

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

**CAIO GOUVEIA MADI**

**MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE JUNTAS DCB COLADAS EM MATERIAIS  
COMPÓSITOS CONSIDERANDO INCERTEZAS**

**JOINVILLE**

**2023**

**CAIO GOUVEIA MADI**

**MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE JUNTAS DCB COLADAS EM MATERIAIS  
COMPÓSITOS CONSIDERANDO INCERTEZAS**

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

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Medeiros

**JOINVILLE**

**2023**

**CAIO GOUVEIA MADI**

**MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DE JUNTAS DCB COLADAS EM MATERIAIS  
COMPÓSITOS CONSIDERANDO INCERTEZAS**

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

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Medeiros

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. Ricardo de Medeiros  
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membros:

Prof. Me. Rafael Beck  
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Me. Eng. Kelvin Masakazu Kuroki Iwasaki  
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Joinville, 08 de dezembro de 2023

Pelas grandes amizades feitas nesse período de faculdade, dedico esse trabalho aqueles que compartilharam esse momento comigo!

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço de coração a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, tornando este momento ainda mais especial e significativo.

Aos meus pais, agradeço por serem minha fonte inesgotável de apoio, amor e inspiração. Sem o suporte de vocês, esta jornada seria impossível. Sua confiança em mim foi a luz que me guiou nos momentos mais difíceis.

Ao meu querido irmão, agradeço não apenas pelo companheirismo, mas também pela admiração sincera. Saber que tenho alguém tão especial admirando meus esforços tornou essa jornada ainda mais significativa

Aos amigos de faculdade, verdadeiros companheiros nessa jornada, agradeço por compartilharem risos, desafios e conquistas. Cada experiência vivida ao lado de vocês enriqueceu minha trajetória acadêmica e pessoal, transformando-a em uma lembrança memorável.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação de Santa Catarina pelo suporte financeiro (FAPESC - 2017TR1747, 2019TR779, 2021TR843 e 2023TR563).

Aos meus professores orientadores Ricardo e Rafael, expressei minha gratidão pela orientação e comprometimento. Seus conhecimentos, paciência e apoio foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos outros professores, não só da faculdade, mas também da vida, que de alguma forma, fizeram parte dessa trajetória. Cada palavra de incentivo, cada gesto de apoio, cada forma de inspiração contribuiu para meu desenvolvimento.

“Nem tudo que reluz é ouro, nem todos os que  
vagueiam estão perdidos.” (J.R.R. Tolkien)

## RESUMO

Com o crescimento nas últimas décadas, da utilização de uniões adesivas de caráter estrutural pelas indústrias, principalmente o ramo aeroespacial, no qual muitas das aplicações estão relacionadas a materiais compósitos, o presente trabalho, buscou-se avaliar através de modelos tridimensionais de elementos finitos, as incertezas associadas a processo de fabricação de juntas coladas de materiais compósitos nas respostas de fraturamento em modo de abertura. Para tanto empregou-se a metodologia de projeto de experimentos de Plackett-Burman associadas a simulações computacionais no software Abaqus<sup>®</sup>. O modelo computacional adotou modelo de zona coesiva e a lei de amolecimento linear e as taxas de liberação de energia crítica foram calculadas pelo método CBBM. Ao final do estudo concluiu-se que parte das respostas de influência dos parâmetros de incertezas são consistentes, porém outras respostas teriam que ser mais bem avaliadas, por meio de correções no modelo computacional.

**Palavras-chave:** Junta coladas; Materiais compósitos; Projeto de experimentos; Elementos Finitos; Taxa de liberação de energia crítica.

## ABSTRACT

With the growth in recent decades of the use of structural adhesive joints by industries, mainly in the aerospace sector, in which many of the applications are related to composite materials, the present work sought to evaluate through three-dimensional finite element models, the uncertainties associated with the manufacturing process of bonded joints made of composite materials in the fracture responses in opening mode. To this end, the Plackett-Burman Design of Experiment methodology was used associated with computational simulations in the Abaqus<sup>®</sup> software. The computational model adopted the cohesive zone model and the linear softening law and the critical energy release rates were calculated by the CBBM method. At the end of the study, it was concluded that part of the influence responses of the uncertainty parameters are consistent, but other responses would have to be better evaluated, through corrections in the computational model.

**Keywords:** Bonded joints. Composite Materials. Design of Experiments. Finite Elements. Critical Strain Release Rate.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Utilização de adesivos em automóveis. . . . .	16
Figura 2 – Adesivos estruturais. . . . .	20
Figura 3 – Esquema da constituição básica de um compósito. . . . .	21
Figura 4 – Esquema da classificação dos materiais compósitos. . . . .	21
Figura 5 – Elementos estruturais de uma junta adesiva. . . . .	22
Figura 6 – a) Esforço de tração. b) Esforço de compressão. . . . .	23
Figura 7 – Esforço de corte. . . . .	23
Figura 8 – Esforço de clivagem. . . . .	24
Figura 9 – Esforço de arrancamento. . . . .	24
Figura 10 – Mecanismos de falha em juntas coladas: a) Falha Adesiva, b) Falha Coesiva, c) Falha do Aderente, d) Falha Mista. . . . .	25
Figura 11 – Juntas de topo e algumas de suas configurações. . . . .	26
Figura 12 – Juntas de sobreposição e suas configurações. . . . .	26
Figura 13 – Juntas de tira e suas configurações. . . . .	27
Figura 14 – Junta tubular. . . . .	27
Figura 15 – Coeficientes de dilatação de diversos materiais . . . . .	28
Figura 16 – Modos fratura dos materiais. . . . .	29
Figura 17 – Corpo de prova de tração conforme ISO 527-2. . . . .	30
Figura 18 – Corpo de prova de uma junta topo a topo. . . . .	30
Figura 19 – Copos de prova para ensaio de torção: a) geometria sólida; b) geometria tubular. . . . .	31
Figura 20 – Corpo de prova de torção de junta adesiva. . . . .	31
Figura 21 – Representação de Junta adesiva DCB. . . . .	32
Figura 22 – Zona de processo de fratura (FPZ). . . . .	33
Figura 23 – Leis Tração-Separação CZM: a) linear e exponencial; b) trapezoidal . . . . .	36
Figura 24 – Lei Tração-Separação Triangular. . . . .	37
Figura 25 – Modelo DOE/Plackett-Burman . . . . .	39
Figura 26 – Fluxograma das etapas do trabalho. . . . .	40
Figura 27 – Detalhados dimensionais e funcionais do corpo de prova DCB tomado como base para desenvolvimento do modelo computacional. . . . .	41
Figura 28 – Manta de Polímero Reforçado por Fibra. . . . .	41
Figura 29 – Modelo tridimensional inteiro construído no módulo part. . . . .	43
Figura 30 – Janela na interface gráfica para definições do comportamento do adesivo. . . . .	44
Figura 31 – Interação MPC beam. . . . .	45
Figura 32 – Condições de contorno . . . . .	45
Figura 33 – Vista isométrica do modelo com a malha. . . . .	46
Figura 34 – Convergência de malha. . . . .	47
Figura 35 – Vista no plano X-Y DO modelo com malha. . . . .	47

Figura 36 – Curvas $P \times \delta$ resultantes das 12 rodadas do DOE. . . . .	49
Figura 37 – Curvas $G_{IC} \times a_e$ obtidas pelo método CBBM. . . . .	49
Figura 38 – Curva $P \times \delta$ rodada 1 do DoE. . . . .	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades de cada grupo de adesivo classificados pela composição química.	18
Tabela 2 – Aplicações e materiais ligantes relacionados as classes de adesivos. . . . .	19
Tabela 3 – Dimensões da junta DCB empregada no modelo computacional. . . . .	40
Tabela 4 – Propriedades Mecânicas do laminado empregado no modelo computacional.	42
Tabela 5 – Propriedades mecânicas do adesivo empregadas no modelo computacional. .	42
Tabela 6 – Propriedades Mecânicas da junta empregadas no modelo computacional. . .	43
Tabela 7 – Rodadas via DoE das variáveis de estudo de juntas DCB . . . . .	48
Tabela 8 – Incertezas associadas as variáveis geométricas e de materiais. . . . .	48
Tabela 9 – Respostas numéricas por modelos tridimensionais das rodadas via DoE. . .	50
Tabela 10 – Ranking dos fatores de influência obtidos por MEF tridimensionais. . . . .	50
Tabela 11 – Respostas numéricas por modelos bidimensionais das rodadas via DoE. . .	51
Tabela 12 – Ranking dos fatores de influência obtidos por MEF bidimensionais. . . . .	51
Tabela 13 – Comparativo entre a classificação da influência de parâmetros obtidos por análises bidimensional e tridimensional. . . . .	52

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UDESC	Universidade do Estado de Santa Catarina
ASTM	American Society for Testing and Materials
CZM	Cohesive Zone Model
DCB	Double cantilever Beam
ISO	International Organization for Standardization
DOE	Design of experiments
CCM	Compliance Calibration Method
CBBM	Compliance Based Beam Theory
FPZ	Fracture process zone
FPR	Fiber-Reinforced Polymer
MPC	Multi-point constraints
ME	Main Effect

## LISTA DE SÍMBOLOS

$G_{IC}$	Taxa crítica de liberação de energia em modo I
$G_{IIC}$	Taxa crítica de liberação de energia em modo II
$G_{IIIC}$	Taxa crítica de liberação de energia em modo III
$\alpha$	Tensão
$\varepsilon$	Deformação
$\alpha_e$	Tensão de escoamento, limite elástico/plástico
P	Força
$\delta$	Deslocamento
$\nu_{12}$	Coefficiente de Poisson do laminado na direção 1-2
$\nu_{13}$	Coefficiente de Poisson do laminado na direção 1-3
$\nu_{23}$	Coefficiente de Poisson do laminado na direção 2-3
$E_{11}$	Módulo de Young do laminado na direção longitudinal X
$E_{22}$	Módulo de Young do laminado na direção longitudinal Y
$E_{33}$	Módulo de Young do laminado na direção longitudinal z
$G_{12}$	Modulo de cisalhamento do laminado na direção 1-2
$G_{13}$	Modulo de cisalhamento do laminado na direção 1-3
$G_{23}$	Modulo de cisalhamento do laminado na direção 2-3
$\theta$	Orientação do laminado
$\nu$	Coefficiente de Poisson do Adesivo
E	Módulo de Elasticidade Longitudinal do Adesivo
G	Módulo de Elasticidade Transversal do Adesivo
h	Módulo de Elasticidade Longitudinal do Adesivo
$a_0$	Comprimento inicial da trinca
t	Espessura do adesivo no ensaio
B	Largura do corpo de prova no ensaio DCB
L	Comprimento do corpo de prova no ensaio DCB
C	Flexibilidade do corpo de prova no ensaio DCB
$C_0$	Flexibilidade inicial
$E_f$	Módulo de correção flexural

$\Delta$	Fator de correção do comprimento da fenda devido a rotação e deflexão dos aderentes na extremidade da fenda
D	Índice de dano do modelo CZM
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
W	Trabalho
U	Energia de deformação

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	16
1.2	OBJETIVOS	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>18</b>
2.1	ADESIVOS	18
<b>2.1.1</b>	<b>Classificação</b>	<b>18</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Adesivos Estruturais</b>	<b>19</b>
2.2	MATERIAIS COMPÓSITOS	21
2.3	JUNTAS ADESIVAS	22
<b>2.3.1</b>	<b>Terminologia</b>	<b>22</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Esforços</b>	<b>23</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Mecanismos de Falha</b>	<b>24</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Tipos de juntas Adesivas</b>	<b>25</b>
2.4	PROPRIEDADES DOS ADESIVOS	27
2.5	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS ADESIVOS	29
<b>2.5.1</b>	<b>Caracterização das propriedades mecânicas à tração</b>	<b>30</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Caracterização das propriedades mecânicas ao corte</b>	<b>31</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Caracterização das propriedades à fratura</b>	<b>32</b>
<i>2.5.3.1</i>	<i>Obtenção do <math>G_{IC}</math></i>	<i>33</i>
2.6	MODELOS COMPUTACIONAIS	35
<b>2.6.1</b>	<b>Modelos Coesivos</b>	<b>35</b>
2.7	DESIGN OF EXPERIMENTS	38
<b>2.7.1</b>	<b>Design Plackett-Burman</b>	<b>38</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>40</b>
3.1	GEOMETRIA DA JUNTA DCB	40
<b>3.1.1</b>	<b>Propriedades do Substrato</b>	<b>41</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Propriedades do Adesivo</b>	<b>42</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Propriedades da Junta Colada</b>	<b>42</b>
3.2	MODELO COMPUTACIONAL	43
<b>3.2.1</b>	<b>Modelo Tridimensional</b>	<b>43</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Condições de Contorno</b>	<b>44</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Critério de simulação e pós-processamento</b>	<b>46</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Malha</b>	<b>46</b>
<i>3.2.4.1</i>	<i>Convergência de malha</i>	<i>46</i>
3.3	MATRIZ DOE	47

<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> . . . . .	<b>49</b>
4.1	COMPARATIVO ENTRE ESTUDOS . . . . .	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>54</b>
5.1	MELHORIAS E TRABALHOS FUTUROS . . . . .	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>55</b>



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O aumento dos estudos voltados para ligações adesivas tem permitido o crescimento desse tipo de processo de união no mercado, substituindo quando conveniente, outras formas de uniões tradicionais, como uniões soldadas, rebitadas e parafusadas.

Os adesivos estão cada vez mais presentes na indústria, em especial na aeronáutica, automotiva e naval. É um dos motivos para tanto, tem relação a conveniência que o adesivo trás na união de estruturas de materiais diferentes (MACHADO, 2017). A figura 1 apresenta algumas das utilizações dos adesivos no meio automotivo.

Figura 1 – Utilização de adesivos em automóveis.



Fonte: (MACHADO, 2017)

Outras características que enaltecem uso de adesivos, tem relação com suavização de tensões na região colada e ao seu menor peso, quando comparados aos métodos tradicionais de união. Isso somado a materiais compósitos, permitem que estruturas tenham uma alta relação rigidez-peso, ideais pra aplicações no ramo aeroespacial e automobilístico de performance. Dito isso, o estudo de juntas adesivas do tipo compósito-compósito mostram-se pertinentes.

No processo de fabricação de juntas coladas existem diversos parâmetros de incertezas, como fatores geométricos e de materiais dos substratos e adesivos, assim como as interações entre si e o meio. Saber identificar aqueles que são mais críticos, é extremamente importante para estes possam ser devidamente controlados (SILVA, 2022).

Segundo Majano-Majano *et al.* (2022), a modelagem numérica por análise de elementos finitos é reconhecida como uma ferramenta útil para abordar a segurança estrutural e eficiência no projeto de juntas coladas. Sendo assim, um importante fator de análise para esse tipo de

estrutura é crescimento do dano, e modelos de zona coesiva baseados na mecânica da fratura podem ser implementados no modelo computacional para tratar dessa questão.

## 1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar uma análise das incertezas associadas na fabricação de juntas coladas de materiais compósitos. Para tanto, tomou-se como base literaturas associadas ao tema, em especial a tese de doutorado de SILVA (2022), "Comportamento mecânico de juntas coladas de materiais compósitos: Avaliação da influência das incertezas do processo de fabricação".

Dentro do objetivo geral desse trabalho, pode-se listar os objetivos específicos:

- Estudar os mecanismos de falha de juntas coladas;
- Elaborar um modelo tridimensional em elementos finitos para simular as juntas coladas de materiais compósitos;
- Por meio de uma análise de "projeto de experimentos" aplicada nas simulações, identificar as variáveis de maior influência na resposta ao fraturamento;
- Comparar resultados obtidos por meio do MEF tridimensional com os resultados obtidos por meio de MEF bidimensional.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ADESIVOS

A tecnologia dos adesivos é quase tão antiga quanto as primeiras civilizações, há indícios arqueológicos da utilização de adesivos por humanos do período paleolítico. Porém, quando se fala de adesivos é comum relacioná-los a união de objetos para a construção de utensílios práticos. Contudo, pode-se dizer que a função principal da cola na antiguidade estava voltada para a arte, mais precisamente na criação de tintas e fixadores.(ADAMS, 2021).

#### 2.1.1 Classificação

A forma mais comum de classificar os adesivos é com relação sua origem, podendo ser naturais ou sintéticos. Porém, existem diversas outras classificações dos adesivos como pela estrutura molecular, a composição química, o modo de apresentação e de aplicação, as condições de cura, a estabilidade, e quanto a aplicações estruturais (TEIXEIRA, 2000). O método de classificação mais difundido tanto em meio acadêmico como no meio industrial é denominação por composição química (FANECO, 2014). Sendo assim, quando aplicada a adesivos sintéticos podem ser divididos em quatro grupos, termoplásticos, termofixos, elastômeros e os híbridos. Na tabela 1 é apresentado o comportamento dos três primeiros grupos de adesivos.

Tabela 1 – Propriedades de cada grupo de adesivo classificados pela composição química.

Material	Flexibilidade (Resiliência)	Resistência Mecânica	Resistência Térmica	Resistência a agentes Químicos
Termofixos	ruim	boa	boa	boa
Termoplásticos	média	muito ruim	muito ruim	boa
Elastômeros	muito boa	ruim	variável	muito ruim

Fonte: Adaptado de (TEIXEIRA, 2000).

Os adesivos termoplásticos são polímeros de estrutura molecular linear ou ramificada, podem ser fundidos por calor, e por conta disso podem ser moldados e remoldados na região de colagem.

Os adesivos termofixos são polímeros de estrutura largamente reticulada, possuem elevada rigidez após a polimerização. E quando expostos a elevadas temperaturas, esse tipo de adesivo se degrada ao invés de fundir.

Os elastômeros são polímeros que apresentam uma estrutura macromolecular levemente reticulada. Por conta disso, esse tipo de adesivo apresenta uma elevada tenacidade e também se degradam quando submetidos a elevadas taxas de calor.

Como é de se esperar, os adesivos classificados como ligas adesivas ou híbridos, são formados pela combinação de um ou mais dos adesivos citados acima, sendo ideais para aplicações que exigem elevada resistência mecânica e térmica (FANECO, 2014). A tabela 2 mostra algumas das principais utilizações e os substratos normalmente ligados relacionados a cada classificação.

Tabela 2 – Aplicações e materiais ligantes relacionados as classes de adesivos.

	Principal tipo de utilização	Materiais normalmente ligados
Termoplástico	Juntas com solicitações reduzidas, alterações geométricas e reforços para aumento de rigidez	Abrange todos os materiais, com maior ênfase nos não metálicos (madeira,couro, cortiça, papel,etc.)
Termofixo	Juntas com grandes solicitações a temperaturas relativamente elevadas	Maioria dos materiais em utilizações estruturais
Elastômero	Juntas com solicitações reduzidas de materiais leves; juntas solicitadas à flexão	Sem modificações para borracha, tecido, papel, couro, plásticos
Híbridos	Para condições adversas de temperatura, humidade e carregamento; uso militar	Metais, cerâmicos, vidros, plásticos termofixos; o material dos aderentes não é tão importante como o projeto da junta e as condições de serviço (temperatura e esforços aplicados)

Fonte: Adaptado de (FANECO, 2014).

### 2.1.2 Adesivos Estruturais

Dentro das diversas formas de classificação, temos os denominados adesivos estruturais. Segundo MACHADO (2017), os adesivos estruturais tem como função a união de estruturas, dessa forma necessitam resistir a cargas elevadas de solicitação e também devem ter baixa deformação. Os adesivos estruturais que melhor desempenham esse papel são aqueles que pertencem a família dos epóxidos, por conta de sua característica de polivalência. A figura 2 apresenta um esquema de algumas famílias de adesivos estruturais.

Figura 2 – Adesivos estruturais.

<b>Fenólicos</b>	<b>Fenólicos-vinílicos</b>
	<b>Fenólicos-nitrilo</b>
	<b>Fenólicos-policloropreno</b>
<b>Acrílicos</b>	<b>Anaeróbicos</b>
	<b>Cianoacrilatos</b>
<b>Poliuretanos</b>	
<b>Poliimidas</b>	
<b>Epóxidos</b>	<b>Epóxido-poliamida</b>
	<b>Epóxido-polisulfureto</b>
	<b>Epóxido-fenólicos</b>
	<b>Epóxido-poliuretano</b>
	<b>Epóxido-nitrilo</b>

Fonte: (MACHADO, 2017)

Obtidos por meio da condensação do fenol e o formaldeído, os adesivos fenólicos possuem como características vantajosas a estabilidade dimensional, boa resistência a temperatura e a fungos e o baixo custo, porém não apresentam boa resistência ao impacto e são sensíveis a vibrações.

Os Poliuretanos são obtidos através da reação entre um polioli e um isocianato, sua cura pode ser feita em altas temperaturas ou em temperatura ambiente. São adesivos considerados flexíveis, possuem boa tenacidade e boa resistência a baixas temperaturas e a ambientes quimicamente agressivos.

As Poliimidas são adesivos com elevada dureza, e possuem ótima resistência a altas temperaturas, por conta da temperatura de transição vítrea bastante elevada. Podem ser curadas por reação de condensação ou por reação adição. Esse tipo de junta não apresenta boa resistência ao impacto e são sensíveis a vibrações.

Os adesivos Acrílicos Anaeróbicos possuem boa resistência mecânica, suportam solventes e exposições altas de temperatura. São de fácil manuseio e podem ser curados a temperatura ambiente. Os adesivos Acrílicos Cianoacrilatos também conhecidos como cola instantânea apresentam grande resistência a tração, mas são bastante frágeis e pouco resistentes ao arrancamento.

Os epóxidos são adesivos constituídos por dois componentes, a resina epóxida e o endurecedor. Esses adesivos apresentam ótima resistências a tração e ao corte, porém baixa resistência ao arrancamento. São comumente aplicados na indústria automobilística e aeronáutica. Além do mais são adesivos que possuem uma boa fixação em diversos tipos de substratos.

## 2.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Engenheiros e cientistas projetam materiais compósitos de forma a obter melhores características mecânicas como rigidez, tenacidade, resistência a fadiga, resistência ao ambiente e a temperatura. Isso se dá por meio da combinação de maneira inteligente de outros materiais como metais, cerâmicas e polímeros.

Os compósitos podem ser definidos como materiais multifásicos obtidos artificialmente, que devem conter mais de uma fase de componentes químicos diferentes e interfaces delimitadas (CALLISTER, 2019). Além do mais os compósitos tem compromisso com a propriedade, dessa forma os materiais que o constituem são selecionados de forma a combinar as características desejadas para determinado para certo objetivo, o que não seria possível de obter com apenas um tipo de material.

A forma mais simples de materiais compósitos é composta por duas fases: a matriz ou fase contínua e o reforço ou fase dispersa, a figura 3, ilustra a constituição de um compósito.

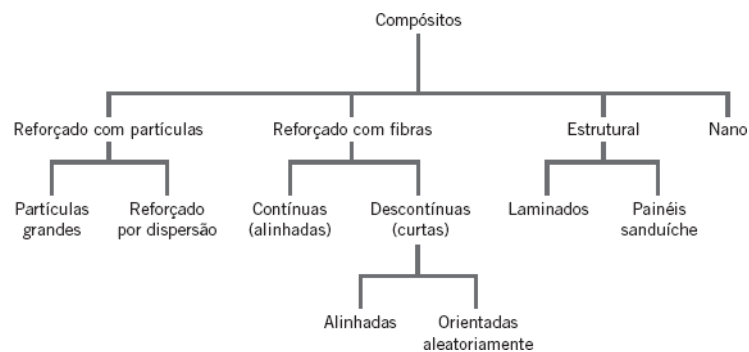
Figura 3 – Esquema da constituição básica de um compósito.



Fonte: (AZEVEDO, 2017)

Os compósitos basicamente possuem quatro divisões, são elas: os compósitos com reforços particulados, compósitos com reforços em fibra, os compósitos estruturais e nanocompósitos. A seguir a figura 4 e apresenta um esquema de classificação de compósitos.

Figura 4 – Esquema da classificação dos materiais compósitos.



Fonte: (CALLISTER, 2019)

## 2.3 JUNTAS ADESIVAS

Segundo REZIER (2020), as juntas adesivas tem ganhado espaço em meio a tecnologias de fixação convencionais. Entre as principais características favoráveis estão:

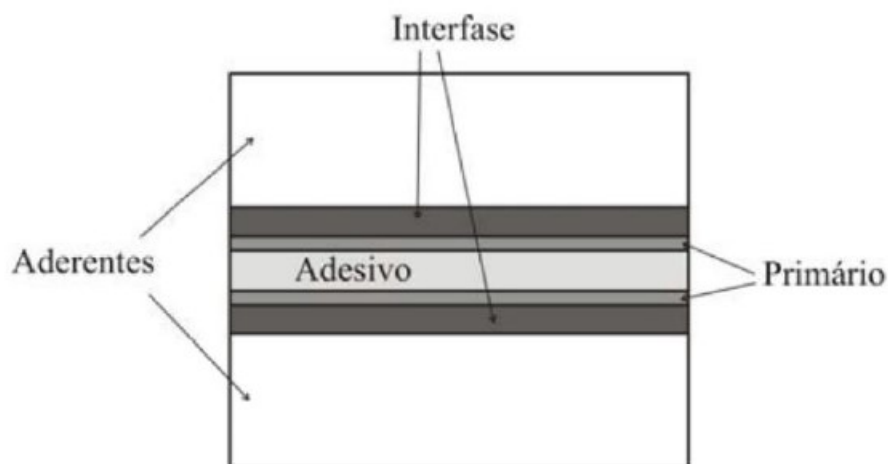
- Distribuição uniforme das tensões ao longo da região colada;
- Redução do peso da estrutura;
- Capacidade de amortecimento de vibrações;
- Vedação na região colada, prevenindo corrosão do substrato;
- Permite a união de materiais de naturezas distintas.

Contudo, a união por adesivo possui também suas limitações, como a maior complexidade de projeto e controle de qualidade, em muitos casos a fixação do adesivo é um processo irreversível, ou seja, caso ocorra alguma avaria em uma das partes coladas, o conjunto inteiro deverá ser descartado. Além do mais ainda existe o fato de alguns adesivos serem inflamáveis e tóxicos (FANECO, 2014)

### 2.3.1 Terminologia

Uniões realizadas por meio de um adesivo são normalmente denominadas como juntas adesivas, juntas coladas ou ligações adesivas. Os membros estruturais da a junta são denominados substratos ou aderentes, sendo que a primeira forma é mais correta para se referir ao membro estrutural antes da ligação e a segunda para depois da ligação (FANECO, 2014).

Figura 5 – Elementos estruturais de uma junta adesiva.



Fonte: (TEXEIRA, 2016).

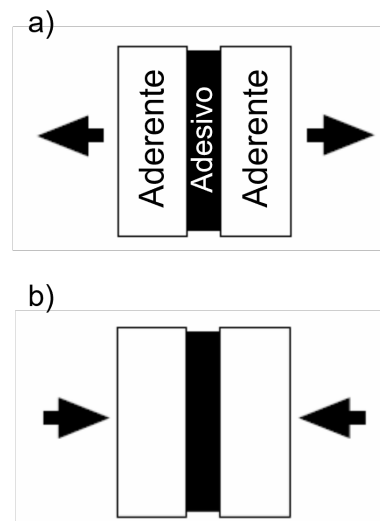
Entre o adesivo e o aderente existe uma região denominada interfase, e caso seja necessário melhorar a adesão entre o aderente e o adesivo deve-se utilizar uma substância chamada "primário"(TEXEIRA, 2016). A estrutura de uma junta colada é exemplificada pela figura 5.

### 2.3.2 Esforços

Uma das características dos adesivos estruturais é a capacidade de suportar esforços consideráveis (TEIXEIRA, 2000). Dessa forma, uniões adesivas podem estar sujeitas a diversas formas de esforços, sendo que os quatro principais são: tração/compressão, corte, clivagem e arrancamento.

Esforços de tração e compressão originam-se de forças aplicadas na direção perpendicular ao plano de colagem dos aderentes. A figura 6 apresenta ambas configurações. A tensão gerada na região da cola é uniforme ao longo do comprimento da colagem.

Figura 6 – a) Esforço de tração. b)Esforço de compressão.



Fonte: (FANECO, 2014)

Na prática é difícil que esses tipos de esforços ocorram, devido as irregularidades na espessura do adesivo, o que resulta em forças não perpendiculares ao plano de cola, originando assim esforços de clivagem e arrancamento.

Esforços de corte são resultado de forças aplicadas paralelamente ao plano de colagem da junta, provocando assim o escorregamento dos aderentes, como é possível observar na figura 7.

Figura 7 – Esforço de corte.



Fonte: (FANECO, 2014)



A distribuição de tensão gerada por essa configuração de carregamento não é uniforme e concentra-se nas extremidades da região colada. Uma maneira de melhorar a resistência da junta é aumentar a largura da junta adesivada, dessa forma a a tensão concentrada nas extremidades da junta serão distribuídas ao longo do acréscimo na dimensão.

Quando se trata de ligações adesivas, a clivagem e o arrancamento são os esforços mais prejudiciais, e os projetos de juntas devem ser pensados de forma a evitá-los. Segundo TEIXEIRA (2000), clivagem é resultado da excentricidade da carga de tração em relação a região colada, isso resulta em uma concentração de tensão em uma das extremidades. A imagem 8 ilustra essa configuração.

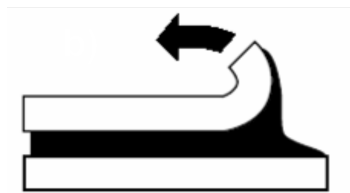
Figura 8 – Esforço de clivagem.



Fonte: (FANECO, 2014)

O arrancamento possui um mecanismo semelhante a clivagem, porém nesse caso, pelo menos um dos aderentes deve ter flexibilidade considerável. Isso resulta numa concentração de tensão na zona extrema da cola no lado do aderente mais flexível. A figura 9 apresenta esse tipo de esforço.

Figura 9 – Esforço de arrancamento.



Fonte: (FANECO, 2014)

### 2.3.3 Mecanismos de Falha

Juntas coladas possuem basicamente 4 modos de falha, são eles:

**Falha coesiva** - Ocorre o rompimento do adesivo. Acontece quando a resistência da ligação entre o adesivo e o aderente é maior que a resistência interna do adesivo.

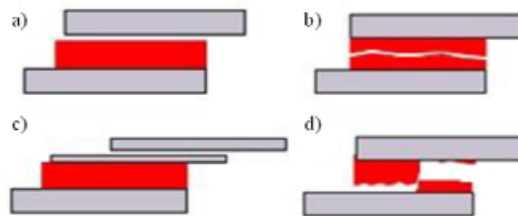
**Falha adesiva** - Ocorre o desprendimento do adesivo em uma das superfícies do aderente. Geralmente esse tipo de falha ocorre quando a superfície do substrato não passou pela devida preparação na região de colagem.

**Falha Mista** - Nesse mecanismo de falha ocorre os dois tipos de falha citados anteriormente, é possível verificar regiões onde ocorreu o desprendimento do adesivo na superfície do aderente e regiões onde houve o rompimento do adesivo.

**Falha do aderente** - Ocorre quando o conjunto colado é submetido a carregamentos que levam a falha do aderente. Isso ocorre quando a resistência do aderente é menor que a resistência de ligação da cola com o substrato e que resistência interna do próprio adesivo.

Quando se trata de juntas coladas é preferível que ocorra uma falha coesiva ou uma falha do aderente. Isso demonstra que a junta foi bem projetada e fabricada, desde que as falhas ocorram de acordo com a resistência nominal dos respectivos materiais. A seguir a figura 10 ilustra cada um dos tipos de falha citados.

Figura 10 – Mecanismos de falha em juntas coladas: a) Falha Adesiva, b) Falha Coesiva, c) Falha do Aderente, d) Falha Mista.



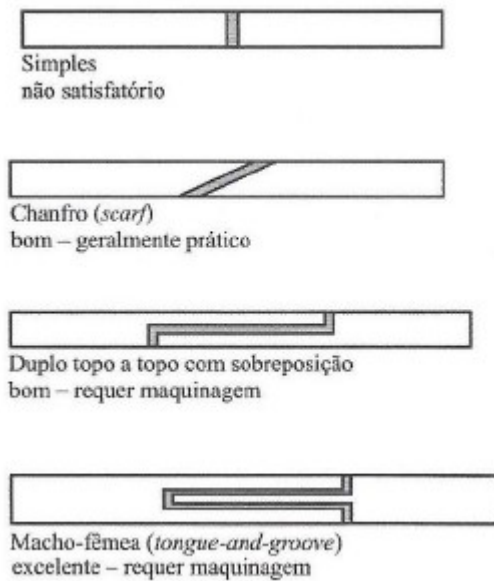
Fonte: (REZIER, 2020)

#### 2.3.4 Tipos de juntas Adesivas

Juntas adesivas possuem diversas configurações, e a escolha do tipo de junta a ser utilizado irá depender da aplicação, da geometria, do nível de solicitação e também do investimento disponível. A seguir, uma breve apresentação de alguns tipos de junta.

Juntas “Topo a Topo”, são um dos tipos mais simples de juntas adesivas, contudo não apresentam bom desempenho em várias ocasiões, pois são mais propensas a terem concentração de tensão de arrancamento em suas extremidades (TEXEIRA, 2016). Além disso, essas juntas são muito sensíveis a esforços de flexão, uma vez que estes a submetem a clivagem do adesivo.

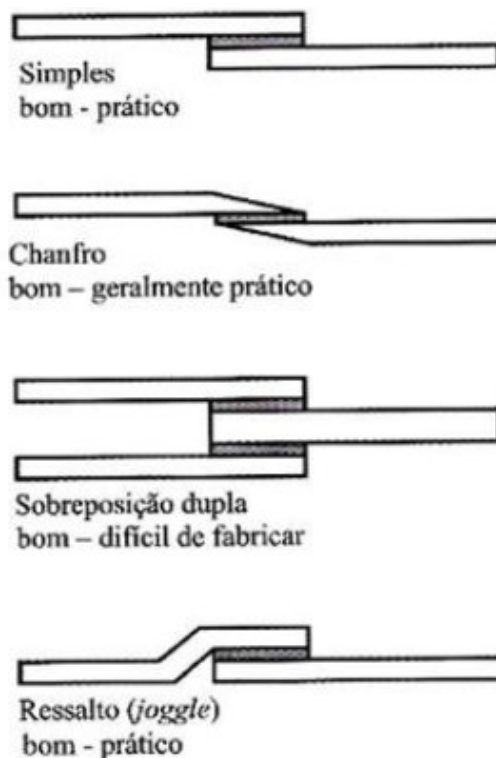
Figura 11 – Juntas de topo e algumas de suas configurações.



Fonte: (TEXEIRA, 2016).

As juntas de “Sobreposição” são as mais comuns, pois são de fácil confecção e geralmente só são solicitadas ao corte. Porém quando forças não colineares agem sobre a junta tensões de arrancamento originam-se, dessa forma pode ser necessário algumas adequações para que resistam a essas solicitações, como é possível ver na figura 12.

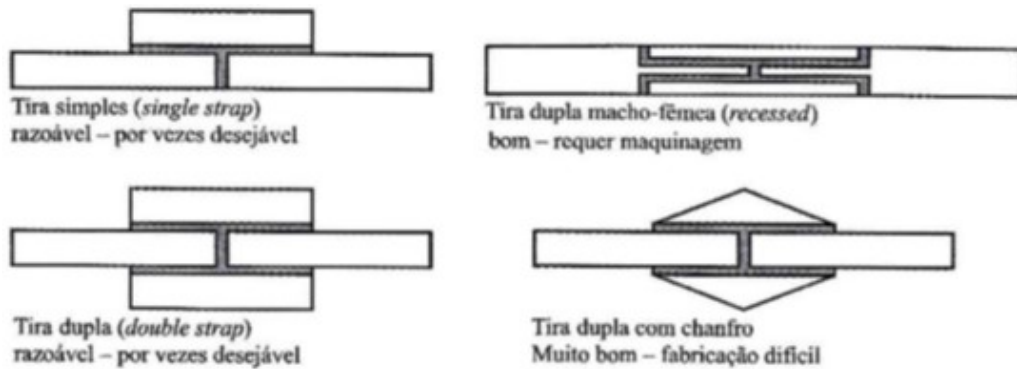
Figura 12 – Juntas de sobreposição e suas configurações.



Fonte: (TEXEIRA, 2016).

Juntas de “Tira”, geralmente são usadas quando há uma limitação geométrica e possuem a vantagem de reduzir excentricidade das cargas. A seguir, a figura 13 representa algumas das configurações desse tipo de junta.

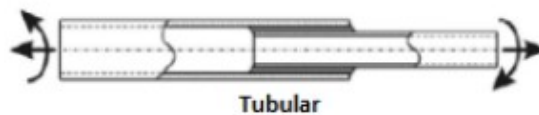
Figura 13 – Juntas de tira e suas configurações.



Fonte: (TEXEIRA, 2016).

Juntas tubulares ou cilíndricas, esse tipo de junta é utilizado para união de tubos de diâmetros diferentes, conforme a imagem 14, o substrato de maior diâmetro é colado pela parede interna na parede externa do substrato de menor diâmetro. Essa configuração diminui o efeito do arrancamento (FANECO, 2014).

Figura 14 – Junta tubular.



Fonte: (MACHADO, 2017).

## 2.4 PROPRIEDADES DOS ADESIVOS

Para a determinação das tensões internas, prever resistência e tempo vida de juntas coladas é fundamental o conhecimento das propriedades térmicas, mecânicas e propriedades de fratura do adesivo e o aderente (TEXEIRA, 2016).

A seleção correta do adesivo vai variar conforme a aplicação do mesmo, sua solicitação de carga, temperatura de trabalho, exposição ao ambiente, entre outros. Para tanto, é necessário o conhecimento das suas propriedades e a forma de obtê-las (REZIER, 2020).

Dentre as propriedades térmicas dos adesivos, as mais importantes para juntas coladas são a temperatura de transição vítrea, de forma que o adesivo escolhido deva estar em seu estado vítreo para a temperatura de operação da junta. E o coeficiente de expansão térmica, garantido de o coeficiente do adesivo não tenha uma diferença muito grande para o substrato, de forma a evitar tensões térmicas residuais (TEXEIRA, 2016).

Como é possível ver na figura 15, os valores de dilatação térmica dos adesivos são maiores que os valores dos materiais comumente usados como aderentes. Dessa forma, para diminuir esses valores de coeficiente de expansão térmica nos adesivos, são adicionadas cargas de sílica ou alumina em sua composição.

Figura 15 – Coeficientes de dilatação de diversos materiais

Material	$\alpha$ ( $\times 10^{-6}$ °C)	
Alumínio	24	
Aço	12	
Titânio	9	
Fibra de vidro	6	
Fibra de carbono (axial)	-0.5	
Fibra de carbono (radial)	10	
Compósito unidirecional epóxico / carbono (ao longo das fibras)	-0.1	
Compósito unidirecional epóxico / carbono (através das fibras)	30	
	Abaixo de Tg	Acima de Tg
Epóxico DGEBA ( <i>Diglycidyl Ether of Bisphenol A</i> ) / dietileno tetramina	60	180
Epóxico DGEBA ( <i>Diglycidyl Ether of Bisphenol A</i> ) / 1,2-diaminobenzeno	57	210
Bismaleimida	35	114
Metacrilato de polimetilo	26	53
Cianocrilato	80	
Anaeróbico	85	235

Fonte: (TEXEIRA, 2016)

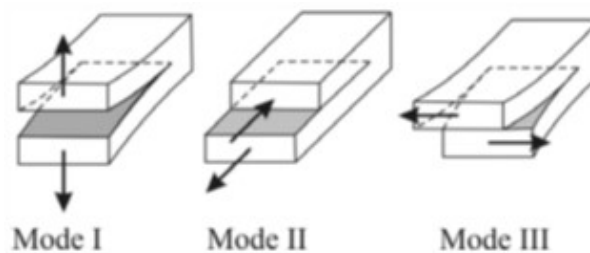
Com relação as propriedades mecânicas dos adesivos, destacam-se o módulo de elasticidade longitudinal e transversal, o coeficiente de Poisson e a tensões de transição elasto-plástica e de limite de resistência, tanto longitudinais como transversais.

O módulo de elasticidade do adesivo, determina sua rigidez, e adesivos dúcteis suportam

valores altos de deformação antes de romperem, dessa forma a relação tensão-deformação não é linear. Com relação ao coeficiente de Poisson dos adesivos, que quantifica a deformação transversal em relação à direção longitudinal de aplicação da carga em um material isotrópico, segundo TEXEIRA (2016) esse valor fica entre 0,3 e 0,5.

Propriedades da mecânica à fratura também são importantes para a definição de adesivos. São essas propriedades que tratam da formação e avanço da trinca. Uma dessas características é a taxa de liberação de energia crítica, que corresponde a energia necessária para que trinca se propague e forme duas unidades novas de superfície (TEXEIRA, 2016). O crescimento da fenda pode ocorrer por modos de sollicitação, como pode-se observar na figura 16.

Figura 16 – Modos fratura dos materiais.



Fonte: (TEXEIRA, 2016).

O modo *I* corresponde a sollicitação por abertura da fenda, no qual os carregamentos são normais plano da trinca, esse parâmetro de fratura corresponde ao  $G_{IC}$ . Já os modos *II* e *III* correspondem as sollicitações de deslizamento e rasgamento respectivamente, e seus carregamentos agem paralelos ao plano da trinca, e os parâmetros que os representam são o  $G_{IIC}$  e o  $G_{IIIC}$ . É normal encontrar em estruturas mais de um modo de fratura agindo simultaneamente, sendo essa combinação denominada como modo misto (FANECO, 2014).

## 2.5 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS ADESIVOS

Um projeto de estruturas coladas exige por parte do engenheiro o conhecimento das propriedades dos materiais, para que o projeto seja executado com segurança e sem desperdícios. Para obter essas propriedades, existem diversas normas que parametrizam ensaios físicos dos materiais, como a ISO e a ASTM. Para adesivos, é comum dividir os ensaios de caracterização em dois grupos, ensaios que utilizam corpos de prova maciços e os que utilizam juntas coladas como corpos de prova. Segundo TEXEIRA (2016) as propriedades obtidas em cada tipo de teste irão ter certa divergência, e isso se dá por conta da influência que os substratos geram nas deformações na fina camada de adesivo da junta. Dessa forma, é importante obter as tais informações por meio das duas categorias quando possível. A seguir será abordado alguns dos ensaios normalmente utilizados para a caracterização de materiais adesivos.

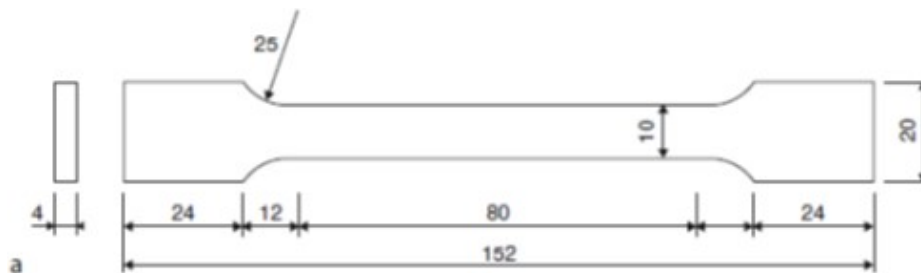
### 2.5.1 Caracterização das propriedades mecânicas à tração

Ensaio de tração em corpos de prova de adesivo maciço, esse é um dos ensaios mais comuns aplicados a meterias, por ser simples e rápido de se executar e por resultar em uma grande quantidade de informações a respeito do material.

O ensaio de tração de corpos maciços, submete o material a uma tensão uniforme e uniaxial, e dele obtém-se a curva tração-deformação, essa curva fornece os valores de módulo de elasticidade longitudinal, tensão da transição elasto-plástica do material, tensão limite e tensão e deformação de ruptura (FANECO, 2014).

Os corpos de prova podem ser fabricados por injeção de material o por pressão entre placas (TEXEIRA, 2016). Uma das normas de que regularizam esse ensaio é a ISO 527-2, a figura 17 ilustra umas das geometrias propostas pela norma.

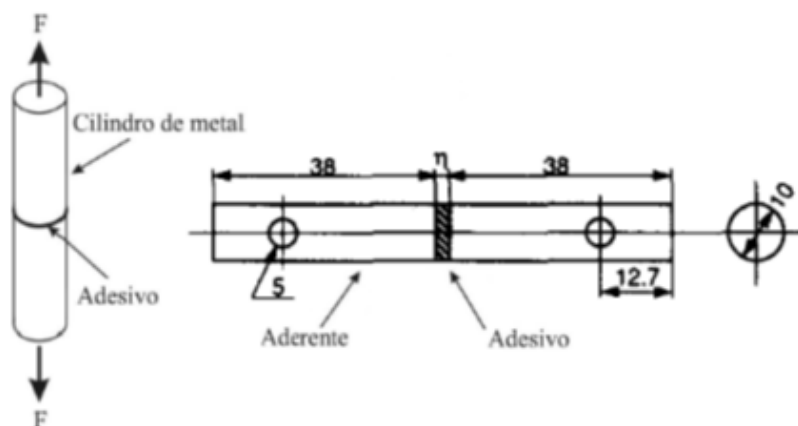
Figura 17 – Corpo de prova de tração conforme ISO 527-2.



Fonte: Adaptado de (FANECO, 2014)

Ensaio de tração em juntas de topo, consiste em dois substratos colados topo a topo pelo adesivo, e a junta é tracionada na direção longitudinal até ocorrer a ruptura do material, conforme representado na figura 18. Diferente do ensaio de tração de corpos maciços, nesse caso não ocorre a formação de um estado uniaxial e uniforme de tensões, devido a restrição dos adesivos juntos a face do aderente, o que ocasiona diferença na rigidez obtida.

Figura 18 – Corpo de prova de uma junta topo a topo.



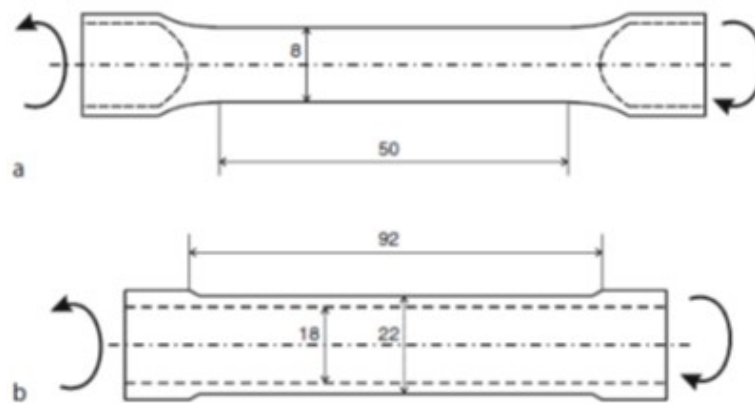
Fonte: (FANECO, 2014)

## 2.5.2 Caracterização das propriedades mecânicas ao corte

Entender as capacidades de um adesivo suportar ao corte é muito importante, uma vez que as distribuições de carga mais favoráveis nas estruturas estão ligadas ao cisalhamento (FANECO, 2014).

O ensaio de torção de corpos de prova maciços, submete o material a um estado puro de torção, gerando um curva tensão-deformação em cisalhamento, na qual se pode colher os dados desejados.

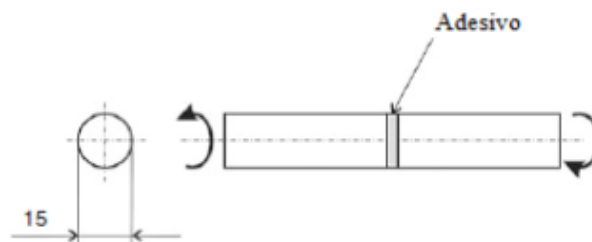
Figura 19 – Copos de prova para ensaio de torção: a) geometria sólida; b) geometria tubular.



Fonte: (FANECO, 2014)

Outra forma de obter as propriedades ao corte do adesivo, é pelo ensaio de torção de juntas topo a topo, que consiste em dois substratos, maciços ou tubulares, colados topo a topo e submetidos a torção. Da mesma forma que os ensaios de corpo maciço, coletam-se os dados de tensão e rotação para gerar a curva tensão deformação. Segue a imagem 20 ilustrando esse tipo de ensaio.

Figura 20 – Corpo de prova de torção de junta adesiva.



Fonte: (TEXEIRA, 2016)

Apesar dos dois testes citados acima serem ideias teoricamente, pois atingem um estado puro de torção, na prática eles possuem suas limitações, uma vez que, as geometrias são mais difíceis de fabricar dependendo da característica do material, assim como a máquina para o ensaio deva ser específica para o mesmo. Para tanto, existem outros ensaios para caracterizar o



corde, adaptados de forma simplificar o processo de fabricação e o maquinário usado para o teste, porém eles não serão abordados nesse trabalho.

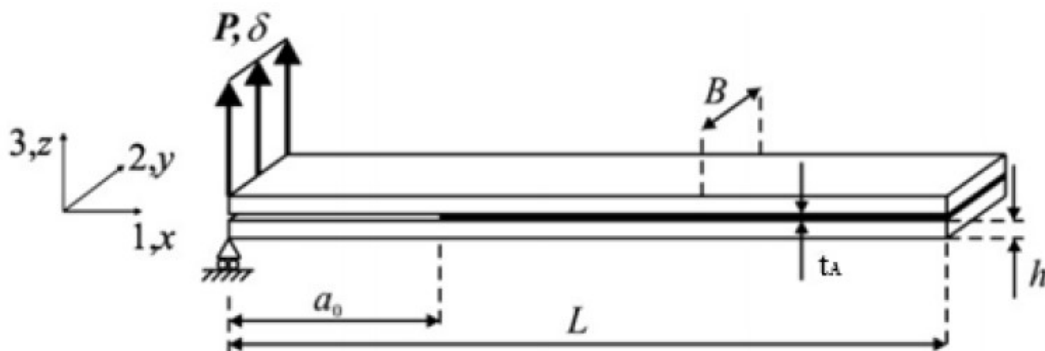
### 2.5.3 Caracterização das propriedades à fratura

Segundo TEXEIRA (2016), a identificação das propriedades à fratura de um adesivo permite que projetos de juntas coladas sejam melhor executados. Uma das características interessantes dessa abordagem é que mecânica da fratura considera efeitos intrínsecos introduzidos na estrutura, seja durante sua fabricação ou recorrente a alguma solicitação (FANECO, 2014). Dessa forma, avalia-se o comportamento da estrutura perante esses efeitos, avaliando se serão catastróficos ou se permanecerão sob controle durante sua solicitação. Nesse contexto, o parâmetro a ser identificado é a taxa de liberação de energia crítica.

O ensaio Double Cantilever Beam (DCB) é utilizado para caracterizar a resistência a fratura em modo I (tração) de juntas coladas, por meio desse obtém-se a taxa crítica de liberação de energia em modo I e é possível avaliar a evolução da fenda da junta.

Como ilustrado na imagem 21, o corpo de prova é constituído por duas vigas de mesmas dimensões, a seção transversal desses substratos possuem espessura constante, e o adesivo está localizado entre as vigas, fazendo a união das mesmas. Em uma das extremidades do corpo de prova há uma fenda, definida como a pré-trinca.

Figura 21 – Representação de Junta adesiva DCB.



Fonte: (SILVA, 2022)

Conforme a figura 21, as variáveis geométricas desse tipo de junta são:

$B$  = Largura do corpo de prova

$a_0$  = pré-trinca da amostra

$t_A$  = espessura do adesivo

$h$  = espessura do aderente

$L$  = comprimento da amostra

O ensaio consiste na aplicação de um deslocamento prescrito *delta* na extremidade onde existe a pré-trinca do corpo de prova, no decorrer do teste são coletadas as forças  $P$

e os respectivos deslocamentos na extremidade do corpo de prova, a partir desses dados é traçada a curva  $P \times \delta$ , dependendo do equipamento pode-se coletar também a evolução da trinca relacionadas aos outros dois parâmetros (SILVA, 2022).

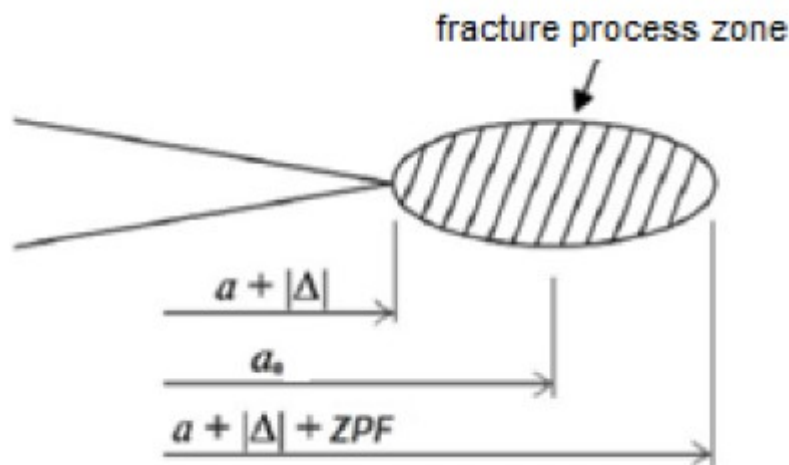
Esse tipo de ensaio é normatizado pelo ASTM D3433, para casos de testes com início e interrupções sucessivas do crescimento da fenda. No caso de uma propagação estável da fenda, utiliza-se a norma ISO 25217 (TEXEIRA, 2016).

### 2.5.3.1 Obtenção do $G_{IC}$

Através do ensaio DCB é possível calcular a Taxa de Liberação Crítica de Energia ao Modo  $I$  do adesivo, existem basicamente dois tipos de métodos para tanto, aqueles que necessitam a medição do avanço da trinca durante o ensaio e aqueles fazem uso de um comprimento de trinca equivalente. Essa segunda forma, traz mais praticidade para o ensaio, uma vez que será necessário apenas a curva Força x Deslocamento ( $P \times \delta$ ) para a obtenção do  $G_{IC}$ .

O método em questão chama-se “Compliance Based Beam Method” (CBBM) e parte do pressuposto de um valor de trinca equivalente  $a_e$  localizado na “Zona de processo de Fratura”, termo originado no inglês Fracture Process Zone (FPZ), ilustrada pela figura 22.

Figura 22 – Zona de processo de fratura (FPZ).



Fonte: (ALVES; KENEDI; BARROS, 2021)

Segundo SILVA (2022), a FPZ é a região da estrutura onde ocorre o crescimento de microfissuras e a plastificação material no decorrer do ensaio, e a trinca equivalente pode ser expressa por:

$$a_e = a_0 + \Delta + FPZ \quad (1)$$

A equação 1 pode ser reescrita na forma de um polinômio de 3º grau, conforme:

$$\alpha a_e^3 + \beta a_e + \gamma = 0 \quad (2)$$

nos quais,  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são constantes:  $\alpha = \frac{8}{E_1 B h^3}$ ,  $\beta = \frac{12}{5 B h G_{13}}$ ,  $\gamma = -C$ , e a solução real do polinômio 2, é dada pela expressão:

$$a_e = \frac{1}{6\alpha} A - \frac{2\beta}{A} \quad (3)$$

onde:

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

Na equação 1, o  $\Delta$  corresponde a uma correção, e pode ser obtido pela relação de Hashemi, Kinloch e Williams, dada por:

$$\Delta = h \sqrt{\frac{E_1}{11G_{13}} \left[ 3 - 2 \left( \frac{\Gamma}{1+\Gamma} \right)^2 \right]} \quad (5)$$

onde  $\Gamma$  também é uma constante,  $\Gamma = 1,18 \frac{\sqrt{E_1 E_3}}{G_{13}}$ .

Ao fazer uso desse método, pode-se usar o módulo de elasticidade corrigido ( $E_f$ ):

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

Onde,  $C_0$  é a flexibilidade inicial do aderente, esse dado é extraído da curva  $P \times \delta$  onde o valor de  $C$  é aproximadamente constante. E a flexibilidade  $C$ , é a razão do deslocamento pela força no decorrer do ensaio.

Energia de deformação

$$U = 2 \left[ \int_0^a \frac{M_f^2}{2E_1 I} dx + \int_0^a \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{\tau^2 B}{2G_{13}} dz dx \right] \quad (7)$$

Aplicando-se o Teorema de Castigliano na equação 7 obtém-se o deslocamento

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \left( \frac{8Pa^3}{E_1 B h^3} + \frac{12Pa}{5BhG_{13}} \right) \quad (8)$$

Aplicando o conceito acima na expressão da continuidade, tem-se

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{8a^3}{E_1 B h^3} + \frac{12a}{5BhG_{13}} \quad (9)$$

A equação de Irwin-Kies para determinação do  $G_{IC}$ , conhecida como Compliance Calibration Method (CCM):

$$G_{IC} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (10)$$

Substituindo a flexibilidade descrita pela equação 9 na expressão acima, obtém-se expressão do  $G_{IC}$  pelo método CBBM, descrito a seguir:

$$G_{IC} = \frac{6P^2}{B^2 h} \left( \frac{2a_e^2}{h^2 E_f} + \frac{1}{5G_{13}} \right) \quad (11)$$

## 2.6 MODELOS COMPUTACIONAIS

Para simular o comportamento das juntas adesivas será necessário o emprego de modelos coesivos. Segundo SILVA (2022) para aplicação desses modelos em elementos finitos é necessário atentar-se em três pontos:

- Critério de iniciação do dano.
- Lei de evolução do dano.
- Remoção do elemento finito que atingiu o dano completo.

Segundo REZIER (2020), modelos analíticos para previsão do comportamento de juntas adesivadas são ferramentas práticas e de baixo custo de execução. Porém, em modelos de maior grau de complexidade, como é o caso de juntas coladas de materiais compósitos, partes com geometria mais complexa ou também pelas características de deformação plástica dos adesivos, a análise por métodos numéricos e computacionais faz-se necessária para obter respostas confiáveis.

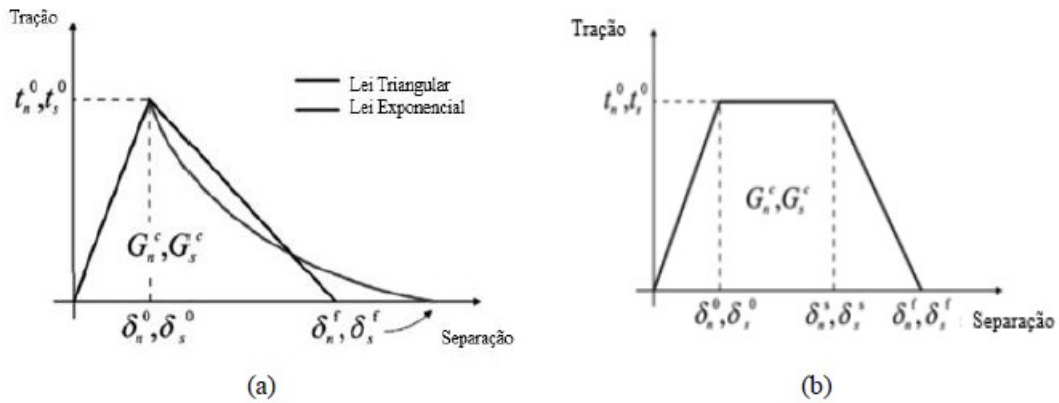
### 2.6.1 Modelos Coesivos

Uma das formas de descrever as falhas coesivas em juntas coladas é por meio do modelo de zona coesiva, no termo inglês corresponde ao Cohesive Zone Model (CZM). Esse método utiliza o critério de degradação mecânica para descrever o deslocamento da união aderente-adesivo (SILVA, 2022).

No CMZ, a zona de degradação se encontra na trinca, e todo o comportamento inelástico do material também pode ser alocado para essa região. Outro termo usado para se referir a degradação mecânica de elementos coesivos corresponde ao “amolecimento” (softening).

O amolecimento em si pode ser expresso em diversas leis, e cabe ao pesquisador aplicar em seu modelo a lei que melhor se enquadra para o objeto de estudo. As duas leis mais famosas são a lei bilinear e a lei exponencial. Sendo que para materiais frágeis a lei bilinear oferece respostas bem próximas da realidade (SILVA, 2022). Para materiais dúcteis, uma boa simulação deles é obtida utilizando a lei trapezoidal. Na figura 23 estão representadas graficamente as configurações de degradação do elemento coesivo para cada lei citada a cima.

Figura 23 – Leis Tração-Separação CZM: a) linear e exponencial; b) trapezoidal



Fonte: (SILVA, 2022)

A teoria do CMZ parte do princípio de que a espessura da cola é muito pequena, assim pode-se dimensionar os esforços com base em leis de tração separação. Dessa forma, as deformações nos adesivos podem descritas pela razão entre o deslocamento ( $\delta$ ) e a espessura ( $T_0$ ), conforme a expressão:

$$\varepsilon = \left\{ \frac{\delta_n}{T_0} \quad \frac{\delta_s}{T_0} \quad \frac{\delta_t}{T_0} \right\} \quad (12)$$

E as tensões que agem no adesivo, serão o produto entre a rigidez do material e as deformações, em uma abordagem tridimensional e as componentes de tensão podem ser escritas na seguinte expressão:

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{sn} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{tn} & K_{ts} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix} \quad (13)$$

Como é possível observar, a equação 13 possui em sua estrutura uma matriz de rigidez, e fora da diagonal principal dessa matriz há os termos associados aos efeitos de acoplamentos. Para simplificar o modelo, pode-se considerar quando pertinente, o acoplamento igual a zero, logo tem-se a seguinte equação:

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_n & 0 & 0 \\ 0 & K_s & 0 \\ 0 & 0 & K_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix} \quad (14)$$

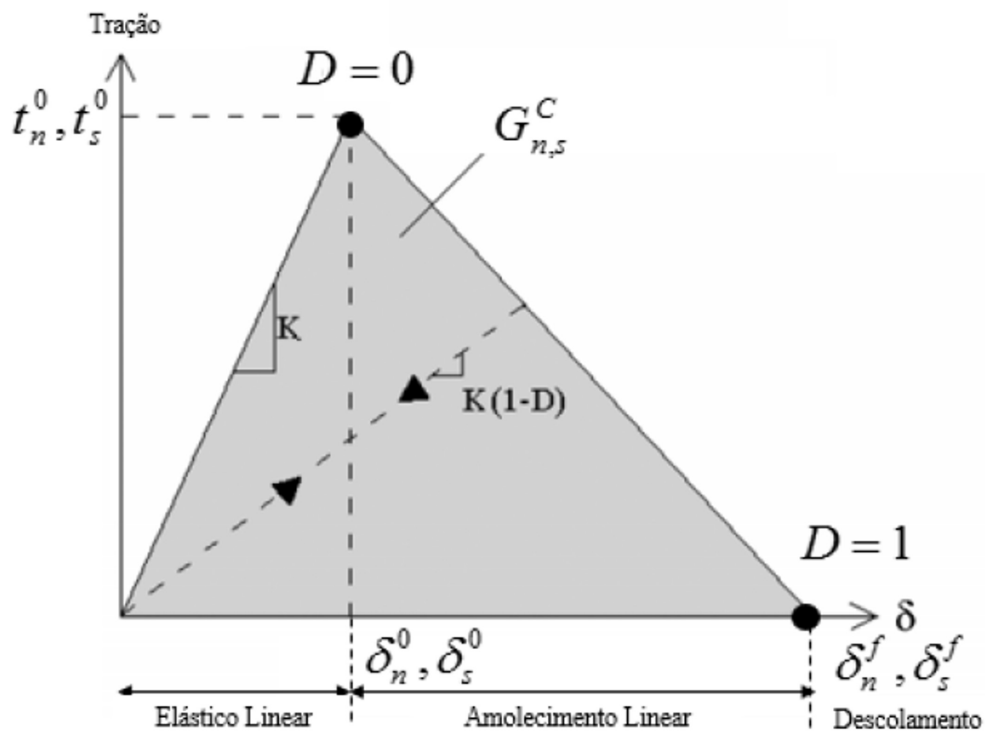
Segundo (SILVA, 2022) quando a espessura da cola é muito fina comparado ao resto da estrutura, pode-se igualar os termos da diagonal principal da matriz de rigidez com a propriedades mecânicas do adesivo, no caso  $K_{nn} = E$  e  $K_{ss} = K_{tt} = G$ . Eventualmente, por tratar de efeitos de

degradação, o dano sofrido pelo material deve ser contabilizado no modelo. Para tanto, adiciona-se na equação 14 o parâmetro D, que corresponde a danificação associada a lei de amolecimento, resultado é expresso pela equação a seguir:

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} D_n & 0 & 0 \\ 0 & D_s & 0 \\ 0 & 0 & D_t \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} K_n & 0 & 0 \\ 0 & K_s & 0 \\ 0 & 0 & K_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix} \quad (15)$$

O valor de D inicialmente é 0, porém com início da fissura esse valor vai aumentando, podendo chegar até no máximo o valor de 1, o qual representa a falha completa do material.

Figura 24 – Lei Tração-Separação Triangular.



Fonte: (SILVA, 2022)

Na figura 24, está representada uma curva esquemática da lei de amolecimento bilinear. É possível verificar que essa curva possui um patamar, que corresponde a resistência a tração ou cisalhamento do material. Até o material chegar a esse nível de sollicitação, o D é igual a zero e seu comportamento será elástico, e a energia total elástica absorvida é representada pela área pintada sob a curva no lado esquerdo do tracejado. Ao atingir o patamar, o material começa a degradar e sua rigidez decresce devido ao efeito do dano, a área pintada sob a curva na parte a direita do tracejado corresponde a energia total dissipada durante a danificação do material.

## 2.7 DESIGN OF EXPERIMENTS

No campo da engenharia é recorrente o trabalho com dados para tomada de decisões, dessa forma o conhecimento da estatística é fundamental para todos os engenheiros, uma vez que essa é a ciência que trata da coleta, apresentação e análise desses dados (MONTGOMERY; RUNGER; HUBELE, 2004).

Uma prática comumente utilizada para compreensão de algum tema ou na solução de problema relacionados a engenharia, é a emprego de métodos científicos e estatísticos. Para tanto, existem diversas metodologias, porém tratar cada assunto específico deve-se utilizar a técnica mais adequada.

Uma dessas metodologias é Design of Experiments (DoE) ou em português Projeto de Experimentos, que trata de como planejar e conduzir experimentos de maneira a extrair o máximo de dados com o menor número de análises possível.

Segundo Vanaja e Rani (2007), entre os pontos positivos em empregar essa metodologia estão:

- Melhor tratativa dos erros;
- Estudo de múltiplas variáveis simultaneamente, e seus efeitos.
- Obtenção de repostas mais confiáveis, com número de ensaios reduzidos, sem perda de qualidade;
- Identificar as variáveis mais importantes, que precisam ser controladas no experimento;
- Permite medir interações entre as variáveis.

Toda metodologia DoE possui algumas etapas em comum, primeiramente é necessário definir o problema que será estudado. Com o objetivo anterior definido, o próximo passo é listar as variáveis que irão influenciar nas repostas do problema. A terceira etapa será conduzir experimentos com diversas combinações dessas variáveis, e por fim, avaliar qual dessas combinações apresentam os resultados desejados. Porém, é comum obter-se um número de análises muito denso para serem avaliados, dessa forma faz-se necessário a utilização de metodologias de triagem para deixar o estudo mais ágil e objetivo. Uma dessas metodologias de triagem é o Plackett-Burman.

### 2.7.1 Design Plackett-Burman

Desenvolvido por R. L. Plackett e J.P Burman em 1946, com o objetivo de melhorar o processo de controle da qualidade a partir de tomadas de decisões mais inteligentes, obtidas através do estudo dos efeitos das variáveis de projeto (VANAJA; RANI, 2007). O método de projeto Plackett-Burman consiste na realização de experimentos com N variáveis e geram para N+1 amostras, sendo que o tamanho dessas amostras é múltiplo de 4 até 36 (SILVA, 2022).

Na figura 25 está exemplificado um modelo de projeto Plackett-Burman, note que a simbologia "+" e "-", correspondem respectivamente as valores máximos e mínimos dos fatores empregados em uma rodada,

Figura 25 – Modelo DOE/Plackett-Burman

<i>k</i>	<i>N</i>	Plackett-Burman DoE
11	12	++-++++--+-
19	20	++--++++-+-+-----+-
23	24	+++++--++--++-----
35	36	-+-++++--++++-+-+-----+-

Número de rodadas	Parâmetros da matriz de projeto (k=11)										
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>
1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1
2	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1
3	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1
4	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	-1
6	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	+1
7	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1
8	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1
9	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	-1
10	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1
11	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Fonte: (CAVAZZUTI, 2013)

Após finalizar as rodadas e obter os valores de cada amostra, aplica-se, do inglês o Main Effect (ME). Esse método tem como objetivo classificar a ordem de influência de das variáveis. Isso se faz através da equação 16.

$$ME_i = M_+^i - M_-^i \tag{16}$$

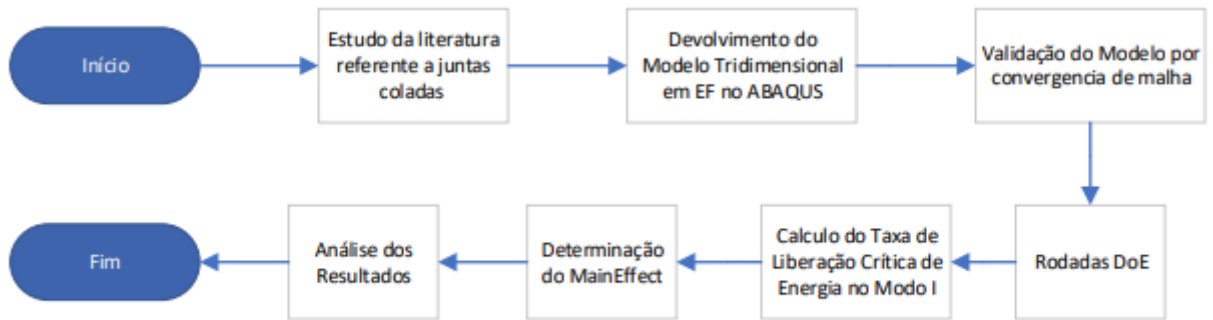
onde, *i* indica a variável,  $M_+^i$  corresponde a soma da médias das respostas das rodadas que possuem valores máximos, e  $M_-^i$  corresponde a soma da médias das respostas das rodadas que possuem valores mínimos,



### 3 METODOLOGIA

Para facilitar a visualização das etapas desse trabalho foi elaborado um fluxograma, conforme a figura 26.

Figura 26 – Fluxograma das etapas do trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme citado anteriormente, o objetivo do presente trabalho é extrapolar um dos estudos realizados pelo SILVA (2022) em sua tese de doutorado. No caso, avaliar os resultados de Main Effect de variáveis geométricas e de matérias na obtenção do  $G_{IC}$  para juntas do tipo DCB, obtidos por meio de uma análise via elementos finitos tridimensionais.

#### 3.1 GEOMETRIA DA JUNTA DCB

A geometria do modelo foi elaborada conforme os parâmetros do corpo de prova elaborado pelo SILVA (2022), representada pela figura 27. Salvo algumas adaptações que foram realizadas para que se ajustasse ao modelo computacional, e dessa forma obter uma geometria mais simplificada. No caso, foram desconsiderados os blocos e as lâminas metálicas, que possuem apenas características funcionais para o ensaio físico.

Vale ressaltar que a geometria está conforme as recomendações da ASTM D5528-13, segue na tabela 3 as dimensões geométricas empregadas no modelo computacional desse trabalho.

Tabela 3 – Dimensões da junta DCB empregada no modelo computacional.

	Dimensão (mm)
B	25
$a_0$	45
$t_A$	0,2
h	2,40
L	280

Fonte: Elaborado pelo autor



importante, é com relação a orientação das fibras, para esse aderente todas as camadas foram empilhadas de maneira as fibras estarem posicionadas em uma única direção, ou seja, orientação  $0^\circ$ .

Quanto as propriedades mecânicas do Texpreg HS 160 RS, utilizou-se os dados contidos na tese do SILVA (2022), apresentados na tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades Mecânicas do laminado empregado no modelo computacional.

Propriedades Mecânicas	SEAL textregistered Texpreg HS 160 RS
$E_1$ (MPa)	109000
$E_2$ (MPa)	8819
$E_3$ (MPa)	8819
$\nu_{12}$ (-)	0,342
$\nu_{13}$ (-)	0,342
$\nu_{23}$ (-)	0,380
$G_{12}$ (MPa)	4315
$G_{13}$ (MPa)	4315
$G_{23}$ (MPa)	3200

Fonte: (SILVA, 2022)

### 3.1.2 Propriedades do Adesivo

O adesivo utilizado foi o Denatite Nagase Chemtex®XNR6852E-3, que é um adesivo dúctil a base de epóxi. Segundo SILVA (2022), essa cola foi escolhida por se tratar de um material resistente ao impacto e também por possuir boa adesão em substratos compósitos como laminados de fibra de carbono. A tabela5, apresenta as propriedades mecânicas desse adesivo.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas do adesivo empregadas no modelo computacional.

Propriedades Mecânicas	Denatite Nagase Chentex XNR6852E-3
E (MPa)	1800
G (MPa)	665
$\nu$ (-)	0,35
$t_n^0$ (MPa)	48,50
$t_s^0$ (MPa)	44,9
$G_{IC}$ (N/mm)	9,2
$G_{IIC}$ (N/mm)	51

Fonte: (VARAJÃO, 2015)

### 3.1.3 Propriedades da Junta Colada

Para a Taxa de Liberação de Energia Crítica em Modo I na junta, utilizou-se a média dos valores obtidos por SILVA (2022), em ensaios de dois corpos de prova DCB e a aplicação do método CBBM. A tabela 6 os valores citados acima.

Tabela 6 – Propriedades Mecânicas da junta empregadas no modelo computacional.

$G_{IC}$ CP1(N/mm)	$G_{IC}$ CP2 (N/mm)	Média do $G_{IC}$ (N/mm)
2,08256	2,554761	2,318661

Fonte: (SILVA, 2022)

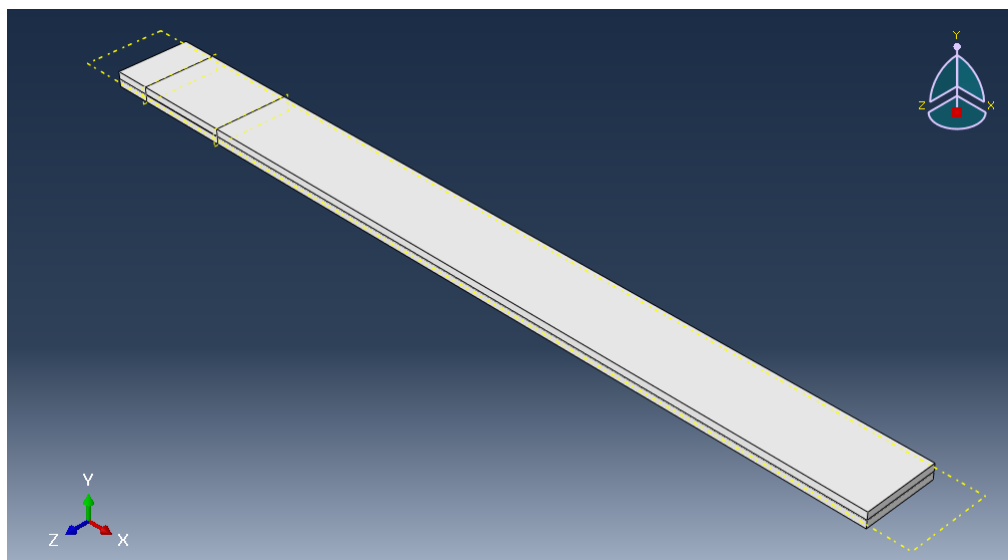
### 3.2 MODELO COMPUTACIONAL

O modelo computacional foi desenvolvido no software de modelagem e análise por elementos finitos Abaqus®. Optou-se pela utilização desse software pela disponibilidade da licença no Departamento de Engenharia Mecânica da UDESC e por conter integrado em seu sistema o módulo de simulação via CZM.

#### 3.2.1 Modelo Tridimensional

A primeira etapa foi modelar a geometria do objeto de análise no módulo "PART", no caso desse trabalho optou-se por usar a estrutura sólida gerada por extrusão. Vale o adendo que, o conjunto aderente/junta foi gerado como uma só parte e depois foram gerados planos de corte para delimitar os componentes da junta, tal situação é mostrada na figura 29. Optou-se por essa abordagem, por questão de facilidade, pois como as partes já estavam conectadas entre si, não foi necessário realizar montagem dos componentes nem estabelecer o comportamento dessas conexões posteriormente.

Figura 29 – Modelo tridimensional inteiro construído no módulo part.

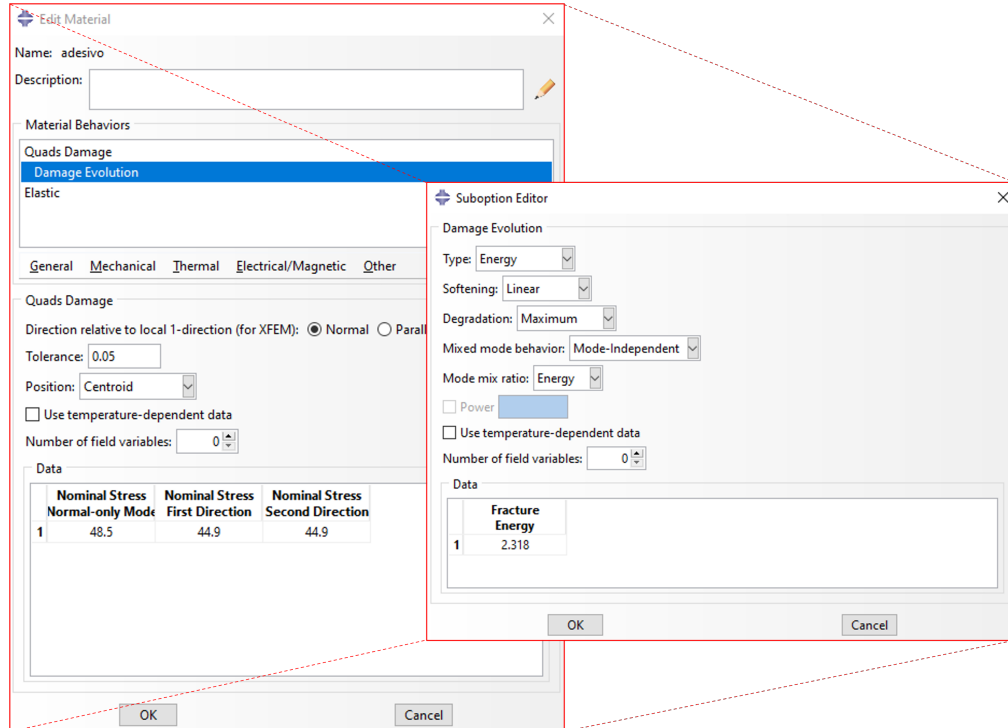


Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a geometria modelada e devidamente seccionada, no módulo "PROPERTY" definiu-se os materiais e as propriedades de cada componente. Vale a ressalva que nessa etapa foi definido o modelo de amolecimento a ser aplicado na análise, no caso desse estudo, foi selecionado a

lei de degradação bilinear, a imagem 30 ilustra a janela da interface gráfica onde é feita essa definição.

Figura 30 – Janela na interface gráfica para definições do comportamento do adesivo.



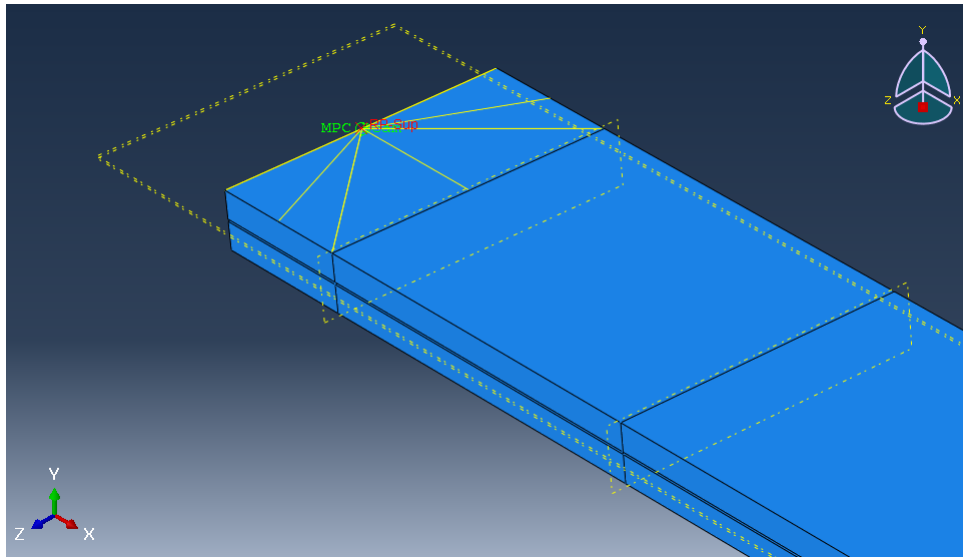
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nessa mesma janela é selecionado o modo de fratura a ser estudado, assim como é informado o seu valor.

### 3.2.2 Condições de Contorno

Para substituir os blocos metálicos do corpo de prova DCB, empregou-se no modelo “Multi-point Constrains” (MPC) para vigas, como é possível verificar na figura 31. Essa funcionalidade garante que a região se comportará como uma viga rígida e todos os efeitos agirão em um único ponto.

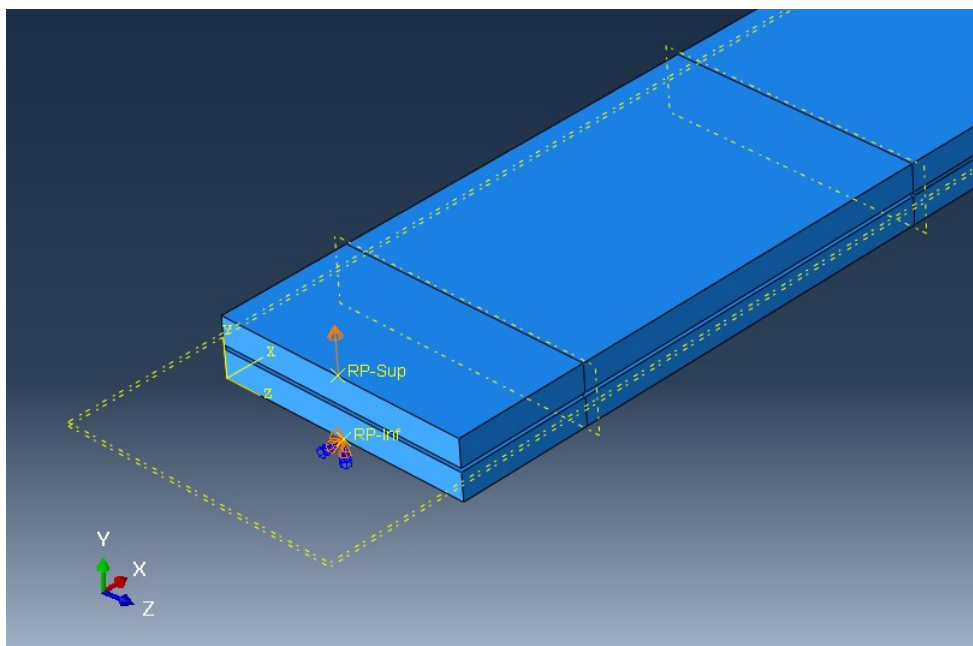
Figura 31 – Interação MPC beam.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dois pontos MPC's foram definidos no lado da pré-trinca, na região onde ficaria os blocos metálicos do ensaio físico, um no ponto superior central do aderente superior RP-SUP e outro no ponto inferior central do aderente inferior RP-INF. O ponto RP-SUP, foi submetido a um deslocamento prescrito de 100 mm, e as demais condições livres. E o ponto RP-INF, foi estabelecido liberdade de rotação no eixo Z e demais condições foram travadas, exemplificado na imagem 32.

Figura 32 – Condições de contorno



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.3 Critério de simulação e pós-processamento

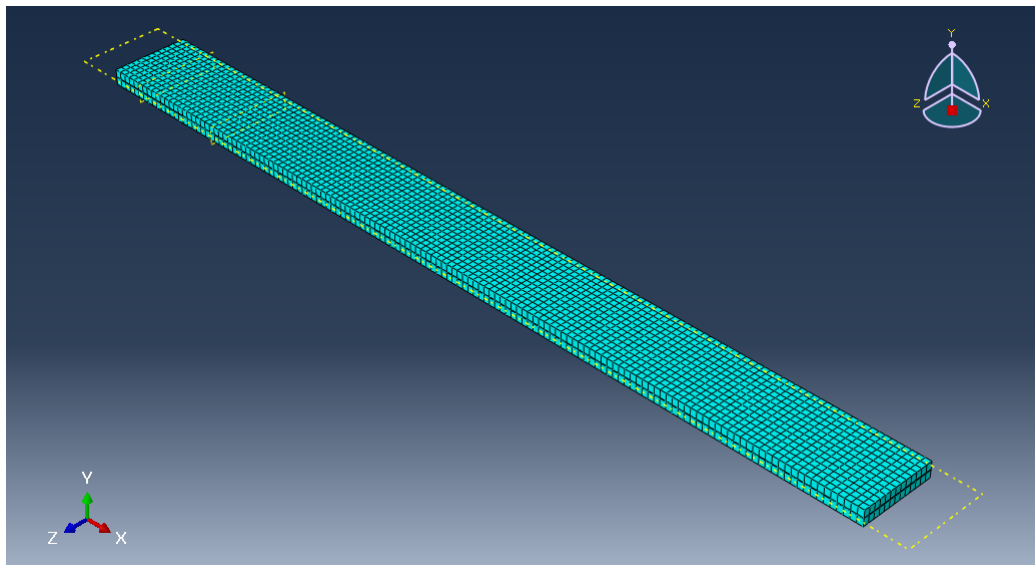
No módulo “STEP”, criou-se uma etapa da simulação, onde foi especificado que se trata de análise não linear, por conta do comportamento não linear do adesivo, nessa mesma janela foi informado os incrementos para esse tipo de simulação, tais valores foram preenchidos conforme SILVA (2022).

Ainda no módulo “STEP”, em “History Output Request” foi selecionado os dados de saída da simulação, no caso o presente trabalho coletou-se os históricos da força pelo deslocamento nos pontos da geometria onde foram definidos os MPC. Após concluída a simulação utilizou-se a função combine para gerar o gráfico  $P \times \delta$ .

### 3.2.4 Malha

A malha do modelo foi definida de no módulo "MESH", e foi disposta de forma homogênea por todo conjunto colado, conforme figura 33.

Figura 33 – Vista isométrica do modelo com a malha.



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

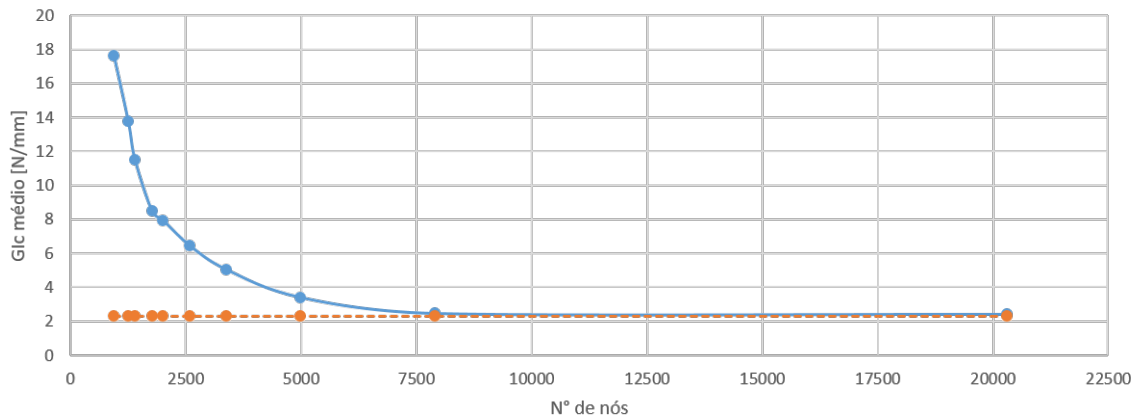
Ainda no nesse modulo foi selecionado o tipo de elemento para a malha de cada componente figura 35, para malha do laminado utilizou-se C3D8: sólido linear com 8 nós, e para a malha do adesivo o COH3D8: elemento coesivo tridimensional com 8 nós. Com os elementos da malha definidos o próximo passo foi a definição com relação a quantidade de elementos utilizar.

#### 3.2.4.1 Convergência de malha

Realizou-se uma análise de convergência de malha para a validação do modelo utilizado para simulações propostas pelo DoE. Dessa forma, o tamanho de elemento foi variado de 6 mm a 1,5 mm, em intervalos de 0,5 mm. O indicador de validação da malha foi o  $G_{IC}$  experimental

médio. Logo, realizou-se as simulações um total de nove simulações, variando apenas o número de elementos do modelo. Para um tamanho de elemento igual a 2 mm, o que gerou um total de 5174 elementos e 7896 nós, verificou-se a convergência do  $G_{IC}$  para a valor referência. Tal resultado está representado pela figura 34.

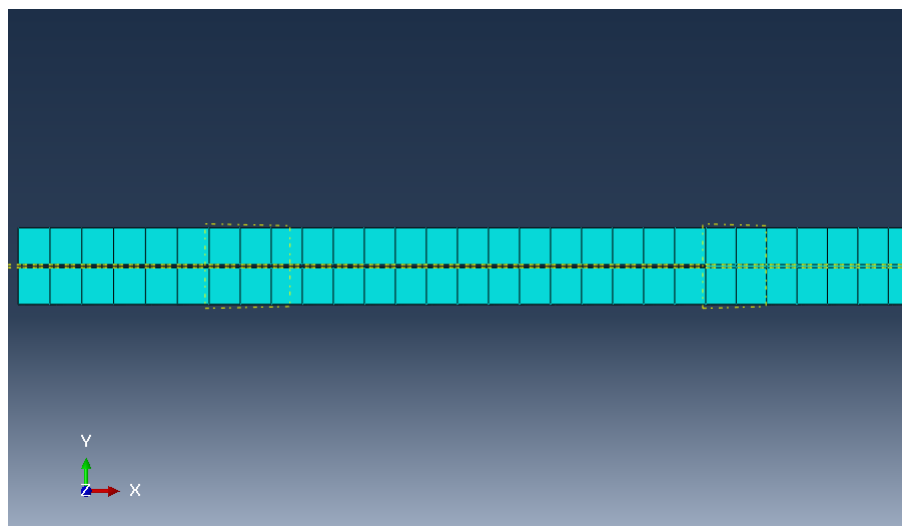
Figura 34 – Convergência de malha.



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

A imagem 35, apresenta uma vista do plano XY do modelo já com a malha definida. Nota-se que o aderente ficou com apenas um elemento de malha. Após definido a malha, o modelo foi liberado para rodar as simulações do DoE.

Figura 35 – Vista no plano X-Y DO modelo com malha.



Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

### 3.3 MATRIZ DOE

Para estudar as incertezas associadas ao processo de fabricação de juntas coladas de material compósito, e identificar as variáveis de maior influência na resposta do  $G_{IC}$  da junta



DCB, o SILVA (2022) empregou o método de projetos de experimentos (DoE) de Plackett-Buman, particularidades do método já foram abordadas no capítulo 2 seção 7. Sendo assim, utilizou-se a mesma matriz de rodadas, apresentadas pela tabela 7.

Tabela 7 – Rodadas via DoE das variáveis de estudo de juntas DCB

	$h$	$t_A$	$a_0$	$\delta$	$E_{11}$	$E_{22}$	$G_{12}$	$G_{23}$	$G_{IC}$	$E$	$G$
run 1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
run 2	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	-
run 3	+	+	-	-	-	+	-	-	+	-	+
run 4	+	-	+	-	+	+	+	-	-	-	-
run 5	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-
run 6	+	-	-	-	+	-	-	+	-	+	+
run 7	-	+	+	-	-	-	+	-	-	+	+
run 8	-	+	-	+	+	+	-	-	-	+	-
run 9	-	+	-	-	+	+	+	+	+	-	-
run 10	-	-	+	+	+	+	-	-	+	-	+
run 11	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	-
run 12	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+

Fonte: Adaptado de SILVA (2022).

Para um total de 11 variáveis, segundo a metodologia, são necessárias 12 rodadas de simulação. Na tabela 7, os valores das variáveis estão definidos pelos limite máximos "+" e os limites mínimos "-", esses valores estão especificados na tabela 8.

Tabela 8 – Incertezas associadas as variáveis geométricas e de materiais.

	Limite inferior	Limite superior
$h$	2,23968	2,58832
$t_a$	0,26991	0,36469
$a_0$	45,482	47,648
$\theta$	-0,856	1,19
$E_{11}$	107500	110500
$E_{22}$	7549	10089
$G_{12}$	4215	4415
$G_{23}$	2740	3660
$G_{IC}$	1,319	3,317
$E$	1481,4	1975,2
$G$	569,77	759,69

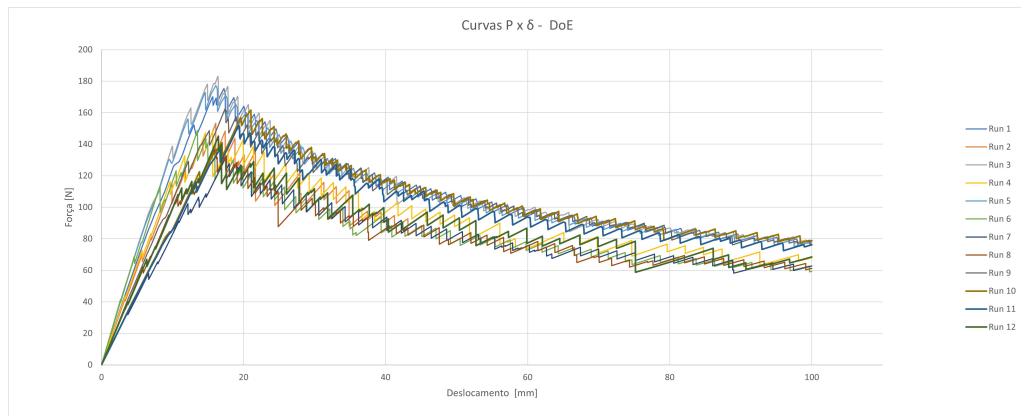
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para cada rodada numérica definida na tabela 7, obteve-se as curvas  $P \times \delta$ , e as respectivas resposta de Taxa de Liberação de Energia em Modo 1 por meio da método CBBM.

## 4 RESULTADOS

Após realizadas as simulações previstas pelo DOE, os dados de saída foram processados e obteve-se as curvas  $P \times \delta$  para cada uma das rodadas, apresentadas na figura 36. É possível observar que para o deslocamento prescrito de 100 mm não ocorreu a falha completa das juntas, pois é característico do rompimento completo a queda brusca nos valores da força durante o ensaio.

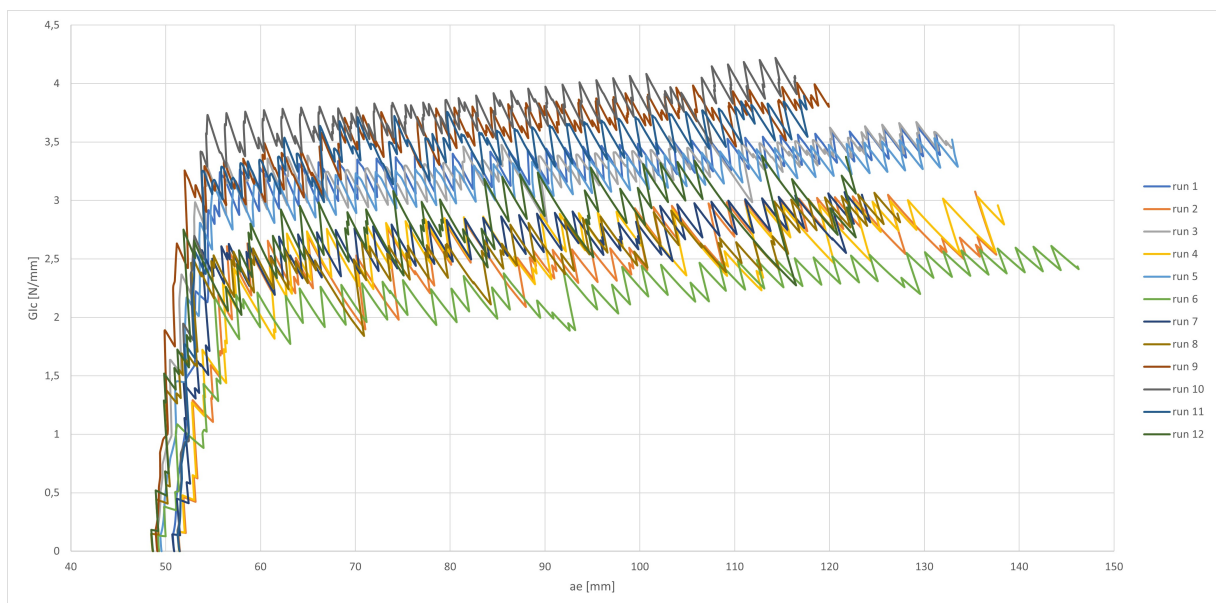
Figura 36 – Curvas  $P \times \delta$  resultantes das 12 rodadas do DOE.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na etapa seguinte, aplicou-se o método CBBM, para obtenção da Taxa de Liberação de Energia Crítica em Modo I. Na figura 37 apresenta-se as curvas do  $G_{IC}$  pelo respectivo valor de trinca equivalente da junta, obtidas em cada rodada do DoE.

Figura 37 – Curvas  $G_{IC} \times a_e$  obtidas pelo método CBBM.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O parâmetro tomado como base para os cálculos de Main Effect foi o  $G_{IC}$  médio, vinculado a cada rodada. Por meio da equação 16, obteve-se os índices de sensibilidade associados a cada variável. A tabela 9 apresenta os valores de  $G_{IC}$  médio para cada uma das rodadas.

Tabela 9 – Respostas numéricas por modelos tridimensionais das rodadas via DoE.

Rodadas	$G_{IC}$ médio [N/mm]
run 1	3,137
run 2	2,393
run 3	3,100
run 4	2,424
run 5	3,046
run 6	2,160
run 7	2,491
run 8	2,408
run 9	3,441
run 10	3,563
run 11	3,229
run 12	2,632

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 10 apresenta a relação entre as variáveis e seus respectivos níveis de influência, já organizadas de forma decrescente. Nota-se que, o parâmetro mais influente é Taxa de Liberação de Energia Crítica em Modo I da junta, essa era a resposta mais esperada, pois o teste DCB em si, tem a função de avaliar a fratura da junta, mais especificamente em Modo de abertura.

Tabela 10 – Ranking dos fatores de influência obtidos por MEF tridimensionais.

Parâmetros	Main Effect	Ranking
$G_{IC}$	0,8344	1
$E_{yy}$	0,3536	2
$h$	0,2207	3
$E$	0,1805	4
$a_0$	0,0756	5
$\theta$	0,0555	6
$G_{xy}$	0,0528	7
$E_{xx}$	0,0403	8
$G$	0,0234	9
$t_a$	0,0142	10
$G_{yz}$	0,0067	11

Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro ponto, é com relação aos quatro parâmetros mais influentes encontrados, esses possuem características diferentes. O  $G_{IC}$ , no caso é uma característica da junta como um todo, O módulo de elasticidade  $E_{yy}$  é uma propriedade de material do laminado. A espessura  $h$  refere-se

a uma característica geométrica da junta. E enfim, o módulo de elasticidade  $E$  é uma propriedade de material do adesivo.

#### 4.1 COMPARATIVO ENTRE ESTUDOS

Por meio da utilização de modelos bidimensionais de elementos finitos, SILVA (2022) obteve os seguintes valores de  $G_{IC}$  médio, apresentados na tabela 11.

Tabela 11 – Respostas numéricas por modelos bidimensionais das rodadas via DoE.

Rodadas	$G_{IC}$ médio [N/mm]
run 1	3,3624
run 2	1,4231
run 3	3,377
run 4	1,3405
run 5	3,3604
run 6	1,3243
run 7	1,3463
run 8	1,3337
run 9	3,362
run 10	3,3644
run 11	3,3602
run 12	1,3561

Fonte: Adaptado de (SILVA, 2022)

A partir dos valores de  $G_{IC}$  médios do SILVA (2022), para cada rodada do DOE, calculou-se o Main Effect de cada parâmetro, os resultados estão expressos na tabela 12.

Tabela 12 – Ranking dos fatores de influência obtidos por MEF bidimensionais.

Parâmetros	Main Effect	Ranking
$G_{IC}$	2,0104	1
$E_{22}$	0,6616	2
$E$	0,0226	3
$E_{11}$	0,0226	4
$t_a$	0,0164	5
$\theta$	0,0150	6
$a_0$	0,0139	7
$G_{23}$	0,0110	8
$G_{12}$	0,0092	9
$G$	0,0082	10
$h$	0,0065	11

Fonte: Adaptado de SILVA (2022)

A taxa de liberação de energia crítica em modo I, o módulo de elasticidade longitudinal no eixo Y e a direção das fibras no laminado, foram os parâmetros que ficaram com posições

iguais na classificação de influência em ambas análises, como é possível verificar na tabela 13. Alguns dos outros parâmetros, no caso a espessura do laminado e a do adesivo ficaram com uma diferença considerável de posição, Os demais parâmetros ficaram com classificações relativamente semelhantes.

Tabela 13 – Comparativo entre a classificação da influência de parâmetros obtidos por análises bidimensional e tridimensional.

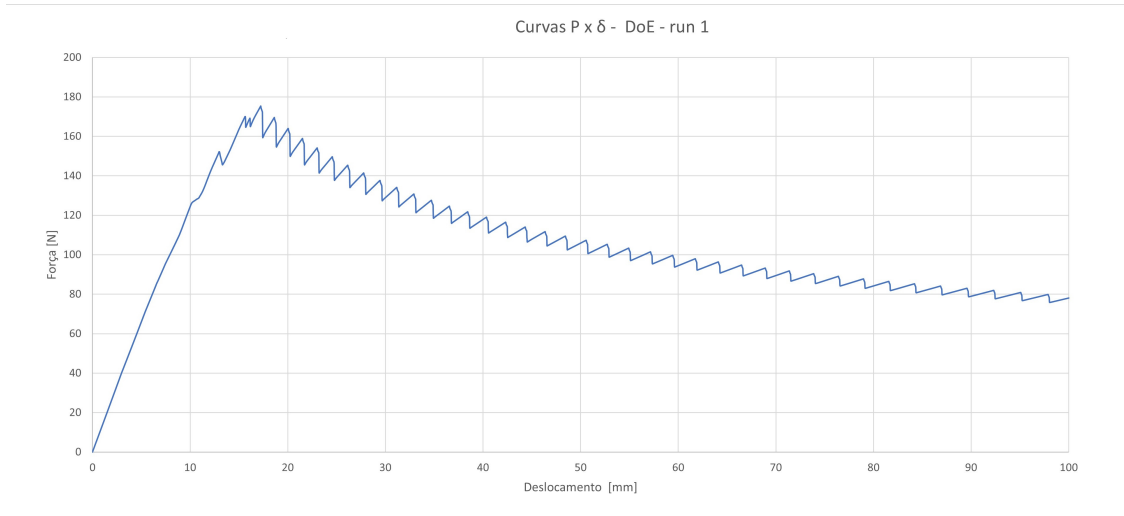
Ranking Main Effect	Modelo 2D	Modelo 3D
1	$G_{IC}$	$G_{IC}$
2	$E_{22}$	$E_{22}$
3	$E$	$h$
4	$E_{11}$	$E$
5	$t_a$	$a_0$
6	$\theta$	$\theta$
7	$a_0$	$G_{12}$
8	$G_{23}$	$E_{11}$
9	$G_{12}$	$G$
10	$G$	$t_a$
11	$h$	$G_{23}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como citado anteriormente faz sentido o  $G_{IC}$  ser o parâmetro mais influente em ambas as análises, uma vez que o ensaio DCB tem como principal objetivo avaliar a energia de fraturamento em modo I. O módulo de elasticidade  $E_{yy}$ , como segundo parâmetro mais influente também é um resultado coerente, por conta das características do carregamento que esse tipo de junta está sendo submetido, que nesse caso é a clivagem, e os sentidos de resistência a tração e a cisalhamento estão na direção do eixo Y.

A espessura do laminado  $h$ , apresentou resultados bastante distintos em cada um dos modelos, enquanto no modelo tridimensional esse parâmetro se encontra como o terceiro mais influente no modelo bidimensional esse é o último. Pode-se dizer que talvez uma das causas dessa divergência esteja associada a quantidade de elementos aplicadas em cada modelo, uma vez que a malha desenvolvida por (SILVA, 2022) permitiu o emprego de vários elementos ao longo a espessura do laminado.

Em contrapartida, o modelo desenvolvido nesse trabalho, utilizou apenas um elemento na espessura, o que pode ter influenciado em algumas respostas da simulação, como no caso da espessura do substrato que por ser a mesma do elemento pode ter influenciado desenvolvimento das tensões e deformações no modelo, e assim essa influência foi propagada para a resposta desejada, no caso  $G_{IC}$ .

Figura 38 – Curva  $P \times \delta$  rodada 1 do DoE.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 38, traz outra evidência da possível influência do tamanho de elemento finito nas respostas. A curva  $P \times \delta$  apresentada faz parte de uma das rodadas do DOE empregado nesse trabalho. Observa-se que na curva em questão há a presença de um “serrilhado” a partir do início da falha do adesivo. Possivelmente esse comportamento é relacionado a função do software Abaqus<sup>®</sup> para deletar os elementos coesivos que atingirem a tensão limite, causando uma queda abrupta da tensão. Essas hipóteses são apenas palpites, para garantir respostas com mais confiabilidade teria que ser empregado uma malha com maior número de elementos na espessura do laminado e novamente comparar os resultados.

## 5 CONCLUSÃO

No presente trabalho desenvolveu-se um modelo computacional para a simulação de juntas coladas, e posteriormente análises de incertezas associadas a esses tipos junta. A proposta foi reproduzir uma pesquisa de influência de variáveis incertezas que utilizou elementos finitos bidimensionais, e no atual trabalho utilizou-se modelos tridimensionais. Por meio do Abaqus<sup>®</sup>, foram realizadas as simulações seguindo o modelo de projeto de experimentos Plackett-Burman. A partir das análises dos resultados obtidos, e o comparativo feito com o trabalho do SILVA (2022), pode-se dizer que as respostas de sensibilidade dos parâmetros de uma junta adesiva DCB, apresentam resultados semelhantes em alguns parâmetros e divergentes em outros, para modelos computacionais de elementos finitos bidimensionais e tridimensionais. O que faz sentido, uma vez que, uma das análises faz uso do estado plano de tensão e ou outro do estado geral de tensão. Porém verificou-se a necessidade de implementar algumas melhorias no modelo de DCB empregado nesse trabalho, para avaliar se as respostas anteriores continuarão sendo validas.

### 5.1 MELHORIAS E TRABALHOS FUTUROS

Com base nos pontos discutidos anteriormente, as possíveis melhorias a serem empregadas em trabalhos futuros seriam:

- Elaborar um modelo computacional com um número maior de elementos na malha, utilizando uma malha mais refinada na região colada, e de preferência mais de um elemento na espessura do laminado;
- Para validação da malha, também levar em consideração a rigidez da junta DCB;
- Transcrever o modelo elaborado nesse trabalho para um script em Python<sup>®</sup> e implementá-lo, de forma a automatizar o processo de simulação das diversas rodadas do DoE.

## REFERÊNCIAS

ADAMS, R.D. **Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications**. Elsevier Science, 2021. (Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies). ISBN 9780323851435. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=-AQhEAAAQBAJ>>. Nenhuma citação no texto.

ALVES, Jonnas Santos; KENEDI, Paulo Pedro; BARROS, Silvio de. Evaluation of structural adhesive joints fracture toughness without crack measurement. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Laboratório de Hidrogênio, Coppe - Universidade Federal do Rio de Janeiro, em cooperação com a Associação Brasileira do Hidrogênio, ABH2, v. 26, n. 1, p. e12917, 2021. ISSN 1517-7076. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1517-707620210001.1217>>. Nenhuma citação no texto.

AZEVEDO, Ana Luísa Moreira. **Caraterização e comparação de materiais compósitos**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2017. Dissertação (Mestrado). Nenhuma citação no texto.

CALLISTER, William D J. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Abordagem Integrada**. 5. ed. Grupo GEN, 2019. Disponível em: <<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636991/>>. Acesso em: 28 nov. 2023. Nenhuma citação no texto.

CAVAZZUTI, Marco. **Optimization methods: from theory to design**. [S.l.: s.n.], 2013. ISBN 9783642311864. Nenhuma citação no texto.

FANECO, Tiago Manuel dos Santos. **Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductibilidade**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2014. Dissertação (Mestrado). Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.22/7908>>. Nenhuma citação no texto.

MACHADO, Rui Manuel Dias. **Análise numérica de juntas adesivas em degrau pelo Método de Elementos Finitos Estendido**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10400.22/11884>>. Nenhuma citação no texto.

MAJANO-MAJANO, Antonio José Lara-Bocanegra Almudena *et al.* Direct evaluation of mode I cohesive law of eucalyptus bonded joints. **Procedia Structural Integrity**, v. 37, p. 492–499, 2022. ISSN 2452-3216. ICSI 2021 The 4th International Conference on Structural Integrity. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321622001226>>. Nenhuma citação no texto.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C.; HUBELE, Norma F. **Estatística Aplicada à Engenharia**. 2ª edição. ed. [S.l.]: Grupo GEN, 2004. Nenhuma citação no texto.

REZIER, Randerson de Souza. **Estudo do comportamento mecânico de juntas coladas submetidas ao carregamento combinado com variação da rigidez do adesivo**. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia dos Materiais). Disponível em: <<http://www.bdt.d.uerj.br/handle/1/16500>>. Nenhuma citação no texto.



SILVA, Antonio Prado da. **Comportamento mecânico de juntas coladas de materiais compósitos: avaliação da influência das incertezas do processo de fabricação.**

Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022. Tese (Doutorado em Aeronaves). Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18148/tde-29062022-154527/pt-br.php>>. Nenhuma citação no texto.

TEIXEIRA, Luís Manuel Barbosa Santos. **Caracterização do comportamento mecânico de juntas de sobreposição simples coladas com adesivos estruturais.** Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2000. Dissertação (Mestrado). Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/12605/2/Texto%20integral.pdf>>. Nenhuma citação no texto.

TEXEIRA, João Miguel Dias. **MODELAÇÃO NUMÉRICA DOS ENSAIOS DCB E TDCB PARA DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE EM TRAÇÃO DE ADESIVOS ESTRUTURAIS.** Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Nenhuma citação no texto.

VANAJA, K.; RANI, R.H. Shobha. Design of experiments: Concept and applications of plackett burman design. **Clinical Research and Regulatory Affairs**, Taylor Francis, v. 24, n. 1, p. 1–23, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10601330701220520>>. Nenhuma citação no texto.

VARAJÃO, Joana Felipa Dias. **IMPACT OF CFRP ADHESIVE JOINTS FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY.** Dissertação (Mestrado) — Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/143396222.pdf>>. Nenhuma citação no texto.