tabela 4-4 – Resultados ensaios de tração FV-EP Orientação [90°]

	Força Máxima [kN]	Tensão Máxima [MPa]	Deslocamento Máximo [mm]	Deformação Máxima	E_{22} [GPa]	ν_{23}
1	12	94	4,80	1,93%	11	-
2	14	123	4,98	2,22%	14	-
3	15	129	4,63	2,51%	18	0,30
4	16	127	5,62	2,27%	12	0,19
5	16	123	5,83	3,20%	7	0,30
6	15	125	5,55	2,48%	14	0,24

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Por último, para obtenção do módulo de cisalhamento G_{12} foram ensaiados 7 corpos de prova com orientação $\pm 45^\circ$ com sua geometria representa pela Figura 4-7 e suas respectivas dimensões informadas na Tabela 4-5. Os corpos de prova foram submetidos à tração na direção x com velocidade do travessão de 1 mm/min.

Figura 4-7 – Características corpo de prova FV-EP Orientação [$\pm 45^\circ$] (Fibras nas direções 1-2)

Tabela 4-5 – Dimensões médias corpos de prova FV-EP Orientação [$\pm 45^\circ$]

CDP	Comprimento L (mm)	Largura w (mm)	Espessura t (mm)	Área ($w \times t$) A (mm ²)
1	255	25,23	2,30	58,04
2	255	25,23	2,30	58,04
3	255	25,40	2,32	58,85
4	255	25,48	2,27	57,77
5	255	26,07	2,38	62,14
6	255	26,38	2,23	58,92
7	255	26,15	2,30	60,15

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

O cálculo do módulo de cisalhamento (G_{12}) pode ser obtido com base na norma ASTM D3518 (2013) no qual fornece a seguinte relação:

$$G_{12} = \frac{\sigma_x/2}{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)} \quad (23)$$

Onde as variáveis da Equação (23) são obtidas através da região elástica da Figura 4-8.

Figura 4-8 – Tensão vs. Deformação FV-EP: Orientação[+/-45°]

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Relacionando os valores da tensão σ_x com seus respectivos valores de deformação ε_x e ε_y na região elástica da Figura 4-8 obtêm-se o gráfico representado pela Figura 4-9, no qual o coeficiente angular do mesmo nos fornece os valores de G_{12} . Os resultados dos ensaios podem ser consultados na Tabela 4-6.

Figura 4-9 – Módulo de cisalhamento G_{12}

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tabela 4-6 – Resultados ensaios de tração FV-EP Orientação $[+/-45^\circ]$

CDP	Força Máxima F [N]	Tensão Máxima σ_x [MPa]	Tensão Cisalhamento Máxima τ_{12} [MPa]	Deslocamento Máximo δ_x [mm]	Módulo de cisalhamento G_{12} [MPa]
1	5618	97	48,40	16,42	3443
2	5465	94	47,08	15,27	3789
3	5234	89	44,47	19,00	3382
4	5234	91	45,31	19,00	4146
5	5442	88	43,79	17,91	3362
6	5515	94	46,80	18,58	3637
7	5495	91	45,68	16,98	3894

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

A Tabela 4-7 fornece a média das propriedades mecânicas obtidas para os corpos de prova de Fibra de Vidro unidirecional-Epóxi, no qual a quantidade de CDPs utilizados para o cálculo da média foram as mesmas daqueles apresentados nas tabelas para cada tipo de ensaio. Os resultados apresentaram boa concordância comparados com os valores típicos disponíveis na literatura para compósitos de Fibra de vidro-Epóxi.

Tabela 4-7 – Valores médios das propriedades mecânicas FV-EP

	Média	Desvio Padrão	Referência*
Tensão máxima longitudinal (0°) σ_{uy} [MPa]	870	± 35	1020
Tensão máxima transversal (90°) σ_{ux} [MPa]	120	± 13	40
Tensão máxima Cisalhamento τ_{uxy} [MPa]	45,93	$\pm 1,60$	60
Deformação máxima longitudinal ε_y	2,04%	$\pm 0,15\%$	1,29%
Deformação máxima transversal ε_x	2,53%	$\pm 0,52\%$	-
Módulo de Elasticidade E_1 [GPa]	44	± 1	45
Módulo de Elasticidade E_2 [GPa]	12,70	$\pm 3,60$	12
Módulo de cisalhamento G_{12} [GPa]	3,65	$\pm 0,30$	5,5
Coefficiente de Poisson ν_{12}	0,16	$\pm 0,02$	0,19
Coefficiente de Poisson ν_{23}	0,26	$\pm 0,05$	0,31

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

*(Barbero, 2017)

4.2 RESINA EPÓXI

Os ensaios para obtenção das propriedades mecânicas da resina epóxi (Ephoxal RAL 120/HAL115) foram realizados de acordo com as recomendações da norma ASTM D638 (2014) e devido os corpos de prova serem constituídos somente de resina epóxi, podemos considerá-los como sendo um material isotrópico, ou seja, suas propriedades mecânicas são constantes e independentes da direção. Neste caso podemos obter todas suas características mecânicas à tração num único ensaio. De acordo com a metodologia descrita no capítulo 4.2, a matriz utilizada para fabricação das amostras foi a mesma, resultando em corpos de prova com as mesmas dimensões.

Verifica-se através da Figura 4-10 um comportamento predominantemente linear elástico das amostras com uma posterior deformação plástica seguida por uma fratura frágil. Observa-se uma deformação plástica excessiva na amostra de número 12 e fratura prematura nas amostra de número 2 e 11. Para a amostra de número 12 tal comportamento pode ser justificado devido a uma cura incompleta da resina, e a falha prematura das amostras 2 e 11 justifica-se pela presença de pequenos vazios observados na região da fratura, resultantes de gases presos durante o processo de cura

Figura 4-10 – Tensão vs. Deformação Resina Epóxi

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

O coeficiente de Poisson ($\nu = -\varepsilon_x/\varepsilon_y$) foi obtido através da relação entre as deformações entre o seu comprimento externo (L_{ext}) e sua largura interna (w_{int}) para um carregamento aplicado na direção de seu comprimento, cujas deformações podem ser visualizadas na Figura 4-11. Os resultados dos ensaios são informados na Tabela 4-8, no qual o módulo de cisalhamento foi obtido através da teoria da elasticidade através da seguinte relação:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Figura 4-11 – Coeficiente de Poisson (ν) Resina Epóxi

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tabela 4-8 – Resultados ensaios de tração: Resina Epóxi Ephoxal (RAL120/HAL115)

CDP	Força Máxima $F_u [N]$	Tensão Máxima $\sigma_u [MPa]$	Módulo Elasticidade $E [MPa]$	Poisson ν	Módulo Cisalhamento $G [MPa]$
1	2610	57	2355	0,36	867
2	2514	55	2318	0,35	856
3	2432	53	2243	0,36	822
4	2521	55	2238	0,34	838

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

A Tabela 4-9 fornece os valores médios das propriedades mecânicas obtidas nos ensaios.

Tabela 4-9 – Propriedades Mecânicas Resina Epóxi Ephoxal (RAL120/HAL115)

	Média	Desvio Padrão
Tensão Máxima $\sigma_u [MPa]$	55	2
Deformação Máxima (%)	4,6%	0,2%
Módulo de Elasticidade $E [MPa]$	2288	57
Poisson ν	0,35	0,01
Módulo de cisalhamento $G [MPa]$	846	20

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

4.3 MODO I

Os corpos de prova para obtenção da energia crítica de resistência a fratura (G_{Ic}) foram fabricados de acordo com a metodologia descrita no capítulo 3.5 para o ensaio *Double Cantilever Beam*, no qual os mesmos são constituído de dois aderentes de fibra de carbono de comprimento L e espessura h unidos por uma camada adesiva t_h . De acordo com as recomendações da norma D5528 (2013) os CDPs são providos de uma trinca inicial (a_0) e possuem dobradiças coladas em suas extremidades para aplicação da carga, forçando que a trinca seja solicitada puramente em Modo I. A Figura 4-12 representa a geometria dos corpos de prova e suas dimensões são informadas na Tabela 4-10.

Figura 4-12 – Características corpo de prova para o ensaio DCB

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tabela 4-10 – Dimensões corpos de prova Modo I

CDP	Comprimento L [mm]	Espessura CDP h [mm]	Largura B [mm]	Espessura Adesivo t_h [mm]	Trinca Inicial a_0 [mm]
2	210	1,8	22,60	0,3	61,0
3	210	1,8	21,25	0,3	65,5
4	210	1,8	21,30	0,3	57,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Os ensaios foram realizados à uma velocidade do travessão de 2 mm/min, cuja demonstração da abertura dos braços da viga e solicitação em Modo I do adesivo podem ser visualizados na Figura 4-13.

Figura 4-13 – Representação do ensaio de Modo I

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Alguns ensaios foram invalidados devido a ocorrência de dois tipos de problemas: descolamento das dobradiças e falha de uma das vigas do corpo de prova. O descolamento das dobradiças foi solucionado com a substituição do tipo de adesivo, que primeiramente era um adesivo do tipo epóxi de cura rápida (10 minutos) por um adesivo do tipo cianoacrilato. A falha das vigas foi atribuída a combinação de uma espessura insuficiente dos aderentes para suportar grandes deflexões com possíveis danos causados nas fibras devido ao tratamento superficial. O comportamento da curva Força vs. Deslocamento de um ensaio DCB pode ser visualizado na Figura 4-14, todas as amostras apresentaram falha coesiva que pode ser visualizada na Figura 4-15.

Figura 4-14 – Ensaio Modo I: (a) Força vs. Deslocamento; (b) Curva de Resistência

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 4-15 – Demonstração de falha coesiva em ensaios DCB.

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

O cálculo de G_{IC} foi feito de acordo com os procedimentos descritos na secção 2.4.1 utilizando o método CBBM. As seguintes propriedades elásticas do compósito fibra de carbono-epóxi $E_1 = 120 \text{ GPa}$ e $E_2 = 6,77 \text{ GPa}$ utilizadas nos equacionamentos foram obtidas por ensaios de tração com retalhos das placas de fibra de carbono. De acordo com De Moura (2006) o módulo de cisalhamento G_{13} tem pouca influência na resistência à fratura, portanto valores típicos da literatura podem ser utilizados. Neste trabalho foi utilizado o valor de $G_{13} = 4,3 \text{ GPa}$ obtido por De Moura (2006) para um compósito carbono-epóxi. Desta maneira, utilizando a Equação (13) e substituindo os valores obtidos experimentalmente foi possível calcular a energia de resistência à fratura ao modo I para o adesivo epóxi, no qual os resultados podem ser conferidos na Tabela 4-11.

$$G_{IC} = \frac{6P^2}{B^2h} \left(\frac{2a_{eq}}{E_f h^2} + \frac{1}{5G_{13}} \right) \quad (24)$$

Tabela 4-11 – Energia Resistência à Fratura do adesivo epóxi Ephoxal (RAL120/HAL115)

Energia Resistência à Fratura $G_{Ic} [N/mm]$	
CDP2	$0,97 \pm 0,1$
CDP3	$0,99 \pm 0,1$
CDP4	$0,81 \pm 0,1$
Média	0,92

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

4.4 MODO II

O ensaio End Notched Flexure para obtenção da energia crítica de resistência a fratura (G_{IIc}) de um material consiste de duas vigas bi-apoiadas unidas por uma camada adesiva. Os apoios são separados por uma distância $2L$, no qual a aplicação de uma carga central provoca a flexão das vigas e deslocamento relativo entre suas faces, causando o cisalhamento da camada adesiva. De acordo com Carlsson et al. (1986), para obter um crescimento de trinca estável recomenda-se que o tamanho de trinca inicial a_0 seja da ordem de 70% da metade da distância de separação entre os apoios (L) representada pela Figura 4-16. Os corpos de prova foram fabricados de acordo com as recomendações da norma ASTM D7905 (2014) com suas dimensões informadas na Tabela 4-12.

Figura 4-16 – Características do corpo de prova ENF Modo II

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tabela 4-12 – Dimensões corpos de prova Modo II

CDP	Comprimento L [mm]	Espessura CDP h [mm]	Largura B [mm]	Espessura Adesivo t_h [mm]	Trinca Inicial a_0 [mm]
1	120	2,85	17,78	0,3	91,00
2	101	2,95	19,45	0,3	73,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Os ensaios foram realizados à uma velocidade do travessão de 2 mm/min, a Figura 4-17 demonstra um corpo de prova em flexão durante os ensaios.

Figura 4-17 – Corpo de prova em flexão: Ensaio ENF

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Novamente alguns ensaios foram descartados devido a falha prematura dos aderentes em flexão, que falharam antes que ocorresse a propagação da trinca da camada adesiva, acusando uma espessura insuficiente para suportar tamanha flexão ou danos estruturais causados por um tratamento superficial em excesso.

O comportamento da curva Força vs. Deslocamento de um ensaio ENF realizado pode ser visualizado na Figura 4-18, todas as amostras apresentaram falha coesiva que pode ser visualizada na Figura 4-19.

Figura 4-18 – Ensaio Modo II: (a) Força vs. Deslocamento; (b) Curva de Resistência

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 4-19 – Demonstração de falha coesiva em ensaios ENF

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

O cálculo de G_{IIc} foi feito de acordo com os procedimentos descritos na secção 2.4.2 utilizando o método CBBM. Desta maneira, utilizando a Equação (19) e substituindo os valores obtidos experimentalmente foi possível calcular a energia de resistência à fratura ao modo II para o adesivo epóxi, no qual os resultados podem ser conferidos na Tabela 4-13.

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 a_{eq}^2}{16B^2 E_f h^3} \quad (25)$$

Tabela 4-13 – Energia de resistência à fratura do adesivo epóxi Ephoxal (RAL120/HAL115)

Energia Resistência à Fratura $G_{IIc} [N/mm]$	
CDP1	$1,54 \pm 0,1$
CDP2	$1,68 \pm 0,1$
Média	1,61

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

4.5 JUNTAS COLADAS

O ensaio de juntas simples coladas (SLJ) foi realizado para verificar a influência da espessura da camada adesiva na resistência da junta quando submetida à esforços de tração (P) como representado pela Figura 4-20. Os corpos de prova foram fabricados com base na norma ASTM D5868, sendo constituídos de dois aderentes de fibra de vidro-epóxi de mesma espessura h unidos por uma camada adesiva t_h . Tabs foram colados nas extremidades das juntas para diminuir os efeitos de momento causado pelo desalinhamento entre as cargas.

Figura 4-20 – Características do corpo de prova Single Lap Joint

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Para estudo da influência da espessura da camada adesiva na resistência da junta, quatro configurações foram estudadas sendo o primeiro conjunto composto por amostras fabricadas sem controle de espessura e outros três contendo amostras com as seguintes espessuras: 0,2, 0,4 e 0,8 mm. As juntas coladas foram fabricadas seguindo os procedimentos descritos no capítulo 3.3.2, utilizando para o controle de espessura linhas de nylon de mesmo diâmetro que as espessuras desejadas. Para a verificação do controle da espessura foram tiradas fotos das juntas coladas e em seguida aplicado um filtro nas imagens para melhor visualização da camada adesiva. O processamento das imagens foi feito através do software GOM Correlate, utilizando como referência uma escala milimetrada posicionada abaixo da junta colada. As figuras de numeração 4-22 à 4-24 representam as imagens processadas com as respectivas espessuras da camada adesiva.

Figura 4-21 – Espessura da camada adesiva: 0,2 mm

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 4-22 – Espessura da camada adesiva: 0,4 mm

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 4-23 – Espessura da camada adesiva: 0,8 mm

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Para estimar a espessura da camada adesiva do conjunto de amostras fabricados sem controle de espessura, foi feita a medição das espessuras dos aderentes na região do overlap antes e depois da aplicação do adesivo, a diferença encontrada (0,1 mm) foi atribuída então à espessura da camada adesiva. As amostras foram fabricadas com o objetivo de ter dimensões similares, de modo que a principal variável fosse a espessura do adesivo. As dimensões de todos os corpos de prova podem ser consultadas na Tabela 4-14.

Tabela 4-14 Dimensões das juntas coladas

CDP	Overlap [mm]	Largura w [mm]	Espessura Aderente h [mm]	Espessura Adesivo t_h [mm]	Comprimento Aderente La [mm]	Área Junta Colada A [mm ²]
1	27,30	27,10	2,1	0,1	102	740
2	26,35	26,58	2,1	0,1	102	700
3	27,30	26,50	2,2	0,1	102	723
4	24,50	25,3	3,8	0,2	110	620
5	26,70	24,85	3,8	0,2	116	621
6	27,00	25,40	3,8	0,2	113	686
7	26,40	25,20	3,8	0,4	116	665
8	26,35	25,20	3,8	0,4	117	664
9	26,2	25,30	3,8	0,4	117	663
10	27,00	24,83	2,3	0,8	103	670
11	26,95	24,85	2,2	0,8	102	670
12	26,22	24,90	2,2	0,8	102	653

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM D5868 que recomenda a utilização de uma velocidade do travessão de 13 mm/min, bem superior comparado com os demais ensaios. A Figura 4-24 representa a união dos resultados dos ensaios de tração obtidos para todos os conjuntos de espessura, no qual os resultados individuais são informados na Tabela 4-15.

Figura 4-24 – Comparação entre as forças e deslocamento máximos resistidos pelas juntas simples coladas em função da espessura da camada adesiva t_h

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Ao analisarmos a Figura 4-24, constata-se que a resistência de juntas SLJ unidas com adesivos de característica frágil, diminui linearmente com o aumento da espessura da camada adesiva. De acordo com Petrie (2000), este comportamento deve-se ao fato de que quanto maior t_h maior a chance do material conter descontinuidades ou vazios em sua estrutura e pior a sua capacidade de transferir o carregamento entre um aderente e outro, pois quanto maior for t_h , maior o desalinhamento entre as cargas, causando um aumento das tensões de rasgamento nas bordas da região do overlap e aumentando a chance da falha por delaminação do compósito. Nos estudos realizados por Petrie (2000), ele destaca que adesivos com espessura na faixa de 0,05 e 0,2 mm não influenciam tanto na máxima carga suportada pela junta, tal comportamento pode ser também observado na Figura 4-24, no qual para os adesivos de espessura 0,1 e 0,2 mm as forças e deslocamentos máximos suportados pela junta foram similares.

Tabela 4-15 – Resultados experimentais ensaio de tração em juntas simples coladas

	Espessura Adesivo t_h [mm]	Força Máxima P [kN]	Deslocamento Máximo δ [mm]
1	0,1	10,5	2,0
2	0,1	9,3	2,1
3	0,1	9,9	2,2
4	0,2	12,2	2,5
5	0,2	9,1	2,3
6	0,2	10,2	2,3
7	0,4	7,7	1,8
8	0,4	8,5	1,9
9	0,4	7,9	2,1
10	0,8	4,7	1,3
11	0,8	3,6	1,0
12	0,8	4,9	1,2

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho apresentou métodos para fabricação de juntas coladas com controle preciso de espessura da camada adesiva, detalhando passo a passo os processos de fabricação dos aderentes e obtenção das propriedades mecânicas tanto dos aderentes quanto do adesivo. Os métodos aqui apresentados foram os resultados de vários meses de estudo e compreensão das normas e técnicas disponíveis na literatura, frutos de um ciclo repetitivo compostos por fabricação, testes e análise de resultados, pois caso os resultados não fossem satisfatórios o ciclo se reiniciava para aprimoramento da técnica. Durante o aprendizado alguns erros acarretavam em danos nos equipamentos sendo gasto um extensivo tempo para compra, reposição e conserto dos materiais danificados. Com a experiência adquirida, os principais problemas deparados nos processos puderam ser solucionados, como o processo de controle de espessura e a obtenção de uma falha coesiva da camada adesiva.

Várias técnicas disponíveis para controle de espessura do adesivo requeriam a pré disposição de um aparato desenvolvido para tal fim (muitas vezes com espessura fixa) ou a inclusão de calços calibrados durante o processo de união das juntas, sendo que para o último método muitas vezes a remoção dos calços (quando possível) após a cura do adesivo era de grande dificuldade, mesmo com a utilização de desmoldantes ou materiais antiaderentes como o Teflon. A inclusão de calços também dificultava a aplicação de pressão durante a cura, podendo ocorrer pequena flexão dos aderentes no processo devido os calços (apoios) se localizarem nos extremos da junta, acarretando numa espessura desigual na junta adesiva. A solução foi desenvolvimento de um dispositivo composto por blocos de madeira e linhas transversais, no qual a linha controla a espessura da junta adesiva e pode ser removida após a cura.

O procedimento para fabricação dos corpos de prova para ensaios DCB, ENF e juntas coladas utilizando o dispositivo desenvolvido se mostrou satisfatório, possibilitando obter uma espessura uniforme da camada adesiva. Para obtenção de uma falha coesiva, o processo de lixar a superfície seguido de uma limpeza com acetona ou álcool se mostrou ineficiente, acarretando sempre numa falha adesiva ou delaminação do aderente, contudo, a realização de jateamento abrasivo nas superfícies seguido por uma limpeza com acetona foi tida como a melhor opção para obtenção de falha coesiva da camada adesiva.

Apesar da relação aceitável obtidas entre os valores de G_{Ic} e G_{IIc} (valores maiores para o modo II), tais resultados não podem ser tidos como corretos devido a utilização de CDPs com dimensões diferentes e a grande ocorrência de falha dos aderentes. Para verificação da coerência dos resultados, recomenda-se em trabalhos futuros a utilização de CDPs mais espessos, capazes de suportar as cargas em flexão, bem como a padronização das dimensões dos corpos de prova e utilização de outros métodos de cálculo da energia crítica de resistência a fratura, como o CCM ou CBT, para verificar se com estes métodos obtêm-se resultados próximos ao obtidos pelo método CBBM.

A respeito de juntas simples coladas, foi constatado uma relação inversamente proporcional entre a espessura da camada adesiva e a resistência máxima suportada pelo sistema, ou seja, quanto maior a espessura do adesivo menor a resistência suportada pela junta. Este fenômeno se deu ao fato de que quanto maior a espessura da camada adesiva maior a concentração de tensões nas bordas do overlap e maior a possibilidade da existência de descontinuidades no adesivo.

Em trabalhos futuros, todas as propriedades e características dos materiais obtidos neste trabalho possibilitam a sua utilização em modelos numéricos de elementos finitos e modelos de falha como o CZM. Isso facilita a comparação entre resultados numéricos e resultados obtidos experimentalmente, possibilitando prever com maior precisão a sua resistência mecânica e aumentando assim a confiabilidade no projeto de estruturas coladas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, T. L. Fracture mechanics: fundamentals and applications. CRC press, 2017. ISBN 1498728146.
- ASTM D3518/D3518M (2013) Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate. ASTM International, West Conshohocken, PA., 2013.
- ASTM D5528-13 Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013
- ASTM D638 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014a.
- ASTM D7905/D7905M-14 Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- ASTM D5868-01(2014) Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.
- ASTM D3039/D3039M (2017) Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA., 2017.
- BANEA, M. D.; DA SILVA, L. F. M. Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L-Journal of Materials-Design and Applications, v. 223, n. L1, p. 1-18, Jan 2009.
- BARBERO, E. J. Introduction to composite materials design. CRC press, 2017.
- BROCKMANN, W. et al. Adhesive Bonding: Adhesives, Applications and Processes. John Wiley & Sons, 2008.
- BROUGHTON, W.; CROCKER, L.; GOWER, M. Design requirements for bonded and bolted composite structures. NPL, 2002.
- BUDHE, S. et al. An updated review of adhesively bonded joints in composite materials. International Journal of Adhesion and Adhesives, v. 72, p. 30-42, Jan 2017.
- BURLAYENKO, V. N.; SADOWSKI, T. FE modeling of delamination growth in interlaminar fracture specimens. Budownictwo i Architektura, v. 2, p. 95-109, 2008.
- CAMPILHO, R. D. et al. Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer. International Journal of Adhesion and Adhesives, v. 44, p. 48-56, 2013.
- CARLSSON, L.; GILLESPIE JR, J.; PIPES, R. J. J. O. C. M. On the analysis and design of the end notched flexure (ENF) specimen for mode II testing. v. 20, n. 6, p. 594-604, 1986.

CLARK, J. D.; MCGREGOR, I. J. ULTIMATE TENSILE-STRESS OVER A ZONE - A NEW FAILURE CRITERION FOR ADHESIVE JOINTS. *Journal of Adhesion*, v. 42, n. 4, p. 227-245, 1993.

DA SILVA, L. F. M. et al. Analytical models of adhesively bonded joints-Part I: Literature survey. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 29, n. 3, p. 319-330, Apr 2009.

DE MORAIS, A. et al. Bilinear approximations to the mixed-mode I-II delamination cohesive law using an inverse method. *Composite Structures*, v. 122, p. 361-366, 2015.

DE MOURA, M. Numerical simulation of the ENF test for the mode-II fracture characterization of bonded joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*, v. 20, n. 1, p. 37-52, 2006.

DE MOURA, M.; CAMPILHO, R.; GONÇALVES, J. J. C. S. A. T. Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading. v. 68, n. 10-11, p. 2224-2230, 2008.

DE MOURA, M.; CAMPILHO, R.; GONÇALVES, J. J. I. J. O. S. A. S. Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints. v. 46, n. 6, p. 1589-1595, 2009.

DE MOURA, M. et al. Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 28, n. 8, p. 419-426, 2008.

DE MOURA, M. F.; CAMPILHO, R. D.; GONÇALVES, J. P. Aplicação de Modelos Coesivos para a Determinação da Resistência Mecânica de Juntas Coladas. *Proceedings CLMEapos; 2008-5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, IICEM-2º Congresso de Engenharia de Moçambique.*, 2008.

GOLAND, M.; REISSNER, E. *Journal of Applied Mechanics*. vol, v. 11, p. 417, 1944.

HASHEMI, S.; KINLOCH, A. J.; WILLIAMS, J. The analysis of interlaminar fracture in uniaxial fibre-polymer composites. *Proc. R. Soc. Lond. A*, v. 427, n. 1872, p. 173-199, 1990.

HART-SMITH, L. J. *Adhesive-bonded single-lap joints*. Citeseer, 1973.

HINTON, M. J.; KADDOUR, A. S.; SODEN, P. D. Failure criteria in fibre reinforced polymer composites: the world-wide failure exercise. Elsevier, 2004.

HYER, M. W.; WHITE, S. R. *Stress Analysis of Fiber-reinforced Composite Materials*. WCB McGraw-Hill, 1998.

IRWIN, G.; WELLS, A. A. A continuum-mechanics view of crack propagation. *Metallurgical Reviews*, v. 10, n. 1, p. 223-270, 1965.

KALIDINDI, S. R.; ABUSAFIEH, A.; ELDANAF, E. Accurate characterization of machine compliance for simple compression testing. *Experimental Mechanics*, v. 37, n. 2, p. 210-215, Jun 1997.

KINLOCH, A. *Adhesion and adhesives: science and technology*. Springer Science & Business Media, 2012.

KWON, O. H.; KIM, S. T.; KANG, J. W. J. J. O. T. K. S. O. S. A study of the strain measurement for Al 6061-T6 tensile specimen using the digital image correlation. v. 28, n. 4, p. 26-32, 2013.

- MALLICK, P. K. Composites engineering handbook. CRC Press, 1997. ISBN 0824793048.
- NETO, J.; CAMPILHO, R. D.; DA SILVA, L. Parametric study of adhesive joints with composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 37, p. 96-101, 2012. ISSN 0143-7496.
- NGUYEN, V.-T. et al. Mechanical Properties Identification of Sheet Metals by 2D-Digital Image Correlation Method. *Advances in Material & Processing Technologies Conference*, v. 184, p. 381-389, 2017 2017.
- NIU, M. C.-Y. Composite airframe structures: practical design information and data. Adaso Adastra Engineering Center, 1992.
- ODI, R. A.; FRIEND, C. M. An improved 2D model for bonded composite joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v. 24, n. 5, p. 389-405, Oct 2004.
- PETRIE, E. M. Handbook of adhesives and sealants. 2000.
- POCIUS, A. V. Adhesion and adhesives technology: an introduction. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2012.
- RUDAWSKA, A. Adhesives: Applications and Properties. ExLi4EvA, 2016.
- REEDER, J. R.; REWS, J. H. Mixed-mode bending method for delamination testing. *AiAA Journal*, v. 28, n. 7, p. 1270-1276, 1990.
- SKEIST, I. Handbook of adhesives. Springer Science & Business Media, 2012.
- SYSTÈMES, D. Abaqus v6. 12 Documentation—ABAQUS analysis user's manual. Abaqus, Providence, RI, 2012.
- TOWSE, A. et al. The design and analysis of high load intensity adhesively bonded double lap joints. *International conference on deformation and fracture of composites*, 1997. p.479-488.
- VOLKERSEN, O. Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten. *Luftfahrtforschung*, v. 15, n. 1/2, p. 41-47, 1938.
- ZHAO, X.; ADAMS, R. D.; DA SILVA, L. F. M. Single Lap Joints with Rounded Adherend Corners: Experimental Results and Strength Prediction. *Journal of Adhesion Science and Technology*, v. 25, n. 8, p. 837-856, 2011.