Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto Politécnico

Evandro de Farias Vogas

Estudo da energia de fratura em modo misto de juntas coladas para diferentes tratamentos superficiais no substrato metálico

Nova Friburgo

2023

Evandro de Farias Vogas

Estudo da energia de fratura em modo misto de juntas coladas para diferentes tratamentos superficiais no substrato metálico

Dissertação apresentada, como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Materiais-Não-Metálicos.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Martins Sampaio

Nova Friburgo

2023

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/E

V877 Vogas, Evandro de Farias.
Estudo da energia de fratura em modo misto de juntas coladas para diferentes tratamentos superficiais no substrato metálico / Evandro de Farias Vogas. - 2023.
74 f. : il.

Orientadores: Eduardo Martins Sampaio.
Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

1. Mecânica da fratura– Teses. 2. Poços de pretóleo – Fraturamento hidráulico – Teses. 3. Adesivos- Teses. I. Sampaio, Eduardo Martins. II.. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto Politécnico. III. Título.

CDU 622.323:531.45

Bibliotecária Pâmela Lisboa CRB7/ 5965

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

_____ _____

Assinatura Data

Evandro de Farias Vogas

Estudo da energia de fratura em modo misto de juntas coladas para diferentes tratamentos superficiais no substrato metálico

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais, do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Materiais-Não-Metálicos.

Aprovada em 28 de novembro de 2023.

Banca examinadora:

_____

Prof. Dr. EDUARDO MARTINS SAMPAIO (Orientador)

Instituto Politécnico - UERJ

_____

Prof. Dr. JOAQUIM TEIXEIRA DE ASSIS

Instituto Politécnico - UERJ

_____

Prof. Dr. RANULFO MARTINS CARNEIRO NETO

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Nova Friburgo

2023

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus por me dar forças e me ajudar a seguir em frente nos momentos difíceis.

A minha avó Therezinha de Jesus Farias e minha mãe Auciléia Rodrigues Farias, por sempre acreditarem em mim e nos meus objetivos.

A minha família, as minhas irmãs Tatianne e Camila, e a Tamara, por me ajudar e apoiar sempre.

Ao professor e orientador Dr. Eduardo Sampaio, pela orientação, incentivo e aceite na parceria do desafio do projeto.

Ao professor Ranulfo Martins, pelas orientações e ajuda ao longo do projeto como um todo.

Aos técnicos Marcelo e Ricardo Hudson do LAA pelo suporte e auxílio nos momentos de ensaio e confecção dos corpos prova. Grandes colaboradores!

E aos amigos que fiz no Instituto Politécnico, destacando Caroline Souza e Thamires Negreiros.

RESUMO

VOGAS, Evandro de Farias. *Estudo da energia de fratura em modo misto de juntas coladas para diferentes tratamentos superficiais no substrato metálico.* 2023. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2023.

Este trabalho acadêmico tem como propósito analisar o desempenho mecânico da fratura em juntas metálicas coladas sob condições de carregamento combinado de tração (modo I) e cisalhamento (modo II), conhecido como modo misto. Para atingir esse objetivo, foi desenvolvido um novo dispositivo mecânico no Laboratório de Adesão e Aderência (LAA). Esse dispositivo, integrado a uma máquina de ensaios universais, possibilita a variação da relação entre os carregamentos de modo I e modo II. Essa abordagem visa proporcionar uma compreensão mais abrangente do comportamento da fratura em junções coladas sujeitas a diferentes condições de carregamento. Posteriormente, são realizados ensaios de fratura nas juntas metálicas coladas, empregando distintos tratamentos superficiais. Os resultados experimentais desses ensaios são então utilizados para desenvolver os envelopes de falha associados a cada variante de tratamento superficial. Através dessa construção, efetua-se uma análise comparativa para examinar as disparidades nas propriedades mecânicas e no padrão de fratura das juntas coladas, levando em conta as diferentes abordagens de tratamento superficial. As juntas metálicas coladas com adesivo epóxi NVT foram fabricadas em um molde, utilizando dois métodos distintos de tratamento superficial, nomeadamente como jateamento e lixamento com MBX, sendo em seguida submetidas a ensaios no novo dispositivo projetado para avaliação em modo misto. Finalmente, os resultados obtidos são minuciosamente analisados, considerado que a discussão abrange a avaliação da energia de fratura das juntas coladas, sendo utilizado o Método CBBM (*Compliance Based Beam Method*) para a construção do envelope de falha. Este método independe do monitoramento da propagação da trinca, concentrando-se exclusivamente na carga P, controlada pela máquina de ensaios universais, e nas deformações em modo I (δ_I) e modo II (δ_{II}), monitoradas por LVDTs instalados no dispositivo. Os resultados revelam que o dispositivo desenvolvido é eficaz para testar a junta colada em modo misto, abrangendo diversas razões entre os modos I e II. Além disso, os resultados das juntas com substratos tratados por jateamento e MBX demonstram claramente a influência desses tratamentos superficiais na resistência à fratura e na dissipação de energia do material adesivo, fornecendo *insights* para a otimização dos processos de união de materiais e destacando a importância da seleção criteriosa de tratamentos superficiais na aplicação do adesivo NVT.

Palavras-chave: fratura; juntas coladas; adesivo NVT; energia de fratura; jateamento; lixamento MBX; envelope de falhas; modo misto.

ABSTRACT

VOGAS, Evandro de Farias. *Study of the fracture energy in the mixed mode of glued joints for different surface treatments in the metallic substrate.* 2023. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2023.

This academic work aims to analyze the mechanical performance of fracture in bonded metal joints under combined tensile (Mode I) and shear (Mode II) loading conditions, known as mixed mode. To achieve this objective, a new mechanical device was developed in the Materials Analysis Laboratory (LAA). This device, integrated with a universal testing machine, allows for varying the ratio between Mode I and Mode II loadings. This approach aims to provide a more comprehensive understanding of the fracture behavior in bonded joints subjected to different loading conditions. Subsequently, fracture tests are conducted on the bonded metal joints, employing different surface treatments. The experimental results from these tests are then used to develop failure envelopes associated with each surface treatment variant. Through this construction, a comparative analysis is performed to examine disparities in the mechanical properties and fracture patterns of the bonded joints, considering different surface treatment approaches. Metallic joints bonded with NVT epoxy adhesive were manufactured in a mold, incorporating two distinct surface treatment methods, namely blasting and MBX, and then subjected to tests on the new device designed for mixed mode evaluation. Finally, the obtained results are thoroughly analyzed, considering that the discussion covers the evaluation of the fracture energy of the bonded joints, using the Compliance-Based Beam Method (CBBM) to construct the failure envelope. This method is independent of crack propagation monitoring, focusing solely on the load P controlled by the universal testing machine, and deformations in Mode I (δ_I) and Mode II (δ_{II}), monitored by LVDTs installed on the device. The results reveal that the developed device is effective in testing the bonded joint in mixed mode, covering various ratios between Modes I and II. Furthermore, the results of joints with surfaces treated by blasting and MBX clearly demonstrate the influence of these surface treatments on fracture resistance and energy dissipation of the adhesive material, providing insights for optimizing material bonding processes and emphasizing the importance of careful selection of surface treatments in the application of NVT adhesive.

Keywords: fracture; glued joints; NVT adhesive; fracture energy; blasting; MBX sanding; fault envelope; mixed mode.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de falhas mais comuns 17
Figura 2 - Tipos de tensão encontradas em uma junta adesiva 18
Figura 3 - Representação esquemática do ensaio DCB 26
Figura 4 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio DBC 27
Figura 5 - Demonstração do ensaio ENF 28
Figura 6 - Decomposição de uma carga de modo misto em dois modos puros separados (I e II). 29
Figura 7 - Representação da FPZ - Fracture Process Zone em função da espessura do adesivo 31
Figura 8 - Zona de processo de fratura 33
Figura 9 - Representação esforços MMB no corpo de prova para medição de *aeq* 36
Figura 10 - Ilustração de um LVDT 39
Figura 11 - Modelo 3D do dispositivo MMB 40
Figura 12 - Configurações do dispositivo 42
Figura 13 - Arranjo do dispositivo em modo misto 43
Figura 14 - Representação do corpo de prova MMB com dimensões 44
Figura 15 - Substratos antes do tratamento superficial 45
Figura 16 - Equipamento COTIJATO utilizado no procedimento de jateamento dos CPs 46
Figura 17 - Substrato após tratamento superficial 46
Figura 18 - Equipamento MBX/MONTI utilizado no procedimento de tratamento superficial dos CPs 47
Figura 19 - Equipamento MBX/MONTI utilizado no procedimento de tratamento superficial dos CPs 47
Figura 20 - Rugosímetro portátil utilizado para medir rugosidade das superfícies 48
Figura 21 - Limpeza do CP 49
Figura 22 - Componente A e componente B 50
Figura 23 - Indicação do Fabricante 51
Figura 24 - Processo de mistura dos componentes do adesivo 51
Figura 25 - União dos corpos de prova com o adesivo 52
Figura 26 - Molde utilizado na união dos corpos de prova 52
Figura 27 - Remoção das juntas do molde 52
Figura 28 - Juntas coladas 53

Figura 29 - Ensaio modo misto utilizando dispositivo MMB 53
Figura 30 - Gráfico de Carga x Deslocamento para Jateamento 56
Figura 31 - Gráfico de Carga x Deslocamento para MBX 56
Figura 32 - Gráfico de Curva R – Jateamento - CP 05 Rácio 22,5 58
Figura 33 - Gráfico de Curva R - Jateamento - CP 24 61,7° 59
Figura 34 - Gráfico de envelope de falha para jateamento 60
Figura 35 - Gráfico de envelope de falha para lixamento MBX 61
Figura 36 - Gráfico de comparativo do tratamento de dados Jateamento e MBX 62
Figura 37 - Gráfico de comparação dos valores médios de GI no Jateamento e no MBX 63
Figura 38 - Gráfico de comparação dos valores médios de GII no Jateamento e no MBX 63
Figura 39 - Corpo de prova rompido após ensaio 64
Figura 40 - Falha das superfícies dos corpos de prova: a) ψ = 61.7°, b) ψ = 73.9°, c) ψ = 86.9° 65
Figura 41 - Falha das superfícies dos corpos de prova no MBX: d) ψ = 61.7°, e) ψ = 73.9°, f) ψ = 86.9° 66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	*American Society for Testing and Materials*
LAA	Laboratório de adesão e aderência
CBBM	*Compliance-based Beam Method*
CENPES	Centro de Pesquisa da Petrobras
CP	Corpo de prova
DP	Desvio padrão
DCB	*Double Cantilever Beam*
ENF	*End Notched Flexure*
MMB	*Mixed Mode Bending*
G_I	Energia de fratura no modo normal (modo I)
G_{Ii}	Energia de fratura no modo cisalhante (modo II)
G_{Ic}	Energia crítica de fratura modo normal (modo I)
G_{IIC}	Energia crítica de fratura em modo cisalhante (modo II)
G_C	Resistência à fratura
h	Espessura
L	Comprimento
P	Carga
t	Espessura do adesivo
δ	Deformação
C_0	Flexibilidade inicial
C	Flexibilidade
F	Força
LVDT	*Linear Variable Differential Transformer*
FPZ	*Fracture Process Zone*
UERJ	Universidade Estadual do Rio de Janeiro

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 11
1. OBJETIVOS 14
1.2 **Objetivos Específicos** 14
2 **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA** 15
2.1 **Juntas adesivas** 15
2.1.1 Vantagens das juntas adesivas 16
2.1.2 Desvantagens das juntas adesivas 16
2.1.3 Classificação dos tipos de falhas 16
2.1.4 Tipos de carregamentos 18
2.1.4.1 Esforço de tração 19
2.1.4.2 Esforço de compressão 19
2.1.4.3 Esforço de cisalhamento 20
2.1.4.4 Esforço de clivagem 20
2.1.4.5 Esforço do descascamento 20
2.1.5 Fatores que influenciam a resistência das juntas adesivas 21
2.2 **Tratamento superficial** 23
2.3 **Ensaios de fratura** 24
2.3.1. MODO I - ensaio de tração 26
2.3.2 MODO II - ensaio de cisalhamento 27
2.3.3 MODO MISTO (I+II) - ensaios em carregamento combinado (MMB) 29
2.4 **Métodos para determinação de GIc e $GIIc$** 30
2.4.1 Método para determinação de GIc – CBBM aplicado ao DCB 31
2.4.2 Método para determinação de $GIIc$ - CBBM - aplicado ao ENF 34
2.4.3 Método para determinação de GIc e $GIic$ – CBBM aplicado ao MMB 35
3 **SENSOR MECÂNICO E DISPOSITIVO** 39
3.1 **Sensor mecânico LVDT** 39
3.2 **Dispositivo Mixed Mode Bending (MMB)** 39
4 **METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS** 44

4.1 **Preparação dos corpos de prova** 44
4.1.1 Tratamento superficial 45
4.1.1.1 Jateamento 46
4.1.1.2 Lixamento MBX/MONTI 47
4.1.2 Colagem das juntas com adesivo NVT 49
4.2 **Execução dos ensaios do dispositivo MMB** 53
4.3 **Tratamento de dados** 55
5 **ANÁLISE E RESULTADOS** 55
5.1 **Comparativo dos resultados** 62
5.2 **Mecanismo de falha** 64
CONCLUSÃO 67
REFERÊNCIAS 68
APÊNDICE A - Medidas de rugosidade para o jateamento 71
APÊNDICE B - Medidas de rugosidade para o MBX 73

INTRODUÇÃO

Há um notável aumento no uso de juntas adesivas em diversos setores, como na indústria naval, aeronáutica e automotiva. Esse crescimento destaca a necessidade de aprimorar e expandir estudos relacionados a essa técnica, visando sua otimização e ampliação na aplicação em estruturas. A união por adesivos, que utiliza adesivos estruturais para unir substratos, apresenta vantagens em comparação com outras técnicas para o mesmo fim (Marques*et al*, 2014). Entre seus benefícios estão o custo de fabricação reduzido, a dispensa de calor para união dos substratos, uma distribuição eficaz de tensões e resistência a danos (Banea; Silva, 2009).

Diversos fatores influenciam a resistência de juntas coladas, como o tipo de material do substrato, o adesivo utilizado, a espessura do adesivo e do substrato, a geometria da junta, o tratamento superficial do substrato e a molhabilidade. Essa complexidade torna a obtenção de modelos de previsão de resistência de juntas coladas desafiadora, dada a interconexão de variáveis. Como resultado, muitas vezes, quando se utilizam juntas coladas, projetistas incorporam outros tipos de conectores, como rebites e parafusos, à estrutura final, sobrecarregando-a com pontos adicionais de concentração de tensão, custos extras e peso adicional (Carneiro Neto, 2017).

O modelo de dano coesivo (MDC), em conjunto com elementos finitos, tem sido amplamente pesquisado para projetar juntas coladas com mais segurança, simulando o crescimento do dano com base em princípios de energia (Campilho*et al*, 2013). No entanto, a determinação das propriedades da interface da junta colada é uma das principais dificuldades na modelagem de uniões adesivas. Para aplicar o MDC associado ao MEF, são necessárias medições das propriedades coesivas, caracterizando as energias liberadas no início da propagação das trincas nas direções normais e de cisalhamento, modo I e modo II. Apesar de o processo inicial de propagação da trinca poder começar com carregamento unidirecional de tração ou cisalhamento, sua propagação ocorrerá nos dois modos simultaneamente, ou seja, no modo misto.

Este trabalho é uma continuidade de pesquisas anteriores realizadas no LAA sobre a propagação de trincas em juntas metálicas coladas. Em 2019, na dissertação de mestrado de Silva, Felipe Pereira, intitulada "Estudo da tenacidade à fratura de juntas adesivas sob modo

misto (I+II) através do ensaio MMB-*Mixed Mode Bending*", o LAA desenvolveu o primeiro dispositivo de módulo misto para juntas coladas. Com o *know-how* adquirido em confecção de corpos de prova e em projetos mecânicos em diversas dissertações sobre o tema, a equipe do LAA, em parceria com o CENPES/PETROBRAS, projetou e construiu um novo dispositivo de modo misto. Este dispositivo permite a variação/razão do carregamento em modo I (tração) e modo II (cisalhamento). A PETROBRAS tem interesse em obter uma avaliação mais realista da energia de fratura para aprimorar os modelos de comportamento mecânico das juntas coladas, proporcionando maior segurança em sua aplicação em campo.

Por outro lado, o tratamento superficial dos substratos é um procedimento crucial para obter juntas coladas com elevada resistência mecânica. Esse tratamento é realizado para melhorar a adesão e a aderência, criando rugosidade na superfície e aumentando a tensão superficial. Dessa forma, a investigação dos impactos dos tratamentos na otimização dessa técnica de união assume grande relevância, principalmente na análise do envelope de falha das juntas coladas.

Nesse contexto, este estudo tem como objetivo qualificar o novo dispositivo de modo misto em termos de seu funcionamento e analisar a influência dos processos de tratamento superficial mais comuns nas instalações industriais no envelope de falha no modo misto das juntas coladas. Isso será realizado por meio do Método CBBM (*Compliance Based Beam Method*), que independe do acompanhamento da propagação da trinca. O experimento é apenas dependente da carga aplicada P, monitorada pela máquina de ensaio universal, e das deformações em modo I (δ_I) e modo II (δ_{II}), monitoradas por dois LVDTs instalados no dispositivo.

Esta dissertação é estruturada em sete capítulos organizados da seguinte forma. O primeiro capítulo serve como uma introdução, fornecendo uma contextualização aprofundada do tema em discussão.

O segundo capítulo descreve os objetivos, tanto gerais quanto específicos, de maneira detalhada.

No terceiro capítulo, uma revisão bibliográfica abrangente é realizada, cobrindo tópicos como juntas adesivas, tratamento superficial e ensaios de fratura. Este capítulo explora as vantagens e desvantagens, classificação de falhas e tipos de carregamentos. Além disso, o método CBBM para determinação de G_{Ic} e G_{IIc} é discutido em detalhes.

O quarto capítulo apresenta o sensor mecânico LVDT e o dispositivo *Mixed Mode Bending* (MMB) desenvolvido, proporcionando uma visão detalhada de sua funcionalidade e aplicação.

O quinto capítulo detalha a metodologia e os procedimentos experimentais, incluindo tratamento superficial, jateamento, lixamento MBX e colagem das juntas. Este capítulo também se concentra na execução dos ensaios MMB e no tratamento de dados.

A análise e os resultados são apresentados no sexto capítulo, que inclui um comparativo dos tratamentos de dados e o mecanismo de falha.

Finalmente, o sétimo capítulo conclui o trabalho, fornecendo uma síntese das descobertas e contribuições significativas feitas ao longo da pesquisa. O documento é encerrado com a lista de referências, reconhecendo as contribuições de outros pesquisadores e trabalhos no campo.

1. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a variação da energia de fratura em juntas metálicas coladas, sujeitas a diferentes tratamentos superficiais, sob carregamento em modo misto (Modo I e Modo II). Essa análise será realizada utilizando o método CBBM (*Compliance Based Beam Method*) e por meio do ensaio MMB (*Mixed Mode Bending*) no novo dispositivo desenvolvido no Laboratório de Adesão e Aderência (LAA).

1.2 **Objetivos Específicos**

- Qualificar o novo dispositivo de fratura de módulo misto de juntas metálicas coladas desenvolvido no Laboratório de Adesão e Aderência (LAA).
- Estudar a energia de fratura em modo misto e levantar os envelopes de falha para dois diferentes tipos de tratamentos superficial, jateamento e lixamento MBX, no substrato metálico das juntas coladas com o adesivo estrutural NVT.
- Apresentar a metodologia/procedimento do cálculo do envelope de falha pelo método CBBM para a energia de fratura em módulo misto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 **Juntas adesivas**

A junta adesiva é composta pelos substratos (ou aderentes) e pelo adesivo. Os substratos referem-se aos materiais a serem unidos, podendo ser metálicos, de madeira, compósitos, entre outros. O adesivo estrutural, geralmente um material polimérico com tensão de cisalhamento acima de 6 MPa, é responsável por promover a união entre os substratos e transmitir as tensões entre eles.

A utilização das uniões adesivas tem crescido significativamente em diversos setores, tais como o aeronáutico, automotivo, naval e outros (Marques *et al*, 2014). Isso se deve às vantagens apresentadas pela técnica em comparação com outras formas de união, tais como parafusos e rebites. Entre as vantagens destacam-se: o baixo custo de produção; a resistência à fadiga; a distribuição uniforme da tensão; a capacidade de resistir aos danos e ausência de calor na união (Banea& Silva, 2009).

No entanto, a resistência das juntas adesivas depende de uma série de variáveis, tais como: os diferentes materiais do substrato, os diferentes adesivos e seus diversos processos de cura, a espessura do adesivo, a rugosidade do substrato, a molhabilidade do adesivo no substrato, a geometria da junta, o processo de união e o tipo de carregamento,entre outros (Carneiro Neto, 2017). Isso torna a obtenção de modelos de previsão da resistência de juntas coladas uma tarefa complexa, uma vez que seu comportamento não é trivial. Por esse motivo, em muitos casos, os projetistas adicionam outros tipos de conectores, como parafusos e rebites, sobrecarregando a estrutura final e gerando mais pontos de concentração de tensão, custo adicional e peso extra (Carneiro Neto, 2017).

Ainda para o autor Carneiro Neto (2017) sabendo da complexidade que existe em se produzir estruturas grandes e complexas de uma só vez, ter componentes que conectam as diferentes partes, com diferentes geometrias de uma estrutura facilita todo este processo. Ou seja, são fabricadas peças em menor escala e, posteriormente, estas são ligadas por meio de união adesivas, originando o produto final. Em geral, utiliza-se parafusos, rebites, soldas etc., para realizar a conexão de diferentes componentes. Porém, por apresentar excelentes características como versatilidade e baixo peso específico, as juntas adesivas vêm sendo muito utilizadas nos últimos tempos, o que aumenta a necessidade de mais estudos referente a este

objeto. Neto (2017) descreve as principais vantagens e desvantagens da utilização de juntas coladas.

2.1.1 Vantagens das juntas adesivas

• Une materiais diferentes sem permitir contato entre eles. Em outros casos poderia ocorrer corrosão galvânica;

• Distribuem os esforços de maneira mais uniforme do que a junção com fixadores mecânicos, reduzindo-se assim as concentrações de tensão;

• Alta capacidade de amortecer vibrações devido à natureza visco elástico dos adesivos;

• Boa resistência a fadiga;

• Boa resistência a corrosão;

• Além de possuir boa vedação, impede a entrada de umidade e detritos;

• Reduz o peso da estrutura;

• Permitem uniões com diversas geometrias dos substratos.

2.1.2 Desvantagens das juntas adesivas

• Os substratos geralmente necessitam de tratamento superficial;

• Os tempos de cura dos adesivos podem ser elevados;

• Baixa resistência ao fogo e a altas temperaturas;

• Difícil inspeção para verificação da qualidade da junta;

2.1.3Classificação dos tipos de falhas

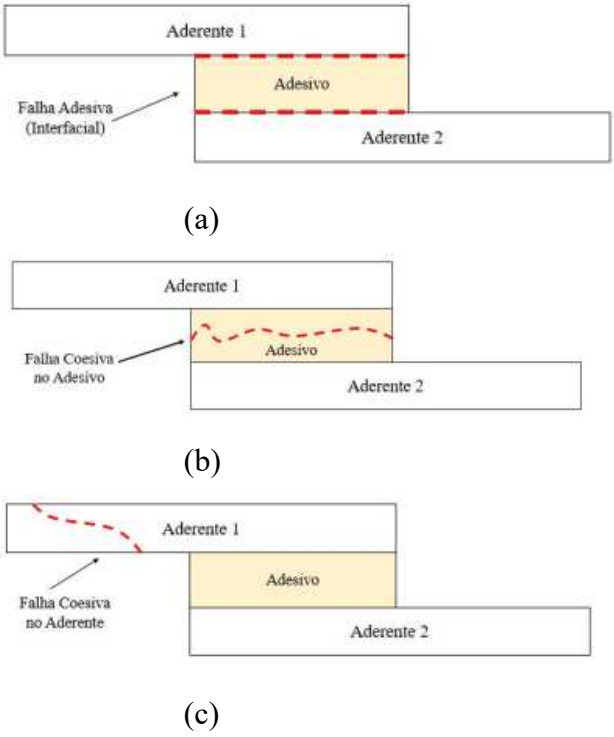
As falhas nas juntas coladas são classificadas como adesiva e coesiva, que são internas ao material, podendo ocorrer tanto no adesivo como no aderente (Sampaio, 1998). Quando há

falha na interface presente entre o adesivo e aderente, trata-se da falha dita como adesiva. Já a falha coesiva, falha ideal nas juntas coladas, se dá devido ao rompimento do adesivo (Figura 1 (b)). Uma junta colada é considerada bem-sucedida quando a falha resultante do carregamento é principalmente coesiva, indicando uma sólida adesão entre o substrato e o adesivo.

A falha nas juntas coladas é proveniente de vários fatores que geram imperfeições na colagem, como por exemplo: defeitos devido ao processo de colagem (bolhas, falta de uniformidade na espessura, contaminantes na superfície do substrato, etc..) e de cura do adesivo, pouca rugosidade devido ao tratamento superficial inadequado, pouca molhabilidade entre o adesivo e o substrato, o que acabam por prejudicar um máximo alcance por parte das forças de adesão e aderência.Como pode ser visto na Figura 1 (a), quando ocorre a falha adesiva, o adesivo segue totalmente unido a uma das faces do aderente.

Outro tipo de falha, menos comum, é o tipo de falha proveniente da estrutura do próprio aderente, como o nome já sugere e pode ser observada na Figura 1 (c). A falha mista que ocorre com muita frequência nas junta coladas, apresenta áreas adesivas e áreas coesivas ao longo do substrato.

Figura 1 - Tipos de falhas mais comuns



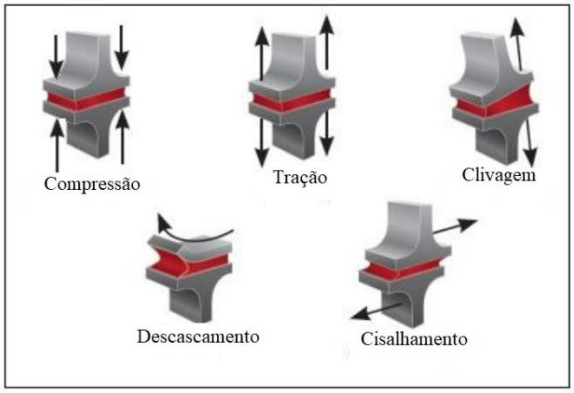
Fonte: Silva *et al,* 2012

Estudos mostram que a seleção do adesivo e a escolha adequada do método de preparação da superfície são fundamentais para minimizar os modos de falha das juntas adesivas (Banea; Silva, 2009). Além disso, a análise de falha permite identificar pontos de melhoria na técnica de união adesiva e auxilia na tomada de decisões para aprimorar a eficiência e a segurança das juntas.

2.1.4 Tipos de carregamentos

Para que haja ampliação da aplicação da união adesiva, são realizadas análises de seu comportamento quando submetida à diferentes tipos de esforços, avaliando-se assim sua durabilidade e resistência. Estas análises possibilitam saber se essas juntas adesivas irão suportar os carregamentos ou se falharão em serviço. Os carregamentos mais comuns em que as juntas adesivas estão sujeitas são os esforços de compressão, tração, clivagem, descascamento e cisalhamento, que podem ser observados na Figura 2:

Figura 2 - Tipos de tensão encontradas em uma junta adesiva



Fonte: Adaptado de 3M, 2016.

As tensões de tração se manifestam quando há aplicação de forças perpendicularmente ao plano da junta, demandando que os substratos estejam alinhados de forma paralela e separados por forças normais. Contudo, na prática, a espessura do adesivo raramente se mantém uniforme ao longo de toda a extensão, e as forças raramente seguem uma direção completamente axial. Importante notar que a ocorrência exclusiva de rompimento devido à compressão é altamente improvável, conforme apontado por Bueno (2002) e Ribeiro (2012).

No âmbito das juntas coladas, as tensões de cisalhamento desempenham um papel de significativa importância. Além de sua fabricação simplificada, apresentam notável resistência

aos esforços cisalhantes, sendo fortemente indicadas para união de substratos sujeitos a tais esforços, proporcionando um incremento na resistência. (Cognard, 2005; Oliva, 2016).

Os esforços do tipo clivagem e arrancamento são reconhecidos como as principais fragilidades das juntas adesivas. A tensão de clivagem emerge quando os substratos são separados por forças que atuam nas extremidades da junta colada. Analogamente, a tensão de arrancamento se manifesta quando um ou ambos os substratos são flexíveis. Nestes carregamentos, a resistência é significativamente reduzida em comparação com as juntas de cisalhamento, devido à concentração de tensão em uma área muito restrita, enquanto nas juntas de cisalhamento há uma distribuição mais ampla na área colada, conforme evidenciado por Silva (2007) e Soares (2015). Em resumo, as cargas frequentemente resultam de combinações desses diferentes esforços.

Dado que cada categoria de força aplicada a uma junta adesiva resulta em um comportamento singular na junta, torna-se fundamental possuir um entendimento abrangente dos esforços que serão aplicados no projeto dessa junta. As cargas externas geram tensões locais que frequentemente superam a tensão média. Essas áreas de concentração de tensão, muitas vezes imprevisíveis, têm o potencial de influenciar significativamente a capacidade real de suporte da junta. Essa consideração minuciosa dos diferentes esforços é crucial para garantir o desempenho adequado e a durabilidade efetiva da junta adesiva.

2.1.4.1 Esforço de tração

No contexto das juntas coladas, as tensões de tração se manifestam quando as forças se propagam perpendicularmente ao plano de colagem. Idealmente, esperaríamos uma distribuição uniforme das tensões normais ao longo da colagem nesses casos. Entretanto, na realidade, os adesivos presentes em juntas coladas não experimentam tensões uniformes devido ao surgimento de picos de tensões de clivagem ou descascamento nas extremidades da zona de sobreposição. Portanto, em situações em que as juntas operam em regime de tração, é essencial que estejam perfeitamente alinhadas para assegurar um carregamento axial uniforme (Silva *et al,* 2012).

2.1.4.2 Esforço de compressão

No contexto do carregamento que busca comprimir os aderentes um contra o outro, como ilustrado na Figura 2b, ocorre uma tentativa de esmagamento da película de adesivo. Observa-se uma distribuição constante da tensão ao longo do adesivo, semelhante à distribuição observada em carregamentos de tração. Para manter o adesivo em compressão pura, é fundamental que as forças de compressão permaneçam alinhadas. Essa análise, baseada no trabalho de Silva, *et al* (2012), destaca a importância de manter a integridade do carregamento para garantir a eficácia da compressão do adesivo.

2.1.4.3 Esforço de cisalhamento

No plano do adesivo, as forças de cisalhamento atuam com o objetivo de induzir o escorregamento entre os dois aderentes. Geralmente, as juntas demonstram uma resistência superior quando submetidas a solicitações de cisalhamento, pois toda a área de aderência contribui para a força da junta.

Ao analisarmos a distribuição de tensões de cisalhamento em uma junta de sobreposição simples, observamos que há uma maior concentração de tensão nas extremidades em comparação com a parte central da ligação. Essa característica é justificada pelo efeito de deformação diferencial de cada aderente ao longo do comprimento da sobreposição. De fato, os aderentes se deformam longitudinalmente a uma taxa crescente, desde uma extremidade até a oposta da sobreposição, conforme destacado por Pinto*et al* (2009).

2.1.4.4 Esforço de clivagem

Os esforços de clivagem se manifestam pela formação de uma abertura em uma das extremidades da ligação entre aderentes rígidos, como mostrado na figura 2d. Esse fenômeno provoca a distribuição dos esforços normais por um comprimento considerável, conforme ilustrado na figura 4a, resultando na separação dos aderentes. Notavelmente, há uma concentração significativa de tensões na extremidade da junta sujeita a forças de clivagem, como discutido por Pinto *et al* (2009).

2.1.4.5 Esforço do descascamento

O esforço de descascamento, semelhante aos esforços de clivagem, distingue-se pelo fato de envolver substratos finos e flexíveis, capazes de se deformar plasticamente sob a ação das forças aplicadas. Nesse cenário, todas as tensões se concentram em uma área muito pequena, próxima à aplicação da carga, conforme explicado por Pinto *et al* (2009).

2.1.5 Fatores que influenciam a resistência das juntas adesivas

As juntas adesivas são amplamente utilizadas em diversas áreas, como na indústria aeronáutica e automotiva, devido às suas vantagens em relação a outras técnicas de união. No entanto, há uma série de fatores que influenciam a resistência dessas juntas, o que torna a previsão de sua resistência um desafio complexo.

Um dos fatores que influenciam a resistência das juntas adesivas é o tipo de material utilizado para o substrato e para o adesivo. De acordo com Marques, *et al* (2014), a escolha do material deve levar em consideração as propriedades mecânicas, como a resistência à tração, à compressão e ao cisalhamento, bem como as características químicas, como a compatibilidade entre o substrato e o adesivo.

Outro fator importante é a espessura tanto do adesivo quanto do substrato. A espessura do adesivo afeta a distribuição de tensão ao longo da junta adesiva, enquanto a espessura do substrato influencia a área de adesão disponível. Banea e Silva (2009) apontam que a espessura ideal do adesivo deve ser determinada experimentalmente, levando em consideração as propriedades do material e o tipo de carregamento ao qual a junta será submetida.

Segundo CarneiroNeto(2017), a geometria da junta afeta a distribuição de tensão e pode levar a concentrações de tensão em pontos específicos, o que pode causar o início de trincas ou falhas. Por isso, é importante escolher a geometria da junta adequadamente e dimensioná-la de acordo com as propriedades dos materiais e as cargas a que estará submetida.

É sabido que tratamentos superficiais podem alterar G_{Ic} e G_{IIc}e, no trabalho desenvolvido por Rikards*et al*, 1996, fibras de vidro foram estudadas, a fim de analisar as influências de dois diferentes tratamentos superficiais nos modos I, II e misto. Os autores relataram que, no Modo I, o crescimento da trinca ao longo do ensaio DCB, é acompanhada por uma extensa ponte de fissura. Quando analisados os dois diferentes tipos de tratamentos

superficiais, relatou-se haver aumento na resistência à fratura interlaminar considerável de acordo com o crescimento da trinca. E, além disso, o ensaio em modo misto, apresentou semelhança com o ensaio DBC (modo I).

No trabalho desenvolvido por Barros*et al* (2017), estudou-se a influência da rugosidade da superfície de substratos de aço maciço na resistência à fadiga em placas coladas com juntas adesivas. Os autores utilizaram três diferentes tratamentos superficiais – jato de areia, jato de cascalho e jato de cerdas – em amostras de aço A36 e realizaram testes do modo II (ENF), de forma estática e dinâmica.

Ainda de acordo com Barros *et al* (2017) para tais análises, foram realizados testes de fadiga de alto ciclo nas juntas adesivas submetidas aos diferentes tipos de tratamento térmico e, ainda, testes de cisalhamento, a fim de obter informações quanto a carga de falha. Ao se comparar a superfície com os diferentes tratamentos, notou-se que o jateamento de cerdas resultou numa baixa rugosidade e superfície irregular. Já o jato de cascalho apresentou superfície, aproximadamente, três vezes mais áspera, quando comparada as demais. Com os resultados obtidos, foi concluído que há uma diferença considerável em juntas tratadas e não tratadas termicamente, quando submetidas à carregamentos estáticos e dinâmicos.

O trabalho desenvolvido por Martínez-Landeros*et al* (2019) teve o objetivo de estudar a eficácia de tratamentos superficiais em relação à resistência final de juntas adesivas, ao serem realizados os diferentes tipos de tratamentos superficiais, os autores concluíram que, quando a superfície é modificada, há alteração da molhabilidade e da energia de superfície. Além disso, ressaltou-se a importância do lixamento no processo de preparação da superfície, podendo resultar em uma maior rugosidade superficial. Analisou-se, ainda, em relação à energia de superfície, o ângulo de contato com a resistência da camada de ligação, medido através do teste DCB. Os processos realizados na superfície resultaram em aumento da resistência à fratura interlaminar. O tratamento superficial visa obter uma interligação mecânica mais resistente, além de maior compatibilidade química entre s materiais (Sampaio, 1998). Buscando propiciar na junta uma ruptura coesiva, no adesivo ou no substrato (Carbas, 2008).

Além desses fatores, há outros que podem influenciar a resistência das juntas adesivas, como a temperatura, umidade, tempo de cura do adesivo, taxa de carregamento e o tipo de carregamento. Todos esses fatores devem ser considerados ao se projetar uma junta adesiva, a fim de garantir sua resistência e durabilidade.

Em resumo, a resistência das juntas adesivas é influenciada por uma série de fatores, desde a escolha dos materiais até a geometria da junta e o tipo de carregamento ao qual ela será submetida. É importante considerar todos esses fatores na hora de projetar uma junta adesiva, a fim de garantir sua eficiência e segurança em uso.

2.2 **Tratamento superficial**

A etapa crítica do processo de colagem é o tratamento das superfícies dos substratos a serem unidos. Isso se deve à interferência na vida útil e na resistência da junta pela presença de contaminantes como óleos, graxas e poeiras (Santos, 2007). Uma maneira de avaliar o tratamento superficial é realizar ensaios destrutivos para observar como ocorre a ruptura. Se a ruptura for coesiva, pode-se assumir que o tratamento superficial é adequado. No entanto, se ocorrer uma ruptura adesiva, é necessário reavaliar a preparação superficial.

A influência dos tratamentos superficiais na resistência das juntas coladas tem sido extensivamente pesquisada. Cada combinação de substrato e adesivo possui uma condição de tratamento superficial que resulta em maior resistência, o que torna a análise específica para cada junta e apresenta desafios.

Estudos experimentais realizados por Silva*et al* (2009) em junta de cisalhamento simples de aço carbono investigaram o efeito do tratamento superficial na resistência da junta. Três adesivos foram utilizados: Sikaflex - 255 FC (muito dúctil), Araldite AV138/HV998 (muito frágil) e Araldite 2015 (intermediário com dois componentes de adesivo epóxi). Os resultados indicaram que os tratamentos superficiais realizados não aumentaram a resistência das juntas.

Pereira (2010), por sua vez, conduziu ensaios de tração com substratos de alumínio colados com adesivo epóxi, utilizando cinco tratamentos superficiais diferentes. Sua conclusão foi que a resistência ao cisalhamento dos corpos de prova aumentou com a redução da rugosidade superficial.

Silva*et al* (2010) investigaram a influência das rugosidades na preparação de superfícies coladas. Os resultados revelaram que o padrão de superfície impacta na resistência

mecânica da junta, sendo esse efeito mais pronunciado em corpos de prova sem tratamento superficial. Corpos de prova com rugosidade apresentaram rupturas mistas (coesivas e adesivas), enquanto aqueles sem rugosidades exibiram rupturas adesivas na interface.

Passos (2016) conduziu experimentos com substratos de material pultrudado colados com adesivo MasterPur, em configurações de juntas de cisalhamento simples. As tensões de ruptura média foram avaliadas para diferentes tipos de tratamento: lixamento manual, Primer de silano hidrolisado, Primer Almasuper, além de uma junta sem tratamento. Os resultados não demonstraram aumento na resistência mecânica das juntas, apesar da variação no nível de rugosidade.

Para aprimorar o uso de juntas adesivas, é necessário realizar estudos específicos sobre a influência no comportamento mecânico do tratamento superficial nos substratos. O tratamento superficial é uma etapa importante para a obtenção de uma boa aderência e adesão (Sampaio, 1998) entre os substratos e o adesivo, já que influencia diretamente na limpeza, na rugosidade e na molhabilidade da superfície (Mittal, 2013).

A fase crítica do procedimento de colagem reside na higienização das superfícies dos substratos destinados à união. Isso se deve à interferência, na longevidade da junta, causada pela presença de impurezas como óleos, graxas e poeiras, o que prejudica sua resistência (Santos, 2007). Uma abordagem para avaliar a eficácia do tratamento superficial consiste em realizar testes destrutivos e observar o padrão de ruptura. Se a ruptura for coesiva, presume-se que o tratamento superficial seja apropriado. Em contrapartida, se ocorrer uma ruptura adesiva, é necessário revisitar a preparação superficial.

2.3 **Ensaios de fratura**

Os ensaios de fratura são importantes para o estudo e análise do comportamento de materiais, incluindo juntas adesivas. Esses ensaios consistem em submeter o material a uma carga até que ocorra a falha, permitindo a medição de diversas propriedades, como resistência à tração, tenacidade à fratura e módulo de elasticidade (Santos*et al*, 2017)

Ainda para Santos*et al* (2017) existem diversos tipos de ensaios de fratura, incluindo os ensaios de tração, cisalhamento, compressão e flexão. Cada tipo de ensaio é indicado para avaliar um aspecto específico do comportamento do material em relação aos diferentes tipos de cargas.

No que se refere às juntas adesivas, os testes de fratura são conduzidos com o propósito de avaliar a força e desempenho do sistema, composto pelo substrato, adesivo, tratamento superficial e espessura adequada do adesivo; perante cargas de tração ou cisalhamento. Esses ensaios podem ser realizados em diferentes modos de fratura, como o modo I (tração), o modo II (cisalhamento) e o modo III (descascamento).

Outros fatores que podem ser avaliados nos testes de fratura das juntas adesivas incluem a taxa de deformação, a temperatura e a umidade. Além disso, é importante considerar o tipo de substrato utilizado, pois diferentes materiais podem apresentar comportamentos distintos em relação à aderência. Para garantir resultados precisos e confiáveis, os testes devem ser realizados de acordo com normas técnicas específicas e por profissionais qualificados na área. A análise dos resultados obtidos nos testes de fratura permite identificar possíveis falhas no sistema adesivo e realizar ajustes para melhorar o desempenho da junta adesiva em questão.

A caracterização das juntas adesivas é feita pela mecânica da fratura, a qual define os parâmetros coesivos com auxílio da mecânica do dano, possibilitando a simulação e projeto dessas juntas. Para que este projeto seja realmente possível, é preciso realizar a caracterização da tenacidade à fratura em modo I, II e misto (I e II). Neste caso, o objetivo obter a energia necessária para que haja propagação da trinca (G_c), sendo este parâmetro conseguido por meio dos ensaios de fratura. Os ensaios nos modos I, II e misto mais utilizados são, respectivamente, o *Double Cantilever Beam* (DCB), *End Notched Flexure* (ENF) e *Mixed Mode Bending* (MMB) (Costa *et al*, 2017).

Sendo assim, é importante destacar que a escolha do tipo de junta adesiva a ser utilizada também influencia diretamente na caracterização da fratura. Por isso, é necessário considerar as propriedades mecânicas dos materiais envolvidos e o ambiente em que a junta será exposta. Outro aspecto relevante é a análise da interface entre os substratos e a camada adesiva, pois essa região pode ser uma zona crítica para o desempenho da junta adesiva. Portanto, é fundamental realizar estudos detalhados sobre as características das juntas adesivas para garantir sua eficiência e segurança em diversas aplicações industriais.

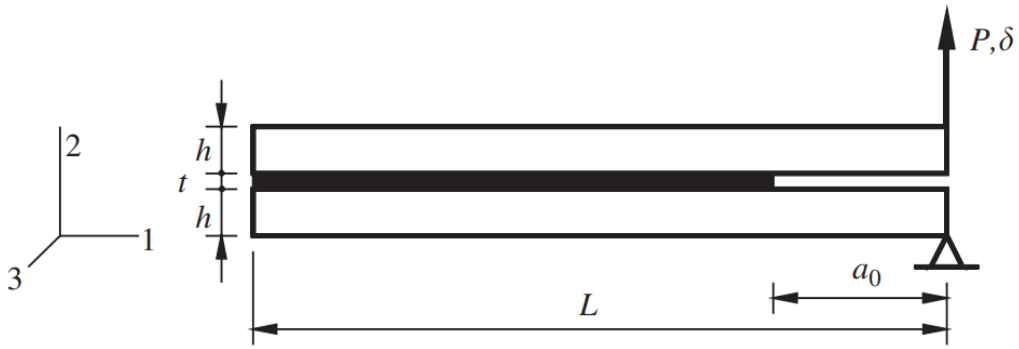
Esses ensaios permitem avaliar a resistência das juntas adesivas e identificar possíveis falhas ou problemas em sua aplicação. Além disso, são fundamentais para a validação de modelos de previsão de falha e para o desenvolvimento de novos materiais e técnicas de união.

De acordo com Santos *et al* (2017), os ensaios de fratura são considerados uma das principais ferramentas para a avaliação da qualidade das juntas adesivas e são amplamente utilizados na indústria aeronáutica e automotiva para garantir a segurança e confiabilidade dos produtos.

2.3.1. MODO I - Ensaio de tração

O ensaio com esforços unicamente em tração, segundo a Norma ASTM D3433-99 ("D-3433,"), é a descrição do ensaio DCB (*Double Cantilever Beam*), que é considerado um dos mais utilizados na descrição do comportamento de juntas adesivas no Modo I, além de fazer uso da teoria das vigas para calcular G_{Ic}. A representação do ensaio em questão, que atua sob efeito de tração, está exibida na Figura 3:

Figura 3 - Representação esquemática do ensaio DCB



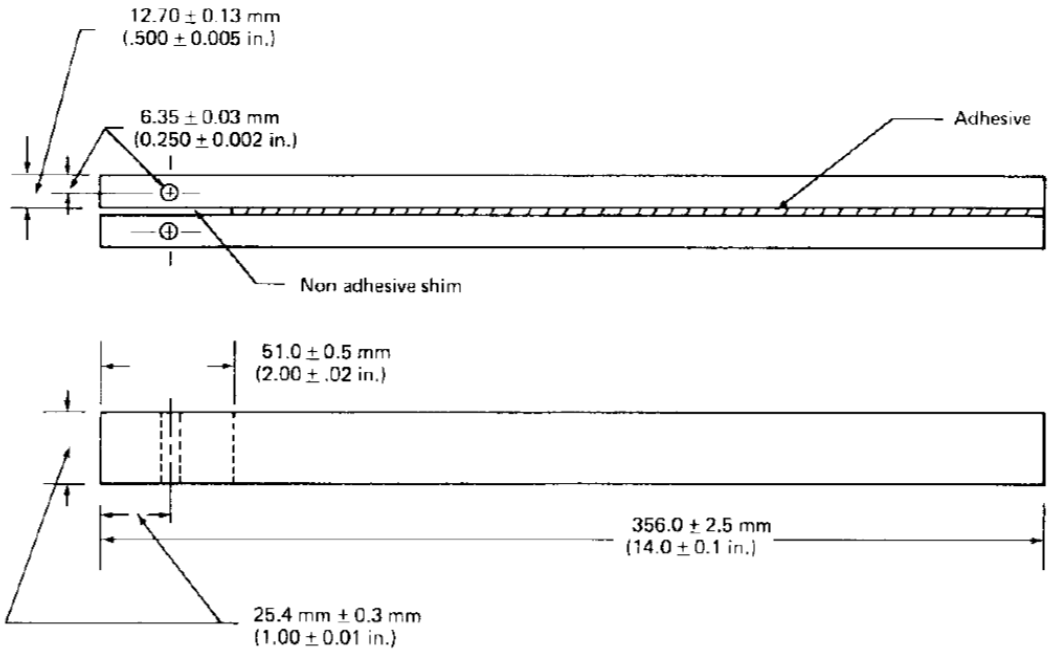
Fonte: Moura *et al*., 2008

Os corpos de prova têm um comprimento L, espessura h e, na Figura 3, está mostrado a espessura do adesivo t. Além disso, na extremidade em que é aplicada uma carga P e está sendo exibida a deformação (δ), há uma pré-trinca, com comprimento a_0.

A realização do ensaio é feita através de uma máquina de tração, sendo submetida ao corpo de prova uma força na direção perpendicular ao corpo de prova, induzido, assim, o crescimento da trinca. Ao longo do ensaio, registra-se os valores da carga aplicada (P), deslocamento (δ) e do comprimento da trinca, de acordo com o critério utilizado no cálculo da energia. Esta máquina é configurada para que haja abertura da pré-trinca em velocidade constante. A norma ASTM D3433-99 estabelece as dimensões necessárias para a realização do ensaio, como um comprimento total de 356 mm, distância da extremidade esquerda do

corpo de prova até o local de aplicação da carga de 25,4 mm e uma altura de 12,7 mm, como mostrado na Figura 4:

Figura 4 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio DBC



Fonte: D-3433

De acordo com a norma (“D-3433”) o ensaio DCB é descontínuo pois, conforme é iniciado o carregamento, a trinca inicia sua propagação e, neste intervalo, observa-se o avanço no crescimento da trinca, registando-se de forma paralela os valores da carga P e da deformação δ. Esse processo continua até que o valor de P atinja um valor aproximadamente constante. Quando existe instabilidade na propagação da trinca, há uma certa dificuldade em se conseguir determinar o valor de G_{Ic}. Esses casos necessitam de um método alternativo para aquisição do G_{Ic}, por exemplo, o método CBBM (*Compliance Based Beam Method*), no qual calcula capacidade de carga e comportamento estrutural de vigas, usando um modelo matemático baseado no princípio da conformidade. É útil para calcular a quantidade máxima.

2.3.2 MODO II - Ensaio De Cisalhamento

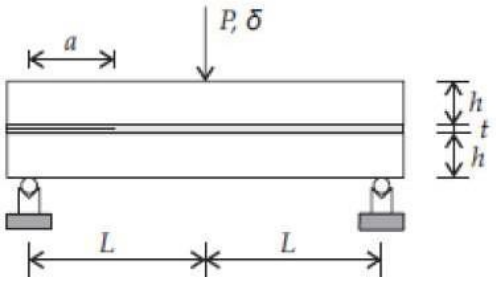
Em comparação com os ensaios de modo I, os ensaios de modo II ainda carecem de uma padronização adequada. Enquanto os ensaios de modo I para juntas adesivas já estão

normatizados, os ensaios de modo II ainda precisam passar por esse processo. Para a caracterização de juntas adesivas, os ensaios mais comuns para obtenção de resultados sobre tenacidade à fratura são o ENF, ELS e 4ENF (Lopes, 2014).

Apesar de muitos pesquisadores utilizarem esse método no estudo de juntas adesivas, a medição do comprimento da trinca em Modo II tem se mostrado desafiadora devido à natureza do ensaio, que atua sob efeito de cisalhamento. A ausência de abertura da pré-trinca resulta em uma propagação complexa da fratura, muitas vezes ocorrendo por meio de mecanismos de microfissura. Dessa forma, vários estudos classificam esse tipo de ensaio como apresentando uma elevada incerteza na medição experimental do comprimento da trinca em modo II (Lopes, 2014).

Este teste é amplamente utilizado para a caracterização de juntas adesivas em modo II, sendo a configuração do corpo de prova bastante semelhante ao ensaio DBC. Consiste em dois aderentes de espessura h conhecida, unidos por um adesivo de espessura t. No ensaio ENF, uma viga é apoiada em dois suportes, sendo carregada por uma carga P aplicada no meio, na extremidade oposta aos apoios. Inicialmente, é criada uma pré-trinca no adesivo em um dos lados do corpo de prova, com comprimento (a) conhecido, representando a região de concentração de tensão e propagação. O esquema do ensaio pode ser visualizado na Figura 5.

Figura 5 - Demonstração do ensaio ENF



Fonte: Esteves,2010.

Através do uso de uma máquina de ensaio universal, são registrados a carga P e o deslocamento δ, que serão posteriormente empregados no cálculo de G_{IIc}. Contudo, um ponto desfavorável nesse ensaio é a possibilidade de propagação instável da trinca, caso o comprimento inicial não seja adequadamente selecionado. Consequentemente, a trinca pode tender a se fechar, dificultando o acompanhamento da fratura durante o ensaio. Como alternativa e visando uma compreensão mais aprofundada do teste, alguns autores

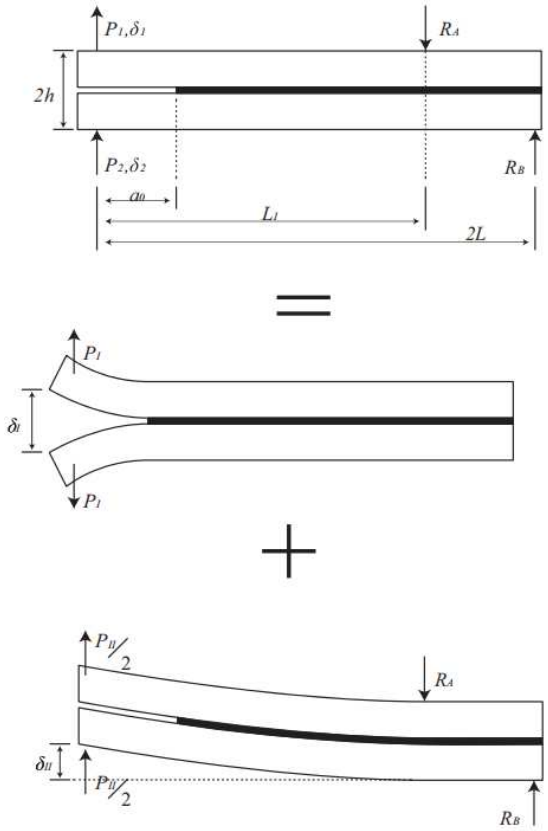
empregaram diversos métodos para monitorar e estudar o comportamento da trinca, os quais serão abordados na seção deste trabalho.

2.3.3 MODO MISTO (I+II) - Ensaios em carregamento combinado (MMB)

O ensaio no modo misto trata-se da combinação dos modos I e II e, consequentemente, da combinação de carregamentos. Este é um dos ensaios mais importantes, por ser o que mais se aproxima da realidade, visto que a maior parte dos carregamentos reais são em modo misto. Quando em modo misto, esta análise da junta adesiva torna-se um pouco mais problemática.

Esse tipo de ensaio é utilizado para determinar os valores de energia de fratura em materiais. A energia de fratura é a quantidade de energia necessária para que uma trinca se propague no material até a sua falha completa. Para realizar um ensaio de modo misto, é considerada a carga que atua na trinca como sendo composta por uma carga de modo I (DCB) e uma carga de modo II (ENF assimétrico), conforme ilustrado na figura 6, onde P_1 e P_2são as forças aplicadas, L_1 é a distância para o suporte superior (R_A), 2L é a distância para o suporte inferior (R_B), a_0 é o comprimento de trinca e 2h é a espessura da junta.

Figura 6 - Decomposição de uma carga de modo misto em dois modos puros separados (I e II).



Fonte: Costa*et al,* 2017

A carga de modo I atua perpendicularmente à trinca, enquanto a carga de modo II atua paralelamente à mesma. (Costa *et al,* 2017)

Ainda para Costa *et al* (2017), ao separar as cargas em modos diferentes, torna-se possível aplicar o esquema para tratamento de dados CBBM independentemente para cada tipo diferente de carregamento. Isso permite obter valores mais precisos e confiáveis para a energia de fratura do material em questão.

Sendo assim, ensaio de modo misto é uma técnica utilizada para determinar os valores de energia necessários para propagar uma trinca em um material. Para isso, as cargas são separadas em modos diferentes e tratadas individualmente para obter resultados mais precisos.

Para um teste de modo misto, a determinação dos valores de energia de fratura é alcançada considerando a carga de modo misto como a soma de uma carga de modo I (DCB) e uma carga de modo II (ENF assimétrico). Ao fazer essa separação, o esquema de redução de dados CBBM pode ser aplicado independentemente para cada modo de carga.

2.4 **Métodos para determinação de G_{Ic} e G_{IIc}**

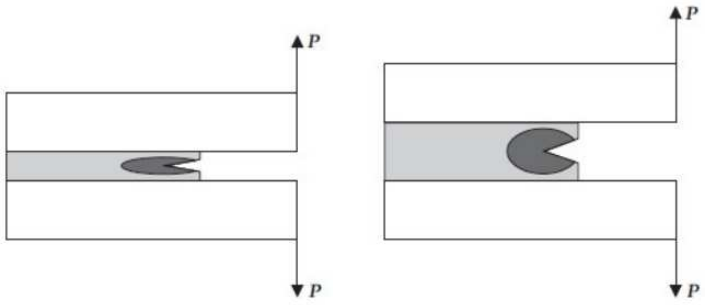
Alguns métodos foram criados que, quando associados ao ensaio, permitem obter os resultados de G_{Ic}e G_{IIc}. Esses métodos são modelos matemáticos que evoluíram ao longo do tempo com as abordagens de mecânica em juntas adesivas, resultando em métodos mais alinhados com a realidade. A seguir, esses métodos para os ensaios DCB, ENF e MMB serão apresentados.

2.4.1 Método para determinação de G_{Ic} – CBBM aplicado ao DCB

O método CBBM baseia-se no conceito da trinca equivalente. Este método tem a grande vantagem de não necessitar do cálculo da propagação da trinca durante o ensaio para a obtenção da tenacidade à fratura G_{Ic}.

Na extremidade da trinca, desenvolve-se uma zona de processo de fratura (ZPF), também conhecida como *Fracture Process Zone* (FPZ). Como se pode observar na fig. 13, a FPZ varia em função da espessura do adesivo e influencia o comportamento à fratura das juntas, aspecto que não é considerado nos modelos de dano coesivo. A FPZ é uma região existente na extremidade da trinca caracterizada por processos inelásticos, como microfissuras e micro deformação plástica, que resultam na absorção de parte da energia do ensaio. No caso de adesivos dúcteis, a energia dissipada na FPZ é ainda maior, devendo por isso ser levada em consideração.

Figura 7 - Representação da FPZ - Fracture Process Zone em função da espessura do adesivo



Fonte: Moura*et al*, 2008

DE MOURA *et al* (2008) explica que essa teoria depende exclusivamente da geometria do corpo de prova e de seu comportamento durante a execução do ensaio. Adicionalmente, a energia de deformação dos aderentes, resultante da rotação dos aderentes

na ponta da trinca e incluindo os esforços de cisalhamento, é calculada aplicando a teoria das vigas. Segundo essa teoria, a energia elástica de deformação, U, do corpo de prova é determinada pela expressão 1.

$$U = 2\left[\int_0^a \frac{M_f^2}{2E_1 I}dx + \int_0^a \int_{\frac{-h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{\tau^2}{2G_{13}} B dz dx\right] \qquad (1)$$

onde E_1 e G_{13} são as propriedades elásticas do material, o Módulo de Young e de Cisalhamento respectivamente, M_f é o momento fletor, B a largura do corpo de prova, h a espessura e I o momento de inércia da seção reta de um braço do corpo de prova dado pela expressão (2).

$$I = \frac{Bh^3}{12} \qquad (2)$$

A tensão de cisalhamento ao longo da espessura de cada aderente do corpo de prova é demonstrada como:

$$\tau = \frac{3P}{2Bh}\left(1 - \frac{z^2}{c^2}\right) \qquad (3)$$

Onde sendo c metade da espessura da viga, ($c = h/2$), e z metade de cota no sentido z.

Aplicando o Teorema de Castigliano consegue-se chegar na expressão para o deslocamento no ponto de aplicação da carga.

$$\delta = \frac{dU}{dP} = \frac{8Pa^3}{E_1 Bh^3} + \frac{12Pa}{5G_{13}Bh} \qquad (4)$$

A partir dessa expressão, é possível definir a flexibilidade do corpo de prova, C= δ/P, usando a curva de carga P – deslocamento (δ) obtida no ensaio DCB. No entanto, a teoria das vigas não considera todos os fenômenos que influenciam a curva P/δ. De fato, existem concentrações de tensões na face da trinca que durante o início da parte elástica da curva P/δ que, por exemplo, não são consideradas pela teoria das vigas.

Para superar essa limitação, Moura (2008) propõe o uso de um módulo de flexão equivalente E_f, que substituirá o módulo de elasticidade E_1, E_f é definido usando uma flexibilidade inicial C_0:

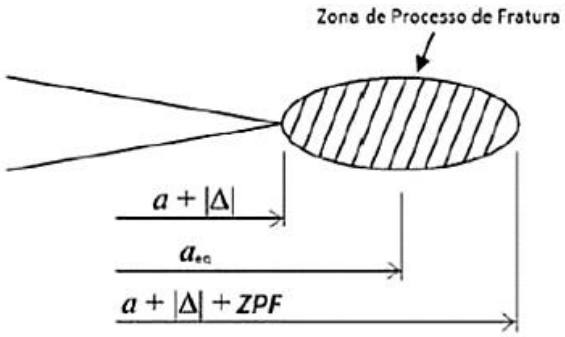
$$E_f = \left(C_0 - \frac{12(a_0 + |\Delta|)}{EBhG_{13}}\right)^{-1} \frac{8(a_0 + |\Delta|^3}{Bh^3} \qquad (5)$$

O parâmetro Δ (Figura 8) é um fator de correção do comprimento de trinca inicial a_0, obtido através da regressão linear do valor da flexibilidade $C_{1/3}$= f (a_0).

Uma outra forma de calcular os efeitos de rotação de raíz para juntas de aderentes homogêneos é proposto por Wang e Williams (1992), usando um parâmetro ΔI o qual poderá ser substituído no lugar de Δ na equação 5 e que é definido de acordo com a equação 6.

$$\Delta_I = h\sqrt{\frac{E}{11G_{13}}\left[3-2\left(\frac{r}{1+r}\right)^2\right]}, \quad \text{sendo } r = 1{,}18\frac{E}{G_{13}} \qquad (6)$$

Figura 8 - Zona de processo de fratura



Fonte: MOURA, 2008

Para levar em conta os efeitos da FPZ na região da trinca, deve ser considerado um comprimento equivalente (a_e) obtido em função da flexibilidade do corpo de prova registada durante o ensaio. O comprimento equivalente de trinca pode ser calculado a partir da equação 4, considerando a_{eq} ao em vez de a, onde a_{eq} = a + |Δ| + ΔaFPZ. O cálculo de a_{eq} é complexo e pode desenvolvido com uso de um programa matemático, o qual pode ser presentado pelas equações a seguir.

A equação 4 pode ser reescrita pela equação 7:

$$\propto a_e^3 + \beta a_e + \gamma = 0 \qquad (7)$$

Onde ∝, β e γ são dados por:

$$\propto = \frac{8}{Bh^3E_1};\ \beta = \frac{12}{5bhG_{13}};\ \gamma = -C, \text{sendo } C = \frac{\delta}{P} \qquad (8)$$

Com o uso do software MATLAB® e considerado apenas a solução real, é apresentado a expressão 9 para o comprimento equivalente (a_e).

$$a_e = \frac{1}{6a}A - \frac{2\beta}{A} \qquad (9)$$

Sendo que

$$A = \left(\left(-108\gamma + 12\sqrt{3\left(\frac{4\beta^3+27\gamma^2\alpha}{\alpha}\right)}\right)\alpha^2\right)^{\frac{1}{3}} \qquad (10)$$

Desta forma é possível chegar a uma equação para G_{Ic} onde não é restrita ao acompanhamento da programação da trinca a durante o ensaio, sendo este parâmetro substituído por um comprimento de trinca equivalente. Sendo assim o G_{Ic} pode ser representada de acordo com a expressão 11.

$$G_{Ic} = \frac{6P^2}{B^2h^3}\left(\frac{2a_e^2}{E_f} + \frac{h^2}{5G_{13}}\right) \qquad (11)$$

2.4.2 Método para determinação de G_{IIc} - CBBM - aplicado ao ENF

Como mencionado anteriormente, o ensaio ENF consiste na junção de dois aderentes de geometrias idênticas com um adesivo entre eles. Este adesivo possui uma pré-trinca em sua extremidade de comprimento e dimensões conhecidas.

Semelhante ao ensaio DCB, os métodos para determinação da tenacidade à fratura G_{IIc} pelo ensaio ENF podem ser divididos em: métodos que exigem a medição do comprimento da trinca, métodos que se baseiam no comprimento da trinca equivalente e o método baseado na integral J.

A partir do Teorema de Castigliano pode-se escrever a equação 12 de flexibilidade para o ENF.

$$C = \frac{3a^3+2L^3}{8E_1Bh^3} + \frac{3L}{10G_{13}Bh} \qquad (12)$$

Como o módulo de flexão desempenha um papel fundamental da curva P-δ, este pode ser calculado pela expressão anterior a partir da flexibilidade inicial C_0e o comprimento de trinca inicial a_0, como mostra a equação 13.

$$E_f = \left(\frac{3{a_0}^3+2L^3}{8Bh^3C_{0corr}}\right) \qquad (13)$$

Onde C_{0corr}é dado por:

$$C_{0corr} = \frac{3a_0^3+2L^3}{8Bh^3C_{0corr}} \qquad (14)$$

Durante a propagação da trinca é considerado uma correção ao comprimento real da trinca para incluir o efeito FPZ. Desta forma a equação de flexibilidade pode ser reescrita pela equação 15.

$$\mathrm{C} = \frac{3(\mathrm{a}+\Delta_{\mathrm{aFPZ}})^3+2\mathrm{L}^3}{8\mathrm{E_f Bh}^3} + \frac{3\mathrm{L}}{10\mathrm{G_{13}Bh}} \qquad (15)$$

Substituindo o Ef na equação nova de C, chega-se na expressão 16 para o comprimento da trinca equivalente.

$$a_{eq} = a + \Delta_{FPZ} = \left[\frac{C_{corr}}{C_{0corr}}a_0^3 + \frac{2}{3}\left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1\right)L^3\right]^{\frac{1}{3}} \qquad (16)$$

Em que:

$$C_{corr} = C - \frac{3L}{10G_{13}Bh} \quad \text{e} \quad C_{0corr} = C_0 - \frac{3L}{10G_{13}Bh} \qquad (17)$$

Desta forma o autor MOURA (2008) chega a equação 18 para cálculo G_{IIc} para o ensaio ENF que não necessita da mediação do comprimento da trinca durante a realização do ensaio.

$$G_{IIc} = \frac{9P^2}{16B^2E_fh^3}a_{eq}^2 = \frac{9P^2}{16B^2E_fh^3}\left(\left[\frac{C_{corr}}{C_{0corr}}a_0^3 + \frac{2}{3}\left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1\right)L^3\right]^{\frac{1}{3}}\right)^2 \qquad (18)$$

2.4.3 Método para determinação de G_{Ic} e G_{IIc} – CBBM aplicado ao MMB

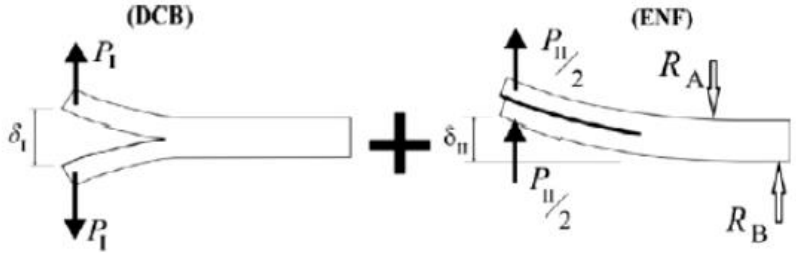
Como mencionado anteriormente, o ensaio MMB - *Mixed Mode Bending* combina os ensaios de modo I e modo II, respectivamente DBC e ENF, que são os mais utilizados para a caracterização da tenacidade à fratura em juntas adesivas. Assim para os ensaios DCB e ENF, foram combinados em um único método MMB para determinar a taxa de liberação de energia em juntas adesivas. Portanto, os métodos para calcular G_{Ic} e G_{IIc} pelo ensaio MMB podem ser

classificados em dois: o primeiro que requer a medição do comprimento da trinca durante o ensaio e o segundo, que é utilizado neste trabalho, se baseia no comprimento da trinca equivalente.

Moura *et al* (2007) também observaram que, assim como nos métodos para os ensaios DCB e ENF, a teoria das vigas não considera a zona FPZ nem as na região da trinca. Portanto, ele desenvolveu um estudo para determinar G_{Ic} e G_{IIc} aplicando os conceitos do comprimento da trinca equivalente no ensaio MMB.

Para uma compreensão inicial, Moura combinou os modos puros dos ensaios DCB e ENF apresentados na Figura 9 e, aplicando o Teorema de Castigliano, chegou às expressões 19 e 20 para as flexibilidades (C1 e CII) no ensaio.

Figura 9 - Representação esforços MMB no corpo de prova para medição de *aeq*



Fonte: Moura*et al*, 2007

$$C_I = \frac{\delta_I}{P_I} = \frac{8a^3}{E_1 B h^3} + \frac{12a}{5G_{13}Bh} \qquad (19)$$

$$C_{II} = \frac{\delta_{II}}{P_{II}} = \frac{3a^3+2L^3}{8E_1 B h^3} + \frac{3L}{10G_{13}Bh} \qquad (20)$$

A deformação δ_{II} é calculada por $\delta_{II} = \delta_c + \delta_I/4$, onde δ_c é o deslocamento medido no meio do corpo de prova no ponto de aplicação da carga e δ_I é o deslocamento medido no início do corpo de prova, na região da aplicação da carga em modo I.

Durante o teste, os deslocamentos aplicados aos braços da amostra (δ_I e δ_{II}) devem ser monitorados usando dois sensores mecânicos. Esses dispositivos podem ser fixados à placa de base e mantidos em contato com os elos verticais fixados às extremidades dos braços da amostra para medir seus deslocamentos. Seguindo este procedimento, a conformidade da estrutura de carga não influenciará a conformidade medida da amostra.

Um dos desafios críticos dos testes de fratura é a dificuldade de monitorar o comprimento da trinca durante sua propagação. Isso é especialmente desafiador quando o

carregamento do modo II predomina, pois a trinca tende a crescer em suas interfaces de contato, dificultando a identificação do início da trinca.

Além disso, existem vários aspectos que não são incluídos nas equações 19 e 20 que podem influenciar o comportamento do corpo de prova. De fato, questões como concentrações de tensões, a presença da camada adesiva e a existência da zona FPZ à frente da ponta da trinca durante a propagação não são incluídas nessas equações, o que resulta na absorção de parte da energia do ensaio. Para superar essa limitação, Moura (2007) propõe o uso de E_{fI}e E_{fII} para serem substituídos nas equações de C_I e C_{II} respectivamente no lugar dos módulos de elasticidade na direção longitudinal E_I.

$$E_{fI} = \left(C_{01} - \frac{12(a_0+h|\Delta_I|)}{5BhG_{13}}\right)^{-1} \frac{8(a_0+h|\Delta_I|^3}{Bh^3} \qquad (21)$$

$$E_{fII} = \frac{3a_0^3+2L^3}{8Bh^3}\left(C_{0II} - \frac{3L}{10BhG_{13}}\right)^{-1} \qquad (22)$$

Onde C_{0I} e C_{0II} são a flexibilidade inicial no corpo de prova. $|\Delta_I|$, desta forma, chega-se as equações 23 e 24 para cálculo de G_I e G_{II} respectivamente, pelo ensaio MMB em que não é necessário a medição da propagação da trinca.

$$G_I = \frac{12_{eqI}^2 P_I^2}{B^2h^3E_{fI}} \qquad (23)$$

$$G_{II} = \frac{9a_{eqII}^2 P_{II}^2}{16B^2h^3E_{fII}} \qquad (24)$$

Os comprimentos das trincas equivalentes a_{eqI} e a_{eqII} podem ser obtidos das seguintes expressões:

Modificando a equação para o a_{eq}do ensaio DCB, temos a expressão 25 para a_{eqI}:

$$a_{eqI} = a + h|\Delta| + \Delta a_{FPZ} = \frac{1}{6\alpha}A` - \frac{2\beta}{A`} \qquad (25)$$

Onde

$$\alpha = \frac{8}{Bh^3E_{fI}}; \beta = \frac{12}{5BhG_{13}}; \gamma = -C_I \qquad (26)$$

e

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

Modificando a equação para o a_{eq} do ensaio ENF, temos a expressão 28 para α_{eqII}.

$$\alpha_{eqII} = \alpha + \Delta_{FPZ} = \left[\frac{C_{IIcorr}}{C_{0IIcorr}}\alpha_0^3 + \frac{2}{3}\left(\frac{C_{IIcorr}}{C_{0IIcorr}} - 1\right)L^3\right]^{\frac{1}{3}} \quad (28)$$

onde

$$C_{IIcorr} = C_{II} - \frac{3L}{5G_{13}Bh} \quad \text{e} \quad C_{0IIcorr} = C_{0II} - \frac{3L}{5G_{13}Bh} \quad (29)$$

Desta forma é encontrada as equações 23 e 24 para o cálculo de G_I e G_{II} respectivamente, aplicados ao ensaio MMB em que não é necessário a medição da trinca, sendo apenas função da deformação δ_I e δ_{II}, que pode ser medido com o uso de um sensor mecânico LVDT.

3. SENSOR MECÂNICO E DISPOSITIVO

3.1 **Sensor mecânico LVDT**

Para determinar a curva carga – deslocamento (P – δ), é utilizada uma máquina de ensaio universal, que está conectada a um computador para o registro dos dados. Os deslocamentos podem ser medidos com o uso de um sensor de deslocamento LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*). O LVDT é um transdutor para medição de deslocamento linear, que é o movimento de um objeto em uma direção ao longo de um único eixo. A medição do deslocamento indica a direção do movimento. O sinal de saída do sensor de deslocamento linear representa a medição da distância percorrida por um objeto em unidades de milímetros (mm) ou polegadas (in), cujo valor pode ser positivo ou negativo.

O funcionamento desse sensor é baseado em três bobinas e um núcleo cilíndrico de material ferromagnético de alta permeabilidade. Ele produz um sinal linear, proporcional ao deslocamento do núcleo, que está fixado ou em contato com o que se deseja medir.

Figura 10 - Ilustração de um LVDT

Fonte: O autor, 2022

3.2 **Dispositivo Mixed Mode Bending (MMB)**

Mixed Mode Bending (MMB), também conhecido como flexão em modo misto, é um método de ensaio utilizado para avaliar a resistência e o comportamento de fratura e materiais compostos laminados ou juntas adesivas. Nesse método, são aplicados simultaneamente carregamentos de tração e cisalhamento à junta, criando uma combinação de modos I (tração) e II (cisalhamento) de fratura.

O objetivo do ensaio MMB é reproduzir as condições de carregamento realistas que as juntas adesivas ou as camadas laminadas podem encontrar em aplicações práticas, onde o carregamento é uma combinação de tração e cisalhamento. Esse tipo de carregamento misto pode ocorrer, por exemplo, em estruturas compostas sujeitas a carregamentos de flexão ou em adesivos submetidos a tensões variáveis.

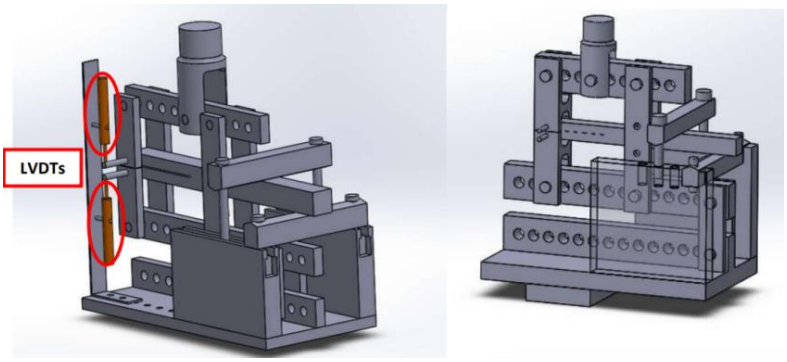
O desenvolvimento do dispositivo em questão demonstrado na figura 11, é resultado de uma colaboração entre a empresa NOVATEC, o Laboratório de Adesão e Aderência (LAA) e o Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES).

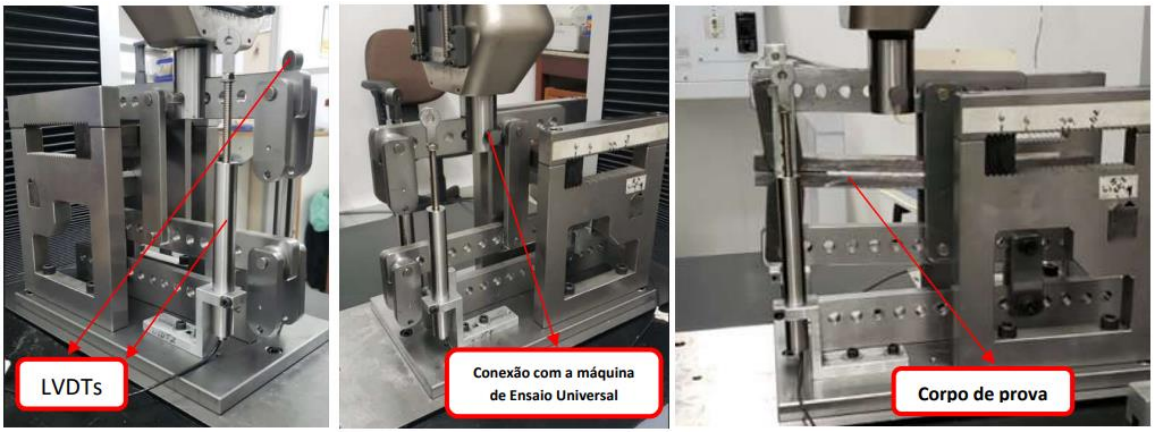
O equipamento foi projetado com base no artigo "*An apparatus for mixed-mode fracture characterization of adhesive joints*", dos autores Costa*et al* (2017), indicando uma fundamentação técnica sólida para o projeto. A finalidade principal do dispositivo é realizar testes de fratura em juntas coladas em modo misto, visando calcular o envelope de falha e a energia de fratura. Esses parâmetros são cruciais para a modelagem numérica de reparos de estruturas navais com materiais compósitos.

Para atender às demandas específicas de ensaios em modo misto, a NOVATEC, em colaboração com o LAA, desenvolveu um dispositivo pioneiro. Além disso, foi formado um grupo técnico para pesquisar, projetar e construir um novo equipamento para realizar esforços em modo misto em juntas metálicas. Essa abordagem demonstra uma abordagem sistemática e abrangente para abordar diferentes configurações em juntas coladas.

O resultado desse trabalho em equipe é um dispositivo totalmente ajustável, capaz de avaliar juntas coladas em diversas combinações entre os modos I e II. A presença de várias furações no equipamento permite acessar diferentes configurações, possibilitando a realização de testes de modos mistos com diferentes rácios, além dos modos I e II. Esse nível de versatilidade e adaptabilidade é fundamental para atender às diversas necessidades de pesquisa e desenvolvimento na área de fraturas de juntas coladas.

Figura 11 - Modelo 3D do dispositivo MMB





Fonte: NOVATEC, 2022

A metodologia típica para um ensaio MMB envolve a preparação de uma amostra composta por dois substratos e uma camada adesiva. A amostra é então submetida a um carregamento que induz tanto tração quanto cisalhamento simultaneamente. Isso pode ser alcançado por meio de uma configuração experimental específica que fornece as componentes de carga corretas.

Durante o ensaio MMB, são monitorados vários parâmetros, como a força aplicada, os deslocamentos e as deformações. Esses dados são analisados para determinar a energia crítica de fratura da junta adesiva ou da camada laminada, fornecendo informações cruciais sobre o comportamento de fratura do material.

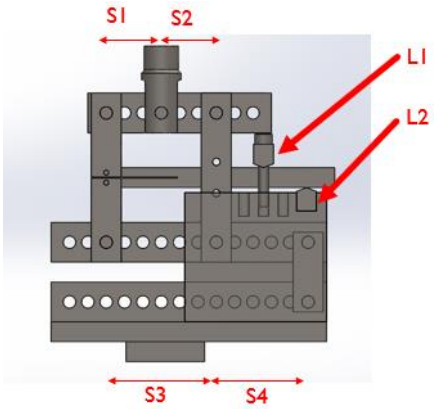
O ensaio MMB permite a caracterização e a compreensão das propriedades de fratura e resistência desses materiais em condições de carregamento misto. Essas informações são essenciais para o projeto e a otimização de estruturas adesivas e compósitas, contribuindo para a segurança e o desempenho dessas aplicações em uma variedade de setores, como aeroespacial, automotivo e construção civil.

O dispositivo descrito é projetado para aplicar esforços em modo misto com diferentes proporções dos modos normal (modo I) e de cisalhamento (modo II). Ele possui várias furações estrategicamente localizadas, permitindo o acesso a diversas configurações. Isso possibilita a realização de testes em modos mistos com diferentes razões, além do modo puro I e quase modo puro II.

A configuração do dispositivo é definida pelas distancias mostradas na figura 12 e detalhadas na Tabela 1. Essas distancias podem ser ajustadas de acordo com a configuração desejadas para alcançar a proporção de modos I e II necessária. Essa flexibilidade permite

uma ampla gama de combinações de modos de fratura, fornecendo uma caracterização abrangente do comportamento do material em modo misto.

Figura 12 - Configurações do dispositivo



Fonte: NOVATEC, 2022

Tabela 1 - ângulos e configurações do dispositivo

Ψ (^{0})	S_1(mm)	S_2 (mm)	S_3 (mm)	S_4 (mm)	L_1 (mm)	2L(mm)
0	60	100	160	-100	205	230
22.0	60	100	160	-60	205	230
56.6	60	80	140	80	180	130
61.7	40	60	100	120	165	220
73.9	40	40	80	120	135	210
86.9	100	40	140	80	170	270

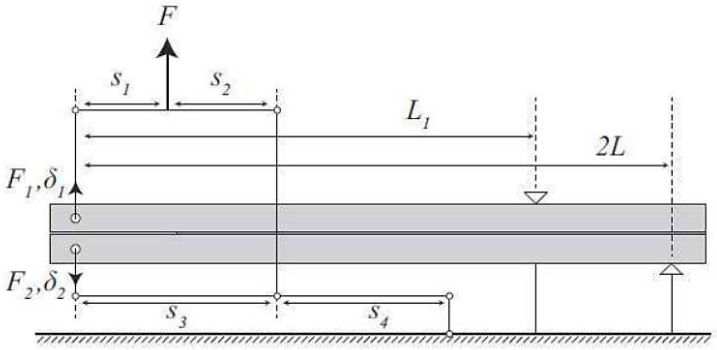
Fonte: NOVATEC, 2022

Essa capacidade de ajuste é essencial para reproduzir as condições de carregamento realistas que as juntas adesivas ou camadas laminadas podem encontrar em aplicações práticas. Ao permitir diferentes razões entre os modos de fratura, o dispositivo proporciona uma avaliação mais precisa e representativa do desempenho desses materiais em situações reais.

Essa configuração versátil do dispositivo de teste de modo misto é amplamente utilizado em pesquisas e indústrias relacionadas a materiais compósitos e adesivos. Ele desempenha um papel fundamental no projeto e na otimização de estruturas adesivas e

compósitas, permitindo uma compreensão aprofundada das propriedades de fratura e resistência em condições de carregamento misto.

Figura 13 - Arranjo do dispositivo em modo misto



Fonte: Costa*et al,* 2017

O arranjo do dispositivo em modo misto é calculado considerando o F como o local onde a força da máquina de tração é aplicada. F1 e F2 são as forças aplicadas, L1 é a distância do furo para o suporte superior, 2L é a distância entre o furo e suporte inferior, e as distâncias s1, s2, s3 e s4 são parâmetros que variam de acordo com o ângulo de fase aplicado.

4 METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste trabalho, adotou-se uma abordagem experimental para obter informações relevantes sobre as propriedades coesivas do adesivo selecionado para ser utilizado no projeto em questão. Por meio dessas análises, foi possível obter dados que serão fundamentais para o desenvolvimento da etapa de modelagem computacional, que será realizada em projetos futuros.

Foram realizados ensaios de carregamento combinado nas juntas, a fim de estudar as condições de aplicação do adesivo e sua resposta sob diferentes cargas e ângulos de fase. Esses ensaios permitiram avaliar o desempenho das juntas coladas, fornecendo informações valiosas que poderão ser utilizadas futuramente na modelagem computacional.

Assim, a metodologia adotada neste trabalho compreende a realização de ensaios experimentais para caracterização das propriedades coesivas do adesivo. Foram realizados dois tipos de tratamento das superfícies para efeito comparativo. Os ensaios em modo misto foram realizados para obtenção das energias de fratura e do envelope de falha.

4.1 **Preparação dos corpos de prova**

Para a confecção dos corpos de prova (CP) para o ensaio MMB foram utilizados dois aderentes de espessuras iguais. A geometria e dimensões destes corpos de prova podem ser observadas através da Figura 14.

Figura 14 - Representação do corpo de prova MMB com dimensões

z + ao	70	mm
z	25,4	mm
ao	44,6	mm
L	300	mm
ts	12,7	mm
ta	0,3	mm

Fonte: O autor, 2022.

Para os ensaios foram produzidos pelo menos cinco corpos de prova para cada rácio e para cada tratamento superficial avaliado, conforme a tabela 2 demonstra.

Tabela 2 - Quantidade de CPs fabricados para cada Rácio testado

RÁCIO (°)	0	22	56,6	61,7	73,9	86,9	TOTAL
JATEAMENTO QTD (UN)	5	5	5	5	5	5	60
MBX QTD (UN)	5	5	5	5	5	5	

Fonte: O autor 2023.

4.1.1 Tratamento superficial

Antes de proceder à união dos corpos de prova feitos em aço carbono, foi necessário realizar uma etapa prévia de preparação da superfície com o intuito de promover uma melhoria na aderência do adesivo NVT, aumentando a rugosidade da superfície e também assegurar que ela esteja limpa e em condições ideais para permitir a aderência adequada das superfícies. Tal procedimento é essencial para garantir que os resultados alcançados sejam confiáveis e precisos, visto que qualquer contaminação ou impureza na superfície pode comprometer as propriedades mecânicas do material em questão. Portanto, é crucial seguir rigorosamente todos os protocolos de preparação da superfície antes da adesão dos corpos de prova ser realizada. Neste trabalho foram utilizadas duas formas distintas para o tratamento de superfície, o jateamento com granalha e o lixamento com MBX.

Figura 15 - Substratos antes do tratamento superficial

Fonte: O autor, 2022.

4.1.1.1 Jateamento

Os corpos de prova foram submetidos a um processo de jateamento com granalhas de aço classe SAE G40, que tem como objetivo aumentar a rugosidade da superfície para melhorar a aderência do adesivo NVT. A Figura 16 ilustra o equipamento utilizado durante o processo de jateamento, enquanto a Figura 17 mostra os corpos de prova após a conclusão do procedimento. Essas informações são importantes para garantir que os resultados do teste sejam precisos e confiáveis.

Figura 16 - Equipamento COTIJATO utilizado no procedimento de jateamento dos CPs

Fonte: O autor, 2022.

Figura 17 - Substrato após tratamento superficial

Fonte: O autor, 2022.

4.1.1.2 Lixamento MBX/MONTI

O MBX *Bristle Blaster* é uma ferramenta pneumática (também pode ser elétrica) utilizada para a tratamento de superfícies metálicas. Ele consiste em pontas de cerdas de arame que são montadas em um cubo rotativo de uma ferramenta manual. A ferramenta opera a uma velocidade de aproximadamente 2500 rotações por minuto, sendo alimentada por ar comprimido (ou energia elétrica). As pontas dos fios individuais da escova atingem a superfície e imediatamente retraem, o que resulta na remoção da corrosão e cria uma textura na superfície. Este processo pode resultar em superfícies localmente quentes e na geração de faíscas mecânicas. Portanto, é uma ferramenta eficaz para a remoção de corrosão e a preparação de superfícies metálicas. (Wingerden, 2009)

Durante o desenvolvimento do estudo, além da técnica de jateamento superficial, foi realizado o processo de lixamento com MBX para fins comparativos do envelope de falha. Esse tratamento teve como objetivo promover uma melhoria na aderência do adesivo NVT, aumentando a rugosidade da superfície. As figuras 18 e 19 deste estudo apresentam o equipamento utilizado para a execução desse procedimento superficial.

Figura 18 - Equipamento MBX/MONTI utilizado no procedimento de tratamento superficial dos CPs

Fonte: O autor, 2022.

Figura 19 - Equipamento MBX/MONTI utilizado no procedimento de tratamento superficial dos CPs

Fonte: O autor, 2022.

Após a finalização do tratamento superficial, para verificar se as superfícies dos corpos de prova apresentavam uma rugosidade uniforme, foi realizada a medição da rugosidade das superfícies por meio do uso do rugosímetro apresentado na figura 20.

Figura 20 - Rugosímetro portátil utilizado para medir rugosidade das superfícies

Fonte: O autor, 2022.

Para remover impurezas como umidade, graxa, óleo, entre outros, utilizou-se acetona, como demonstrado na figura 21:

Figura 21 - Limpeza do CP

Fonte: O autor, 2023.

O objetivo deste procedimento de limpeza do corpo de prova com acetona é assegurar que nenhum resíduo prejudicial seja deixado durante a etapa de colagem das juntas. É importante garantir que o corpo de prova esteja completamente limpo antes da aplicação do adesivo, pois qualquer resíduo pode afetar negativamente a aderência e durabilidade da junta. Portanto, a utilização de acetona é uma medida preventiva para garantir a qualidade e eficácia do processo de colagem.

4.1.2 Colagem das juntas com adesivo NVT

O adesivo NVT é amplamente utilizado na indústria devido às suas propriedades adesivas e coesivas, pois apresenta uma excelente resistência ao cisalhamento e uma alta capacidade de adesão em diferentes substratos. Essas características foram comprovadas em testes laboratoriais, nos quais o adesivo demonstrou desempenho satisfatório tanto em condições ambientais normais quanto em ambientes agressivos, como alta umidade e temperaturas extremas.

O adesivo estrutural de base epóxi utilizado neste trabalho é o NVT, o qual é fornecido pela empresa *Fine Composites*, apresenta uma base de diglicidil éter de bisfenol-A (DEGBA) e agente de cura com base em poliamidas/poliaminas. O adesivo NVT apresenta rápida cura e elevada resistência à abrasão.

Os valores do módulo de Young e tensão normal máxima do adesivo NVT, foram utilizadas dos trabalhos desenvolvidos por Rohen*et al*, 2010 e Silva, 2018. Segue abaixo a

Tabela 3, em que são mostrados, respectivamente, os parâmetros, valores e normas para determinação das propriedades do adesivo NVT curado.

Tabela 3 - Propriedades do adesivo NVT curado

Parâmetros	Tensão máxima (Mpa)	Tensão de cisalhamento (MPa)	Teste de abrasão (%perda de massa)	Dureza	Perda de massa TGA (°C)
Valores	27,25	16	0,45	60	>300
Normas	ASTM D638	ASTM D1002	DIN 53516	ASTM D2240	-

Fonte: Adaptado de Silva, 2018.

O processo de preparação do adesivo envolveu a mistura cuidadosa dos elementos A e B em uma proporção precisa de 2 x 1, conforme indicado pelo fabricante, conforme Figura 22 e Figura 23.

Figura 22 - Componente A e componente B

Fonte: O autor, 2023.

Figura 23 - Indicação do Fabricante

Fonte: O autor, 2023.

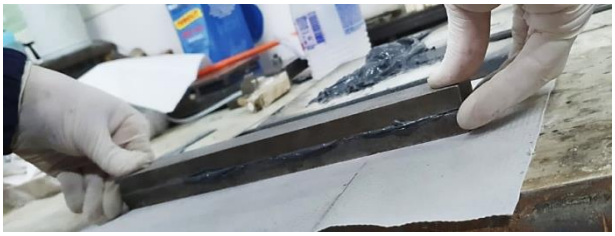
Essa etapa é crucial para garantir a eficácia do adesivo e sua capacidade de aderir adequadamente às superfícies desejadas. Após a mistura, a solução resultante foi então colocada em pequenas quantidades no molde, o que é fundamental para evitar a formação de bolhas no CP final. A figura 24 ilustra o processo de mistura do adesivo, mostrando cada etapa com detalhes importantes que garantem um resultado final satisfatório.

Figura 24 - Processo de mistura dos componentes do adesivo

Fonte: O autor, 2023.

A mistura mencionada anteriormente tem como finalidade principal unir os corpos de prova, os quais são compostos de aço carbono do tipo A36. É importante destacar que essa técnica é ilustrada na figura 25, que pode ser observada com atenção para melhor compreensão do processo. Posteriormente, utiliza-se um molde específico, apresentado na figura 26, para garantir a precisão e qualidade do resultado final.

Figura 25 - União dos corpos de prova com o adesivo



Fonte: O autor, 2023.

Figura 26 - Molde utilizado na união dos corpos de prova

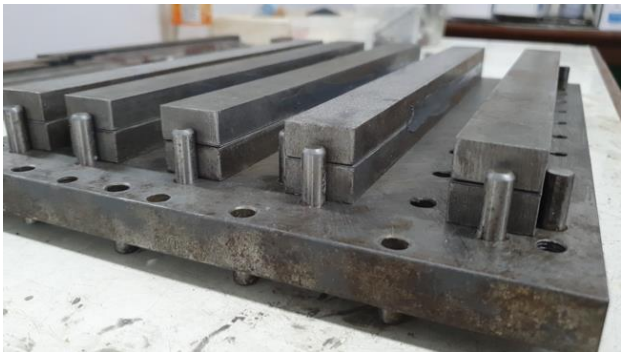
Fonte: O autor, 2023.

A remoção dos corpos de prova do molde é um processo que ocorre após o tempo mínimo de cura, que geralmente é de 24 horas. Essa etapa é crucial para garantir que os corpos de prova estejam prontos para serem submetidos a ensaios no dispositivo adequado. Durante a remoção, é importante ter cuidado para evitar danificar os corpos de prova ou comprometer sua integridade estrutural. Uma vez removidos do molde, os corpos de prova podem ser avaliados quanto às suas propriedades mecânicas e outras características relevantes para o projeto em questão.

Figura 27 - Remoção das juntas do molde

Fonte: O autor, 2023.

Figura 28 - Juntas coladas



Fonte: O autor, 2023.

4.2 **Execução dos ensaios do dispositivo MMB**

Ao realizar ensaios em modos mistos, é necessário determinar um parâmetro que descreva a proporção entre os modos I e II em cada situação. Isso é feito por meio do ângulo de fase (ψ), calculado com base na equação 30 a seguir:

$$\psi = \tan^{-1}\sqrt{\frac{G_n}{G_I}} \qquad (30)$$

Quando um modo I puro é aplicado, o ângulo de fase é igual a 0°, enquanto um modo II puro corresponde a ψ = 90°. Em casos de modos mistos, o ângulo de fase está compreendido entre 0° e 90°.

Todos os ensaios foram realizados na máquina de ensaio universal modelo Autography AG-X Plus 100 kN, fabricada pela Shimadzu, no Laboratório de Adesão e Aderência (LAA/IPRJ/UERJ).

Figura 29 - Ensaio modo misto utilizando dispositivo MMB

Fonte: O autor, 2023.

Durante os ensaios, a força aplicada e o deslocamento foram registrados pelo software da máquina. Além disso, foram registrados os deslocamentos dos corpos de prova em dois pontos específicos, utilizando-se dois transdutores de deslocamento do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformers*) com alcance de ± 25 mm. Assim, foram obtidas as seguintes informações em todos os ensaios:

i) força aplicada pela máquina;
ii) deslocamento no ponto de aplicação da força;
iii) deslocamento no furo superior da junta colada e;
iv) deslocamento no furo inferior da junta colada.

Com base nessas informações, os dados dos ensaios foram tratados utilizando o método CBBM (*Compliance Bases Beam Method*). Esse método utiliza o conceito de trinca equivalente, dependendo apenas da flexibilidade dos corpos de prova durante os testes, sem a necessidade de medição precisa do tamanho da trinca propagada.

Considerando que o ensaio realizado é em modo misto, assume-se que o efeito total é a soma dos efeitos nos modos puros. Portanto, foram obtidas as flexibilidades para o modo puro I (CI) e para o modo puro II (CII), através das equações 31 e 32 respectivamente.

$$C_I = \frac{8a^3}{EBh^3} + \frac{12_a}{5BHG_{13}} \quad (31)$$

$$C_{II} = \frac{3a^3 + 2LL_1^2}{2EB^3} + \frac{6LL_1}{5BHG_{13}(2L - L_1)} \qquad (32)$$

Onde a é o comprimento da trinca, E é o módulo de Young, B é a largura do corpo de prova, h a espessura do substrato e G13 o módulo de cisalhamento. L1 é a distância do furo para o suporte superior, indicada na Figura 13. As energias de fratura em modo I (G_{IC}) e modo II (G_{IC}) foram calculadas pelas Equações 33 e 34, respectivamente:

$$G_{IC} = \frac{6P_I^2}{B^2h}\left(\frac{2a^2}{h^2E} + \frac{1}{5G}\right) \qquad (33)$$

$$G_{IIC} = \frac{6P_{II}^2a^2}{16EB^2h^3} \qquad (34)$$

Onde PI e PII são as forças aplicadas nos modos I e II, respectivamente.

4.3 **Tratamento de dados**

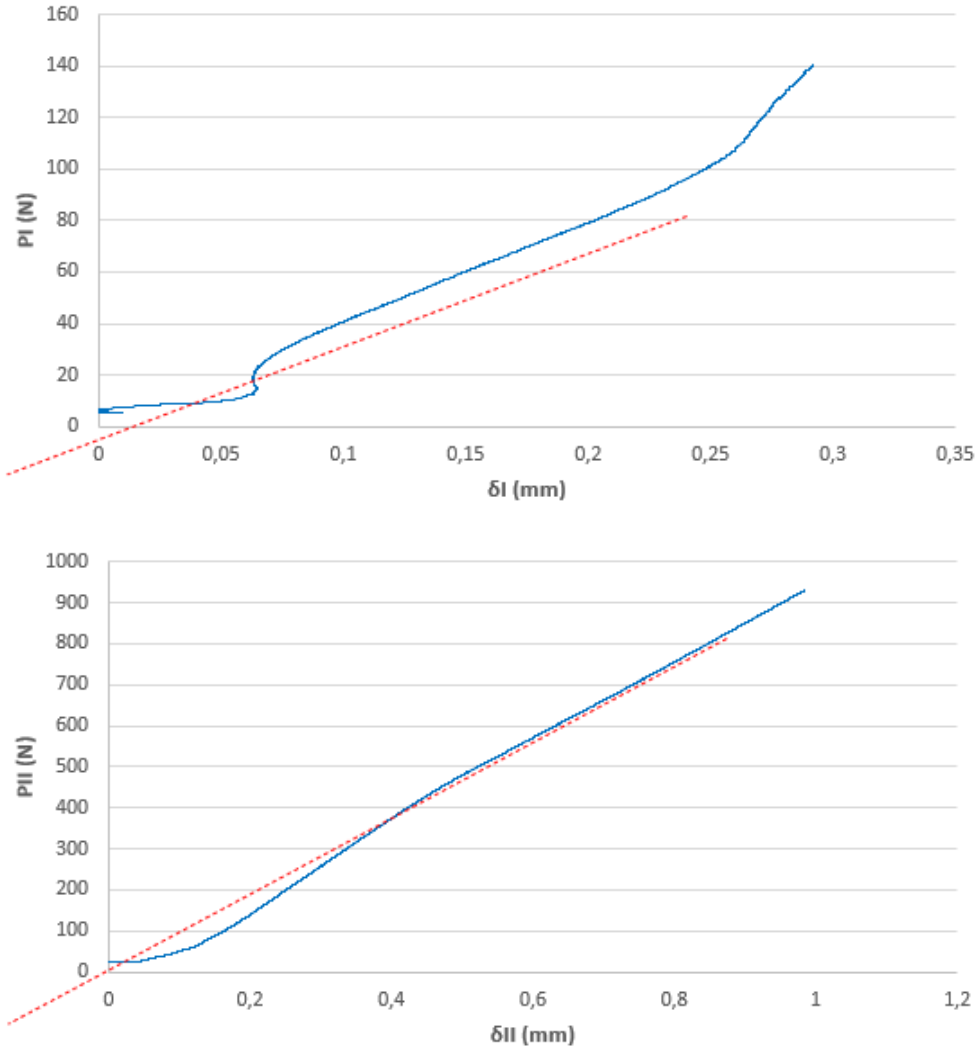
Os testes foram conduzidos à temperatura ambiente, que era em média de 24ºC. As distâncias s1, s2, s3 e s4 foram ajustadas de acordo com o ângulo de fase. Para cada amostra, a flexibilidade inicial em modo I e II foi analisada. As curvas de resistência (curvas-R) foram geradas para cada amostra. Os valores de energia de fratura eram normalmente obtidos a partir do platô das curvas, mas poderiam ser também obtidos através dos pontos de inflexão das curvas (mudança de concavidade), ou até mesmo nos valores máximos, dependendo do comportamento.

Após a obtenção dos valores de energia de fratura de cada amostra, realizou-se uma análise para avaliar os resultados obtidos pelo mesmo grupo experimental, para isso, foi utilizada a média aritmética como método de cálculo para determinar os valores médios de G_I e G_{II}.

5 ANÁLISE E RESULTADOS

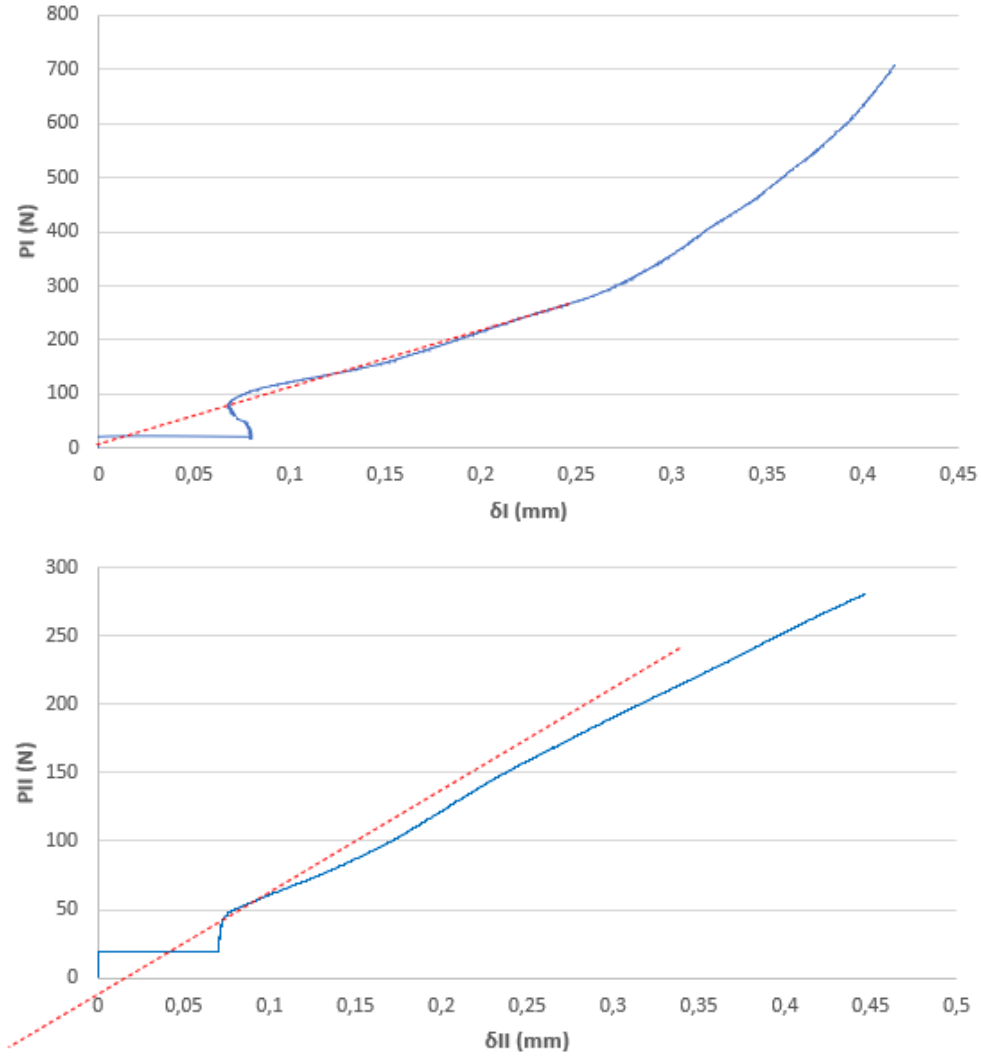
O ensaio MMB, representado na figura 29 foi usado para obter a taxa crítica de energia de fratura em modo I e II, G_{Ic} e G_{IIc} respectivamente. Durante o ensaio, os valores da carga P aplicado pela máquina de ensaio universal e os valores médios do deslocamento (δ) medidos pelos dois LVDTs foram registrados possibilitando a construção das curvas – R.

Figura 30 - Gráfico de Carga x Deslocamento para Jateamento



Fonte: O autor, 2023.

Figura 31 - Gráfico de Carga x Deslocamento para MBX



Fonte: O autor, 2023.

A carga máxima exercida pela máquina e deslocamento máximo medido pelos LVDTs, para os corpos de prova ensaiados estão representados na tabela 4 e 5.

Tabela 4 - Força e deslocamento obtidos do ensaio MMB para Jateamento.

CORPO DE PROVA	FORÇA MÁXIMA (N)	DESLOCAMENTO MÁXIMO (mm)	LVTD1 Máximo (mm)	LVTD2 Máximo (mm)
CP01	5753,82	5,80660	6,97599	5,49962
CP02	53 89,17	5,80321	7,00821	5,42230
CP03	6041.05	5,8061	6,86088	5,74109
CP04	6037,41	5,82594	7,02276	5,68428
CP05	5878,8	5,78442	6,62121	5,51127
Média	5820.05	5,80525	6,89781	5,57171
Desvio Padrão	269,064	0,01474	0,16717	0,13466
Faixa	651,880	0,04152	0,40155	0,31879

Fonte: O autor, 2023.

Tabela 5 - Força e deslocamento obtidos do ensaio MMB para MBX.

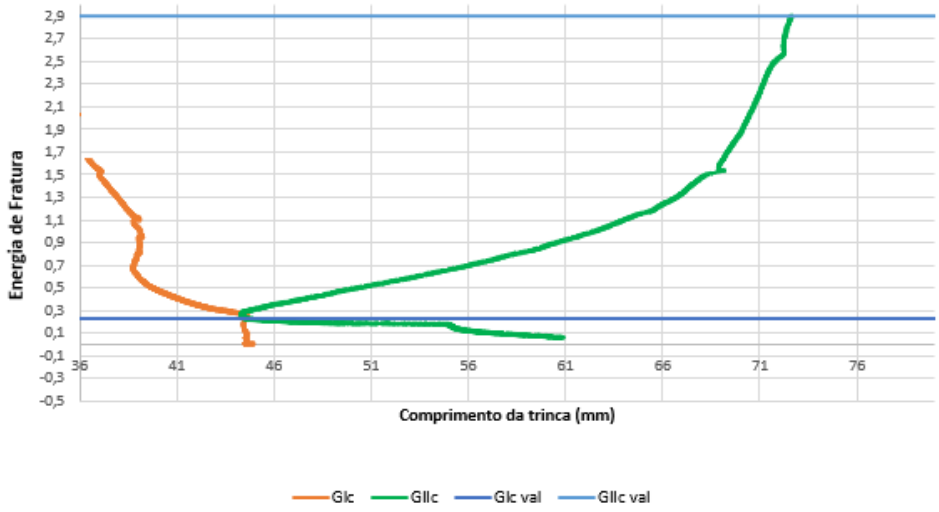
CORPO DE PROVA	FORÇA MÁXIMA (N)	DESLOCAMENTO MÁXIMO (mm)	LVTD1 Máximo (mm)	LVTD2 Máximo (mm)
CP01	8024,68	4,98190	5,46554	5,32284
CP02	76 82,34	4,83756	5,2049	5,18706
CP03	7554,96	4,75756	5,30632	5,02825
CP04	7380,74	4,85023	5,25642	5,14561
CP05	7919,22	5,17056	5,6722	5,50386
Média	7712,39	4,91956	5,38108	5,23753
Desvio Padrão	2.626,70	0,16176	0,18977	0,18235
Faixa	643,940	0,413	0,4673	0,47561

Fonte: O autor, 2023.

Todos os corpos de prova chegaram até o final do ensaio pois nenhum deles sofreu uma falha aderente e todos tiveram um comportamento similar demonstrando a qualidade da preparação dos CPs.

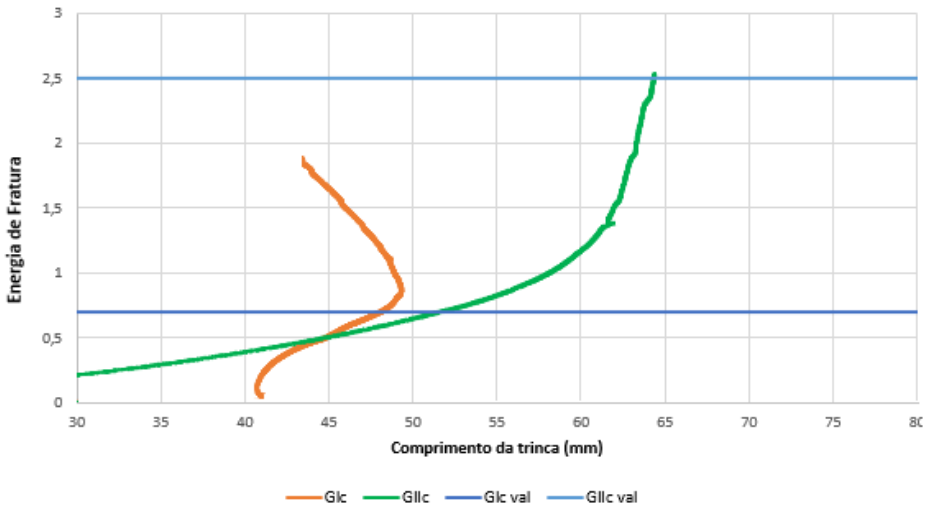
Os valores de carga e deslocamento, foram lançados em uma planilha Excel e associados as equações para o método CBBM. Assim, foi possível obter os valores da Energia de fratura em modo misto no ensaio MMB conforme mostrado na figura 32 e figura 33 (curva R).

Figura 32 - Gráfico de Curva R – Jateamento - CP 05 Rácio 22,5



Fonte: O autor, 2023.

Figura 33 - Gráfico de Curva R - Jateamento - CP 24 61,7°



Fonte: O autor, 2023.

A tabela 6, apresenta os resultados fundamentais obtidos a partir dos ensaios realizados com o dispositivo desenvolvido. Estes valores representam a energia de fratura em modo misto e o desvio padrão (DP), fornecendo uma visão detalhada do desempenho do material em condições específicas de jateamento. A tabela inclui informações sobre as diferentes combinações de modos I e II testadas, destacando a variabilidade dos resultados e a influência do jateamento na resistência à fratura em modo misto. Esses dados são importantes para a compreensão das propriedades de fratura do material e para investigar o impacto do tratamento superficial e obtenção do envelope de falha para garantir a aplicabilidade da junta em cenários práticos, contribuindo significativamente para o avanço do conhecimento nessa área específica de pesquisa.

Tabela 6 - Valores das energias de fratura e desvio padrão (DP) em modo misto para jateamento

ÂNGULO	G_I (N/mm)	DP	G_{II} (N/mm)	DP
0.0°	0,97	0,04	0,01	0,00
22.5°	1,56	0,37	0,09	0,03
56.6°	1,16	0,26	1,08	0,28
61.7°	0,73	0,13	3,43	0,75
73,9°	0,42	0,12	5,35	1,31
86.9°	0,01	0,00	8,43	1,39

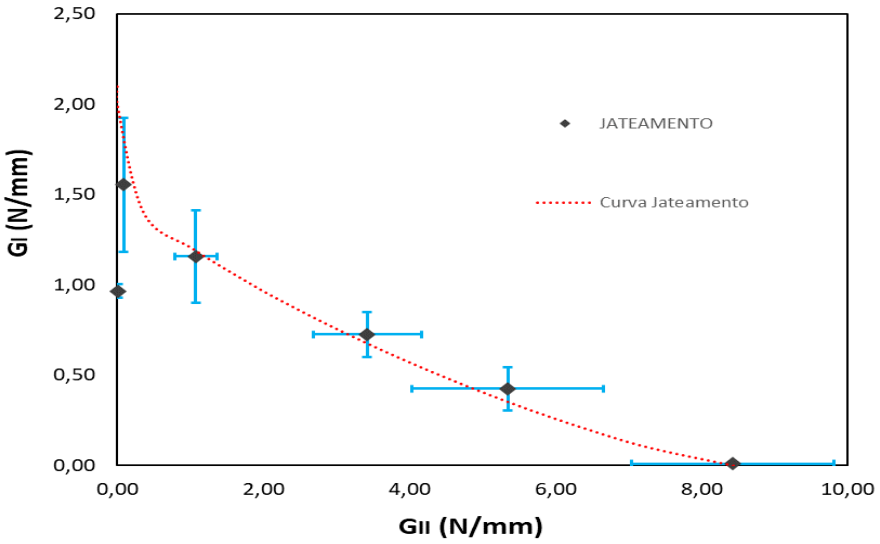
Fonte: O autor, 2023.

Posteriormente, o envelope de falha foi obtido por meio da representação gráfica dos valores contidos na tabela 6. Com base na equação 35 a seguir, estima-se que o valor de α para o jateamento seja igual a 0,80. Esse valor é responsável por reproduzir um comportamento do envelope de falha próximo ao obtido pelos experimentos realizados. Na prática, o parâmetro α pode ser incorporado em simulações numéricas combinadas com elementos finitos desde que os elementos coesivos sejam aplicados no adesivo.

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^{\alpha} + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^{\alpha} = 1 \quad (35)$$

$$\alpha = 0{,}80$$

Figura 34-Gráfico de envelope de falha para jateamento



Fonte: O autor, 2023.

A tabela 7, apresenta uma compilação dos resultados provenientes dos ensaios realizados utilizando o lixamento com MBX. Esses valores refletem as energias de fratura em modo misto, destacando a resposta do material quando submetido a este tratamento superficial. A tabela oferece informações sobre as diferentes combinações de modos I e II.

Tabela 7 - Valores das energias de fratura em modo misto para MBX

ÂNGULO	G_I (N/mm)	DP	G_{II} (N/mm)	DP
0.0°	0,84	0,18	0	0
22.5°	1,39	0,16	0,25	0,06
56.6°	0,66	0,19	2,09	0,49
61.7°	0,39	0,17	3,84	0,38
73,9°	0,16	0,06	2,30	0,34
86.9°	0,01	0	4,91	0,61

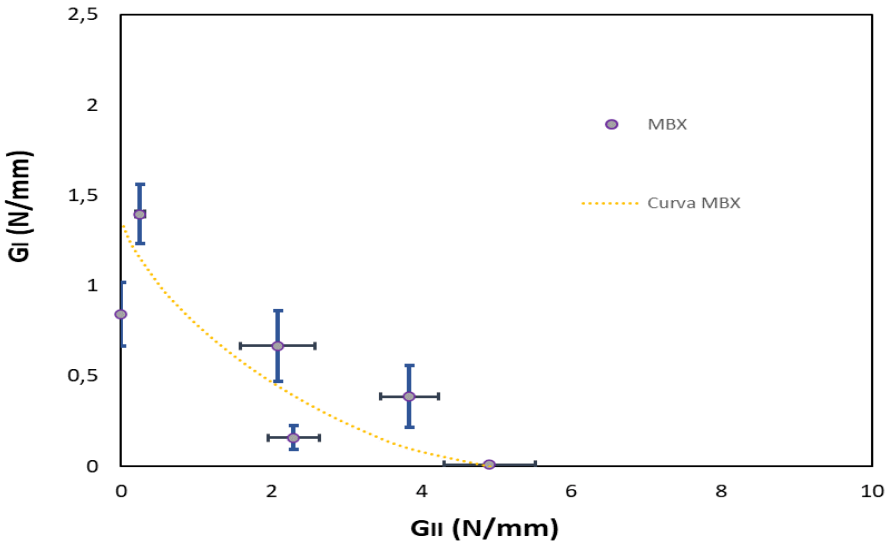
Fonte: O autor, 2023.

Em seguida, a obtenção do envelope de falha para o MBX foi realizada através da criação de um gráfico com os dados presentes na tabela 7. Com base na equação 36, estimou-se que o valor de α para MBX fosse igual a 0,70. Este valor desempenha um papel crucial na representação do envelope de falha.

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^{\alpha} + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^{\alpha} = 1 \qquad (36)$$

$$\alpha = 0{,}70$$

Figura 35 - Gráfico de envelope de falha para lixamento MBX



Fonte: O autor, 2023.

Em geral, a literatura se concentra principalmente na modelagem de carregamentos em modos puros e fornece informações detalhadas sobre as energias críticas de fratura nos modos

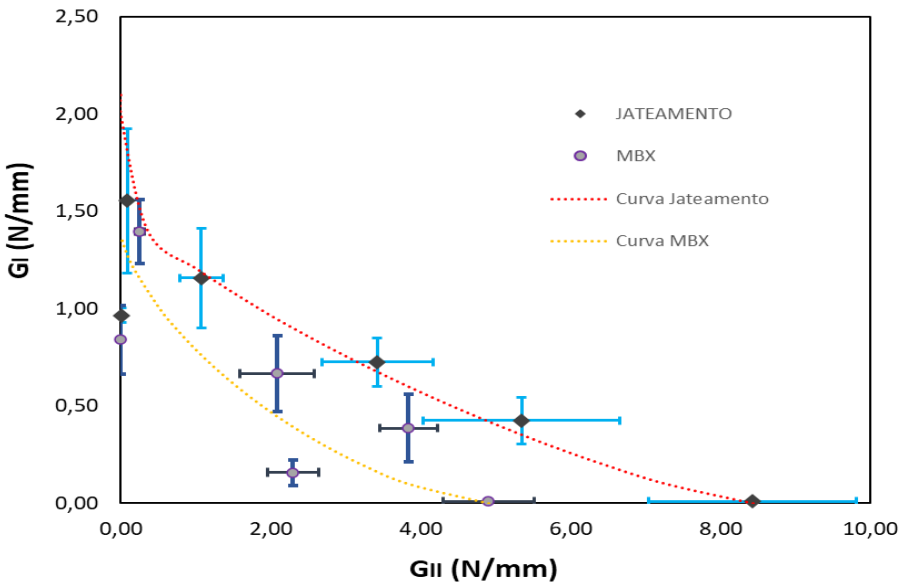
I e II. No entanto, na realidade das aplicações, ocorrem combinações de esforços mistos, envolvendo tanto o cisalhamento quanto a tração normal. Portanto, para que posteriormente seja feita uma simulação adequada desse comportamento misto, a incorporação do parâmetro α é necessária, o que resultará em uma modelagem numérica mais robusta e mais próxima dos resultados observados nos experimentos.

5.1 **Comparativo dos resultados**

No tratamento de dados, após a obtenção dos valores de energia de fratura de cada amostra, realizou-se uma análise para avaliar os resultados obtidos pelo mesmo grupo experimental. Para isso, foi utilizada a média aritmética como método de cálculo para determinar os valores médios de G_I e G_{II}. Esses dados foram apresentados na tabela 8, que mostra as informações detalhadas sobre o experimento realizado.

No entanto, há diferença entre os valores estimado de α, que é maior no jateamento (0,80) do que no MBX (0,70). Isso pode indicar uma diferença na maneira como as falhas ocorreram, como pode ser verificado nos dados comparativos a seguir:

Figura 36 - Gráfico de comparativo do tratamento de dados Jateamento e MBX



Fonte: O autor, 2023.

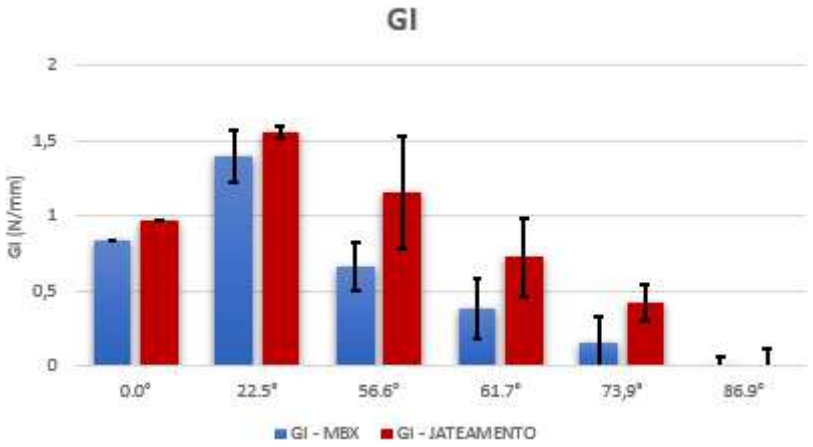
Tabela 8 - Valores das energias de fratura no jateamento e no MBX

ÂNGULO	GI – MBX	GI – JATEAMENTO	DP MBX	DP JATEAMENTO
0.0°	0,84	0,966	0,18	0,04
22.5°	1,396	1,555	0,16	0,37
56.6°	0,666	1,1575	0,20	0,26
61.7°	0,386	0,725	0,17	0,13
73,9°	0,158	0,424	0,07	0,12
86.9°	0	0	0,00	0,00

ÂNGULO	GII – MBX	GII – JATEAMENTO	DP MBX	DP JATEAMENTO
0.0°	0	0	0,00	0,00
22.5°	0,253	0,085	0,06	0,03
56.6°	2,09	1,075	0,49	0,28
61.7°	3,84	3,425	0,38	0,75
73,9°	2,3	5,35	0,35	1,31
86.9°	4,91	8,434	0,61	1,39

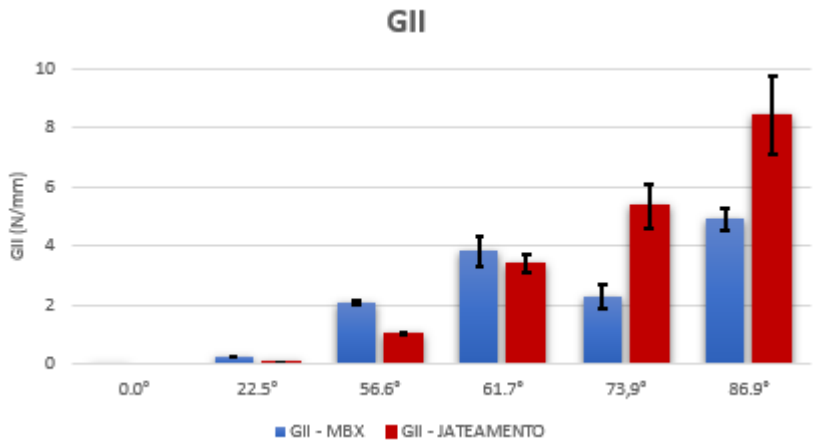
Fonte: O autor, 2023.

Figura 37 - Gráfico de comparação dos valores médios de G_I no Jateamento e no MBX



Fonte: O autor, 2023.

Figura 38 - Gráfico de comparação dos valores médios de G_{II} no Jateamento e no MBX



Fonte: O autor, 2023.

Em geral podemos verificar com as figuras 37 e 38, valores mais altos para a taxa de energia de fratura G_{II}, quando comparados a taxa de energia de fratura G_I e isso mostra uma coerência, pois o adesivo tem uma resistência a fratura maior ao cisalhamento (modo II).

5.2 **Mecanismo de falha**

O mecanismo de falha, frequentemente referido como fratura em modo misto ou misto I/II, envolve uma combinação de esforços de cisalhamento (modo II) e tração normal (modo I) atuando simultaneamente. Este tipo de fratura é comum em muitas aplicações do mundo real.

A análise e compreensão de falhas são importantes para engenharia de materiais e fabricação.

Após a realização dos testes, uma análise visual foi feita para avaliar os tipos de falhas que ocorreram nos corpos de prova figura 39.

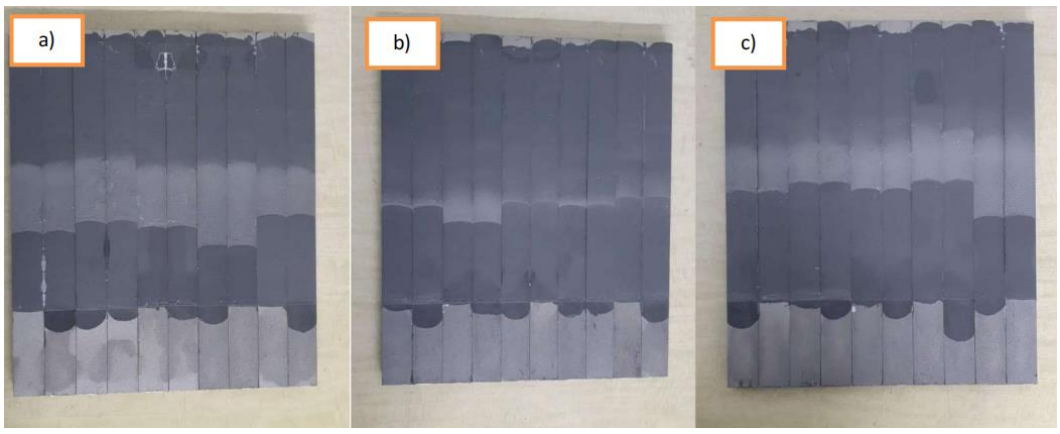
Figura 39 - Corpo de prova rompido após ensaio

.

Fonte: O autor, 2023.

A figura 40, que apresenta as superfícies de falha tratadas com jateamento para diferentes ângulos de fase (61.7°, 73.9° e 86.9°), ilustrando de forma visual a natureza das falhas observadas. Todas essas superfícies de falha exibem características de falhas coesivas, conforme previsto. Isso é consistente com a qualidade do material adesivo e do processo de união, proporcionando uma validação adicional do processo de fabricação, o que é um resultado positivo para o projeto.

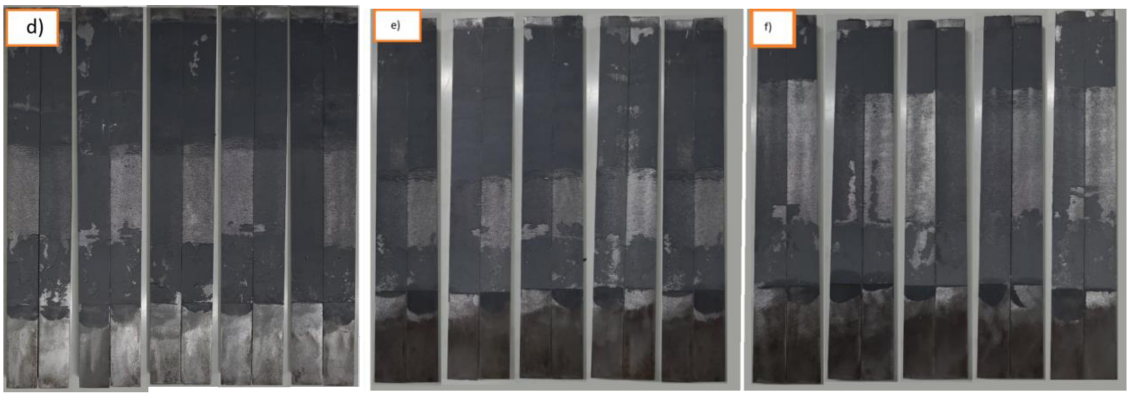
Figura 40 - Falha das superfícies dos corpos de prova: a) ψ = 61.7°, b) ψ = 73.9°, c) ψ = 86.9°



Fonte: O autor, 2022.

A figura 41, que apresenta as superfícies de falha que utilizaram o tratamento com lixadeira MBX para diferentes ângulos de fase (61.7°, 73.9° e 86.9°), porém neste contexto podemos observar que maior parte do adesivo ficou em dos lados da junta, porém ainda sim exibem características de falhas coesivas, como o material adesivo utilizado foi o mesmo para o tratamento superficial anterior e com uma qualidade já comprovada em diversos ensaios, tudo nos leva a acreditar que essa pequena diferença se deve ao processo de fabricação, que é feito de forma manual o que sempre está sujeito a variações.

Figura 41 - Falha das superfícies dos corpos de prova no MBX: d) $\psi = 61.7°$, e) $\psi = 73.9°$, f) $\psi = 86.9°$



Fonte: O autor, 2023.

No geral os corpos de prova examinados apresentaram falhas do tipo coesiva. Essa descoberta é altamente significativa, pois ela confirma a qualidade do processo de fabricação empregado. Indica que as peças produzidas mantiveram sua integridade sob as condições de teste, o que é um indicativo positivo da robustez do método de fabricação.

CONCLUSÃO

Este trabalho proporcionou uma análise das energias críticas de fratura, quando sujeitos a diferentes tratamentos de superfície.

Os resultados revelaram a importância crucial de compreender o modo misto de fratura, uma vez que ele reflete de forma mais precisa as condições reais encontradas em aplicações práticas. É relevante notar que o aparelho proposto desempenhou um papel fundamental ao resolver alguns dos desafios relacionados aos testes de modo misto de juntas adesivas. Sua versatilidade permitiu avaliar juntas coladas de maneira precisa, enquanto a capacidade de deduzir um comprimento de trinca equivalente independente de erros de leitura demonstrou a sua eficiência. Além disso, sua versatilidade para uso em diferentes configurações, amplia seu potencial de aplicação.

A validação dos resultados obtidos, seja por meio de modelos mistos ou clássicos, fortalece a confiança na confiabilidade dos dados gerados pelo aparelho proposto. Essa validação mostrou que os resultados obtidos no modo misto são robustos e consistentes, para ambos os tratamentos superficiais.

Por fim, as curvas experimentais obtidas mostraram uma notável coerência, proporcionando garantias adicionais de resultados no modo misto. Os resultados obtidos neste estudo sugerem uma base sólida para futuras investigações e inovações no campo da aderência de materiais metálicos e compósitos. O conhecimento adquirido não apenas enriquece nosso entendimento da ciência dos materiais, mas também abre caminho para aplicações mais seguras e avançadas em diversas áreas tecnológicas, como a modelagem computacional de materiais.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, João Carlos Silva. Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio *End-Notched Flexure* (ENF). 2014. Tese de Doutorado. Instituto Politécnico do Porto (Portugal).

BANEA, Mariana D.; DA SILVA, Lucas FM. 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. 1, p. 1-18, 2009.

BROCKMANN, Walter *et al. Adhesive bonding*: materials, applications and technology. John Wiley & Sons, 2008.

BROUGHTON, W. R.; CROCKER, L. E.; GOWER, M. R. L. *Design requirements for bonded and bolted composite structures.*2002.

CALLISTER JR., W. D. *Ciência e Engenharia de Materiais:* uma introdução. 7. edição, Rio de Janeiro, 2007.

CARBAS, Ricardo João Camilo. *Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi.* Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

COSTA, M. *et al.* An apparatus for mixed-mode fracture characterization of adhesive joints. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, v. 91, p. 94-102, 2017.

DA SILVA, Antônio Henrique Monteiro da Fonseca Thomé.*Critério de falha para juntas coladas submetidas a carregamentos complexos*. 2010. 236 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, 2010.

DA SILVA, Henrique Pereira. *Comportamento mecânico de compósitos de fibra de vidro/epoxy nano-reforçados*. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de Coimbra (Portugal).

DA SILVA, L.F.M., *et al*. *Testing Adhesive Joints*. Porto: Wiley-VCH Verlag & Co. 463 p, 2011.

DE BARROS, S. et al. Influence of mechanical surface treatment on fatigue life of bonded joints. *The Journal of Adhesion,* v. 93, n. 8, p. 599-612, 2017.

DE MOURA, M. F. S. F. *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. S. F. *et al. Mixed-mode I/II wood fracture characterization using the mixed-mode bending test. Engineering Fracture Mechanics*, v. 77, n. 1, p. 144-152, 2010.

DE MOURA, M. F. S. F.; CAMPILHO, R. D. S. G.; GONÇALVES, J. P. M. *Crack* equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading. *Composites science and technology,* v. 68, n. 10-11, p. 2224-2230, 2008.

DE MOURA, M. F. S. F.; CAMPILHO, R. D. S. G.; GONÇALVES, J. P. M. Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints. *International Journal of Solids and Structures,* v. 46, n. 6, p. 1589-1595, 2009.

DILLARD, D. A. Fracture mechanics of adhesive bonds. *Adhesive Bonding*, p. 189-208, 2005.

ESTEVES, Vítor Hugo Carones. Determinação da tenacidade de um adesivo em solicitações de modo misto (I+ II). Departamento de Engenharia Mecânica, p. 124, 2010.

MARQUES, E. A. S. *et al*. *Adhesive joints for low-and high-temperature use: an overview. The Journal of Adhesion*, v. 91, n. 7, p. 556-585, 2015.

MARTÍNEZ-LANDEROS, V. H. et al. Studies on the influence of surface treatment type, in the effectiveness of structural adhesive bonding, for carbon fiber reinforced composites. *Journal of Manufacturing Processes,* v. 39, p. 160-166, 2019.

MEDINA, Jorge Arturo Hinostroza. Avaliação de previsões de fratura elastoplástica. 2014. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

NETO, R. M. C. *Análise numérica e experimental de juntas coladas em duas configurações: junta de cisalhamento simples e junta de carregamento combinado.* 2017. 159 f. Tese (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais), Instituto Politécnico, Universidade do Estado Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2017.

NUNES, Filipe André Almeida. Estudo numérico da fratura em modo misto de juntas adesivas pelo ensaio *Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam*. 2017. Tese de Doutorado. Instituto Politécnico do Porto (Portugal).

PINTO, Arnaldo Manuel Guedes *et al. Single-lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive. The Journal of Adhesion*, v. 85, n. 6, p. 351-376, 2009.

REEDER, James R.; CREWS JR, John H. *Mixed-mode bending method for delamination testing. AiAA Journal*, v. 28, n. 7, p. 1270-1276, 1990.

RIKARDS, R. *et al*. *Mode I, mode II, and mixed-mode I/II interlaminar fracture toughness of GFRP influenced by fiber surface treatment. Mechanics of composite materials*, v. 32, n. 5, p. 439-462, 1996.

ROHEN, Lazaro Araújo *et al*. *Tensile behavior of epoxy composites reinforced with thinner sisal fibers*. In: Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2016. p. 249-254.

SAMPAIO, Eduardo Martins. *Um modelo de dano em juntas coladas.* 1998. 111 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

APÊNDICE A - Medidas de rugosidade para o jateamento

LOTE 01

	CP1	CP2	CP3
Ra	8.61	10.65	8.60
Rz	43.47	53.87	45.26
Rq	10.30	13.03	10.66
Rt	56.56	69.41	59.36

LOTE 02

	CP1	CP2	CP3
Ra	7.93	11.39	11.83
Rz	44.55	62.32	64.39
Rq	10.09	14.20	14.78
Rt	69.22	82.53	93.15

LOTE 03

	CP1	CP2	CP3
Ra	10.29	7.62	6.98
Rz	51.48	42.47	38.80
Rq	12.29	9.37	8.81
Rt	64.36	52.24	52.86

LOTE 04

	CP1	CP2	CP3
Ra	8.87	9.71	11.82
Rz	44.87	57.30	59.97
Rq	10.89	12.34	14.21
Rt	57.00	71.80	73.06

LOTE 05

	CP1	CP2	CP3
Ra	8.41	12.59	9.08
Rz	42.74	65.50	53.25
Rq	10.36	15.64	11.32
Rt	54.87	80.38	83.31

LOTE 06

	CP1	CP2	CP3
Ra	8.83	10.74	10.92
Rz	50.57	60.90	58.54
Rq	11.03	13.33	13.68
Rt	81.10	72.91	81.42

APÊNDICE B - Medidas de rugosidade para o MBX

LOTE 01

	CP1	CP2	CP3
Ra	6,97	8,58	7,75
Rz	33,02	41,89	45,13
Rq	8,46	10,18	9,63
Rt	46,4	53,87	55,78

LOTE 02

	CP1	CP2	CP3
Ra	6,68	7,87	8,64
Rz	36,95	37,21	44,3
Rq	8,3	9,53	10,69
Rt	45,02	46,94	51,22

LOTE 03

	CP1	CP2	CP3
Ra	9,33	12,26	8,77
Rz	43,84	60,5	44
Rq	10,97	15,31	10,79
Rt	59,63	72,59	56,99

LOTE 04

	CP1	CP2	CP3
Ra	8,32	6,97	8,22
Rz	38,88	37,55	41,29
Rq	10,16	8,59	10,15
Rt	51,35	46,46	52,73

LOTE 05

	CP1	CP2	CP3
Ra	7,07	11,78	8,75
Rz	31,63	57,59	45,24
Rq	8,24	14,28	10,87
Rt	41,19	70,05	51,33

LOTE 06

	CP1	CP2	CP3
Ra	8,69	9,7	9,24
Rz	45	45,94	45,26
Rq	10,82	11,56	11,22
Rt	53,79	55,99	54,2