

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
ENGENHARIA MECÂNICA**

LUCAS ROEDER BAUMGARTEN

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIÁVEIS EM UM MODELO *DOUBLE
CANTILEVER BEAM* EM MATERIAL COMPÓSITO.**

JOINVILLE

2022

LUCAS ROEDER BAUMGARTEN

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIÁVEIS EM UM MODELO *DOUBLE*
CANTILEVER BEAM EM MATERIAL COMPÓSITO.**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Medeiros

JOINVILLE

2022

LUCAS ROEDER BAUMGARTEN

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE VARIÁVEIS EM UM MODELO *DOUBLE CANTILEVER BEAM* EM MATERIAL COMPÓSITO.

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Medeiros

BANCA EXAMINADORA:

Membros:

Prof. Dr. Ricardo de Medeiros
UDESC/CCT

Prof. M. Sc. Rafael Beck
UDESC/CCT

M. Sc. Kelvin Masakazu Kuroki Iwasaki
UDESC/CCT

Joinville, 23 de fevereiro de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família pelo apoio durante a faculdade. Meus agradecimentos aos amigos, companheiros em trabalhos e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida. À Instituição pelo ambiente criativo e amigável que proporciona. Ao Prof. Dr. Ricardo de Medeiros pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho. E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte de minha formação, o meu muito obrigado.

”Não podemos resolver nossos problemas com o mesmo pensamento que tínhamos quando os criamos.”

(Albert Einstein)

RESUMO

Nos últimos anos, tem havido um crescente interesse por parte de diversos ramos da indústria na aplicação de juntas coladas feitas de compósitos laminados em componentes estruturais. As juntas adesivas permitem a união de formas complexas e podem fornecer resistência excepcional ao mesmo tempo que reduzem o peso das estruturas. Em relação a predição de força nessas articulações adesivas, dois exemplos de métodos altamente relevantes são, o modelo de zona coesiva (CZM) e a Mecânica da fratura elástica e linear (MFEL). O método CZM permite a simulação do início e da propagação do dano na junta. As energias críticas de fratura nos modos I e II (G_{Ic} e G_{IIc}) dos adesivos são parâmetros importantes na predição da falha por propagação de trincas em juntas adesivas. Para a obtenção do parâmetro G_{Ic} um dos testes mais comumente usados é o Double-Cantilever Beam (DCB). Esse trabalho visa através de simulações em Abaqus CAE e da análise estatística utilizando o Design de Plackett-Burman, obter qual o grau de influência de cada uma das 15 variáveis mecânicas e geométricas de uma junta sobre o G_{Ic} .

Palavras-chave: Adesivo. *Double cantilever Beam*. Junta estrutural. Plackett-Burman. *Cohesive Zone Model*.

ABSTRACT

In recent years, there has been a growing interest on the part of several branches of industry in the application of laminated composite joints in structural components. Adhesive joints allow the joining of complex shapes and can provide exceptional strength while reducing the weight of structures. Regarding the prediction of force in these adhesive joints, two highly relevant methods are the cohesive zone model (CZM) and Mechanical Fracture. The CZM method allows for the simulation of the onset and propagation of joint damage. The critical energy release stress (G_{Ic} and G_{IIc}) of the adhesives is an important parameter in the strength and failure of a joint. To obtain the G_{Ic} parameter, one of the most commonly used tests is the Double-Cantilever Beam (DCB). This work aims, through simulations in Abaqus CAE and statistical analysis using the Plackett-Burman Design, to obtain the degree of influence of each of the 15 mechanical and geometric variables of a joint on the G_{Ic} .

Keywords: Double cantilever Beam. Plackett-Burman. Cohesive Zone Model. Adhesive. Estrutural joint.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Aplicação de juntas adesivas na industria aeronáutica.	15
Figura 2 – Carregamentos de uma junta adesiva.	16
Figura 3 – Configurações de fibras/matriz.	17
Figura 4 – Partes de um automóvel que podem ser substituídas por materiais compósitos.	18
Figura 5 – Exemplo de sobreposição de camadas com orientações diferentes.	19
Figura 6 – Exemplos de orientação de falhas no compósito.	19
Figura 7 – Tração em junta adesiva.	24
Figura 8 – Compressão em junta adesiva.	24
Figura 9 – Cisalhamento em junta adesiva.	25
Figura 10 – Clivagem em junta adesiva.	25
Figura 11 – Arrancamento em junta adesiva.	25
Figura 12 – Tipos de ruptura.	26
Figura 13 – Ensaio de tração.	27
Figura 14 – Curva do ensaio de tração.	28
Figura 15 – Corpos de prova tração maciços.	29
Figura 16 – Ensaio de tração topo a topo.	29
Figura 17 – Ensaio de cisalhamento.	31
Figura 18 – Representação esquemática da flexão dos aderentes: (a) junta antes da deformação, (b) excentricidade da carga, (c) momento fletor, (d) deformação final da junta.	31
Figura 19 – Sobreposição dupla.	32
Figura 20 – Junta de ressalto.	32
Figura 21 – Corpos de prova do ensaio de torção.	32
Figura 22 – Ensaio de junta topo a topo para torção.	33
Figura 23 – Ensaio napkin-ring.	33
Figura 24 – Ensaio TAST.	34
Figura 25 – Modos de falha.	34
Figura 26 – Esquemático do corpo de prova do ensaio DCB.	35
Figura 27 – Deslocamento no corpo de prova do ensaio DCB.	36
Figura 28 – Curvas $P - \delta$ de ensaios DCB.	36
Figura 29 – Método de determinação de Δ	38
Figura 30 – Zona de processo de fratura (FPZ).	39
Figura 31 – Corpo de prova DCB.	40
Figura 32 – Resposta bilinear de elementos coesivos a separação por tração.	41
Figura 33 – Araldite 420 A/B.	47
Figura 34 – Exemplo de modelo computacional utilizado.	48
Figura 35 – Comparação entre modelos com superfícies e elementos coesivos.	49

Figura 36 – Comparação entre modelos sólidos e tipo shell.	50
Figura 37 – Modelo de geometria única.	50
Figura 38 – Planos de separação de seções.	51
Figura 39 – Convergência de malha.	52
Figura 40 – Malha final (0.5mm).	52
Figura 41 – Condições de contorno.	54
Figura 42 – Interação MPC.	54
Figura 43 – Curva $P-\delta$ Rodadas 1-4	55
Figura 44 – Curva $P-\delta$ Rodadas 5-8	56
Figura 45 – Curva $P-\delta$ Rodadas 9-12	56
Figura 46 – Curva $P-\delta$ Rodadas 13-16	57
Figura 47 – Início da simulação.	57
Figura 48 – Simulação na eminência da abertura da trinca.	58
Figura 49 – Simulação na eminência da falha total.	58
Figura 50 – Simulação após a falha total.	58
Figura 51 – Envelope das 16 curvas $P-\delta$	59
Figura 52 – Curva $G_{Ic} - a_e$ Rodadas 1 - 4	60
Figura 53 – Curva $G_{Ic} - a_e$ Rodadas 5 - 8	60
Figura 54 – Curva $G_{Ic} - a_e$ Rodadas 9 - 12	61
Figura 55 – Curva $G_{Ic} - a_e$ Rodadas 13 - 16	61
Figura 56 – Estados de trações e cisalhamentos.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz Plackett-Burman para 11 parâmetros.	45
Tabela 2 – Propriedades do laminado de carbono.	47
Tabela 3 – Propriedades do adesivo epóxi.	47
Tabela 4 – Valores limites dos parâmetros de simulação.	48
Tabela 5 – Matriz Plackett-Burman para 15 parâmetros.	53
Tabela 6 – Valores de G_{Ic}	62
Tabela 7 – Fatores de influência G_{Ic}	62
Tabela 8 – Fatores de influência de θ para diferentes configurações.	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
NBR	Normas Técnicas Brasileiras.
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina.
CCT	Centro de Ciência Tecnológicas.
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica.
CZM	<i>Cohesive Zone Model.</i>
MFEL	Mecânica da fratura elástica e linear.
DCB	<i>Double cantilever Beam.</i>
PBD	Plackett-Burman Design.
CAE	Computer-Aided Engineering
ASTM	American Society for Testing and Materials
ISO	International Organization for Standardization
SLJ	<i>Single-lap joint</i>
TAST	<i>Thick Adherend Shear Test</i>
CCM	<i>Compliance Calibration Method</i>
DBT	<i>Direct Beam Theory</i>
CBT	<i>Compliance Based Theory</i>
CBBM	<i>Compliance Based Beam Theory</i>
DOE	<i>Design of experiments</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

G_{Ic}	Energia crítica de fratura em modo I.
G_{IIc}	Energia crítica de fratura em modo II.
σ	Tensão.
ε	Deformação.
σ_e	Tensão de escoamento, limite elástico/plástico.
E	Declive da curva tensão-deformação.
G	Módulo de elasticidade transversal.
W	Trabalho.
A	Área de superfície da fenda.
U	Energia de deformação interna.
G_c	Energia crítica de fratura.
h	Espessura do braço do corpo de prova do ensaio DCB.
a_0	Comprimento inicial da trinca no ensaio DCB.
t	Espessura do adesivo no ensaio DCB.
P	Carga aplicada durante o ensaio DCB.
δ	Deslocamento da ponta do corpo de prova no ensaio DCB.
L	Comprimento do corpo de prova no ensaio DCB.
a	Comprimento inicial da trinca no ensaio DCB.
b	Largura do corpo de prova no ensaio DCB.
C	Flexibilidade do corpo de prova no ensaio DCB.
E_{11}	Módulo de Young do aderente na direção longitudinal X.
Δ	Fator de correção do comprimento da fenda devido a rotação e deflexão dos aderentes na extremidade da fenda.
a_e	Comprimento de fenda equivalente do método CBBM.
M_f	Momento fletor.
I	Segundo momento de área de cada braço aderente.
c	Meia espessura do corpo de prova no ensaio DCB.
V	Carregamento transversal em cada braço de aderente ($0 \leq x \leq a$).
C_0	Tendência inicial da curva $P - \delta$.
E_f	Módulo de correção flexural.

D	Índice de dano do modelo CZM.
\vec{T}	Vetor das tensões coesivas.
$\vec{\delta}$	Vetor dos deslocamento.
K	Matriz de rigidez dos elementos.
t_n^0	Tensão de contato normal no modo de fratura.
t_s^0	Tensão de contato tangencial no modo de fratura.
t_t^0	Tensão de contato torcional no modo de fratura.
t_n	Tensão de contato normal.
t_s	Tensão de contato tangencial.
t_t	Tensão de contato torcional.
M_e	Índice de influencia do método Plackett-Burman.
σ_u	Tensão de ruptura.
ε_u	Deformação de ruptura.
G_{IIIc}	Taxa crítica de liberação de energia em modo III.
ν	Coefficiente de Poisson do adesivo.
E_{epoxi}	Módulo de Young do adesivo.
θ_1	Orientação da lamina externa.
θ_2	Orientação da lamina mediana.
θ_3	Orientação da lamina interna.
G_{12}	Modulo de cisalhamento na direção 1-2.
G_{13}	Modulo de cisalhamento na direção 1-3.
G_{23}	Modulo de cisalhamento na direção 2-3.
E_{22}	Módulo de Young do aderente na direção longitudinal Y.
E_{33}	Módulo de Young do aderente na direção longitudinal Z.
ν_{12}	Coefficiente de Poisson do do aderente na direção 1-2.
ν_{13}	Coefficiente de Poisson do do aderente na direção 1-3.
ν_{21}	Coefficiente de Poisson do do aderente na direção 2-1.
ν_{23}	Coefficiente de Poisson do do aderente na direção 2-3.
ν_{31}	Coefficiente de Poisson do do aderente na direção 3-1.
ν_{32}	Coefficiente de Poisson do do aderente na direção 3-2.

SUMÁRIO

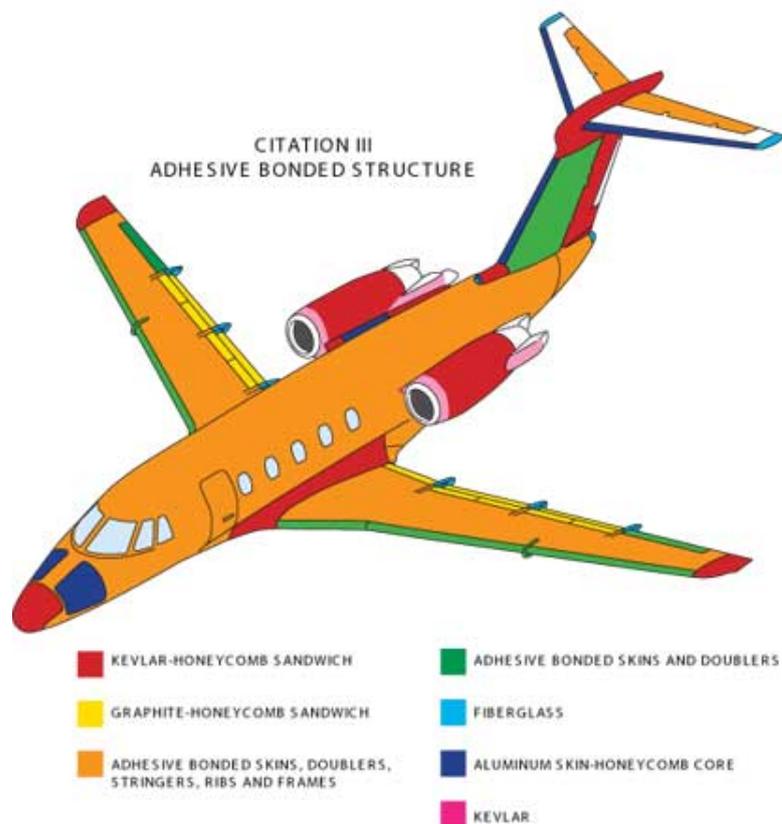
1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS	17
2.2	ADESIVOS	20
2.2.1	Classificação dos adesivos	20
2.2.2	Adesivos Estruturais	21
2.2.2.1	<i>Epóxidos</i>	21
2.2.2.1.1	Epóxido-poliamida.	22
2.2.2.1.2	Epóxido-polisulfido.	22
2.2.2.1.3	Epóxido-vinilo.	22
2.2.2.1.4	Epóxido-poliuretano.	22
2.2.2.1.5	Epóxido-fenólico.	22
2.3	JUNTAS ADESIVAS	22
2.3.1	Tipos de carregamentos em juntas adesivas.	23
2.3.1.1	<i>Tração e Compressão.</i>	24
2.3.1.2	<i>Cisalhamento.</i>	24
2.3.1.3	<i>Clivagem e arrancamento.</i>	25
2.3.2	Modos de falha em juntas adesivas.	26
2.4	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO ADESIVO	26
2.4.1	Propriedades mecânicas a tração	27
2.4.1.1	<i>Tração em corpo de prova de adesivo maciço.</i>	28
2.4.1.2	<i>Tração em juntas topo a topo.</i>	29
2.4.2	Propriedades mecânicas ao cisalhamento	30
2.4.2.1	<i>Single-lap joint (SLJ).</i>	31
2.4.2.2	<i>Ensaio de torção de corpos de prova maciços.</i>	32
2.4.2.3	<i>Junta topo a topo em torção.</i>	33
2.4.2.4	<i>Thick Adherend Shear Test (TAST)</i>	33
2.4.3	Propriedades mecânicas da fratura	34
2.4.3.1	<i>Double Catilever Beam (DCB)</i>	35
2.4.4	Métodos para a determinação do G_{Ic}	36
2.4.4.1	<i>Método CCM (Compliance Calibration Method)</i>	37
2.4.4.2	<i>Método DBT (Direct Beam Theory)</i>	37
2.4.4.3	<i>Método CBT (Compliance Based Theory)</i>	37
2.4.4.4	<i>Método CBBM (Compliance Based Beam Method)</i>	38

2.5	MODELO DE ANÁLISE COMPUTACIONAL	40
2.5.1	Método CZM	40
2.6	<i>DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE).</i>	42
2.6.1	Design de triagem.	43
2.6.2	Design Plackett-Burman	43
2.6.2.1	<i>Seleção de fatores, nível de variação e repostas</i>	44
2.6.2.2	<i>Design da matriz</i>	44
2.6.2.3	<i>Análise de sensibilidade</i>	45
3	METODOLOGIA	46
3.1	DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS.	46
3.1.1	Definição dos materiais.	46
3.1.2	Geometria do corpo de prova	47
3.2	MODELO COMPUTACIONAL	48
3.2.1	Modelo 3D	49
3.2.1.1	<i>Modelo de propagação da delaminação.</i>	49
3.2.1.2	<i>Tipos de elementos.</i>	49
3.2.1.3	<i>Convergência de malha.</i>	51
3.2.1.4	<i>Critérios de separação.</i>	52
3.3	MODELO PLACKETT-BURMAN	53
3.4	CONDIÇÕES DE CONTORNO.	53
4	RESULTADOS	55
4.1	OBTENÇÃO DOS RESULTADOS E TRATAMENTO DOS DADOS.	55
4.1.1	Curvas P-δ	55
4.1.2	Método CBBM	59
4.1.3	Análise de influência.	62
4.1.3.1	<i>Fatores geométricos.</i>	62
4.1.3.2	<i>Fatores do laminado.</i>	63
4.1.3.3	<i>Disposição das lâminas.</i>	63
4.1.3.4	<i>Fatores do adesivo.</i>	64
5	CONCLUSÃO	65
5.1	MELHORIAS E TRABALHOS FUTUROS.	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem havido um crescente interesse por parte de diversos ramos da indústria na aplicação de juntas de compósitos laminados em componentes estruturais. Juntas adesivas apresentam um alto valor de resistência mecânica em relação ao seu peso o que torna esse tipo de material muito atrativos a certos setores da indústria. Nota-se principalmente no ramo do transporte a busca pela aplicação de tais juntas adesivas com o intuito de substituir as juntas metálicas em partes que não necessitem de alta resistência mecânica (VARAJÃO, 2015). A Figura 1 mostra algumas estruturas de um avião que podem utilizar juntas adesivas com compósitos.

Figura 1 – Aplicação de juntas adesivas na industria aeronáutica.

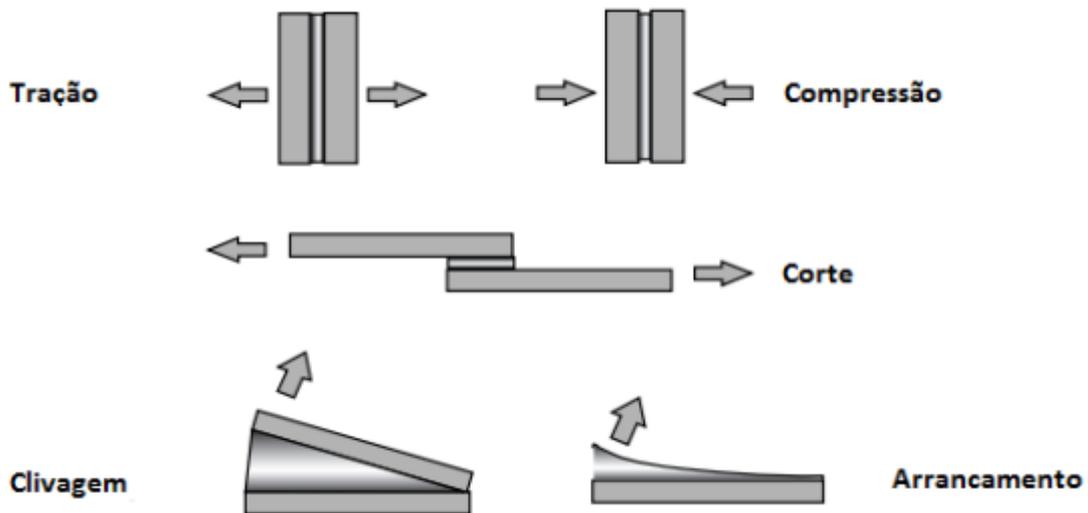


Fonte: Disponível em
 :<<https://www.olympus-ims.com/pl/applications-and-solutions/ndt-theory/bondtesting/>> Acesso em: 13 Fev 2022

Juntas adesivas podem apresentar 4 modos principais de carregamento, que passam pela tração, cisalhamento ou corte, arrancamento e clivagem, podendo-se encontrar na prática infinitas formas de combinação entre esses ou ainda variações destes, Figura 2. Os modo de clivagem e arrancamento acabam sendo muito danosos para as juntas adesivas, principalmente em juntas de compósitos, pois esses modos realizam seus deslocamentos e carregamentos nos sentidos mais curtos das fibras, o que diminui muito a resistência a falha do sistema. Saber reconhecer os tipos de carregamento e resistências mecânicas em juntas adesivas é muito importante para sua

aplicação, dessa forma conhecer as diversas propriedades das juntas adesivas e suas influências no comportamento do sistema acaba sendo imprescindível (JÚNIOR, 2016).

Figura 2 – Carregamentos de uma junta adesiva.



Fonte: Adaptado de (VARAJÃO, 2015).

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é analisar as variáveis mais influentes na resistência de uma junta *Double cantilever Beam* de material compósito utilizando um modelo 3D de elementos finitos e o *Design of Experiment*.

Para o presente trabalho os objetivos específicos são:

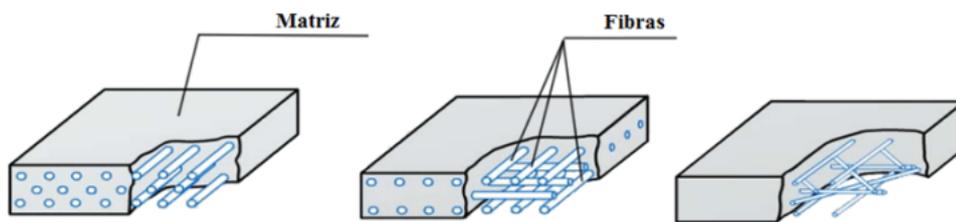
- Definir os parâmetros da junta que serão analisados para um ensaio *Double Cantilever Beam*;
- Desenvolver um modelo computacional que seja condizente com a realidade do ensaio;
- Validar o método de design de experimento, Plackett-Burman para a análise do ensaio DCB;
- Realizar as simulações para encontrar o comportamento de diferentes corpos de prova durante o ensaio DCB;
- Traçar o envelope do ensaio DCB;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos são obtidos a partir de dois ou mais constituintes que tem a finalidade de obter propriedades superiores do que quando analisada individualmente. Usualmente, a fabricação de um compósito é dividida entre uma fase dispersa (ou reforço) e outra fase contínua (ou matriz). O reforço geralmente é um material fibroso, como fibra de carbono, aramida ou fibra de vidro, este é distribuído continuamente na matriz, geralmente polimérica, epóxi e poliéster são os exemplos mais utilizados nas matrizes. As matrizes poliméricas atuam como um agente ligante, mantendo as fibras na orientação desejada, protegendo-as contra abrasivos e efeitos ambientais, bem como transferindo as tensões às fibras (JÚNIOR, 2016). A Figura 3 apresenta a distinção entre a matriz e as fibras.

Figura 3 – Configurações de fibras/matriz.



Fonte: Disponível em : <<https://edctecnologia.com.br/novos-materiais-compositos-desenvolvidos-por-meio-da-simulacao-molecular-com-biovia-materials-studio/>>. Acesso em: 14 Fev 2022.

O uso e pesquisas sobre compósitos tem crescido significativamente nos últimos anos. Isso se deve as propriedades que diferem esses materiais, de materiais convencionais isotrópicos, principalmente as relações de resistência mecânica por massa, rigidez por massa, baixo fator de dilatação térmica, resistência à corrosão e fadiga. Tais propriedades fazem com que esses materiais sejam altamente aplicáveis em estruturas que possuem o seu peso como uma das variáveis fundamentais de projeto. A indústria automotiva, Figura 4, é um bom exemplo de setor que passou a utilizar compósitos para diminuir a massa de seus projetos (VARAJÃO, 2015).

Figura 4 – Partes de um automóvel que podem ser substituídas por materiais compósitos.

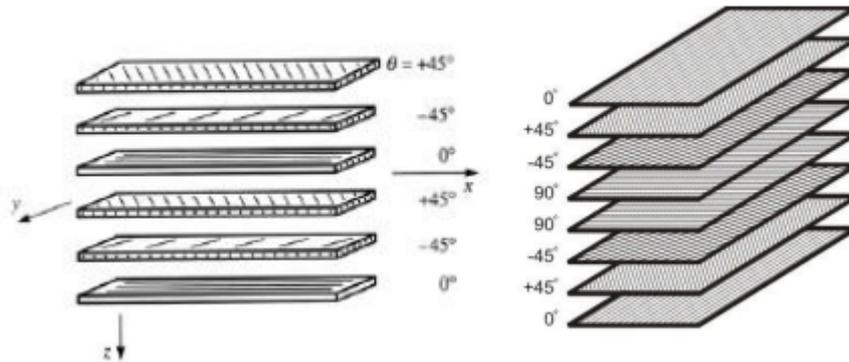


Fonte: Adaptado de (VARAJÃO, 2015).

Compósitos são materiais anisotrópicos. Materiais anisotrópicos são definidos por apresentarem diferentes propriedades dependendo da direção em que são medidos, no caso dos compósitos, esses possuem um alto valor de resistência mecânica na direção das fibras, porém são muito mais frágeis a esforços cisalhantes. O módulo de cisalhamento de compósitos pode ser tão baixo quanto 2% do módulo de Young das fibras enquanto para aderentes metálicos esse valor fica entre 25 - 40%. A análise de aderentes compósitos, por mais que tenha a mesma abordagem que materiais isotrópicos, precisa se atentar a esforços cisalhantes por conta dessa baixa rigidez normal das fibras (ADAMS et al., 1984).

A composição de uma lâmina de compósito consiste em duas ou mais camadas de material com orientações iguais ou diferentes. Uma maneira de tornar esses materiais mais eficientes é a fabricação de lâminas em formato de tecido, com fibras em duas ou mais direções, para contornar a fraqueza da fibra aos esforços cisalhantes como apresentado na Figura 5. Lâminas de compósitos ainda podem apresentar diferenciação de espessura de uma camada para a outra, ou ainda materiais diferentes entre as camadas, tudo isso pensando nas propriedades desejadas para o laminado.

Figura 5 – Exemplo de sobreposição de camadas com orientações diferentes.



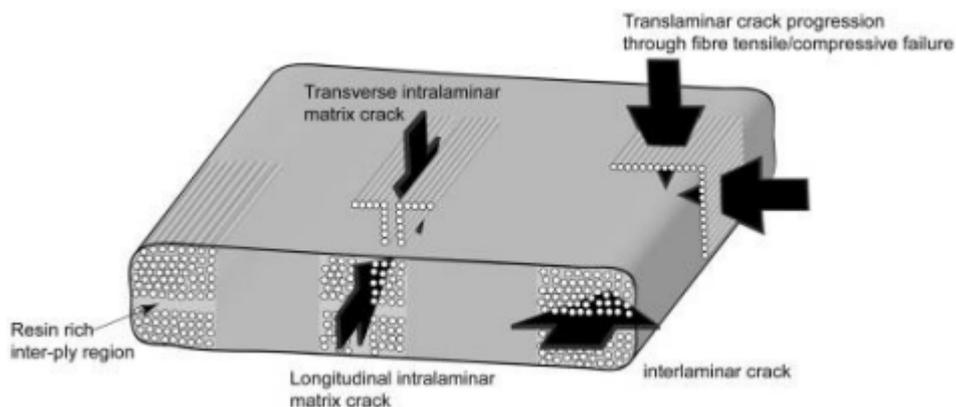
Fonte: Adaptado de (VARAJÃO, 2015)

Existem três tipos de falhas em compósitos das quais todas as outras variações e combinações derivam (ADAMS et al., 1984):

- Falha por tensão na direção das fibras; Ocorre quando o limite de resistência à tração da fibra é superado o que causa sua ruptura.
- Falha por tensão na direção ortogonal às fibras; ocorre quando o limite ao cisalhamento da fibra é ultrapassado. Como explicitado anteriormente, materiais compósitos tendem a apresentar uma resistência a cisalhamento muito menor do que sua resistência a tração.
- Falha interlaminar; ocorre com o início de uma trinca na região da matriz entre as fibras ou entre as lâminas essa falha pode se propagar separando o parte da lâmina e reduzindo sua resistência. Pode ser originada por uma das falhas anteriores ou por outros motivos como por exemplo impurezas, bolhas, vazios na matriz polimérica ou ainda pela baixa adesão entre a matriz e as fibras.

A Figura 6 demonstra as falhas citadas anteriormente e suas variações.

Figura 6 – Exemplos de orientação de falhas no compósito.



Fonte: Adaptado de (VARAJÃO, 2015)

2.2 ADESIVOS

Existem muitas definições para o que é um material adesivo. Segundo (KINLOCH, 1987) “Um adesivo pode ser definido como um material que quando aplicado a superfícies de outros materiais faz a união dos mesmo e resiste a certa força de separação.

2.2.1 Classificação dos adesivos

Adesivos podem ser classificados de diversas maneiras dependendo da sua aplicação. A classificação mais básica divide os adesivos entre naturais e sintéticos. Adesivos naturais são produzidos a partir de fontes naturais como amido, caseína e borrachas naturais. Adesivos sintéticos são confeccionados pelo homem, os polímeros são o melhor exemplo desse grupo. Os polímeros são amplamente mais utilizados do que os adesivos naturais devido a suas melhores propriedades mecânicas além de melhores resistências químicas (FANECO, 2014).

A classificação através da composição química descreve os adesivos como termofixos, termoplásticos, elastômeros ou híbridos. Uma das principais diferenças entre o comportamento de cada grupo é sua temperatura de vitrificação.

Os termofixos possuem uma estrutura fortemente reticulada e grande rigidez após sua polimerização. Entretanto, após solidificados esses materiais se degradam em temperaturas elevadas não permitindo que sejam remoldados. Epóxidos, poliésteres, poliamidas são exemplos de adesivos termofixos.

Já os termoplásticos podem ser remoldados porém não são recomendados para trabalhar em temperaturas acima dos 65°C, pois geralmente a partir dessa temperatura esse materiais começam a perder sua rigidez.

Os elastômeros podem ser termofixos ou termoplásticos e as características que melhor os classificam são a elevada tenacidade e capacidade de deformação, além de ótima resistência ao arrancamento e uma boa flexibilidade, por conta dessas propriedades esse materiais podem absorver muita energia e são indicados a juntas submetidas a carregamentos não uniformes e também para juntas que apresentem materiais com fatores de dilatação térmica diferentes (SILVA; MAGALHAES; MOURA, 2010).

Por fim os adesivos híbridos são combinações entre termoplásticos, termorrígidos e elastômeros, em um só material. Através dessa mistura de materiais de categorias diferentes é possível destacar as propriedades mecânicas e químicas de interesse.

Outra classificação dos adesivos é em relação a sua aplicação, esses podem ser separados em adesivos estruturais e não estruturais. Adesivos estruturais são usados em aplicações onde uma carga substancial é necessária para a separação da junta. Enquanto que adesivos não estruturais são todos os outros exemplo que não possuem alta resistência mecânica, esse grupo é amplamente utilizado no dia a dia em fitas adesivas, colas e etc (SILVA; MAGALHAES; MOURA, 2010).

2.2.2 Adesivos Estruturais

Adesivos estruturais são definidos por sua aplicação, onde uma carga substancial é necessária para a separação da junta. A resistência ao cisalhamento de um adesivo estrutural pode variar de 5MPa para poliuretanos e até 50 MPa para alguns tipos de epóxi (SILVA; MAGALHAES; MOURA, 2010). Para que uma junta adesiva seja aplicada em uma função estrutural é necessário que o aderente também apresente elevada resistência mecânica, fazendo com que a carga de trabalho fique dentro dos limites da junta, além disso, a combinação de aderente e adesivo precisa manter sua integridade por um período de serviço longo de exposição as intempéries do clima.

Por conta de todos os motivos citados anteriormente as famílias de adesivos a seguir podem ser consideradas as mais aptas para aplicações estruturais (PETRIE, 2000):

- Epóxidos,
- Fenólicos,
- Acrílicos,
- Poliaromáticos,
- Poliuretanos.

2.2.2.1 Epóxidos

Esta família de adesivos tem sido amplamente empregada na indústria mecânica em geral pela sua elevada versatilidade de aplicações, podendo aderir a muitos tipos de substratos. Possuem uma forte resistência mecânica à tração e ao cisalhamento, são de fácil aplicação, porém apresentam baixa resistência ao arrancamento e a clivagem. Possuem um tempo de cura longo se comparados com outras famílias e após a cura apresentam elevada rigidez (PETRIE, 2000) e (QUINI, 2011). Os epóxidos são comercializados geralmente em duas fases, a resina de epóxi e um ativador/catalizador.

Quando é comercializado como um componente apenas, o ativador já é incorporado na resina e para que o processo de cura seja iniciado é necessário uma alta temperatura para ativar o catalizador.

Quando comercializado como dois componentes separados a cura pode ser iniciada basicamente a qualquer temperatura, porém deve-se ter cuidado com a proporção de resina e ativador, assim como garantir uma mistura homogênea entre os mesmos. Após a ativação o processo de cura do adesivo pode ser acelerado pelo aumento da temperatura (FANECO, 2014).

Dentro do grupo de epóxidos existe diversas composições de adesivo/catalizador que podem ser utilizadas para buscar as mais diversas propriedades mecânicas. Essas propriedades podem ser alteradas pela adição de outras resinas (poliamida, polisulfido, fenólico ,etc.) ou ainda por elastômeros (poliuretano ou nitrilo) (PINTO et al., 2007).

2.2.2.1.1 Epóxido-poliamida.

A resina de poliamida tem a função de endurecedor e ao mesmo traz mais flexibilidade ao material, sendo possível dosar a flexibilidade a partir da relação entre epóxi e poliamida. Os adesivos originados dessa união apresentam uma maior resistência a clivagem e ao arrancamento se comparado com o epóxi puro. Possuem ainda boa resistência a fadiga e ao impacto, porém possuem baixa resistência a umidade (PINTO et al., 2007).

2.2.2.1.2 Epóxido-polisulfido.

São recomendados a aplicações que estão sujeitas a choques e vibrações. Possuem boa resistência química e boa resistência a intempéries (PINTO et al., 2007).

2.2.2.1.3 Epóxido-vinilo.

A resistência ao impacto e ao arrancamento são melhoradas, porém esse material acaba não sendo recomendado para utilizações a altas temperaturas (PINTO et al., 2007).

2.2.2.1.4 Epóxido-poliuretano.

Foram desenvolvidos para combinar as melhores características dos adesivos epóxido-poliamida e epóxido-polisulfido. Portanto esse tipo de adesivo apresenta boa resistência ao choque e vibrações ao mesmo tempo que possui boa resistência ao arrancamento e a fadiga (PINTO et al., 2007).

2.2.2.1.5 Epóxido-fenólico.

A resina fenólica melhora muito a resistência do adesivo em altas temperaturas porém diminui sua resistência ao impacto e ao arrancamento (PINTO et al., 2007).

2.3 JUNTAS ADESIVAS

Com o avanço da tecnologia e dos novos desafios encontrados pela indústria, os métodos de ligação de materiais evoluíram para diversos caminhos. Hoje existe um vasto leque de opções para cada tipo de necessidade e materiais onde se deseja fazer uma união. Essa variedade vai desde os rebites e parafusos, soldas, até métodos usando adesivos. O aumento do uso de ligações adesivas se dá em grande parte pelo desenvolvimento das indústrias automotiva, naval e aeronáutica.

A estrutura de uma junta adesiva é composta por dois ou mais substratos que podem ser de materiais iguais ou diferentes. A união entre as duas superfícies dos substratos acontece através da aplicação de um adesivo. Geralmente o termo substrato se refere aos componentes

antes da ligação, enquanto que o termo aderente é utilizado para retratar esses componentes após a ligação. A região entre o adesivo e o aderente é conhecida como a interfase. Nessa região se encontra a interface, que é definida como o plano de contato entre a superfície dos dois materiais (SILVA; MAGALHAES; MOURA, 2010). A busca por novas implementações de juntas adesivas tem crescido muito dentro de diversos setores de engenharia, esse crescimento se dá pelos seguintes fatores:

- Redução de peso em comparação com juntas puramente metálicas, o que pode proporcionar um aumento na eficiência de produtos do setor de transporte, por exemplo, além de redução de custos.
- Juntas Adesivas podem unir materiais dissimilares que apresentem diferentes fatores de dilatação térmica e mecânica já que a flexibilidade do adesivo pode compensar essa diferença.
- Apresentam uma elevada resistência à fadiga.
- Capacidade de amortização de vibrações.
- Apresentam uma distribuição de tensão mais uniformizada em comparação com juntas parafusadas e rebitadas. Isso proporciona uma maior rigidez e transmissão dos carregamentos.
- Permite ligar e vedar a junta simultaneamente, não precisando nenhum processo posterior.
- Permite unir formas complexas e irregulares.

Juntas adesivas também apresentam características indesejadas que devem ser levadas em consideração em suas aplicações (SILVA; MAGALHAES; MOURA, 2010):

- É difícil em uma junta adesiva detectar defeitos relacionados a falta de adesão sem realizar ensaios destrutivos.
- A superfície onde é aplicado o adesivo não pode conter impurezas e em muitos casos é necessário uma preparação com solvente, abrasão mecânica ou tratamento químico.
- Baixa resistência à intempéries, principalmente à umidade e temperatura. Isso ocorre pela natureza polimérica dos adesivos.
- É necessário planejar a junta para evitar tensões que concentrem o carregamento em uma área diminuta como a clivagem e o arrancamento.
- Tempo de cura do adesivo.
- Critérios de dimensionamentos ainda pouco desenvolvidos.
- Processo geralmente irrevisível.
- Flamabilidade e toxibilidade de alguns tipos de adesivos.
- Custo do processo é variável podendo ser maior do que os de ligações mecânicas.

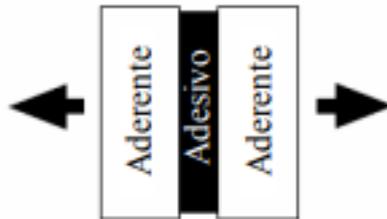
2.3.1 Tipos de carregamentos em juntas adesivas.

No que diz respeito aos tipos de carregamentos mais comuns em juntas adesivas destacam-se : Tração e Compressão, Cisalhamento Clivagem e arrancamento.

2.3.1.1 Tração e Compressão.

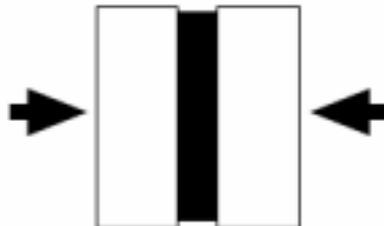
As tensões de tração são originadas por tensões aplicada perpendicularmente a interface de colagem, Figura 7 e 8, sendo sua distribuição uniforme ao longo do comprimento. Na prática, as forças raramente são totalmente perpendiculares ao plano de colagem, o que origina tensões de clivagem e ou arrancamento.

Figura 7 – Tração em junta adesiva.



Fonte: Adaptado de (FANECO, 2014)

Figura 8 – Compressão em junta adesiva.



Fonte: Adaptado de (FANECO, 2014)

2.3.1.2 Cisalhamento.

Os esforços cortantes surgem quando a tensão aplicada é paralela ao plano de colagem, Figura 9, provocando o cisalhamento entre os os aderentes. Nesse caso a distribuição de tensões não é uniformizada, os extremos da junta estão mais sujeitos a uma concentração de tensão se comparados com a região central. Como as extremidades da junta apresentam o maior nível de tensão, juntas que sofrem com esforços cisalhantes tem um benefício muito grande com um acréscimo em sua largura, pois isso distribui a tensão por um comprimento maior o que diminui deformações e o aparecimento de tensões clivagem e ou arrancamento.

Figura 9 – Cisalhamento em junta adesiva.



Fonte: Adaptado de (FANECO, 2014)

2.3.1.3 Clivagem e arrancamento.

Como já ressaltado anteriormente, as tensão de clivagem e arrancamento são os tipos de carregamento que mais prejudicam uma junta adesiva, sempre sendo necessário estudar um meio de evitar ou amenizar essas tensões. A clivagem é definida como a aplicação de tensões em uma das extremidades da junta, de forma a separar os aderentes, Figura 10. O arrancamento é muito semelhante a clivagem porém neste caso um ou ambos os aderentes são flexíveis, o que pode gerar um ângulo de separação maiores que os da clivagem, Figura 11. As propriedades de ductilidade e rigidez dos materiais influenciam diretamente na resistência a esse tipo de esforços, quanto mais frágeis e rígidos são os adesivos menos resistente a clivagem e arrancamento a junta tende a ser. Isso se deve a incapacidade que adesivos mais frágeis possuem de transferir os esforços para a sua zona interior (PINTO et al., 2007).

Figura 10 – Clivagem em junta adesiva.



Fonte: Adaptado de (FANECO, 2014)

Figura 11 – Arrancamento em junta adesiva.



Fonte: Adaptado de (FANECO, 2014)

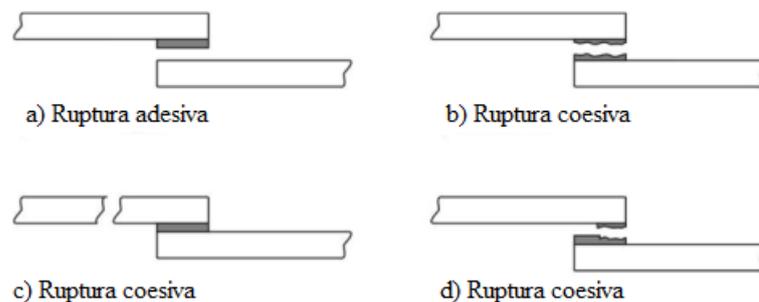
2.3.2 Modos de falha em juntas adesivas.

Já em relação aos modos de falha em juntas adesivas, existem duas possibilidades: falhas por adesão e falhas por coesão.

A Adesão é definida como a atração entre dois materiais resultante da força intermolecular que atua entre eles (SILVA; MAGALHAES; MOURA, 2010). A energia medida em uma fratura interfacial é geralmente ordens de grandezas maior do que aquelas vindas exclusivamente de forças intrínsecas, como as forças moleculares de Van der Waals ou ligações covalentes que atuam na interface. Por esse motivo se torna difícil medir essas forças com precisão através de ensaios mecânicos. Falhas na adesão geralmente ocorrem por conta de um preparo da superfície inadequado ou inefetivo.

O conceito de falha por coesão se difere da adesão pois este envolve apenas forças moleculares presentes em uma substância (adesivo ou aderente). Alguns dos principais fatores que causam as falhas por coesão são a fadiga térmica e defeitos de fabricação como impurezas e vazios. A Figura 12 ilustra na prática a diferença entre as falhas adesivas e coesivas.

Figura 12 – Tipos de ruptura.



Fonte: Adaptado de (PINTO et al., 2007)

2.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO ADESIVO

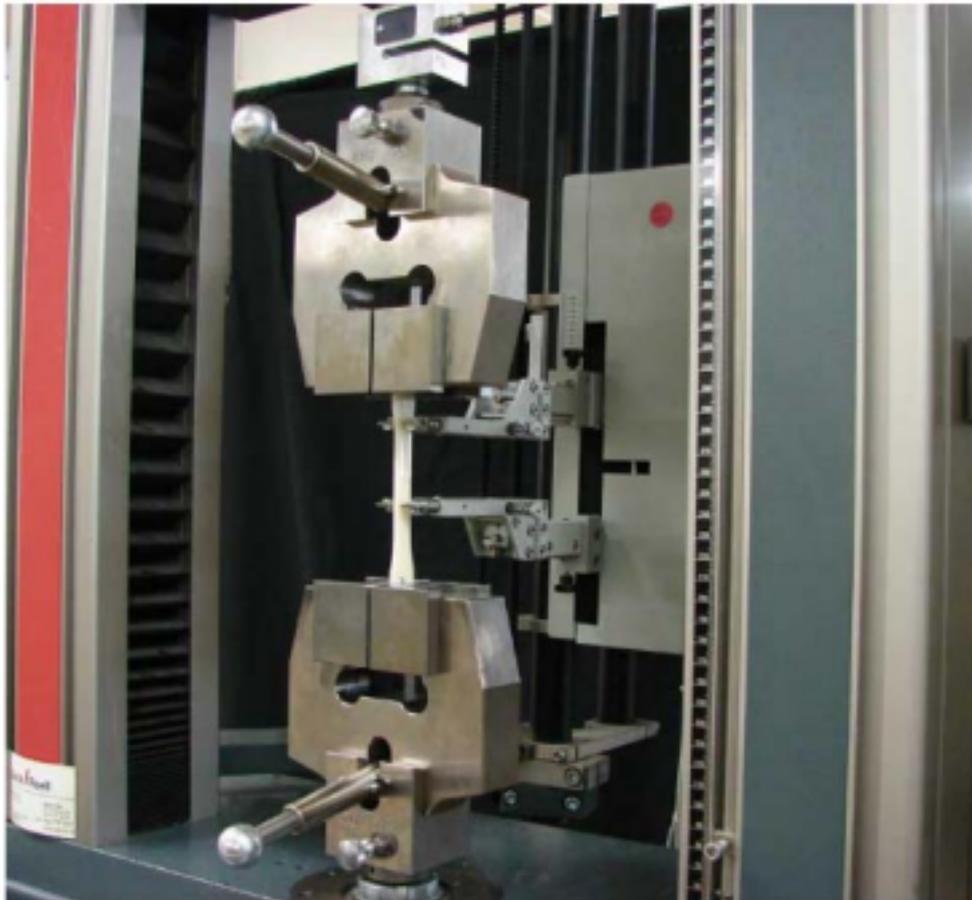
Para realizar a caracterização de um adesivo é necessário determinar uma série de parâmetros das regiões elástica, plástica e de fratura. Hoje existem uma série de testes feitos para determinar parâmetros específicos dessas regiões.

Como já explicitado anteriormente existem diversos tipos e famílias de adesivos, com propriedades das mais variadas, por esse motivo a seleção de qual será o adesivo em um projeto de junta é tão importante. Além do tipo do adesivo, para se proceder a um projeto correto de junta, é necessário o conhecimento do tipo de esforço, a distribuição das tensões e a partir disso a escolha de um critério de teste coerente. A seguir, será abordado formas de caracterização das propriedades mecânicas e de fratura de um adesivo.

2.4.1 Propriedades mecânicas a tração

O ensaio de tração é um dos ensaios destrutivos mais úteis na caracterização de propriedades mecânicas. Isso se deve ao fato da sua fácil e rápida execução, além das inúmeras propriedades e resultados que se podem retirar, sendo esse, o tipo de ensaio que apresenta a maior bibliografia e estudos dentro da área (FANECO, 2014). A Figura 13 mostra um ensaio de tração de um corpo maciço.

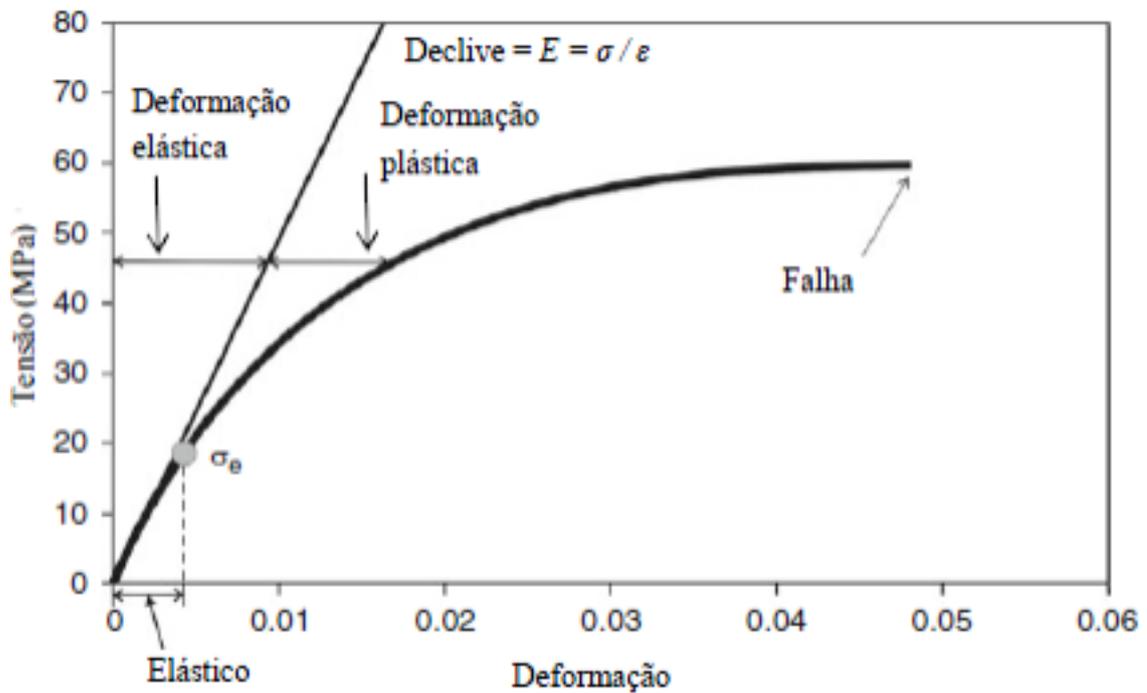
Figura 13 – Ensaio de tração.



Fonte: Adaptado de (FANECO, 2014)

A aplicação desse tipo de ensaio para adesivos ocorre da mesma forma que para outros materiais. Através da curva tensão-deformação que resulta do ensaio, Figura 14, determinar-se o módulo de elasticidade longitudinal (inclinação da curva no domínio elástico), a tensão correspondente à transição elasto-plástica (tendo em conta a força correspondente a essa transição), a tensão máxima e a deformação de ruptura. Para o cálculo das tensões, deve-se dividir a força nesse instante pela área inicial transversal da zona útil do corpo de prova. A zona útil é a parte do corpo de prova onde espera-se que aconteça a ruptura do mesmo (FANECO, 2014).

Figura 14 – Curva do ensaio de tração.



Fonte: Adaptado de (SILVA et al., 2011)

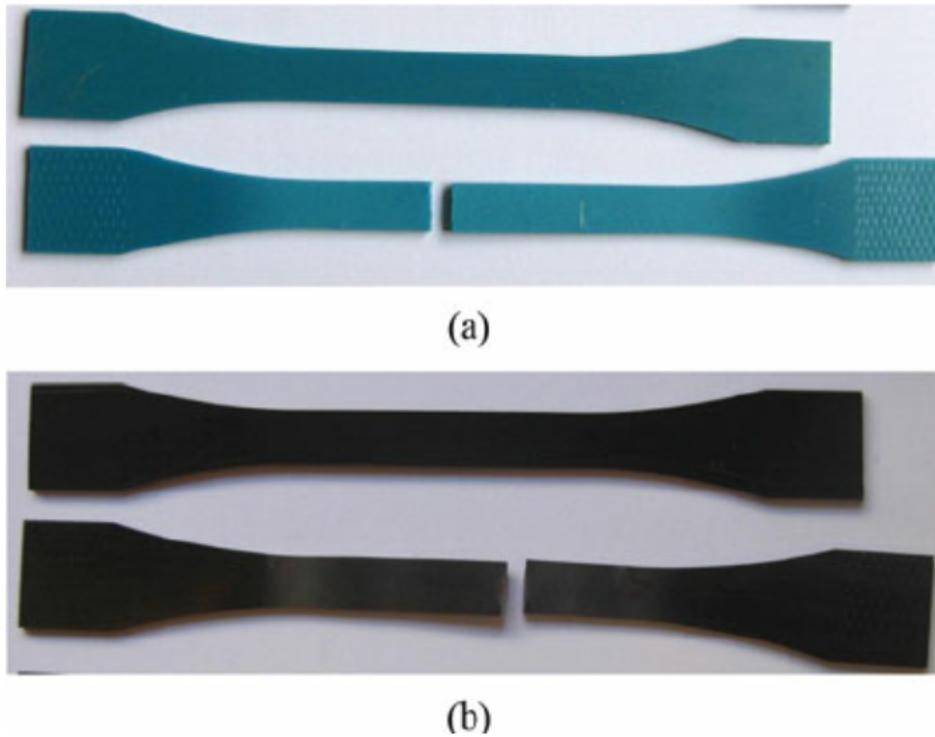
Existem inúmeros métodos de determinação de propriedades de um adesivo à tração, as duas categorias principais são: ensaios que utilizam corpos de prova de adesivo maciço e ensaios de junta adesiva. Existe o debate sobre qual destes métodos é o mais apropriado, pois alguns autores defendem que as propriedades obtidas através de dos corpos de prova maciços possam não ser as mesmas que as obtidas através da junta, por conta dos processos de cura diferentes.

Os ensaios em corpo de provas maciços e as juntas topo a topo, são os mais utilizados para determinação das propriedades à tração (SILVA et al., 2011).

2.4.1.1 Tração em corpo de prova de adesivo maciço.

O ensaio consiste em solicitar o corpo de prova na direção longitudinal do mesmo até à ruptura, registrando a curva de tensão-deformação. Através desta curva, pode-se obter várias propriedades do adesivo, como o módulo de elasticidade longitudinal (ou de Young), a tensão limite elástico-plástico, a tensão de ruptura e a deformação de ruptura. A norma EN ISO 527-2, que direciona a fabricação dos corpos de prova maciços, prevê dois tipos de corpos de prova, longo ou reduzido, em que a escolha é determinada pela rigidez do adesivo. A Figura 15 mostra corpos de prova maciços antes e depois da ruptura.

Figura 15 – Corpos de prova tração maciços.

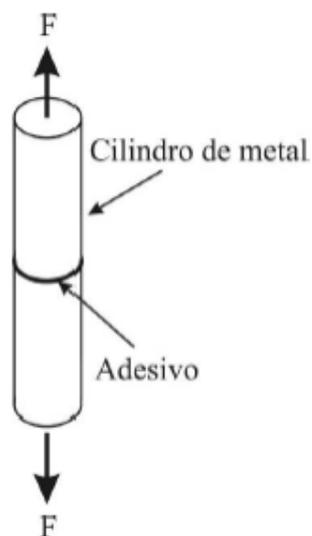


Fonte: Disponível em : <https://www.researchgate.net/figure/Bulk-unmodified-adhesive-specimens-before-and-after-testsaBetamateTM2098-andb_fig2_277920046>. Acesso em: 24 Jan 2022

2.4.1.2 Tração em juntas topo a topo.

Outro ensaio bastante utilizado para a determinação das propriedades é o ensaio em juntas de ligação topo a topo. Nesse método dois substratos geralmente metálicos de seção circular ou retangular são ligados entre si por um camada de adesivo. Como exemplificado na Figura 16.

Figura 16 – Ensaio de tração topo a topo.



Fonte: Adaptado de (PINTO et al., 2007)

Tal como o ensaio de adesivo bruto, o corpo de prova é solicitado longitudinalmente até a ocorrência da fratura da camada adesiva. Neste método não se verifica um estado uniaxial de tensão uniforme, isso ocorre por diversos fatores como, o efeito de Poisson, da constrição provocada na camada de adesivo pelos substratos, na ocorrência de uma diferença sensível de rigidez entre eles, ou ainda por desalinhamento dos aderentes. Tais dificuldades inerentes à obtenção de propriedades mecânicas por este processo estão relacionadas com a precisão na fabricação dos corpos de prova, e no correto alinhamento destes durante a sollicitação. Para garantir o alinhamento, pode ser feita a utilização de gabaritos de posicionamento. Os pequenos desalinhamentos que possam ocorrer introduzem esforços de flexão que reduzem fortemente as propriedades de resistência (FANECO, 2014).

2.4.2 Propriedades mecânicas ao cisalhamento

O estudo sobre esforços de cisalhamento em adesivos é muito importante, pois essa família de materiais apresenta uma distribuição de tensões cisalhantes muito favorável a sua utilização. Sempre que possível a junta deve ser projetada para aproveitar essa resistência ao cisalhamento dos adesivos.

Os ensaios de cisalhamento ou corte também funcionam através da obtenção da curva de tração-deformação. Através dessa curva é possível determinar propriedades como o módulo de cisalhamento, tensão de ruptura ao cisalhamento e a deformação de ruptura ao cisalhamento.

Para determinar as propriedades de forma correta, o método utilizado requer que a única sollicitação nas amostras seja da forma cisalhante. Isso pode ser atingido aplicando um momento torsor direto na junta, entretanto o maquinário necessário para realizar tal medição se torna muito complexo e encarece o processo. Geralmente os ensaios mais comuns para a medição do cisalhamento utilizam máquinas de tração/compressão (FANECO, 2014; PINTO et al., 2007).

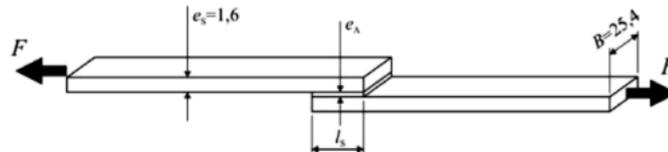
Assim como nos ensaios de tração, os ensaios de cisalhamento são divididos entre ensaios de corpo maciço e junta adesiva. O deslocamento do adesivo em ensaios que utilizam a junta adesiva é muito pequeno, o que torna mais complexo a identificação da deformação. Por esse motivo os corpos de prova maciços fornecem resultados mais precisos de deformação, entretanto há discussão sobre a validade de tais ensaios pois o tamanho e a espessura dos corpos maciços são maiores do que os apresentados em uma junta, o que pode fazer com que as propriedades obtidas estejam defasadas da realidade (ADAMS et al., 1984; SILVA et al., 2011).

Os métodos de medição mais utilizados são: ensaio junta de sobreposição simples ou *Single-lap joint* (SLJ), ensaio *Thick Adherend Shear Test* (TAST), ensaio de juntas topo a topo em torção, ensaio de torção em corpos de prova maciços, ensaio de Iosipescu e o ensaio borboleta (FANECO, 2014).

2.4.2.1 Single-lap joint (SLJ).

O ensaio de junta de sobreposição apresenta a vantagem de ser um método simples e barato, que pode ser realizado em máquinas de tração convencionais. É caracterizado por duas lâminas de aderente pouco espesas que estão ligadas através de uma seção de adesivo na sua sobreposição, Figura 17. A SLJ é descrita nas normas ASTM D 1002 e ISO 4587.

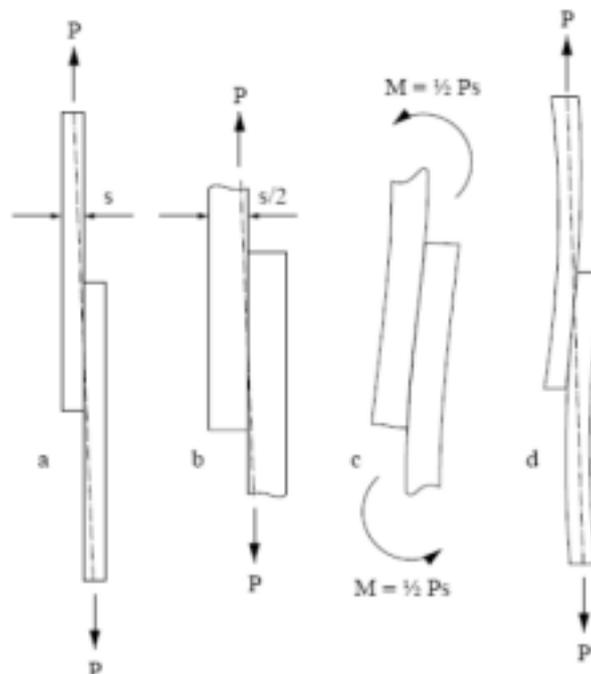
Figura 17 – Ensaio de cisalhamento.



Fonte: Adaptado de (MORAIS, 2013)

Como se pode verificar na Figura 18, a SLJ dá origem a carregamentos desalinhados ou ainda a um corpo de prova inclinado em relação a linha de carga. Esse fato origina um momento fletor que induz outros carregamentos e deformações.

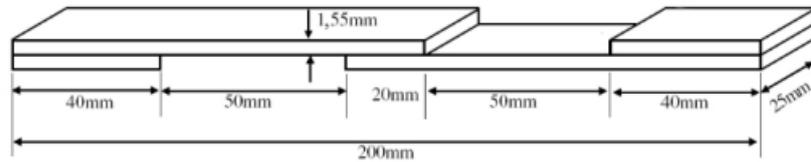
Figura 18 – Representação esquemática da flexão dos aderentes: (a) junta antes da deformação, (b) excentricidade da carga, (c) momento fletor, (d) deformação final da junta.



Fonte: Adaptado de (BERRY; D'ALMEIDA, 2000)

Existem diversas formas de amenizar o efeito da deformação da junta. A sobreposição dupla, Figura 19 consiste em adicionar um calço da mesma espessura do aderente para buscar o alinhamento da linha de carga.

Figura 19 – Sobreposição dupla.



Fonte: Adaptado de (FANECO, 2014)

Outro método mais simples é a utilização de uma junta de ressalto, Figura 20, entretanto esse tipo de junta não é recomendada para materiais frágeis ou com elevada resistência.

Figura 20 – Junta de ressalto.



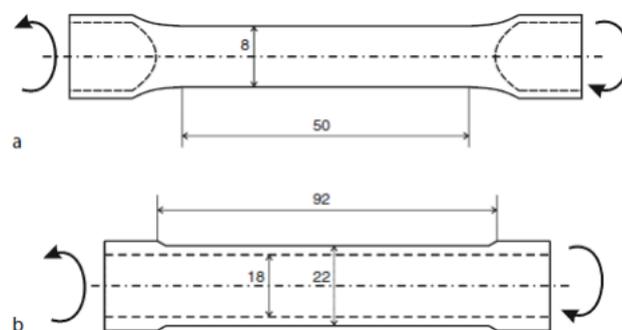
Fonte: Adaptado de (FANECO, 2014)

Vale ressaltar que os métodos anteriores amenizam, mas não acabam com o desalinhamento da linha de carga, pois a própria espessura do adesivo e do aderente influenciam nesse aspecto (CARBAS et al., 2008).

2.4.2.2 Ensaio de torção de corpos de prova maciços.

Esse tipo de ensaio utiliza corpos de prova que podem ser tubulares ou sólidos. Consiste na aplicação de uma torção no corpo de prova, medindo-se a deformação e o torque, Figura 21. A forma cilíndrica do corpo de prova é obtido geralmente através da usinagem o que pode tornar o processo caro e complexo, além de não ser recomendado a utilização de adesivos flexíveis nesse tipo de teste.

Figura 21 – Corpos de prova do ensaio de torção.



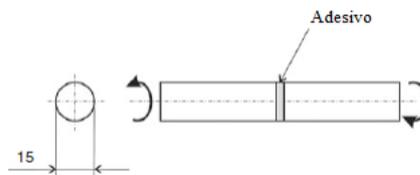
Fonte: Adaptado de (FANECO, 2014)

Como esse tipo de corpo de prova é circular e com bom acabamento superficial, a acuracidade das propriedades obtidas com esse tipos de teste é excelente (SILVA et al., 2011).

2.4.2.3 Junta topo a topo em torção.

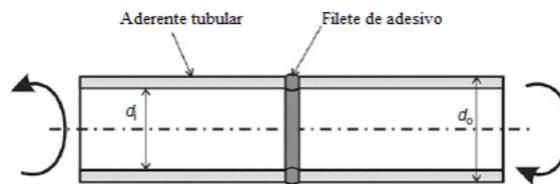
É possível utilizar substratos sólidos ou tubulares nesse tipo de ensaio, Figura 22. O *napkin-ring* é o modelo de ensaio topo a topo mais utilizado, ele consiste em dois cilindros de paredes muito finas alinhados e ligados através de um camada de adesivo, Figura 23. Quando os cilindros estão perfeitamente alinhados o sistema se torna um estado de tensão de cisalhamento puro, e os resultados obtidos são muito precisos (SILVA; MAGALHAES; MOURA, 2010).

Figura 22 – Ensaio de junta topo a topo para torção.



Fonte: Adaptado de (FANECO, 2014)

Figura 23 – Ensaio napkin-ring.



Fonte: Adaptado de (FANECO, 2014)

O *napkin-ring* pode apresentar dificuldades quando o adesivo utilizado possui baixa viscosidade, pois parte do adesivo formara filetes na parte exterior e interior dos tubos. Tais filetes comprometem o calculo da força já que são de difícil remoção e podem apresentar tensões variadas (SILVA et al., 2011).

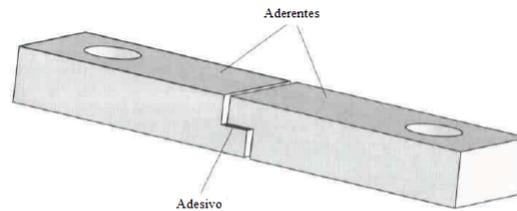
As principais desvantagens desse modelo de ensaio vem da fabricação dos substratos, geralmente metálicos e usinados, e também da precisão necessária para garantir o alinhamento dos substratos e a aplicação correta do adesivo, como já foi comentado nos ensaios de tração topo a topo.

2.4.2.4 Thick Adherend Shear Test (TAST)

O ensaio consiste na aplicação de tração através dos furos de carregamento, até a ruptura do adesivo. A tensão cisalhante aparece devido a geometria do corpo de prova.

É um dos ensaios de cisalhamento mais populares, o corpo de prova é relativamente fácil de se fabricar, em comparação com os dois métodos anteriores. Por ser fabricado em aço e apresentar uma elevada rigidez os substratos fazem com que o adesivo se encontre em um estado de cisalhamento praticamente puro. Além disso, a geometria do substrato apresenta elevada espessura o que evita o arrancamento nas extremidades (MORAIS, 2013). A Figura 24 esquematiza o ensaio TAST.

Figura 24 – Ensaio TAST.



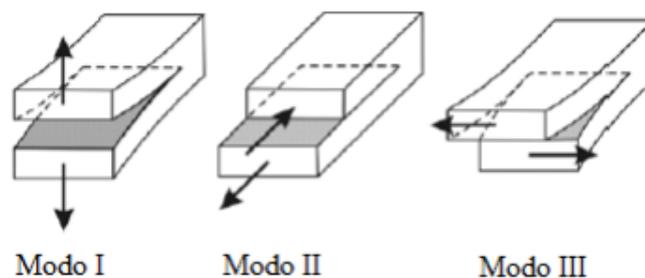
Fonte: Adaptado de (FANECO, 2014)

2.4.3 Propriedades mecânicas da fratura

Os métodos utilizados para estudar a fratura em juntas adesivas se diferem dos métodos baseados em resistência dos materiais vistos anteriormente. Na mecânica da fratura, as abordagens utilizadas assumem a existência de um defeito no corpo de prova, relacionado ao tipo de esforço que será analisado. O objetivo da adição destes defeitos é observar se eles podem induzir uma falha catastrófica na estrutura ou se no decorrer da vida útil da junta estes vão manter sua propagação em um nível estável, inferior a um ponto crítico.

Para caracterizar a fratura de um adesivo é necessário conhecer a energia crítica de fratura G_c . Existem três modos de falha que englobam a energia de fratura. O modo I representa o modo de abertura, já os modos II e III representam os modos de cisalhamento, Figura 25. Em muitas estruturas reais, a carga é aplicada de tal forma que uma combinação dos modos no crescimento da trinca surgem, o que implica na utilização de um modos mistos para que seja possível simular a propagação dos danos (CHAVES et al., 2014).

Figura 25 – Modos de falha.



Fonte: Adaptado de (FANECO, 2014)

A taxa de liberação de energia é dada por (FANECO, 2014):

$$G = \frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA}, \quad (1)$$

onde W [J] representa o trabalho externo aplicado na junta, U [J] a energia de deformação interna e dA [mm^2] a variação de área de superfície da trinca.

A taxa crítica de liberação de energia, G_c , é uma propriedade inerente ao material, portanto uma condição fundamental para evitar a propagação da fissura é (MOURA; CAMPILHO; GONÇALVES, 2008):

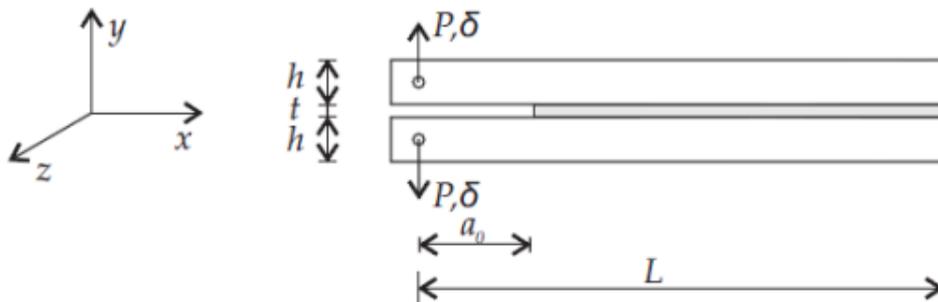
$$G < G_c. \quad (2)$$

2.4.3.1 Double Cantilever Beam (DCB)

O ensaio DCB é o mais simples e rotineiramente utilizado para a determinação do G_{Ic} e o comprimento da fenda da junta adesiva. Foi desenvolvido por (BENBOW; ROESLER, 1957) e (GILMAN, 1959).

O ensaio consiste em uma junta com dois aderentes de iguais comprimentos e espessura colados por uma camada adesiva intermediária. Esse adesivo intermediário possui um comprimento menor que o comprimento dos aderentes, isso cria uma região vazia entre os aderentes o que configura um defeito. Na figura 26 o a_0 representa essa região que é designada como pré-trinca.

Figura 26 – Esquemático do corpo de prova do ensaio DCB.



Fonte: Adaptado de (FANECO, 2014)

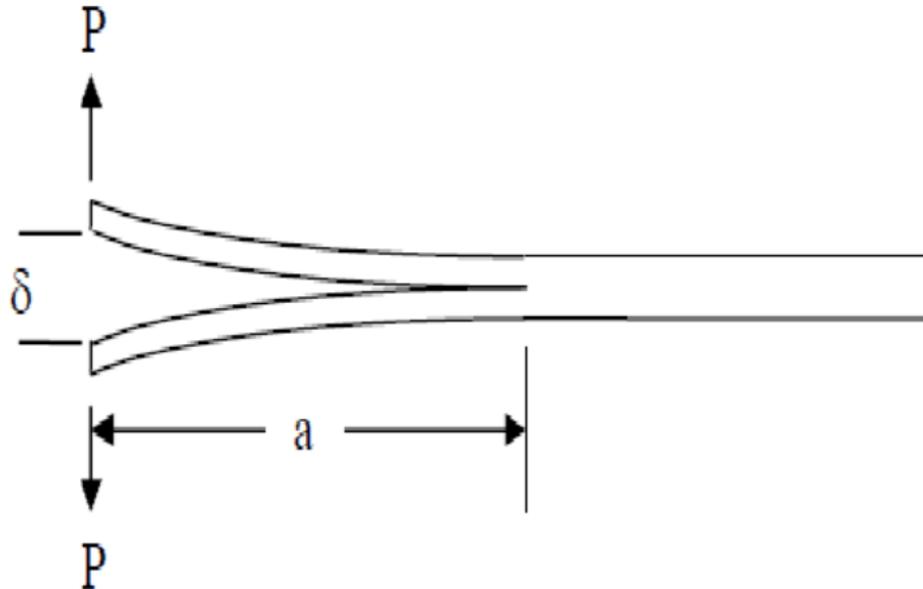
As dimensões e especificações para a realização do DCB são descritas pelas normas ASTM D3433-99 e ASTM D5528.

O corpo de prova é solicitado através da abertura das extremidades, como ilustrado na Figura 27. Esse deslocamento caracteriza um estado de clivagem. Durante o ensaio é registrado a carga P e o deslocamento δ , Figura 28. Também é registrado, através do posicionamento de câmeras, o avanço da trinca correspondendo aos valores de a .

O ensaio termina com a ruptura do corpo de prova, espera-se que todo o desenvolvimento da trinca e ruptura sejam de forma coesiva. Vale ainda ressaltar que caso ocorra a deformação

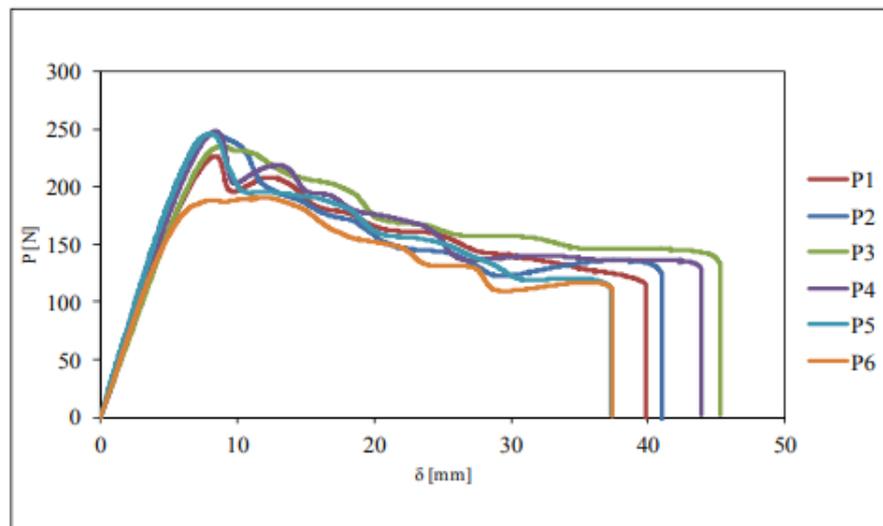
plástica dos aderentes durante o ensaio o valor de G_{Ic} , irá apresentar uma defasagem em relação a realidade (FANECO, 2014).

Figura 27 – Deslocamento no corpo de prova do ensaio DCB.



Fonte: Disponível em : <https://www.researchgate.net/figure/DCB-test-specimen-Sim-2010_fig2_228443284>. Acesso em: 26 Jan 2022

Figura 28 – Curvas P - δ de ensaios DCB.



Fonte: Adaptado de (FANECO, 2014)

2.4.4 Métodos para a determinação do G_{Ic}

A determinação do G_{Ic} é dividida entre os métodos que requerem a medição do comprimento de trinca, métodos *Compliance Calibration Method (CCM)*, *Direct Beam Theory (DBT)* e

Compliance Based Theory (CBT), e os métodos que usam o comprimento de fenda equivalente, como o método *Compliance Based Beam Method* (CBBM).

2.4.4.1 Método CCM (*Compliance Calibration Method*)

O método CCM é baseado na equação na equação de Irwin-Kies

$$G_{Ic} = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da}, \quad (1)$$

onde P [N] representa a carga aplicada, b [mm] representa a largura do corpo de prova e C [mm/N]= δ/P a flexibilidade. Nesse método um polinômio cubico ($C = C_3a^3 + C_2a^2 + C_1a + C_0$) é usado para ajustar as curvas $C = f(a)$, o que resulta em (KANNINEN; MCEVILY; POPELAR, 1986):

$$G_{Ic} = \frac{P^2}{2b} (3C_3a^2 + 2C_2a + C_1), \quad (3)$$

2.4.4.2 Método DBT (*Direct Beam Theory*)

O método DBT utiliza a teoria de vigas para determinar o G_{Ic} ,

$$G_{Ic} = \frac{12a^2P^2}{b^2h^3E_x}, \quad (4)$$

o h representa a espessura de cada aderente, E_1 é o módulo de Young do aderente na direção longitudinal (MOURA; CAMPILHO; GONÇALVES, 2008).

2.4.4.3 Método CBT (*Compliance Based Theory*)

O método CBT calcula o G_{Ic} através de:

$$G_{Ic} = \frac{3P\delta}{2b(a + |\Delta|)}, \quad (5)$$

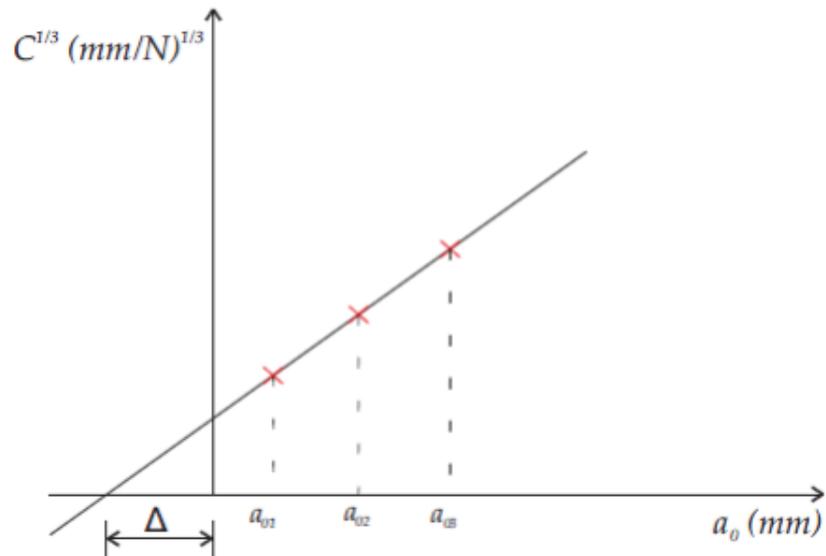
onde Δ é um fator de correção do comprimento da trinca devido a rotação e deflexão dos aderentes na extremidade da trinca. Utilizando a teoria de vigas, a relação entre C e a pode ser expressa por:

$$C = \frac{8(a + |\Delta|)^3}{E_1bh^3}, \quad (6)$$

que resulta em:

$$C^{\frac{1}{3}} = \frac{2}{h(E_1b)^{\frac{1}{3}}} (a + |\Delta|). \quad (7)$$

Determina-se Δ a partir da regressão linear de $C^{\frac{1}{3}} = f(a)$. A regressão linear pode ser obtida através de ensaios de três corpos de prova Figura 29, com diferentes comprimentos iniciais de trincas a_0 .

Figura 29 – Método de determinação de Δ .

Fonte: Adaptado de (FANECO, 2014)

Outra maneira de contabilizar os efeitos de rotação e flexão na extremidade da fenda é através de Δ_I , esse parâmetro é dado por:

$$\Delta_I = h \sqrt{\frac{E}{11G} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right]}, \quad (8)$$

sendo

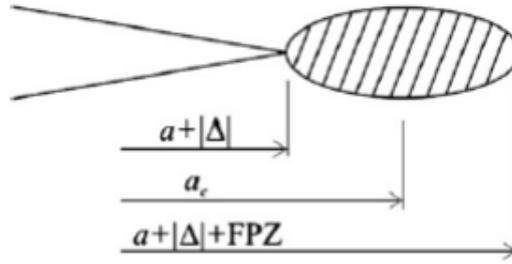
$$\Gamma = 1.18 \frac{E}{G}. \quad (9)$$

Esse parâmetro Δ_I pode substituir o valor Δ na equação (5) (CHAVES et al., 2014).

2.4.4.4 Método CBBM (Compliance Based Beam Method)

Uma zona de processo de fratura (FPZ) se desenvolve em frente a propagação da fenda como consequência de múltiplas micro-fraturas nucleadas durante a plastificação, Figura 30. Por conta desse fenômeno é difícil precisar o verdadeiro comprimento da trinca. Quando adesivos com maior ductilidade são utilizados, a energia dissipada na FPZ não pode ser negligenciada e deve ser considerada no sistema de redução escolhido (MOURA; CAMPILHO; GONÇALVES, 2008).

Figura 30 – Zona de processo de fratura (FPZ).



Fonte: Adaptado de (MOURA; CAMPILHO; GONÇALVES, 2008)

Todos os métodos anteriores eram dependentes da medição do comprimento da trinca durante os ensaios. Tal medição pode ser difícil de ser obtida dependendo do maquinário e das condições de ensaio. No método CBBM, o comprimento da trinca equivalente a_e é utilizado nos cálculos de obtenção de G_{Ic} . Com isso, esse método passa a depender apenas dos dados de força/deslocamento obtidos no ensaio e da geometria do corpo de prova, Figura 31.

A energia de deformação do corpo de prova na Figura 31 devido aos efeitos fletores e cisalhantes é calculada por:

$$U = 2 \left[\int_0^a \frac{M_f^2}{2EI} dx + \int_0^a \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\tau^2}{2G} b dz dx \right], \quad (10)$$

onde M_f é o momento fletor, I o segundo momento de área de cada braço aderente, E_1 e G_{13} são as propriedades elásticas do compósito carbono-epóxi e τ :

$$\tau = \frac{3V}{2bh} \left(1 - \frac{y^2}{c^2} \right), \quad (11)$$

o parâmetro c representa meia espessura e V se refere ao carregamento transversal em cada braço de aderente ($0 \leq x \leq a$). Do teorema de Castigliano podemos calcular o deslocamento δ por:

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{8Pa_e^3}{Ebh^3} + \frac{12Pa_e}{5bhG}, \quad (12)$$

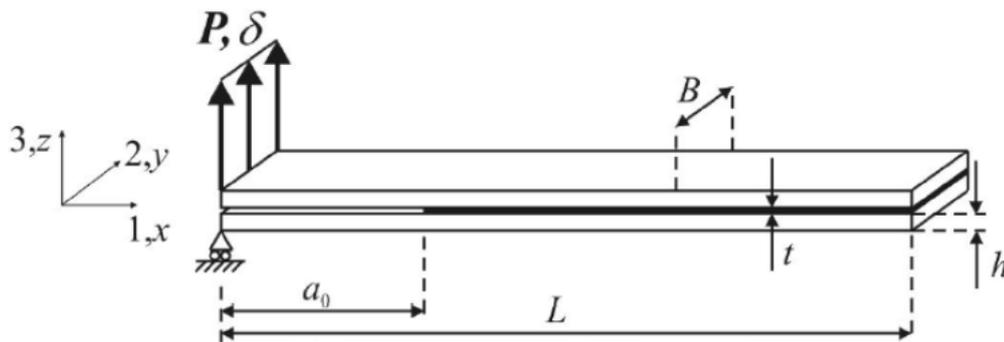
Essa equação é uma aproximação baseada na teoria de vigas e permite que seja definido a tendência $C = \delta/P$ do corpo de prova a partir da curva $P - \delta$. Entretanto a teoria de vigas não leva em consideração alguns fenômenos que influenciam a curva $P - \delta$. Um exemplo acontece no início da parte linear da curva $P - \delta$, onde existem concentrações de tensão na abertura da trinca que não são levadas em consideração na teoria de vigas. Para incluir esses efeitos, um módulo de correção flexural E_f é calculado para substituir E_1 , assim

$$E_f = \left(C_0 - \frac{12(a_0 + |\Delta|)}{5bhG} \right)^{-1} \frac{8(a_0 + |\Delta|)}{bh^3}, \quad (13)$$

onde C_0 é a tendência inicial da curva $P - \delta$, Δ é a correção devido a rotação da abertura da trinca inicial já apresentado nos métodos anteriores. O valor da trinca equivalente a_e é calculado através da equação (12), substituindo a por a_e , e resolvendo o polinômio cúbico. A trinca equivalente considera ($a_e = a + |\Delta| + \Delta_{aFPZ}$). A energia de fratura em modo I pode ser obtida por,

$$G_{Ic} = \frac{6P^2}{b^2h} \left(\frac{2a_e^2}{h^2E_f} + \frac{1}{5G_{13}} \right). \quad (14)$$

Figura 31 – Corpo de prova DCB.



Fonte: Adaptado de (MOURA; CAMPILHO; GONÇALVES, 2008)

2.5 MODELO DE ANÁLISE COMPUTACIONAL

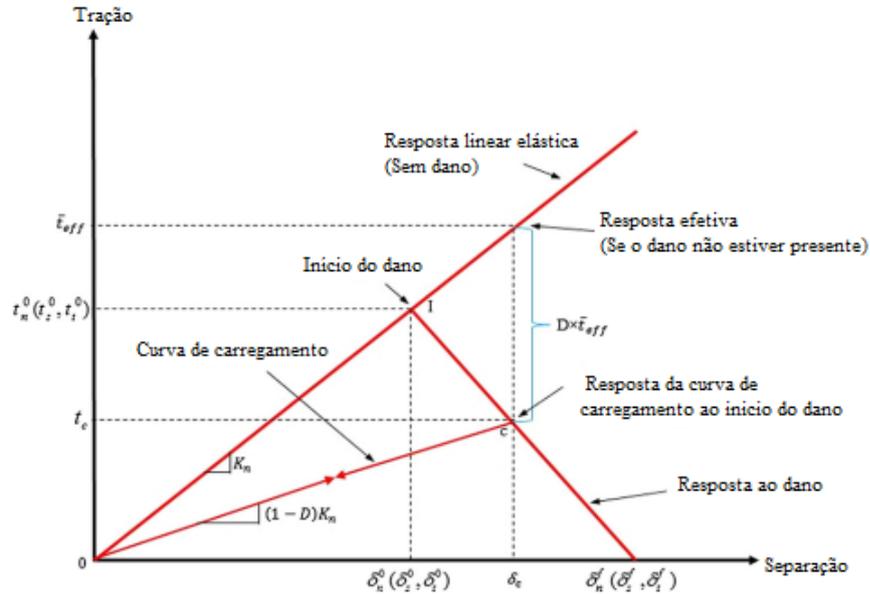
A simulação através de elementos finito (MFE) da propagação da delaminação é de grande interesse, para engenheiros de projeto, a fim de entender o mecanismo de falha de uma estrutura. Existem três técnicas bem conhecidas, por exemplo, *Virtual crack closure technique* (VCCT), *cohesive zone model* (CZM) e *extended finite element method* (XFEM) que podem ser usados com elementos finitos para simular a propagação de trincas em diferentes materiais. O método utilizado foi o CZM pois, simulações que utilizam esse método apresentam boa aproximação da realidade (HEIDARI-RARANI; SAYEDAIN, 2019). Além disso, (BENAMAR et al., 2019; MOURA; CAMPILHO; GONÇALVES, 2008), que são duas referências importantes para esse trabalho, também optaram por utilizar o método CZM em suas simulações.

2.5.1 Método CZM

A modelagem do crescimento de trincas pelo CZM forneceu grandes mudanças à mecânica da fratura, e tornou possível definir o caminho de crescimento na região à frente da trinca. No CZM, as equações necessárias para analisar o processo de fratura são simplificadas e focadas apenas na região da ponta da trinca. Esse método considera as características desta região pela lei de tração-separação. Na modelagem por elementos finitos, a lei de tração-separação é atribuída a elementos definidos no caminho da fissura. A resposta dos elementos coesivos usados neste

estudo são definidos por tração-separação bilinear como mostrado na Figura 32 para modos individuais (HEIDARI-RARANI; SAYEDAIN, 2019).

Figura 32 – Resposta bilinear de elementos coesivos a separação por tração.



Fonte: Adaptado de: (HEIDARI-RARANI; SAYEDAIN, 2019)

O modelo constitutivo elástico que relaciona a tração normal e o cisalhamento com as separações normal e de cisalhamento de um elemento (sem considerar os efeitos de acoplamento) é dado por

$$\vec{T} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_n & 0 & 0 \\ 0 & K_s & 0 \\ 0 & 0 & K_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K \vec{\delta}, \quad (15)$$

onde \vec{T} é o vetor das tensões coesivas, $\vec{\delta}$ é o vetor dos deslocamento e K é a matriz de rigidez dos elementos.

Após o início da fissura, os elementos coesivos experimentam um amolecimento, que é ilustrado por uma variável de dano escalar, D . Este valor é zero inicialmente e aumenta para a unidade monotonicamente quando ocorre dano, nesse o início da abertura da trinca. Se os valores de danos forem especificados no software, quando o modelo começa a danificar, os valores das tensões de contato são afetados por este parâmetro. Conforme mostrado na Figura 32, a interseção do comportamento linear de tração-separação com a inclinação de $(1-D)K_n$, pela linha de amolecimento resulta na tensão normal (t_n^0) ou tensões de contato tangencial (t_s^0 e t_t^0) em cada modo de fratura. Equações (16) - (18) representa a resposta de suavização do elementos coesivos (ABAQUS, 2014):

$$t_n = \begin{cases} (1-D)t_n^0, & t_n^0 \geq 0 \\ t_n^0, & t_n^0 < 0, \end{cases} \quad (16)$$

$$t_s = (1 - D)t_s^0, \quad (17)$$

$$t_t = (1 - D)t_t^0. \quad (18)$$

2.6 DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE).

A estatística é uma ciência matemática que consiste na coleta, análise, interpretação e apresentação de dados, e é aplicável a uma ampla variedade de disciplinas. O "*design of experiments*" (DOE) envolve todas as etapas na escolha de quais experimentos são conduzidos para testar uma ou mais hipóteses. Isso inclui a escolha do tipo de experimentos, operações a serem realizadas e medições a serem feitas, bem como a escolha dos instrumentos de medição. Tudo isso depende do estado do conhecimento na área e sobre a tecnologia disponível para fazer medições coesas. Muitos experimentos que são agora viáveis não poderiam ser realizados há muitos anos. A aplicação da estatística se estendeu muito além de sua origem para diversas áreas de pesquisa, sendo uma delas o design de experimentos (VANAJA; RANI, 2007).

O design experimental, também conhecido como design de experimentos (DOE), é a metodologia de como conduzir e planejar experimentos para extrair o máximo de informações com o menor número de análises. Um experimento planejado é uma ferramenta ou conjunto de ferramentas usadas para coleta de dados de teste. As características típicas de um projeto experimental são testes planejados, abordagem de análise de dados, variabilidade de fatores simultâneos e abordagem científica. Vantagens do design de experimentos:

- Ajuda a lidar com erros experimentais.
- Ajuda a determinar as variáveis importantes que precisam ser controladas e encontrar as variáveis sem importância que não precisam ser controladas.
- Elimina a confusão de efeitos em que o efeito de variáveis de design estão misturadas.
- Ajuda a medir as interações, o que é muito importante.
- Permite extrapolação de dados e busca pelo melhor produto possível dentro dos intervalos das variáveis de teste.
- Permite traçar gráficos para descrever como as variáveis estão relacionadas e em que nível tais variáveis resultam em um produto ótimo. O uso de modelos estatísticos nos mostra a inter-relação entre as variáveis.

O DOE tem sido aplicado em muitas áreas funcionais, sendo uma delas a pesquisa para quantificar a inter-relação entre variáveis e filtrar um grande número de variáveis para identificar as mais importantes. Outra área é o desenvolvimento de produtos pelo qual é utilizado para melhorar os produtos através da reformulação e desenvolvimento de novos produtos. O DOE é baseado em princípios estatísticos consolidados e lógicos (VANAJA; RANI, 2007).

2.6.1 Design de triagem.

Um design de triagem refere-se a um design experimental que pode ser aplicado quando um grande número de potenciais fatores influentes precisam ser examinados, para identificar os mais importantes que podem ter efeito sobre uma ou mais respostas de interesse. Isso reduzirá o número de fatores a serem investigados em novas experiências. Para eliminar fatores irrelevantes antes de investir tempo em um experimento mais elaborado, triagem pode ser realizada (VANAJA; RANI, 2007). O design de triagem tem uma série de pontos positivos:

- Ajuda a melhorar o processo de controle de qualidade, determinando os limites de controle superior e inferior de uma determinada variável.
- Processo pode ser refinado, identificando os fatores de influência de uma forma menos dispendiosa.
- Minimizar o número de experimentos e maximizar a informação é o objetivo final.
- Os resultados podem ser verificados de forma eficiente e confiável, pois são expressões matemáticas.

2.6.2 Design Plackett-Burman

Uma classe popular de designs de triagem é o design Plackett-Burman (PBD), desenvolvido por R.L. Plackett e J.P. Burman em 1946. Foi projetado para melhorar o processo de controle de qualidade que poderia ser usado para estudar os efeitos dos parâmetros de projeto no estado do sistema para que decisões inteligentes pudessem ser feitas. As matrizes ortogonais desenvolvidas por Plackett e Burman são muito úteis para triagem, pois produzem estimativas imparciais de todos os principais efeitos no menor projeto possível. Vários fatores numéricos ou 'n' podem ser rastreados em um projeto PBD de 'n + 1' testes. Uma característica desse método é que o tamanho da amostra é um múltiplo de quatro em vez de uma potência de dois (4k observações com $k = 1, 2, \dots, n$). Projetos PBD são usados para investigar n-1 variáveis em n experimentos propondo designs experimentais para mais de sete fatores e especialmente para $n \times 4$ experimentos, ou seja, 8, 12, 16, 20, etc., que são adequados para estudar 7, 11, 15, 19, etc., fatores respectivamente. Tais projetos são conhecidos como projetos saturados. A principal vantagem dos projetos saturados é o mínimo número de observações necessárias para calcular o efeito para um determinado fator. A propriedade projetiva do design PB é que ele permite ao experimentador acompanhar um projeto com execuções que permitem uma separação científica de efeitos principais e efeitos de interação. A desvantagem do projeto PBD é que o padrão de análise é muito mais complexo, cada efeito principal é associado a cada interação bidirecional não envolvendo esse efeito. A falta de ajuste pode tornar difícil a avaliação, e efeitos de primeira ordem podem ser confundidos com efeitos de interação. Os projetos PBD exigem o menor número de testes, porém, não permitem estimar interações entre fatores; ele pode apenas identificar os principais fatores significativos que compõem as possíveis interações. Uma análise mais aprofundada dos principais fatores importantes permitiria ao analista identificar e estimar

os termos das interações mais significativas. Portanto, o uso de um desenho Plackett-Burman é apropriado para triagem (PLACKETT; BURMAN, 1946).

O passo-a-passo de um processo de um design de triagem é apresentado a seguir:

- Seleção dos fatores.
 - Definição dos níveis de variação para os fatores.
 - Selecionar as respostas a serem medidas.
 - Gerar uma matriz de projeto de PBD.
 - Randomize e realize os experimentos.
 - Replicar o design.
 - Desenvolver um modelo.
 - Análise estatística ou gráfica dos efeitos.
 - Interpretar e concluir a partir da análise estatística.
 - Recomendar possíveis melhorias e, se necessário, aplicar design de resolução mais complexos.
- Crie produtos de verificação.

2.6.2.1 Seleção de fatores, nível de variação e repostas

O primeiro passo em um projeto de triagem é selecionar os fatores, definir os seus níveis e repostas que têm de ser medidos. A seleção de fatores baseia-se na experiência do pesquisador, que escolhe uma ou várias repostas e descobre onde no espaço experimental, derivados da resposta em relação a cada fator pode ser obtido. O conhecimento apropriado das propriedades físicas dos fatores e uma compreensão completa do planejamento experimental aumenta a informação obtida a partir dos experimentos. Os níveis dos fatores devem ser alcançáveis em combinação com cada outro, capaz de definir e redefinir de forma reproduzível entre diferentes designs de experimentos. Se o intervalo do fator for muito pequeno, a variação da resposta é muito pequena e influência do erro experimental no resposta é grande; por outro lado, se o intervalo for muito grande, o modelo de primeiro grau usado para interpretar os resultados do desenho experimental não seria válido. Portanto, em um PBD de triagem, uma faixa entre níveis baixos e altos de cada fator é geralmente pequeno em comparação com os intervalos usados durante a fase de otimização (VANAJA; RANI, 2007).

2.6.2.2 Design da matriz

Após a seleção dos fatores e seus níveis, é gerada uma matriz de projeto. As colunas representam fatores com graus de liberdade iguais ao número de níveis na coluna. Os elementos nas colunas especificam os níveis em alto (+) e baixo (-) a serem definidos para fatores dado o experimento. As linhas na matriz contêm a execução do processo. Dessas execuções, os efeitos sobre a variável podem ser estudados (PLACKETT; BURMAN, 1946).

Tabela 1 – Matriz Plackett-Burman para 11 parâmetros.

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11
1	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+
2	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-
3	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+
4	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+
5	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+
6	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-
7	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-
8	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-
9	-	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+
10	+	-	-	-	+	+	+	-	+	+	-
11	-	+	-	-	-	+	+	+	-	+	+
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Analisando a estrutura da matriz PBD, Tabela 1, nota-se que ela é montada de tal forma que qualquer uma das variáveis irá apresentar metade dos valores como (+) e a outra metade como (-) em sua coluna. A combinação dessa variável de interesse com qualquer outra variável nos mostra que para os valores (+) da variável de interesse, os valores correspondentes (mesma linha) na variável qualquer serão divididos igualmente entre valores (+) e (-), o mesmo acontece para os valores (-) da variável de interesse.

Como exemplo, é possível analisar a variável X1. Nota-se que para os valores (+) de X1 nas linhas 1, 2, 4, 5, 6 e 10 todas as outras variáveis vão apresentar três valores (+) e três valores (-), essa característica acontece tanto para os valores (+) quanto para os (-) e esta presente em todas as variáveis. Essa combinação é o que faz com que seja possível isolar estatisticamente apenas uma variável.

2.6.2.3 Análise de sensibilidade

Cada linha da tabela 1 representa um cenário (um conjunto de valores (+) e (-) para os parâmetros) que produzirá uma saída (variável alvo ou quantidade). O número de variáveis de saída dependerá do modelo que está sendo analisado. A análise para cada variável de saída seguirá o procedimento aqui explicado. Para determinar o efeito de determinado componente/fator/parâmetro, some as saídas (assinadas). Na matriz PBD na coluna associada ao parâmetro em questão, é atribuído os sinais para os valores de saída, linha por linha. Realizando o cálculo da média de todos os valores (+) e a média de todos os valores (-). A diferença entre esses números é a pontuação ou o índice de influencia da variável em questão. Dessa forma cada parâmetro através do seu efeito na variável alvo recebeu uma pontuação M_e .

$$M_e = M_+ - M_-, \quad (19)$$

onde M_+ é a média dos valores (+) e M_- é média dos valores (-).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordados os métodos utilizados para a realização das simulações do ensaio DCB, bem como os materiais selecionados e suas propriedades.

O fluxograma a seguir descreve o passo-a-passo da metodologia seguida para realizar a simulação:

- Seleção dos fatores.
- Definição dos níveis de variação para os fatores.
- Criar o modelo computacional utilizando o CZM.
- Selecionar as respostas a serem medidas.
- Gerar uma matriz de projeto de PBD.
- Replicar o design para todas as rodadas da simulação.
- Rodar a simulação.
- Analisar gráficos P- δ .
- Aplicar método CBBM.
- Análise estatística ou gráfica dos efeitos das 15 variáveis.
- Interpretar e concluir a partir da análise estatística.

3.1 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS.

3.1.1 Definição dos materiais.

Para a realização das simulações da junta, buscou-se materiais que já tivessem sido catalogados em outras publicações. Optou-se por utilizar os dados de trabalhos acadêmicos pelo fato de que é difícil encontrar dados de liberação de energia G_{Ic} e G_{IIc} em *datasheets* oficiais dos fabricantes. Os materiais escolhidos foram, o adesivo Araldite 420 A/B, Figura 33 e o laminado de carbono TEXIPREG HS 160 RM, ambos estudados em (MOURA; DANIAUD; MAGALHÃES, 2006). As tabelas 2 e 3 apresentam os dados utilizados do adesivo e do laminado de material compósito.

Figura 33 – Araldite 420 A/B.



Fonte: Disponível em : <<https://www.silmid.com/adhesives/epoxy-adhesives/araldite-420a-b-adhesive-200ml/>>. Acesso em: 28 Jan 2022

Tabela 2 – Propriedades do laminado de carbono.

Carbon-epoxy (TEXIPREG HS 160 RM)					
E_{11} (GPa)	$E_{22}=E_{33}$ (GPa)	$\nu_{12}=\nu_{13}$	ν_{23}	$G_{12}=G_{13}$ (GPa)	G_{23} (GPa)
100.4	7.67	0.35	0.38	3.20	2.78

Tabela 3 – Propriedades do adesivo epóxi.

Adhesive (Araldite 420 A/B) (MOURA; DANIAUD; MAGALHÃES, 2006).						
E_{11} (GPa)	ν	σ_e (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)	G_{Ic} (N/mm)	G_{IIc} (N/mm)
1.85	0.3	27	35	3.4	0.3	0.6

3.1.2 Geometria do corpo de prova

As características geométricas do corpo de prova foram retiradas da norma ASTM D5528-01.

Segundo a norma , $L \geq 125mm$, $b = 25mm$, $a_0 \cong 50mm$, $3 \leq h \leq 5mm$. Com as dimensões do corpo de prova foi selecionada as 15 variáveis da simulação que estão expostas na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores limites dos parâmetros de simulação.

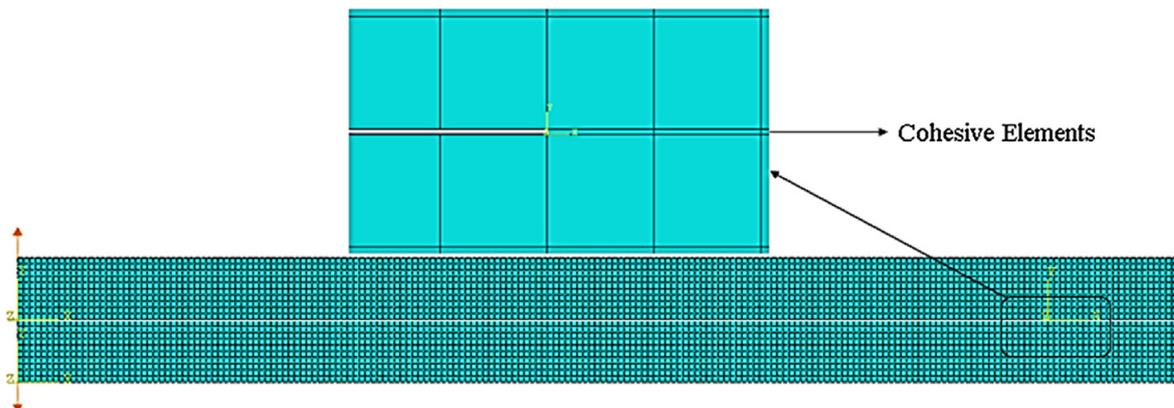
	Propriedade	Valor Min.	Valor Max.	Unidade
Corpo de prova	L	125	155	mm
	a_0	40	50	mm
	h	4	5	mm
	t	0.1	0.13	mm
Propriedades do laminado	E_{11}	90	110	GPa
	$E_{22} = E_{33}$	6.9	8.44	GPa
	$G_{12} = E_{13}$	2.9	3.5	GPa
	G_{23}	2.5	3.06	GPa
	ν_{12}	0.31	0.38	
	θ_1	29	31	°
	θ_2	58	62	°
Propriedades Epóxi	G_{Ic}	0.27	0.33	N/mm
	G_{IIc}	0.54	0.66	N/mm
	E_{epoxi}	1665	2035	N/mm ²

A largura do corpo de prova foi fixada em 25mm para todas as análises pois segundo a própria ASTM D5528-01 esse fator tem pouca influência no resultado do ensaio. Os fatores que representam a direção de fibras nas três laminas de carbono-epóxi apresentam uma variação de 3.33% do seu valor médio. Todos os outros fatores foram escolhidos de forma que configurassem uma variação de cerca de 10% de um valor original.

3.2 MODELO COMPUTACIONAL

Como citado anteriormente, foi desenvolvido um modelo no software Abaqus CAE, Figura 34, para realizar da simulação do avanço da trinca em um corpo de prova submetido ao ensaio DCB. O método CZM, já explicitado anteriormente, foi utilizado para a realização das análises.

Figura 34 – Exemplo de modelo computacional utilizado.



Fonte: Adaptado de: (HEIDARI-RARANI; SAYEDAIN, 2019)

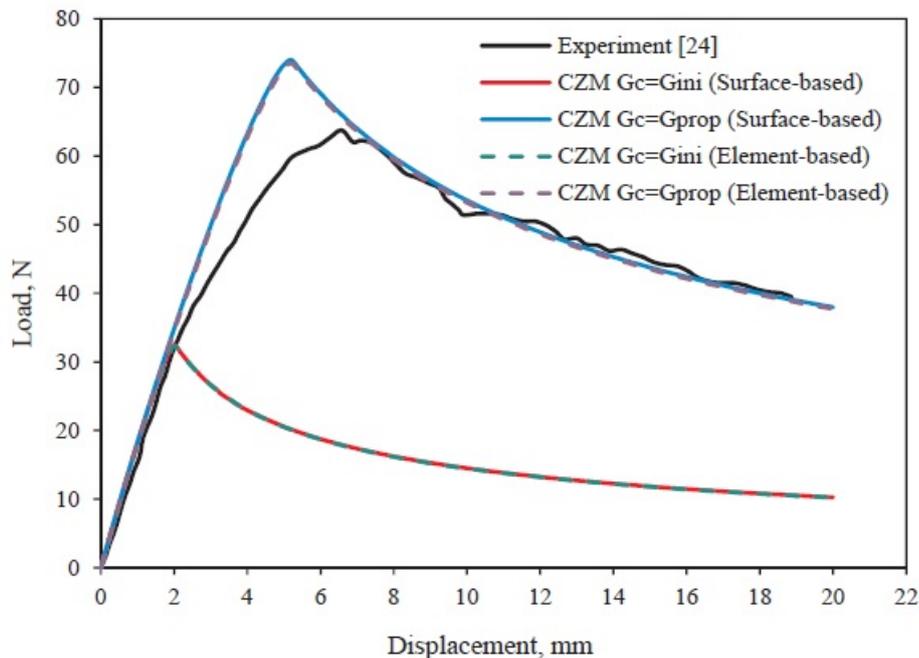
3.2.1 Modelo 3D

3.2.1.1 Modelo de propagação da delaminação.

Existem duas maneiras de modelar a propagação de uma delaminação através do CZM: O método baseado em uma superfície coesiva e o método baseado em elementos coesivos. No método de superfícies coesivas, uma separação por tração com propriedades coesivas é definida entre os dois braços superiores e inferiores do DCB. Enquanto no método de elementos coesivos, uma fina camada de elementos coesivos com comportamento definido por separação por tração é modelado entre dois braços como mostrado na Figura 34.

A diferença de resultados entre um modelo com superfícies coesiva e um com elemento coesivo são quase nulos, Figura 35, as diferenças aparecem apenas no tempo de simulação e alguns problemas de convergência que podem surgir. Por conta da diferença entre os métodos ser desprezível e como é necessário variar a espessura do adesivo o método do elemento coesivo foi utilizado (HEIDARI-RARANI; SAYEDAIN, 2019).

Figura 35 – Comparação entre modelos com superfícies e elementos coesivos.

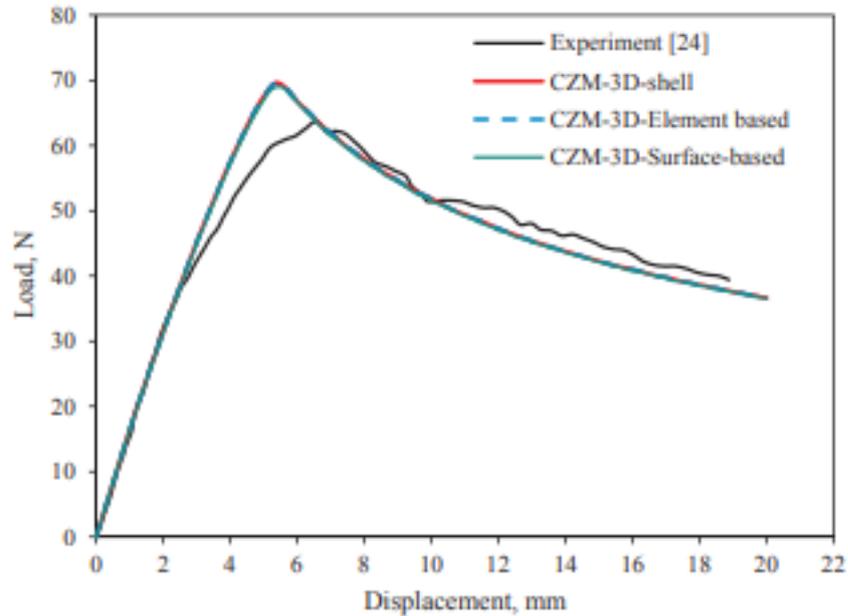


Fonte: Adaptado de: (HEIDARI-RARANI; SAYEDAIN, 2019)

3.2.1.2 Tipos de elementos.

Outra decisão para o modelo 3D é qual tipo de elemento utilizar, tipo sólido ou tipo casca/shell, (HEIDARI-RARANI; SAYEDAIN, 2019) mostra que ambos os tipos se aplicados da forma correta, vão proceder para o mesmo resultado. Logo o modelo utilizado para os corpos foi o tipo sólido por motivo de simplicidade e por apresentar menos problemas de convergência. A Figura 36 mostra a diferença de resultados entre um modelo do tipo sólido e um do tipo casca/shell.

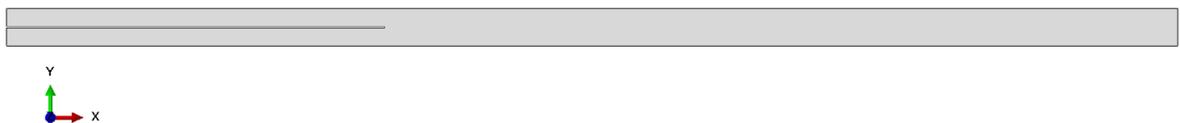
Figura 36 – Comparação entre modelos sólidos e tipo shell.



Fonte: Adaptado de: (HEIDARI-RARANI; SAYEDAIN, 2019)

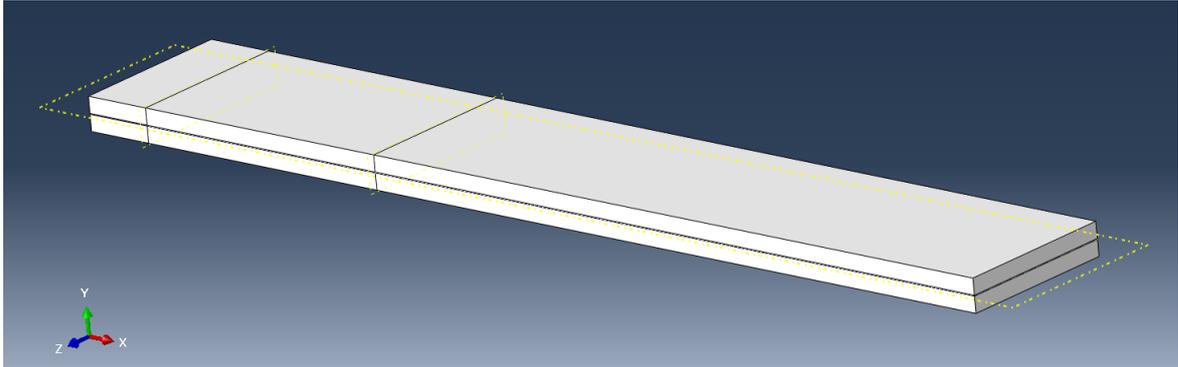
Para que o modelo seja condizente com o ensaio DCB, o caminho de separação usando o CZM deve estar inteiramente na zona coesiva. O modelo de separação por tração linear, foi definido por uma superfície de nós em uma malha sem interação entre as superfícies. Isso consiste em desenhar o corpo de prova montado por completo em uma única geometria, sem a montagem entre os elementos diferentes, Figura 37. Em seguida, as três partes do corpo de prova são separadas através de planos e seções 38. Durante o carregamento, a falha do adesivo e consequentemente a separação das placas ocorre quando as condições de falha são satisfeitas (HEIDARI-RARANI; SAYEDAIN, 2019).

Figura 37 – Modelo de geometria única.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 38 – Planos de separação de seções.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

3.2.1.3 Convergência de malha.

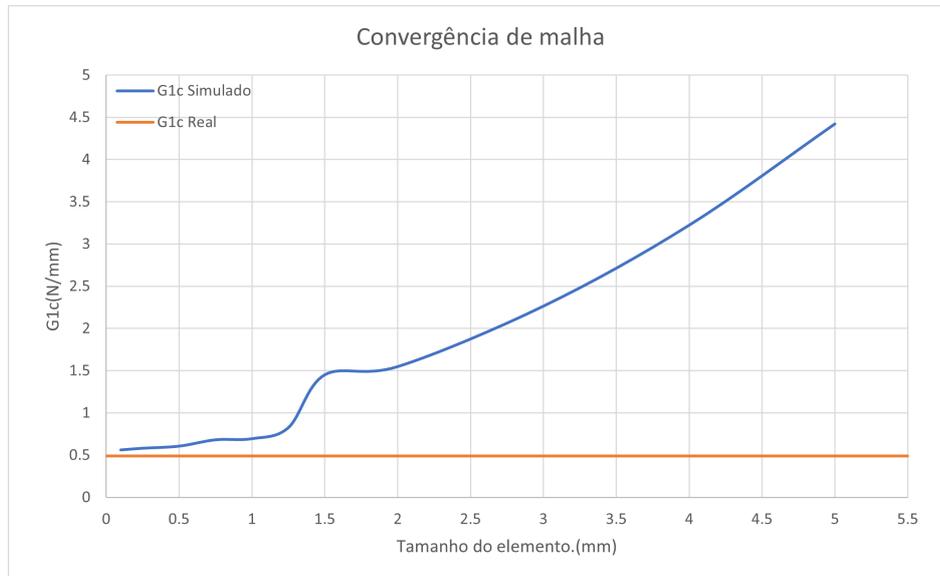
A quantidade de elementos, especialmente na zona coesiva é muito importante. Se a quantidade de elementos aumenta, isso pode ocasionar em pouca precisão da análise ou ainda em erros de convergência, e se refinar demais, o tempo computacional aumentará significativamente.

Para obter o valor ideal para a simulação foi desenvolvido uma convergência de malha para um corpo de prova que ainda não tinha as propriedades finais apresentadas anteriormente.

Foi analisado o tamanho de elementos variando entre 0.1mm e 5mm para uma simulação com condições iguais.

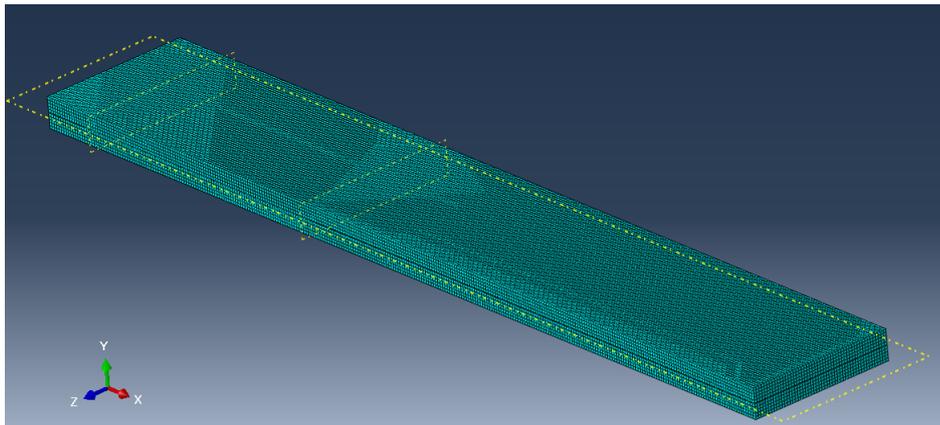
A Figura 39 mostra que para elementos menores que 1mm existe uma boa aproximação entre o valor de G_{Ic} simulado para o real. Foi escolhido um valor de 0.5mm, Figura 40 para as simulação pois esse valor já apresenta pouca variação em relação as malhas mais refinadas e também porque a partir desse valor, ao diminuir o tamanho do elemento o tempo de simulação aumenta exponencialmente.

Figura 39 – Convergência de malha.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 40 – Malha final (0.5mm).



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

3.2.1.4 Critérios de separação.

Para leis de separação por tração, critérios baseados em tensão e deformação para o início do dano e critérios baseados em energia, para a evolução de danos estão disponível no ABAQUS. O critério de iniciação de dano quadrático de tensão nominal (QUADS) foi utilizado. Nesse critério o dano é iniciado quando $f=1$, definido por (MOURA; CAMPILHO; GONÇALVES, 2008; BENAMAR et al., 2019):

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}}\right)^2 + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}}\right)^2 + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIc}}\right)^2 = 1, \quad (20)$$

Já para o critério de evolução de dano, a lei da potencia foi utilizada. Este critério é um dos mais populares e é estabelecido em termos de uma interação entre as taxas de liberação de

energia de deformação da seguinte forma (REEDER, 1992):

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}}\right)^\beta + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIc}}\right)^\chi \geq 1, \quad (21)$$

onde α , β , χ , G_{Ic} , G_{IIc} e G_{IIIc} são seis parâmetros de ajuste que descrevem as superfícies críticas de fratura.

3.3 MODELO PLACKETT-BURMAN

Utilizando a teoria de Plackett-Burman apresentada na seção 2.6, foi realizado uma análise das 15 variáveis apresentadas na seção 3.1.2. Uma matriz de quinze colunas com dezesseis linhas formada pela variação entre os limites superiores (+) e limites inferiores (-), foi traçada de tal forma a respeitar os critérios de Plackett-Burman, Tabela 5.

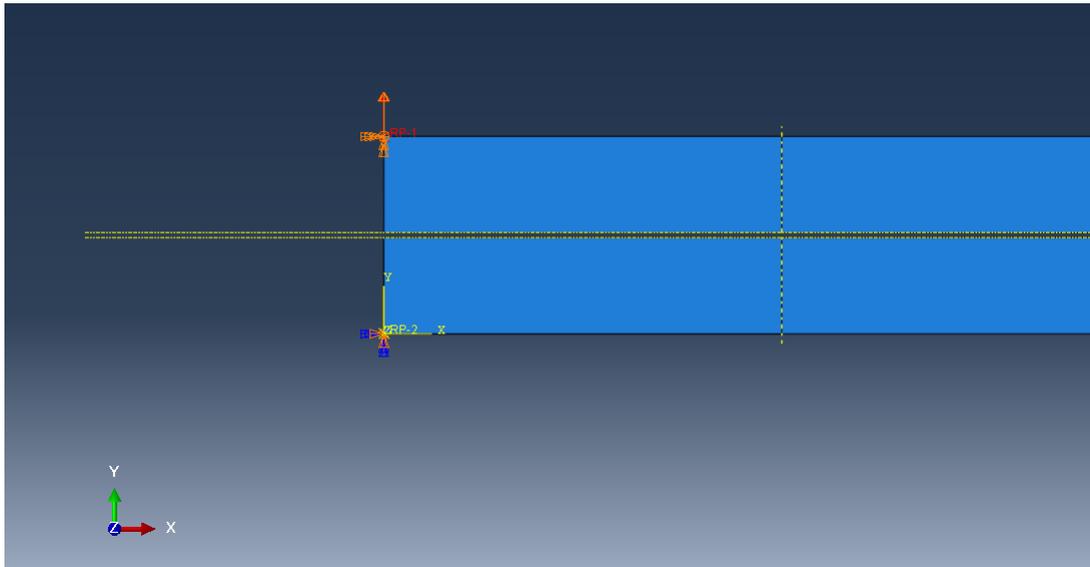
Tabela 5 – Matriz Plackett-Burman para 15 parâmetros.

	L	a_0	h	t	E_{11}	E_{22}	G_{12}	G_{23}	ν_{12}	θ_1	θ_2	θ_3	G_{Ic}	G_{IIc}	E_{epoxi}
Rodada 1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Rodada 2	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
Rodada 3	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+
Rodada 4	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+
Rodada 5	+	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-
Rodada 6	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-
Rodada 7	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-
Rodada 8	+	-	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-
Rodada 9	-	+	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-
Rodada 10	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-
Rodada 11	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-
Rodada 12	-	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-
Rodada 13	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+
Rodada 14	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+
Rodada 15	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+
Rodada 16	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+	+	-	+

3.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO.

Todos os corpos de prova apresentavam duas regiões onde as condições de contorno foram aplicadas, Figura 41, na região RP2 o corpo de prova se encontra restringido em todos os graus de liberdade menos na rotação em torno do eixo Z, enquanto que na região RP1 somente o deslocamento em y e a flexão em Z não estão restringidos.

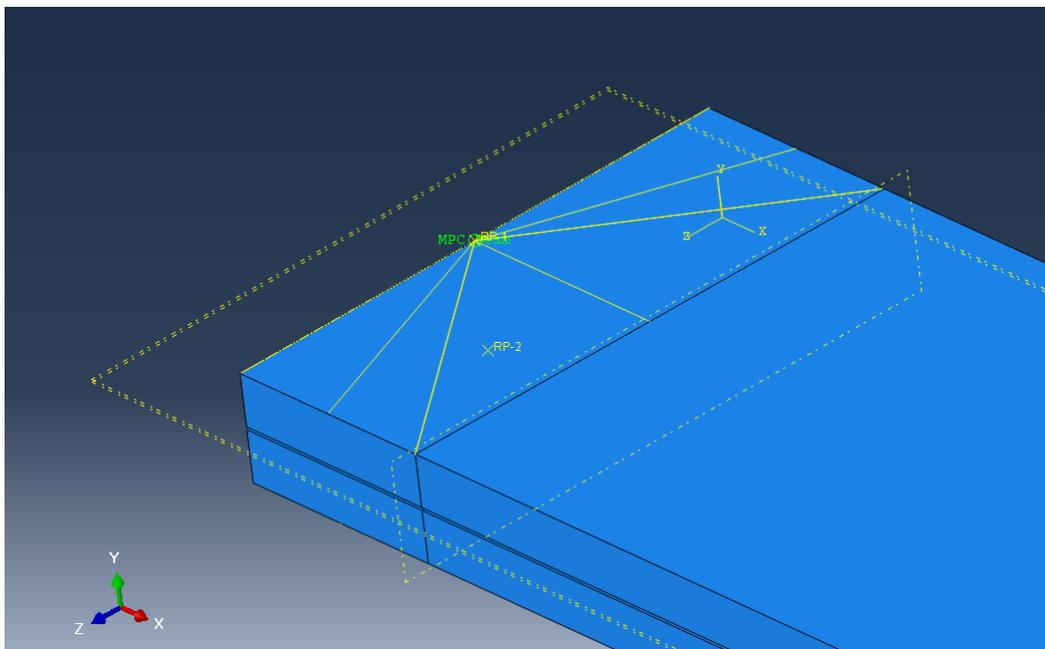
Figura 41 – Condições de contorno.



Fonte

Foi aplicada uma interação MPC-Beam entre os RPs e a região em que eles se encontram, Figura 42, isso foi feito para garantir que a simulação não trate a região das condições de contorno como engastes.

Figura 42 – Interação MPC.



Fonte

As simulações ocorreram com o deslocamento da região de RP1 até a falha total do adesivo pelo comprimento do corpo de prova.

4 RESULTADOS

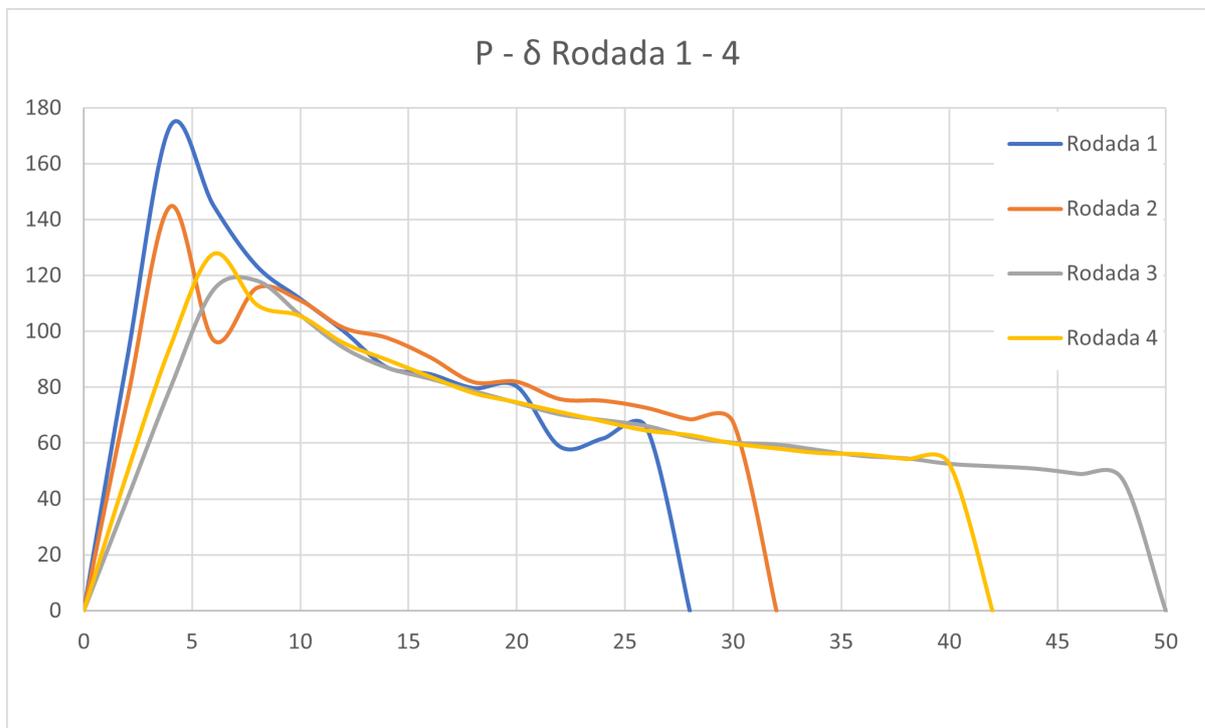
4.1 OBTENÇÃO DOS RESULTADOS E TRATAMENTO DOS DADOS.

4.1.1 Curvas P- δ

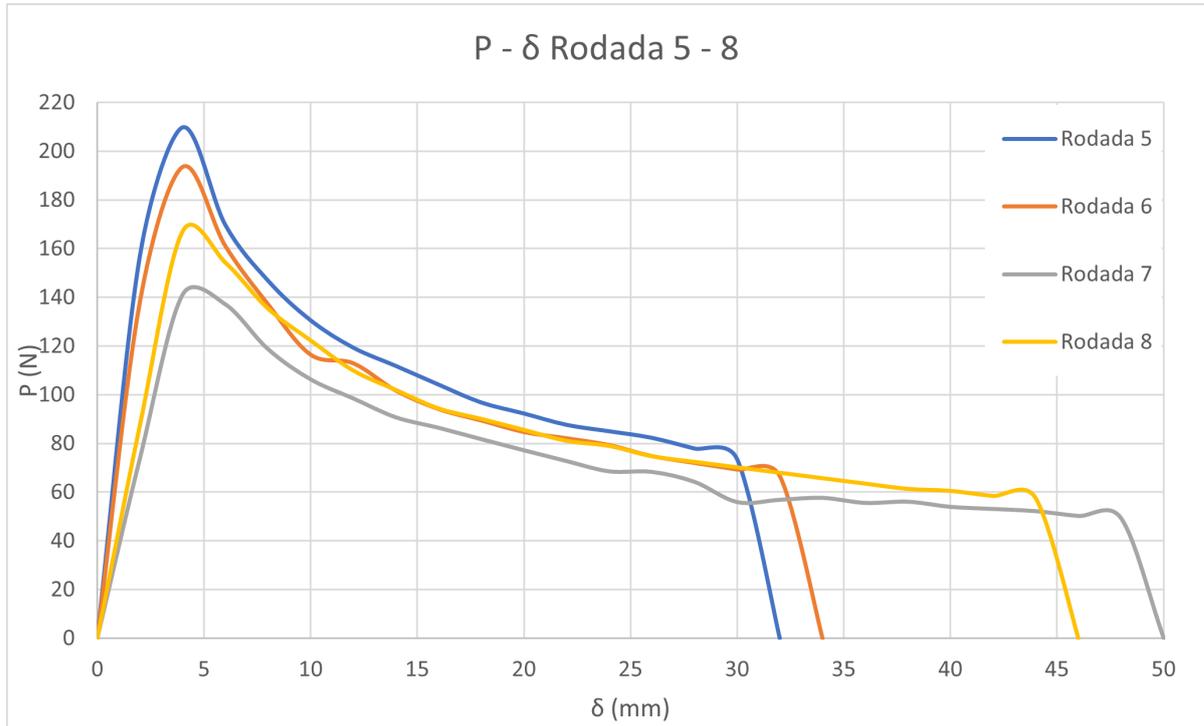
Utilizando a Tabela 5, os valores da Tabela 4, e toda a teoria apresentada na seção 3, foi desenvolvido 16 simulações de corpos de prova diferentes, no software Abaqus CAE.

As Figuras 43 - 46 mostram as curvas P- δ de cada uma das 16 rodadas da simulação.

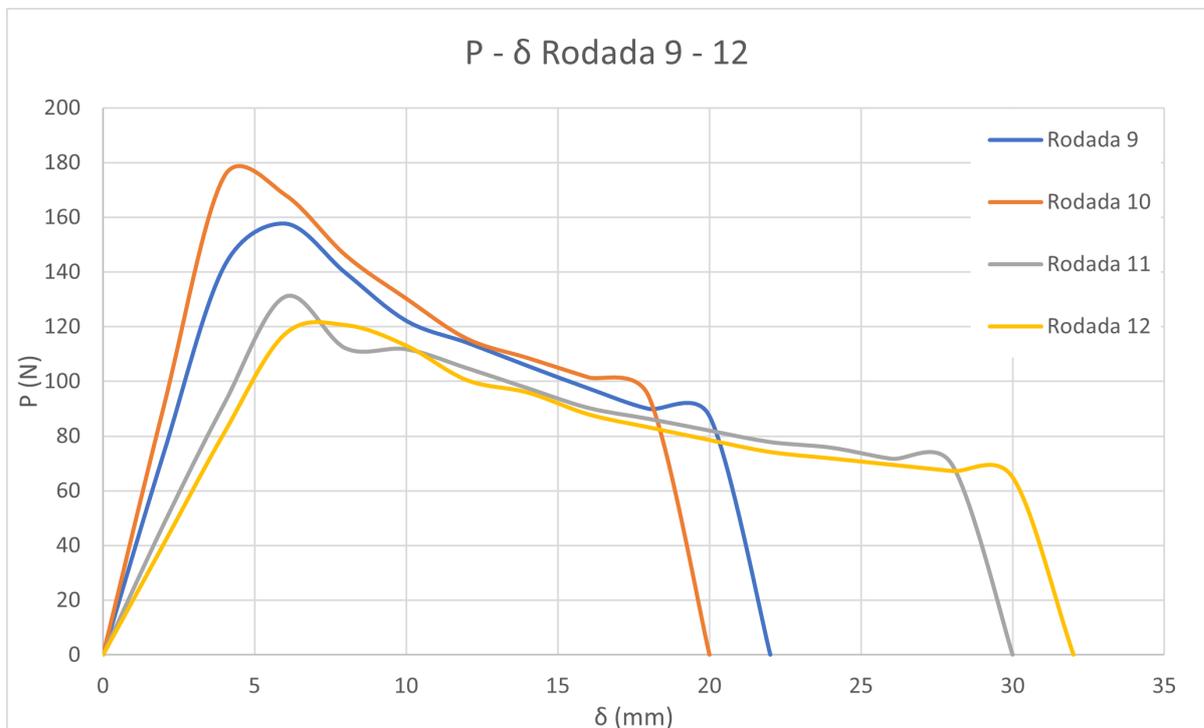
Figura 43 – Curva P- δ Rodadas 1-4



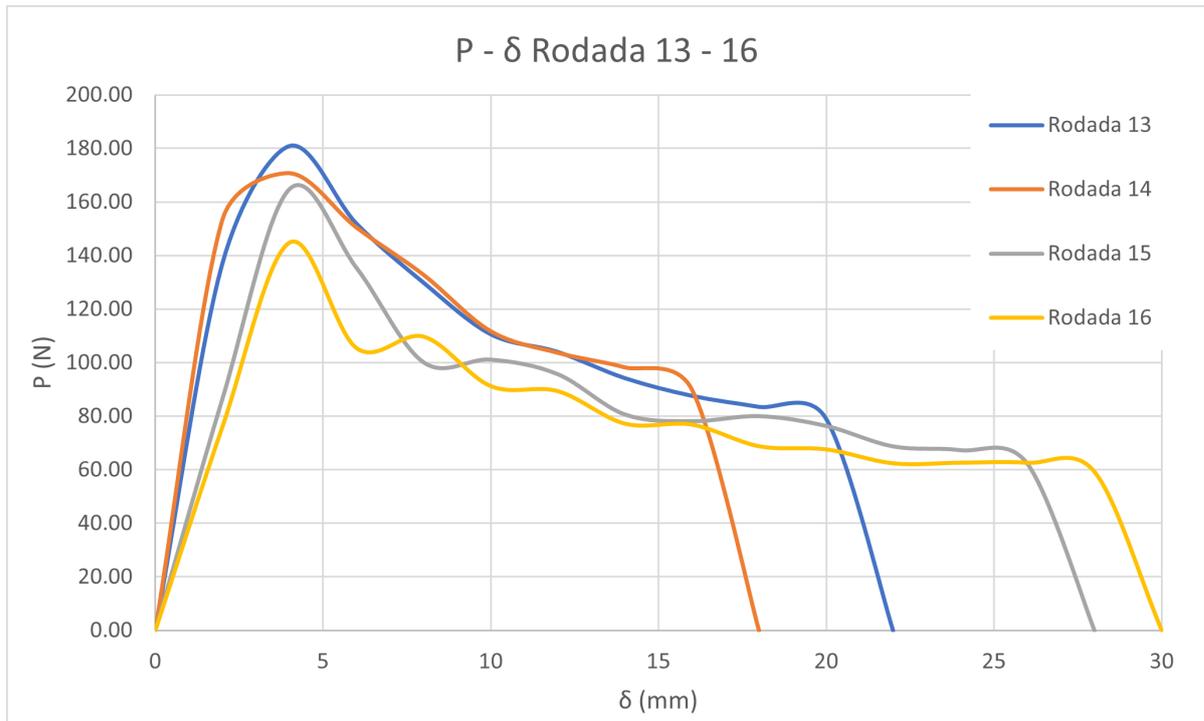
Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 44 – Curva P- δ Rodadas 5-8

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 45 – Curva P- δ Rodadas 9-12

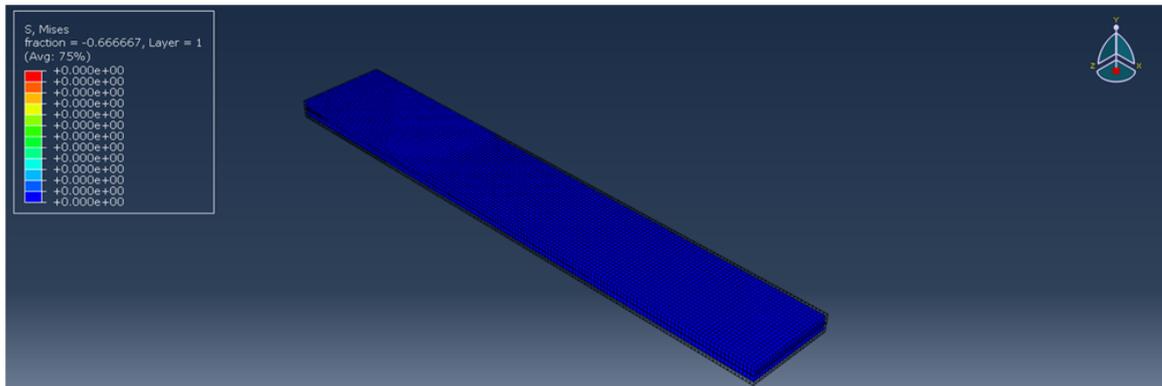
Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 46 – Curva P- δ Rodadas 13-16

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A Figura 47 representa o início da simulação, antes da aplicação do deslocamento.

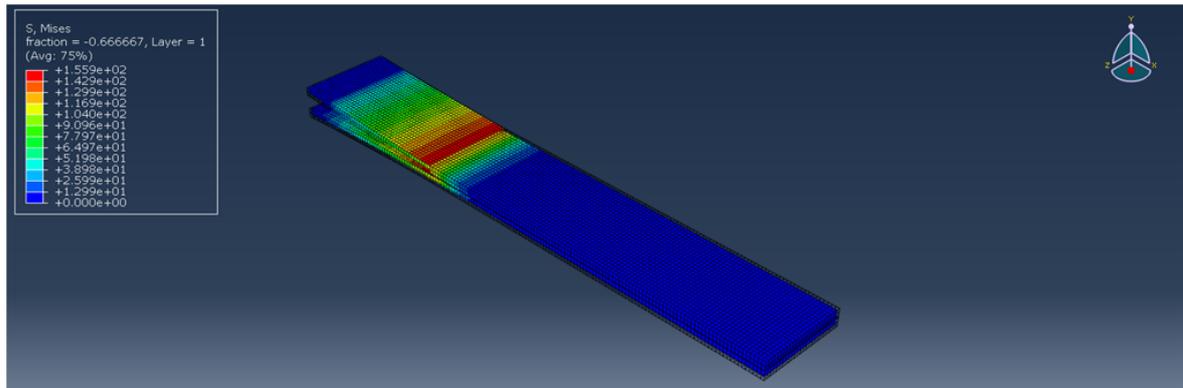
Figura 47 – Início da simulação.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A Figura 48 representa a simulação na eminência da abertura da trinca no adesivo, nota-se que nessa fase os esforços no corpo de prova atingem o valor máximo.

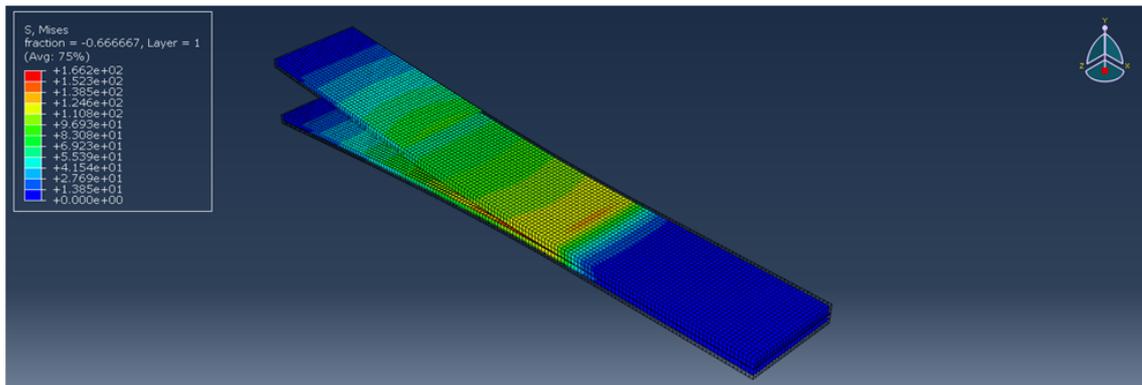
Figura 48 – Simulação na eminência da abertura da trinca.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A Figura 49 representa o corpo de prova logo antes da propagação da trinca causar a falha total.

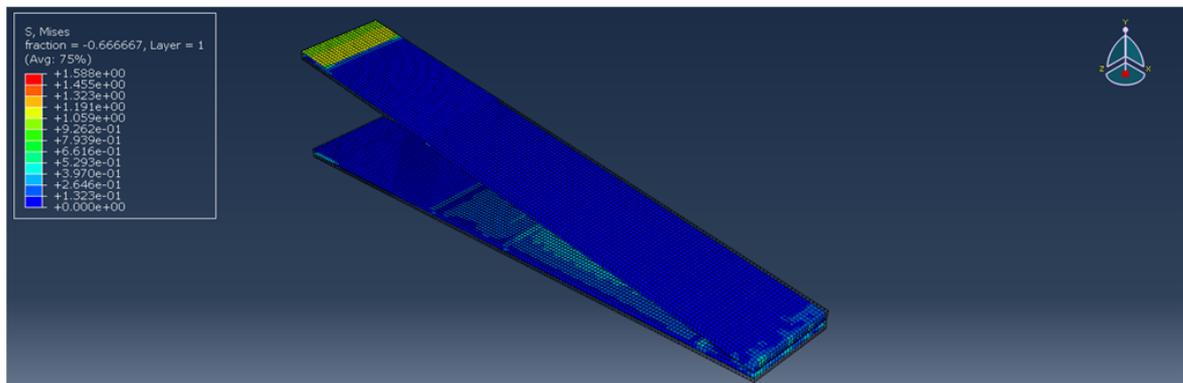
Figura 49 – Simulação na eminência da falha total.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A Figura 50 representa o fim da simulação, quando o corpo de prova já teve a trinca propagada por toda a sua extensão.

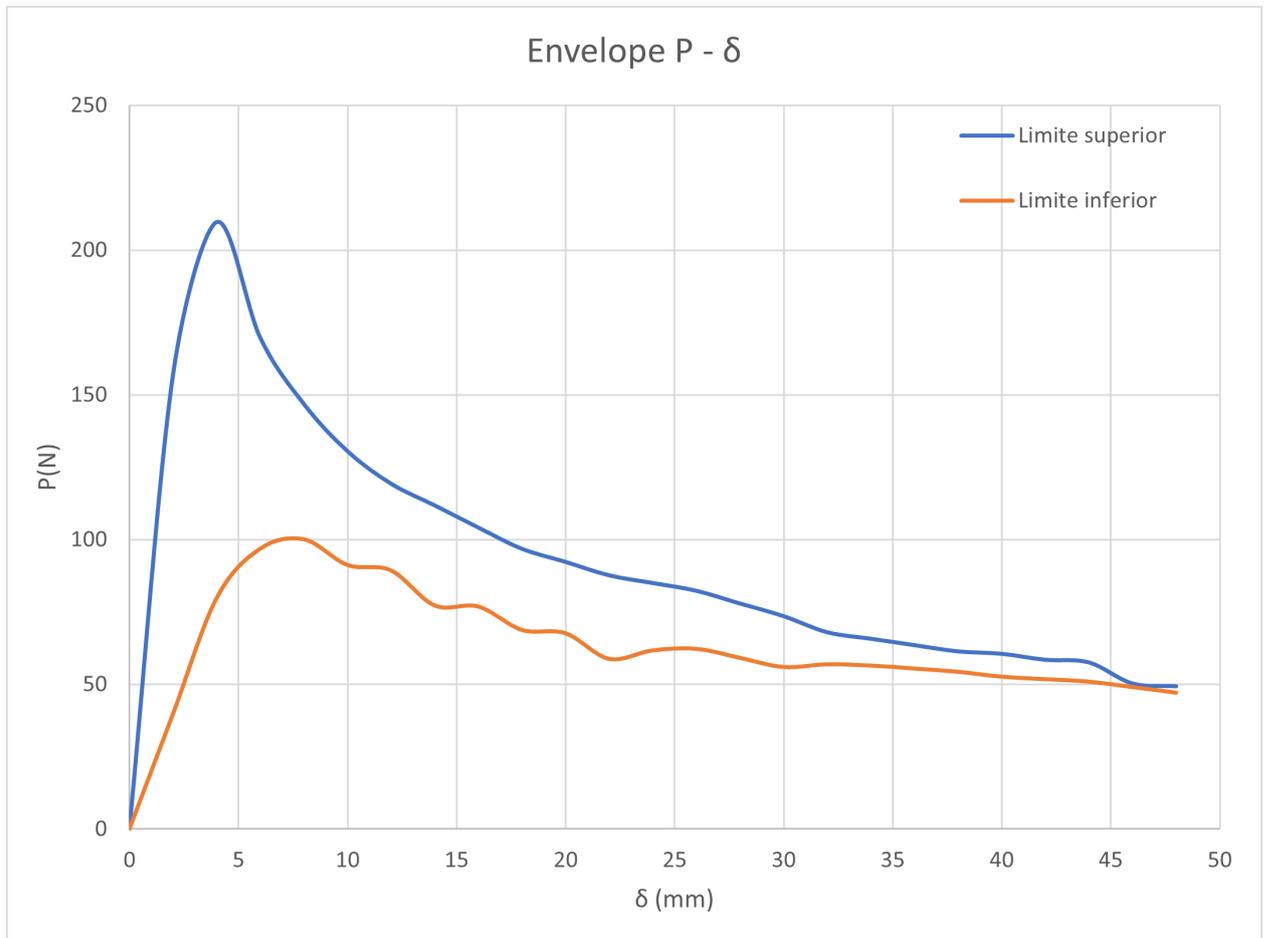
Figura 50 – Simulação após a falha total.



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Com os dados das 16 rodadas da simulação foi possível traçar o envelope das curvas P- δ , conforme apresentado na Figura 51. O envelope representa a região na qual se encontra todas as simulações realizadas.

Figura 51 – Envelope das 16 curvas P- δ



Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

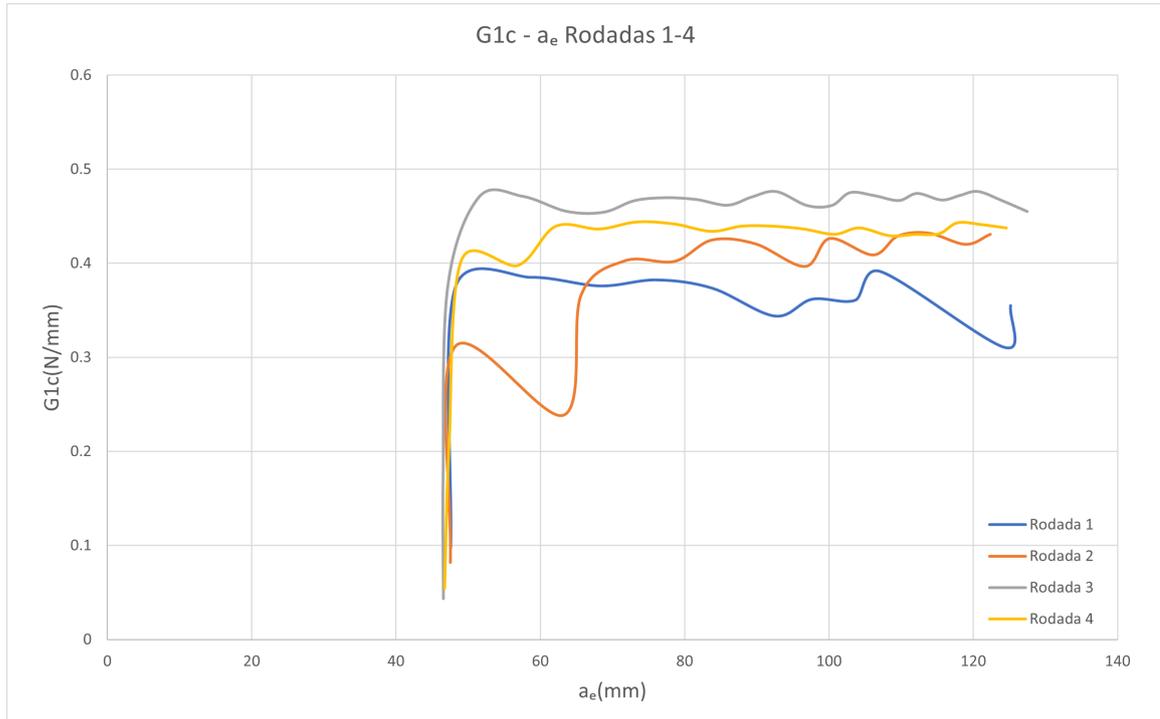
4.1.2 Método CBBM

Com as curvas P - δ foi aplicado as análise do método CBBM, seção 2.4.4.4, para encontrar o G_{Ic} . O primeiro passo foi encontrar o fator que contabiliza os efeitos de rotação e flexão na extremidade da trinca Δ . Através das equações (8) e (9) esse fator pode ser encontrado sem que seja necessário o teste de vários corpos de prova.

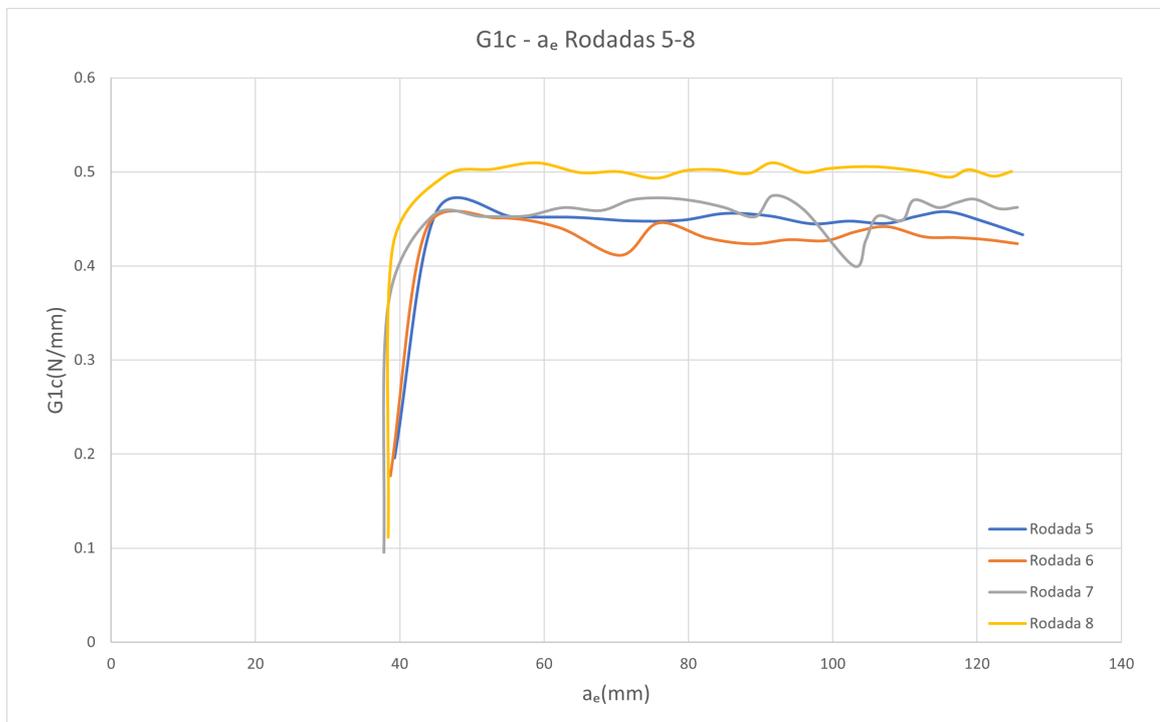
Para encontrar o a_e é necessário substituir a na equação (12) e resolver a equação cúbica para cada iteração da abertura δ .

Em seguida, é calculado o módulo de correção flexural E_f através da equação (13).

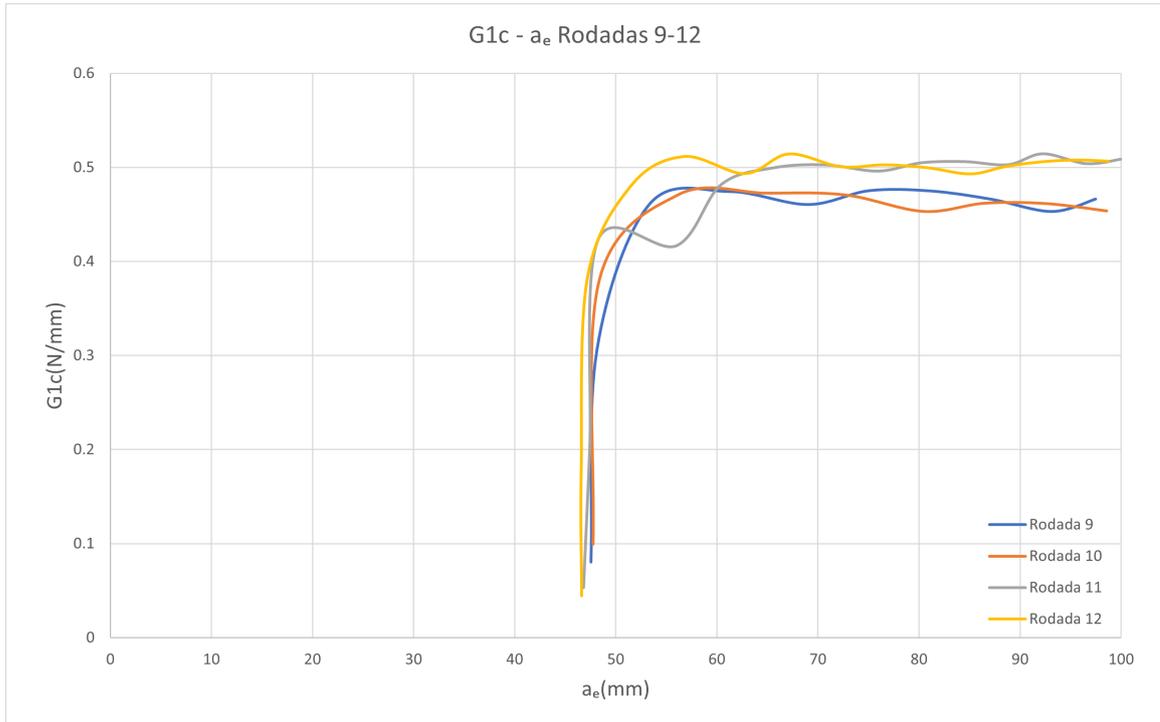
Com o valor de E_f e a_e a curva G_{Ic} por a_e é calculada através de (14). As Figuras 52 - 55 apresentam essas curvas.

Figura 52 – Curva $G_{Ic} - a_e$ Rodadas 1 - 4

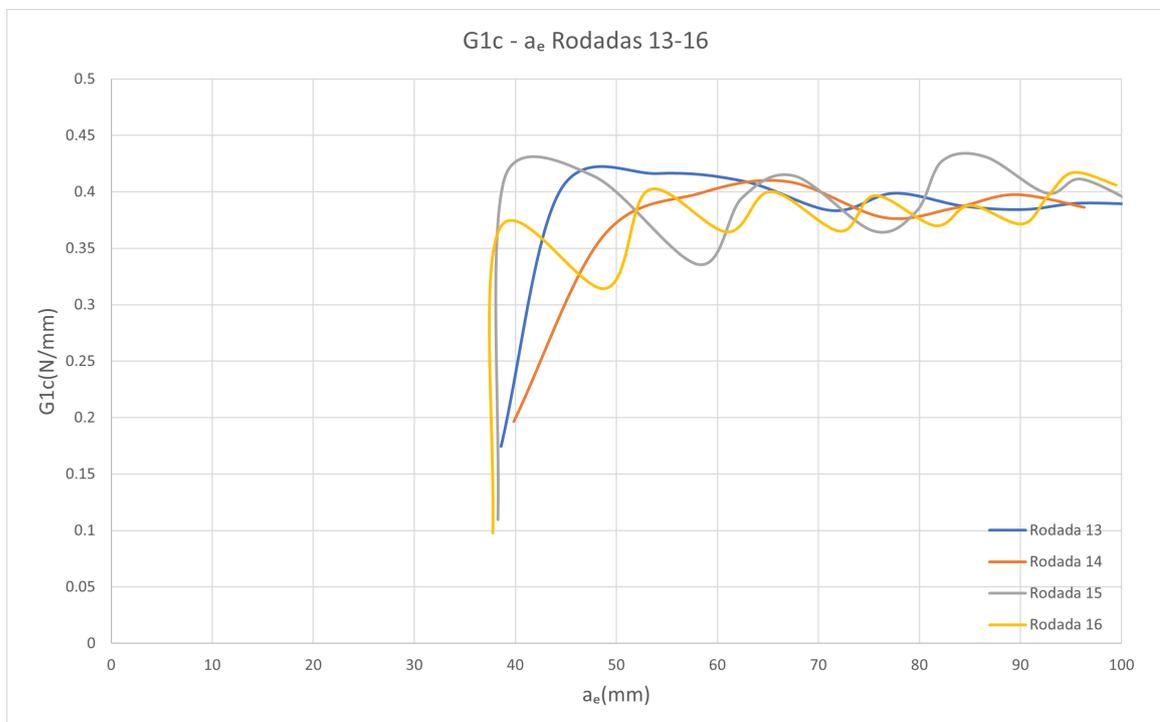
Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 53 – Curva $G_{Ic} - a_e$ Rodadas 5 - 8

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 54 – Curva $G_{Ic} - a_e$ Rodadas 9 - 12

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

Figura 55 – Curva $G_{Ic} - a_e$ Rodadas 13 - 16

Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

A tabela 6 apresenta a média do valor de G_{Ic} na região de estabilização para cada uma das 16 rodadas da simulação.

Tabela 6 – Valores de G_{Ic}

Rodada	G_{Ic} (N/mm)	Rodada	G_{Ic} (N/mm)
1	0.3573	9	0.4663
2	0.3934	10	0.4529
3	0.4663	11	0.4989
4	0.4328	12	0.4922
5	0.4512	13	0.3994
6	0.4333	14	0.3880
7	0.4575	15	0.3983
8	0.5017	16	0.3813

4.1.3 Análise de influência.

Com os valores de G_{Ic} resultantes foi possível calcular as médias dos valores (+) e (-) para cada uma das 15 variáveis. Assim, resulta-se em um índice de influência único para cada parâmetro, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 – Fatores de influência G_{Ic} .

Propriedade	Índice de influência	Propriedade	Índice de influência
L	0.0021	ν_{12}	0.0097
a_0	0.0187	θ_1	0.0019
h	0.0359	θ_2	0.0040
h_a	0.0024	θ_3	0.0199
E_{11}	0.0011	G_{Ic}	0.0192
$E_{22} = E_{33}$	0.0149	G_{IIc}	0.0008
$G_{12} = G_{13}$	0.0180	E_{epxi}	0.0672
G_{23}	0.0008		

4.1.3.1 Fatores geométricos.

Analisando os fatores geométricos, nota-se que:

- O comprimento do corpo de prova L , não apresenta grande influência no resultado, isso se dá pelo fato desse fator não influenciar no início da trinca, e nem na FPZ citada por (MOURA; CAMPILHO; GONÇALVES, 2008).

- A espessura do adesivo h_a , também não apresentou grande influência no valor de G_{Ic} . Esse resultado pode ser um pouco desconexo com a realidade pois, a análise realizada pela CZM foca em deixar todo o caminho da trinca no adesivo, e por conta disso acaba tratando as relações entre o laminado e o adesivo, e efeitos da espessura do adesivo como fatores de ordens menores.

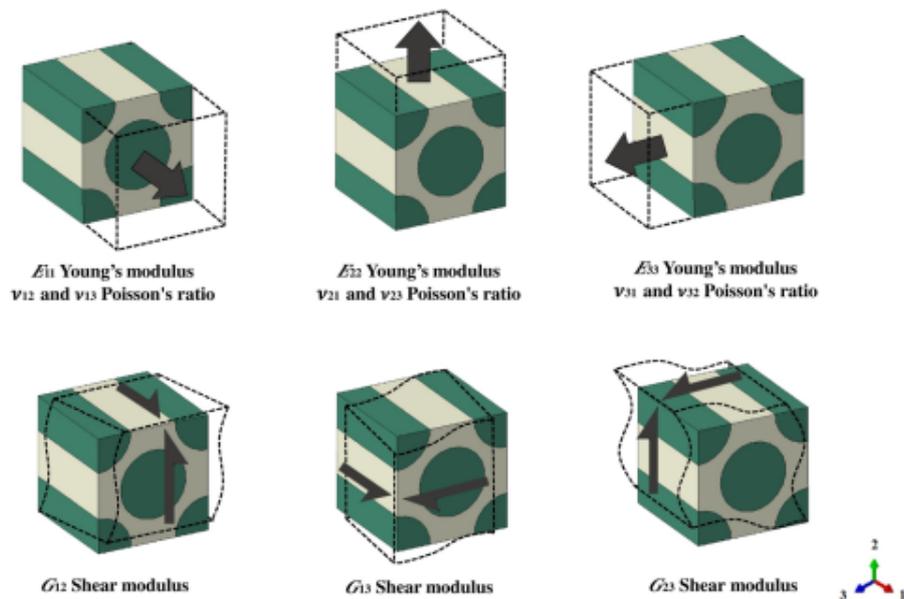
- A maior influência desses parâmetros vem da espessura total do corpo de prova h o que é condizente com a realidade pois ao alterar a espessura do corpo de prova, mais precisamente a espessura do laminado compósito, é alterado a quantidade de material que resiste a clivagem do ensaio.

- Enquanto ao tamanho da falha inicial a_0 , já era esperado que esse fator apresentasse uma grande influência, pois ao aumentar o a_0 aumentasse o comprimento do braço de alavanca, o que aumenta o momento no sentido da clivagem, o que fragiliza o sistema, facilitando a abertura da trinca e sua propagação.

4.1.3.2 Fatores do laminado.

Nas propriedades do laminado, G_{12} e E_{22} apresentam a maior influência com certa diferença para os demais fatores. Esse resultado é condizente com a realidade do ensaio DCB pois essas resistências em questão representam o sentido da tração e cisalhamento mais solicitados durante a clivagem do modelo na simulação, Figura 56.

Figura 56 – Estados de trações e cisalhamentos.



Fonte: Disponível em : <<https://d-nb.info/1163718068/34>>. Acesso em: 30 Jan 2022

4.1.3.3 Disposição das lâminas.

Para as disposições das lâminas, θ_1 , θ_2 e θ_3 , (HEIDARI-RARANI; SAYEDAIN, 2019) e mostram que o modelo CZM bilinear consegue prever o início e o crescimento da delaminação de forma precisa, porém não consegue levar em consideração outros fenômenos que ocorrem nas fibras e que influenciam nas curvas $P-\delta$. Um exemplo disso é o fenômeno *Fiber bridging* que ocorre quando as fibras de camadas adjacentes preenchem o plano de delaminação e atuam como supressores de trincas, devido a isso a resistência à delaminação e a tenacidade à fratura interlaminar aumentam.

Por essa deficiência do modelo em calcular a influência da disposição das fibras no G_{Ic} , pouco pode ser concluído sobre qual angulação tem a maior influência. Entretanto mais duas

simulações de 16 rodadas foram feitas alterando a disposição das fibras, Tabela 8, o que se pode notar é que quanto mais próximo à delaminação maior será a influência da lâmina no resultado de G_{Ic} , o que já era esperado.

Tabela 8 – Fatores de influência de θ para diferentes configurações.

Configuração das lâminas	Influência de θ_1	Influência de θ_2	Influência de θ_3
(30/60/90)	0.0019	0.0040	0.0199
(90/60/30)	0.0022	0.0041	0.0184
(90/30/60)	0.0021	0.0048	0.0196

Vale ressaltar que θ_1 é a lâmina mais externa, enquanto θ_3 é a lâmina que tem a interface com o adesivo.

4.1.3.4 Fatores do adesivo.

Os índices do adesivo são condizentes com a realidade pois eles mostram que o G_{Ic} e o E_{epxi} são muito influentes no ensaio DCB, enquanto que G_{IIc} possui uma influência algumas ordens de grandeza menor. Esse resultado já era esperado pois o ensaio DCB visa justamente isolar o modo I do laminado para a determinação do G_{Ic} .

5 CONCLUSÃO

Com a análise dos resultados feitos anteriormente, pode-se concluir que mesmo com o modelo computacional apresentando limitações, ainda é bem evidente que a análise de sensibilidade das variáveis em um ensaio DCB utilizando o método de Plackett-Burman foi condizente com a realidade esperada. Observa-se que E_{22}, G_{12} do laminado e G_{Ic}, E_{epoxi} do adesivo são as propriedades intrínsecas dos materiais que mais tem influencia sobre o comportamento da curva $P-\delta$ e consequentemente na energia de liberação do modo I da junta. Pode se observar também o aumento da influencia das laminas no G_{Ic} conforme estas estão mais próximas à interface do adesivo.

Outra conclusão que pode ser tirada é que o método CZM bilinear pode prever o início e crescimento da delaminação. Porém, o fato desse método precisar de apenas dois parâmetros, a taxa de liberação de energia crítica e a tensão máxima de interface, faz com que fenômenos que possuem origem no laminado compósito como o *Fiber bridging*, citado anteriormente, não possam ser modelados e calculados de forma correta. (HEIDARI-RARANI; SAYEDAIN, 2019) Indica que para levar esses fenômenos em consideração para uma análise computacional mais precisa, seria necessário adotar um sistema CZM trilinear ou multilinear, ou ainda utilizar da combinação do CZM com o método XFEM. Tal análise tem um teor de complexabilidade muito mais elevado e acabaria desviando do escopo desse trabalho que é identificar as variáveis mais influentes no sistema DCB

5.1 MELHORIAS E TRABALHOS FUTUROS.

As possíveis melhorias do modelo atual que podem aumentar sua acuracidade são:

- Desenvolver um modelo funcional que tenha as três partes do ensaio DCB como corpos independentes e que tenham as propriedades das interfaces bem definidas.

- Adotar teorias mais complexas que possam levar em consideração o dano e outro efeitos adversos do laminado compósito, como modelos CZM trilineares ou multilineares ou combinações entre o CZM e XFEM.

Com base nesse trabalho o ensaio de determinação do G_{IIc} o *Single Lap Joint*, também pode ser realizado para se obter as variáveis mais influentes sobre esse parâmetro.

REFERÊNCIAS

- ABAQUS. **ABAQUS/Standard Version 6.14 User's Manual: Volumes I–III**. Providence, RI, USA,: Dassault Systèmes Simulia Corporation Providence, RI, 2014. Citado na página 41.
- ADAMS, Robert D et al. **Structural adhesive joints in engineering**. London: Elsevier Applied Science, 1984. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 30.
- BENAMAR, Badr et al. **Using a cohesive zone modeling to predict the compressive and tensile behavior on the failure load of single lap bonded joint**. 2019. 112–125 p. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 52.
- BENBOW, JJ; ROESLER, FC. **Experiments on Controlled Fractures Proceedings of the Physical Society**. [S.l.]: IOP Publishing, 1957. 201-211 p. Citado na página 35.
- BERRY, Nara G; D'ALMEIDA, José Roberto M. **Efeito da presença de defeitos no comportamento mecânico de juntas coladas carbono-epoxi**. [S.l.]: SciELO Brasil, 2000. 138–148 p. Citado na página 31.
- CARBAS, Ricardo João Camilo et al. **Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10216/59819>>. Citado na página 32.
- CHAVES, Filipe JP et al. **Fracture Mechanics Tests in Adhesively Bonded Joints: A Literature Review**. Taylor & Francis, 2014. 955-992 p. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00218464.2013.859075>>. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 38.
- FANECO, Tiago Manuel dos Santos. **Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.22/7908>>. Citado 12 vezes nas páginas 20, 21, 24, 25, 27, 30, 32, 33, 34, 35, 36 e 38.
- GILMAN, John J. **Cleavage, Ductility and Tenacity in Crystals**. Massachusetts Inst. of Technology, New York: Wiley, New York, 1959. Citado na página 35.
- HEIDARI-RARANI, Mohammad; SAYEDAIN, Mousa. **Finite element modeling strategies for 2D and 3D delamination propagation in composite DCB specimens using VCCT, CZM and XFEM approaches**. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan: Elsevier, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167844219300394>>. Citado 7 vezes nas páginas 40, 41, 48, 49, 50, 63 e 65.
- JÚNIOR, José Humberto Santos Almeida. **Dano e falha em compósitos estruturais de carbono/epóxi processados por filament winding**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2016. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/149826/001007389.pdf?sequence=1>>. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- KANNINEN, Melvin F; MCEVILY, AJ; POPELAR, Carl H. **Advanced Fracture Mechanics**. [S.l.]: The American Society of Mechanical Engineers (ASME), 1986. Citado na página 37.
- KINLOCH, Anthony J. **Adhesion and Adhesives: Science and technology**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1987. Citado na página 20.

MORAIS, João Francisco Alves. **Desenvolvimento de ferramentas e provetes para o ensaio Thick Adherend Shear Test (TAST)**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto., Porto, 2013. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.22/4698>>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 34.

MOURA, MFSF De; CAMPILHO, RDSG; GONÇALVES, JPM. **Crack Equivalent Concept Applied to the Fracture Characterization of Bonded Joints under Pure Mode I Loading**. Elsevier: [s.n.], 2008. 2224-2230 p. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266353808001267>>. Citado 7 vezes nas páginas 35, 37, 38, 39, 40, 52 e 62.

MOURA, MFSF De; DANIAUD, R; MAGALHÃES, AG. **Simulation of mechanical behaviour of composite bonded joints containing strip defects**. Elsevier, 2006. 464-473 p. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/222797620_Simulation_of_mechanical_behaviour_of_composite_bonded_joints_containing_strip_defects>. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

PETRIE, Edward M. **Handbook of Adhesives and Sealants**. USA,: McGraw-Hill, 2000. Citado na página 21.

PINTO, Arnaldo Manuel Guedes et al. **Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos**. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2007. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10216/58792>>. Citado 6 vezes nas páginas 21, 22, 25, 26, 29 e 30.

PLACKETT, Robin L; BURMAN, J Peter. **The design of optimum multifactorial experiments**. JSTOR, 1946. 305-325 p. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/2332195>>. Citado na página 44.

QUINI, Josué Garcia. **Adesivos estruturais uretânicos aplicados a combinações de compósitos, plásticos e metais**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-16092011-130634/pt-br.php>>. Citado na página 21.

REEDER, JR. **An evaluation of mixed-mode delamination failure criteria**. 1992. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19920009705/downloads/19920009705.pdf>>. Citado na página 53.

SILVA, Lucas Filipe Martins da; MAGALHAES, Antonio Goncalves de; MOURA, Marcelo Francisco SF de. **Juntas adesivas estruturais**. Porto: Publindústria Portugal, 2010. Citado 5 vezes nas páginas 20, 21, 23, 26 e 33.

SILVA, Lucas Filipe Martins da et al. **Handbook of Adhesion Technology**,. 1. ed. Verlag Berlin: Springer, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 28, 30 e 33.

VANAJA, K; RANI, RH Shobha. **Design of Experiments: Concept and Applications of Plackett Burman Design**. Taylor & Francis, 2007. 1-23 p. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/232038996_Design_of_Experiments_Concept_and_Applications_of_Plackett_Burman_Design>. Citado 3 vezes nas páginas 42, 43 e 44.

VARAJÃO, Joana Filipa Dias. **Impact of CFRP adhesive joints for the automotive industry**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2015. Disponível

em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/79488/2/35651.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2020. Citado 5 vezes nas páginas 15, 16, 17, 18 e 19.