



Análise de juntas adesivas tubulares do tipo varão-tubo sujeitas a esforços de tração para aplicações estruturais

ABILIO JOSE ARAUJO VIEIRA

julho de 2023

ANÁLISE DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES DO TIPO VARÃO-TUBO SUJEITAS A ESFORÇOS DE TRAÇÃO PARA APLICAÇÕES ESTRUTURAIS

Abílio José Araújo Vieira

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES DO TIPO VARÃO-TUBO SUJEITAS A ESFORÇOS DE TRAÇÃO PARA APLICAÇÕES ESTRUTURAIS

Abílio José Araújo Vieira

1170011

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho.

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

AGRADECIMENTOS

O culminar deste trabalho só foi possível graças ao valioso contributo proporcionado por diversas pessoas e entidades. Gostaria de agradecer em particular:

ao Professor Doutor Raul Campilho orientador deste trabalho, pelo apoio, pela disponibilidade na partilha de saber, rigor científico, revisão crítica, pela sua amizade e simpatia que desde sempre constituíram um estímulo para a conclusão desta dissertação,

ao Fernando Amaral e Edgar Alexandre, CEO e Diretor Geral, respetivamente, da Automotive Compounding Industry por sempre reunirem as condições para que pudesse realizar este mestrado,

aos meus pais, à minha irmã e aos meus amigos pelo apoio e encorajamento,

à minha companheira Silvéria pelo apoio e compreensão inestimável, pelos diversos sacrifícios suportados e pelo constante encorajamento a fim de prosseguir a elaboração deste trabalho, foram vitais no decorrer desta longa etapa.

página propositadamente em branco

RESUMO

As ligações adesivas têm vindo a substituir métodos tradicionais de ligação, tais como, a soldadura, ligações aparafusadas e rebitadas na conceção de estruturas mecânicas das mais variadas indústrias, destacando-se a aeronáutica, espacial e automóvel. Esse método de união apresenta várias vantagens relativamente aos outros métodos tais como, facilidade de fabricação, maiores cadências de produção, menores custos, facilidade em unir materiais diferentes, melhor resistência à fadiga, elevada capacidade de amortecimento de vibrações, melhor distribuição das tensões e elevada resistência a corrosão. As juntas adesivas tubulares têm aplicações variadas, como em treliças, eixos de máquinas e tubulações.

Esta dissertação teve com principal objetivo comparar o desempenho à tração, de juntas adesivas do tipo varão-tubo de alumínio (AW6082-T651), considerando a variação dos principais parâmetros geométricos: comprimento de sobreposição (L_0) e espessura do tubo (t_s), diâmetro do varão (v_d), existência de chanfro inteiro adesivo e tipo de adesivo (Araldite® 2015, Araldite® AV138 e SikaForce®472 FR). O método de Taguchi foi empregue na elaboração do desenho de experiências utilizado. Esta técnica permite identificar as variáveis que têm verdadeira influência no desempenho da junta. Para comparar o desempenho das juntas varão-tubo, procedeu-se a uma análise numérica utilizando um programa de elementos finitos (EF). As tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}) na camada adesiva foram obtidas através de modelos puramente elásticos. Através da utilização de modelos de dano coesivo, foi possível obter a variável de dano (*stiffness degradation* ou SDEG), a resistência e energia dissipada das juntas adesivas em estudo. Como resultado da aplicação do método de Taguchi, a configuração de junta que apresentou uma melhor combinação de propriedades foi a junta tubular com o Araldite® AV138, com um $L_0=40$ mm, $v_d=20$ e $t_s=3$ mm.

PALAVRAS-CHAVE

Adesivos, Juntas adesivas tubulares, Método de Elementos Finitos, Modelos de Dano Coesivo, Parâmetros geométricos.

página propositadamente em branco

ABSTRACT

Adhesive bonding has been replacing traditional jointing methods such as welding, bolting and riveting connections in the design of mechanical structures in industries like automotive, aerospace and aeronautics. This joining method has several advantages over other methods such as ease of manufacture, higher production rates, lower costs, ease of joining different materials, higher fatigue resistance, high vibration damping capacity, better stress distribution and high corrosion resistance. Tubular adhesive joints have varying applications, such as in trusses, machine axles, and piping.

This thesis compares the tensile performance of adhesively-bonded aluminum rod-tube joints (AW6082-T651), considering the variation of the main geometric parameters: overlap length (L_o), tube thickness (t_s), rod diameter (v_d), adhesive fillet and type of adhesive (Araldite® 2015, Araldite® AV138 and SikaForce® 472 FR). The Taguchi's method was employed in the elaboration of the design of experience applied. This technique allows identifying the variables that have a real influence on the mechanical performance of the joint. To compare the behavior of the rod-tube joints, a numerical analysis was done through a finite element program (FE). Peeling (σ_y) and shear (τ_{xy}) stresses in the adhesive layer were obtained applying a purely elastic models. Through the use of cohesive zone model it was possible to obtain the damage variable (stiffness degradation or SDEG), the strength and dissipated energy of the adhesive joints under study. As a result of applying the Taguchi method the adhesive joint that showed the better overall performance in configuration with Araldite® AV138, $L_o=40$ mm, $v_d=20$ and $t_s=3$ mm.

KEYWORDS

Adhesive, Tubular adhesive joint, Finite element method, Cohesive zone models, Strength prediction, Geometric parameters.

página propositadamente em branco

ÍNDICE

RESUMO	VII
ABSTRACT	IX
ÍNDICE.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABELAS	XVII
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XIX
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivo	1
1.3. Organização.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Métodos de ligação para projeto mecânico.....	3
2.1.1. Contextualização da ligação de estruturas	3
2.1.2. Tipos de ligações mais comuns e respectivas aplicações	4
2.1.2.1. Ligações soldadas	4
2.1.2.2. Ligações aparafusadas e rebitadas.....	4
2.1.2.3. Ligações adesivas	5
2.1.3. Análise comparativa dos principais tipos de ligação.....	6
2.1.4. Tendências atuais.....	6
2.2. Ligações adesivas.....	8
2.2.1. Caracterização das ligações adesivas	8
2.2.2. Tipos de adesivos	12
2.2.2.1. Epóxidos	12
2.2.2.2. Fenólicos.....	12
2.2.2.3. Acrílicos	12
2.2.2.4. Poliuretano.....	13
2.2.2.5. Poliimida.....	13
2.2.3. Configurações de junta mais comuns	13
2.2.4. Aplicações estruturais.....	14
2.3. Previsão de resistência de ligações adesivas	15
2.3.1. Mecânica dos meios contínuos.....	15
2.3.2. Mecânica da fratura	15
2.3.3. Mecânica do dano.....	16
2.3.4. Modelos de dano coesivo	16
2.3.4.1. Tipos de leis coesivas.....	17
2.3.4.2. Determinação dos parâmetros coesivos.....	18

2.3.5. Método de elementos finitos estendido	20
2.3.6. Estado-da-arte.....	20
2.4. Ligações adesivas tubulares	20
2.4.1. Contextualização	22
2.4.2. Configurações de junta tubular mais comuns	23
2.4.3. Procedimentos de fabrico de juntas tubulares.....	24
2.4.4. Procedimento numérico de modelação de juntas tubulares	25
2.4.5. Estado-da-arte.....	27
2.4.5.1. Trabalhos experimentais	27
2.4.5.2. Trabalhos analíticos.....	28
2.4.5.3. Trabalhos numéricos	29
3. DESENVOLVIMENTO	31
3.1. Objetivos e procedimentos	31
3.2. Geometria da junta	31
3.3. Materiais selecionados.....	32
3.3.1. Substratos	32
3.3.2. Adesivos	32
3.3.2.1. Araldite® AV138	32
3.3.2.2. Araldite® 2015	33
3.3.2.3. SikaForce®472 FR	33
3.4. Taguchi	34
3.5. Técnica numérica	38
3.5.1. Modelo de dano coesivo.....	38
3.5.2. Formulação do modelo	39
3.5.3. Leis coesivas para simulação do adesivo	40
3.5.4. Validação da técnica numérica	40
3.5.5. Criação do modelo numérico axisimétrico	41
3.5.5.1. <i>Part</i>	41
3.5.5.2. <i>Property</i>	42
3.5.5.3. <i>Sections</i>	43
3.5.5.4. <i>Assembly</i>	43
3.5.5.5. <i>Step</i>	43
3.5.5.6. <i>Load</i>	44
3.5.5.7. <i>Mesh</i>	44
3.5.5.8. <i>Job</i>	45
3.5.5.9. <i>Visualization</i>	45
3.6. Estudo paramétrico numérico.....	45
3.6.1. Desenho de experiências	45
3.6.2. Resistência da junta	47
3.6.3. Análise da variável de dano	50
3.6.4. Tensão de arrancamento	52

3.6.5. Tensões de corte	56
3.6.6. Previsão da energia dissipada	60
3.6.7. Análise dos resultados obtidos	63
4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - a) Ligação adesiva vs. b) ligação rebitada (adaptado de [4]).	3
Figura 2 - Exemplos de configuração de ligações soldadas (adaptado de [7]).	4
Figura 3 - Tipo de ligações empregues numa estrutura automóvel [11].	7
Figura 4- Combinação de vários tipos de materiais numa carruagem de comboio [13].	7
Figura 5- Tipos de ligações em aeronaves [15].	8
Figura 6 - Ligação adesiva [12].	8
Figura 7 - Representação esquemática do angulo de contacto (adaptado de [18]).	9
Figura 8 - A adesiva, B coesiva C rotura do substrato [18].	10
Figura 9 - Propagação da fissura [25].	16
Figura 10 - Elementos coesivos para simular uma espessura nula de material: a) aproximação local e b) aproximação contínua (modificado de [25]).	17
Figura 11 - Influência do tamanho da malha nos valores de resistência de junta adesiva utilizando elementos coesivos [25].	17
Figura 12 - Modelo coesivo de dano triangular [26].	18
Figura 13 - Geometria do provete DCB [52].	19
Figura 14 - Geometria do provete ENF [52].	20
Figura 15 - Configuração mais comuns de juntas adesivas tubulares [9].	23
Figura 16 - Juntas cilíndricas em varões/veios [9].	23
Figura 17 - Parâmetros α de uma junta tubular de sobreposição [67].	24
Figura 18 - Localização de orifício para escape de ar [68].	24
Figura 19 - Fabrico de juntas tubulares por injeção [69].	25
Figura 20 - Imperfeições possível de ocorrer durante o processo de fabrico de uma junta adesiva tubular[69].	25
Figura 21 - Representação de juntas tubulares desenhadas em 2D axisimétrico e em 3D [71,72].	26
Figura 22 - Configurações utilizadas no estudo [74].	27
Figura 23 - a) Vista isométrica da junta varão-tubo; b) corte da junta; c) representação do chanfro adesivo interior.	31
Figura 24 - Representação esquemática das etapas do método de Taguchi.	37
Figura 25 - Representação de leis de tração separação [96].	38
Figura 26 - Representação gráfica da lei coesiva triangula [97].	38
Figura 27 - Modelo coesivo de forma triangular [26].	39
Figura 28 - a) Desenho técnico da junta tubular utilizada no estudo; b) modelo numérico; c) ensaio experimental de uma das juntas tubulares.	40
Figura 29 - Interface em árvore do <i>programa</i> Abaqus®.	41
Figura 30 - Definição do tipo de modelo.	42
Figura 31 - a) Junta adesiva tubular modelada no ABAQUS®; b) partição de uma junta adesiva tubular com $L_0=20$ mm no ABAQUS®.	42
Figura 32 - Representação do <i>programa</i> ABAQUS® da geometria da junta na etapa <i>Sections</i> .	43
Figura 33 - Definição de incrementos para análise no ABAQUS®.	43
Figura 34 - Condições fronteira na simulação.	44
Figura 35 - Detalhe da malha de EF na zona de sobreposição para L_0 de 20 mm.	44
Figura 36 - Representação do <i>programa</i> ABAQUS® da ferramenta <i>Monitor</i> do comando <i>Job</i> .	45

Figura 37 - Curva P - δ de um dos modelos.	45
Figura 38 – Influência dos fatores e respectivos níveis em P_{max}	48
Figura 39 - Configuração do teste de confirmação para P_{max}	49
Figura 40 - Curva P - δ para a configuração do teste de confirmação.	49
Figura 41 – SDEG nas camadas de adesivo para P_{max} : a) Condição 25; b) condição 27.	50
Figura 42 - Influência dos fatores e respectivos níveis no dano para P_{max}	52
Figura 43 - Tensão de arrancamento da condição 11.	52
Figura 44 - Tensão de arrancamento da condição 1.	53
Figura 45 - Influência dos fatores e respectivos níveis em σ_y/τ_{avg}	54
Figura 46 - Configuração do teste de confirmação para σ_y/τ_{avg}	55
Figura 47 - Curva σ_y/τ_{avg} para a configuração do teste de confirmação.	56
Figura 48 - Curva de corte da condição 11.	56
Figura 49 - Curva de corte da condição 1.	57
Figura 50 - Influência dos fatores e respectivos níveis em τ_{xy}/τ_{avg}	58
Figura 51 - Configuração do teste de confirmação para τ_{xy}/τ_{avg}	59
Figura 52 - Curva τ_{xy}/τ_{avg} para a configuração do teste de confirmação.	60
Figura 53 - Representação simplificada do cálculo de U	61
Figura 54 - Influência dos fatores e respectivos níveis em U	62
Figura 55- Configuração do teste de confirmação para U	63
Figura 56 - Peças tubulares em automóveis [102].	64

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Ligas de alumínio utilizadas em rebites aeroespaciais (adaptado de [8]).	4
Tabela 2- Exemplos de aplicações de ligações adesivas [10, 11].	5
Tabela 3- Análise comparativa entre os vários processos de ligação (adaptado de [9]).	6
Tabela 4 - Representação do tipo de solicitações mecânicas que uma junta adesiva [18].	10
Tabela 5 - Métodos utilizados para avaliar a tensão de corte de uma ligação adesiva (adaptado [19]).	11
Tabela 6 - Principais adesivos estruturais e não estruturais (adaptado [18]).	12
Tabela 7- configurações típicas das juntas adesivas (adaptado de [23, 24]).	13
Tabela 8 - Exemplos de aplicações de ligações adesivas estruturais [10].	14
Tabela 9- Estudos computacionais realizados em juntas adesivas entre 2018-2022.	21
Tabela 10 - Etapas seguidas na simulação numérica utilizando MDC de juntas adesivas tubular. .	26
Tabela 11 - Trabalhos experimentais realizados sobre juntas tubulares adesivas.	27
Tabela 12 - Estudos analíticos realizados sobre juntas tubulares.	28
Tabela 13 - Estudos recentes realizados a juntas tubulares adesivas.	29
Tabela 14 - Propriedades da liga de alumínio AW6082-T651 [91].	32
Tabela 15 - Propriedades mecânicas do epóxico Araldite® AV138 [65].	32
Tabela 16 - Propriedades mecânicas do epóxico Araldite® 2015 [65].	33
Tabela 17 - Propriedades mecânicas do SikaForce®472 FR [65].	33
Tabela 18 - Propriedades coesivas dos adesivos em estudo [65].	40
Tabela 19 - Valores de P_{max} [N] experimentais e numéricos, para os três adesivos em função de L_o , e respetiva diferença relativa [65].	41
Tabela 20 - Níveis selecionados para cada fator em estudo.	46
Tabela 21 - Matriz ortogonal L_{27} .	46
Tabela 22 - Resultados de P_{max} para cada condição em estudo.	47
Tabela 23 - Resultados da ANOM para a resposta P_{max} .	47
Tabela 24 - Análise da variância (ANOVA) para a resposta P_{max} .	48
Tabela 25 - Valores de SDEG e de área em dano para cada condição em estudo.	51
Tabela 26 - Resultados da ANOM para a resposta dano para P_{max} .	51
Tabela 27 - Resultados de σ_y/τ_{avg} para cada condição em estudo.	53
Tabela 28 - Resultados da ANOM para a resposta σ_y/τ_{avg} .	54
Tabela 29 - Análise da variância (ANOVA) para a resposta σ_y/τ_{avg} .	55
Tabela 30 - Resultados de τ_{xy}/τ_{avg} para cada condição em estudo.	57
Tabela 31 - Resultados da ANOM para a resposta τ_{xy}/τ_{avg} .	58
Tabela 32 - Análise da variância (ANOVA) para a resposta τ_{xy}/τ_{avg} .	59
Tabela 33 - Resultados de U para cada condição estudada.	61
Tabela 34 - Resultados da ANOM para a resposta U .	62
Tabela 35 - Análise da variância (ANOVA) para a resposta U .	62
Tabela 36 - Tabela resumo com todas as propriedades das condições de teste.	63

página propositadamente em branco

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS	<i>British Standards</i>
CLS	<i>Critical longitudinal strain</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
EF	Elementos Finitos
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
JSS	Junta de sobreposição simples
JSD	Junta sobreposição dupla
JTS	Junta tubular de sobreposição simples
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MDC	Modelos de Dano Coesivo
MEFX	Método de elementos finitos extendido
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica

Lista de Símbolos

σ	Tensão principal	MPa
σ_f	Tensão de rotura à tração	MPa
σ_y	Tensão de cedência à tração ou arrancamento	MPa
τ	Tensão de rotura ao corte	MPa
τ_y	Tensão de corte	MPa
τ_{xy}	Tensão de cedência ao corte	MPa
d_{se}	Diâmetro externo do substrato exterior	mm
d_{si}	Diâmetro externo do substrato interior	mm
E	Módulo de elasticidade longitudinal/Módulo de Young	GPa
G	Módulo de elasticidade transversal	GPa
G_c	Tenacidade	N/mm
G_{Ic}	Tenacidade à tração	N/mm
G_{IIc}	Tenacidade ao corte	N/mm
L	Comprimento da junta	mm
L_0	Comprimento de sobreposição	mm
L_s	Comprimento dos substratos	mm
L_T	Comprimento total da junta adesiva tubular	mm
P_{max}	Força máxima aplicada	N

t_A	Espessura do adesivo	mm
t_{se}	Espessura do substrato exterior	mm
t_{si}	Espessura do substrato interior	mm

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

As ligações adesivas têm sido amplamente empregues em áreas tão distintas tais como a indústria aeroespacial e aeronáutica, de defesa, automóvel, de componentes de eletrónica, da construção civil, do calçado e das madeiras. A utilização de juntas adesivas em aplicações industriais tem aumentado circunstancialmente nos últimos anos, em detrimento dos métodos tradicionais de ligação tais como a soldadura, ligações aparafusadas e rebitadas. A facilidade de fabricação, maiores cadências de produção (caso dos cianoacrilato), menores custos, facilidade em unir materiais diferentes, melhor resistência à fadiga, elevada capacidade de amortecimento de vibrações, melhor distribuição das tensões e elevada resistência a corrosão, são algumas das razões que justificam a expansão das ligações adesivas. De entre os tipos de ligações adesivas mais comuns podem-se referir, as juntas de sobreposição simples, sobreposição dupla, com chanfro interior e em degrau [1]. Outros tipos de juntas adesivas, como por exemplo as juntas tubulares, apresentam aplicações específicas, como por exemplo para os nós de ligação de estruturas em treliça, eixos de máquinas e chassis de veículos como por exemplo aviões e automóveis. A inexistência de normas internacionais (ISO, DIN, BS e ASTM) para avaliar a resistência à tração, torção, fadiga e impacto das ligações adesivas tubular, associada a necessidade de rapidamente terminar os projetos de engenharia, leva a que os engenheiros recorram a ferramentas numéricas que permitem o estudo das ligações adesivas com recurso ao Método de Elementos Finitos (EF).

1.2. Objetivo

Neste trabalho pretende-se analisar numericamente juntas adesivas tubulares do tipo varão-tubo sujeitas a esforços de tração, considerando 3 adesivos de ductilidade distinta e diferentes geometrias (comprimento de ligação e espessura do tubo exterior). O trabalho a realizar é baseado na utilização do Método de Elementos Finitos (EF) acoplado a Modelos de Dano Coesivo (MDC) para estudo das tensões no adesivo em regime elástico, variável de dano e previsão da resistência das juntas tubulares. Pretende-se analisar o efeito de diferentes variáveis geométricas e definir a geometria ótima para carregamentos de tração.

1.3. Organização

Esta dissertação é dividida em 4 capítulos distintos. O capítulo 1 centra-se no enquadramento do tema, objetivos propostos e organização da estrutura da dissertação. No capítulo 2 realiza-se uma revisão bibliográfica sobre a temática das ligações adesivas. A informação presente neste capítulo incide sobre os diferentes métodos de união, tipos de juntas, adesivos estruturais, aplicações, modos de rotura de juntas adesivas, métodos numéricos mais utilizados para prever da resistência das juntas adesivas, configurações de juntas tubulares, processos de fabrico de juntas tubulares e os tipos de esforços que estas juntas estão sujeitas. No último subcapítulo passa-se em revista alguns estudos experimentais, analíticos e numéricos recentes realizados a juntas adesivas tubulares. O capítulo 3 corresponde ao estudo numérico realizado, aqui serão apresentados os

resultados obtidos e respetiva análise. No capítulo 4 são apresentadas as conclusões obtidas e sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Métodos de ligação para projeto mecânico

2.1.1. Contextualização da ligação de estruturas

A crescente complexidade dos produtos, a exigência a nível funcional cada vez maior, as limitações de processamento e os custos associados, levam a que os produtos sejam divididos em vários componentes [2]. Automóveis, aviões, navios, computadores, televisões, são exemplos de produtos compostos por diferentes componentes ligados entre si [3]. Atualmente existe um vasto número de técnicas de ligação à escolha, sendo que a sua seleção está dependente do tipo aplicação e dos materiais/componentes a ligar. Ligações aparafusadas e rebitadas tendem a absorver melhor as vibrações, contudo as ligações soldadas apresentam um melhor custo/benefício. As ligações adesivas, por outro, lado têm-se tornado populares nos últimos anos representando em muitos casos uma alternativa viável às ligações soldadas e aparafusadas devido à sua facilidade de aplicação e não alteração da aparência do produto. Esta técnica de união permite ainda unir metais sem provocar alteração das suas propriedades metalúrgicas. Na Figura 1 é possível observar as diferenças ao nível da área de ligação e esforços entre uma ligação adesiva e uma ligação rebitada [3].

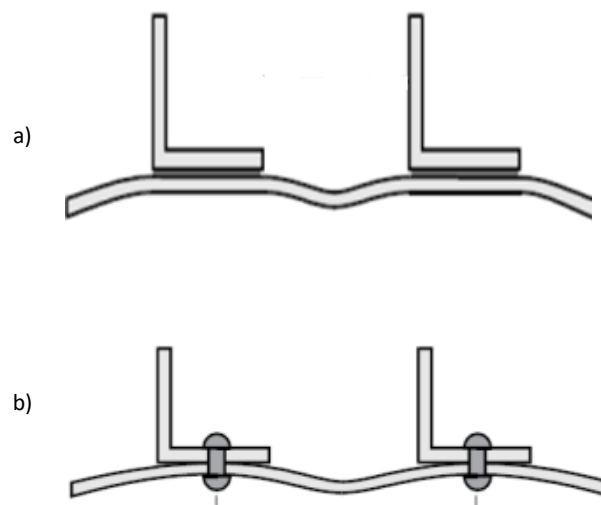
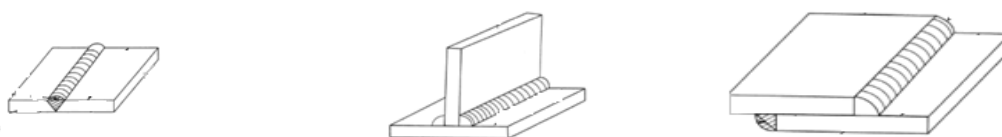


Figura 1 - a) Ligação adesiva vs. b) ligação rebitada (adaptado de [4]).

2.1.2. Tipos de ligações mais comuns e respectivas aplicações

2.1.2.1. Ligações soldadas

A soldadura é processo de união de duas peças por aquecimento ou fusão local da junção, podendo ou não ser empregues materiais de adição [5]. Este processo de ligação é o mais utilizado a nível industrial podendo dar-se como exemplo de aplicações: vasos de pressão, pontes, estruturas prediais, aeronaves e naves espaciais, vagões ferroviários e aplicações gerais para além da construção naval, automobilística, elétrica, eletrônica e de defesa, vias-férreas e instalações nucleares [6].



a) Junta topo a topo chanfro em v

b) Junta em T

c) Junta de sobreposição

Figura 2 - Exemplos de configuração de ligações soldadas (adaptado de [7]).

2.1.2.2. Ligações aparafusadas e rebitadas

O uso de rebites na construção aeroespacial é uma prática bem estabelecida. O primeiro uso de rebites de alumínio em aeronaves foi em 1936 nos Estados Unidos pela Cherry Aeroespacial [8]. A Tabela 1 apresenta algumas das propriedades mecânicas das ligas de alumínio que são normalmente usadas em rebites aeroespaciais. Esses rebites geralmente são equivalentes em composição química e propriedades mecânicas aos materiais que unem [8].

Tabela 1- Ligas de alumínio utilizadas em rebites aeroespaciais (adaptado de [8]).

Ligas de alumínio	Têmpera	Tensão de cedência (MPa)	Resistência a tração (MPa)	Resistência ao corte (MPa)
1100	O	34	90	34
2017	T4	276	427	124
2024	T3	345	483	283
2117	T4	165	296	193
2219	T851	352	455	285
5056	O	152	290	179
7050	T7451	469	524	240
7075	T6	503	572	159

Os rebites são usados não apenas na construção de aeronaves, mas também rotineiramente na indústria da construção. Na construção estes são utilizados em pontes e edifícios, para ligação entre vigas metálicas. Para serem considerados para fins estruturais, os rebites precisam ser feitos de aço temperado e revenido com uma resistência à tração mínima de 820 MPa [8].

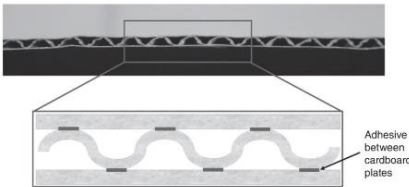
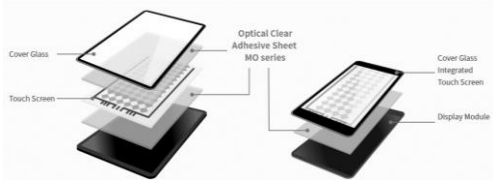


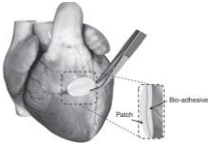

2.1.2.3. Ligações adesivas

As ligações adesivas constituem uma técnica bastante utilizada atualmente. As principais indústrias que utilizam estas ligações são:

- Automóvel,
- Naval,
- Calçado,
- Construção,
- Medicina,
- Eletrónica,
- Aeronáutica.

Uma extensa lista de aplicações pode ser consultada em livros de referência [9-11]. Na Tabela 2 encontram-se exemplos de aplicações desta técnica de ligação.

Tabela 2- Exemplos de aplicações de ligações adesivas [10, 11].

Sector	Exemplo	Descrição
Embalagens	 A cross-sectional diagram of a corrugated cardboard structure. It shows two flat cardboard plates with a wavy adhesive layer between them. A label points to the adhesive with the text 'Adhesive between cardboard plates'.	Ligação efetuada no cartão canelado
Telecomunicação	 A diagram illustrating the assembly of a mobile phone. On the left, the components are shown separated: 'Cover Glass', 'Touch Screen', and 'Display Module'. In the center, an 'Optical Clear Adhesive Sheet MO series' is shown being applied. On the right, the components are shown fully assembled into a phone.	Montagem de componentes de telemóveis
Indústria do calçado	 A photograph showing a shoe sole being prepared for adhesive application. A metal can of adhesive is visible, and a brush is being used to apply the adhesive to the sole of a shoe.	Colagem da sola de sapato
Indústria da construção	 A photograph of a modern building with large glass windows. To the right, a technical diagram shows a cross-section of a window frame with adhesive used to secure the glass panes.	Envidraçamento
Medicina	 A medical illustration of a human heart. A circular 'Bio-adhesive Patch' is shown being applied to the surface of the heart.	Colocação de bio adesivo
Desporto	 A photograph of a cyclist in motion on a road bike. The image highlights the use of composite materials in the construction of the bicycle frame and wheels.	Colagem de compósitos

2.1.3. Análise comparativa dos principais tipos de ligação

A ligação de materiais por intermédio de adesivos tem aumentado substancialmente nos últimos anos devido às exigências do mercado. Fatores como utilização de multimateriais na otimização de projetos, redução de peso, economia de energia e combustível têm levado a um aumento da utilização de ligações adesivas [12]. A utilização de processos de ligação por adesivos oferece inúmeras vantagens quando comparados aos sistemas de junta tradicionais, como resistência à corrosão, redução de peso e eliminação da concentração de tensão. Outros benefícios incluem melhoria da resistência à fadiga, elevada capacidade de amortecimento de vibrações e amortecimento sonoro. No entanto, obter essas vantagens requer um projeto de junta adesiva específico que melhore o desempenho e restrinja as suas limitações ao nível de solicitações mecânicas, nomeadamente pela redução das tensões de arrancamento. A necessidade de tratamento adequado das superfícies antes da união, associado a um processo moroso e com um controle rigoroso parâmetros de processo, são outras das desvantagens desta técnica. A Tabela 3 apresenta uma análise comparativa dos diferentes tipos de ligações.

Tabela 3- Análise comparativa entre os vários processos de ligação (adaptado de [9]).

Ligas de alumínio	Rebites	Soldadura	Adesivos
Maquinagem preliminar	F	E	E
Limite na combinação de metais	F	F	E
Preparação da superfície	E	B	F
Ferramentas	E	F	F
Distribuição de tensões	F	M	E
Estanqueidade	F	M	B
Taxe de desenvolvimento de tenções	E	E	F
Distorção da montagem	M	F	E
Maquinagem final	E	M	E
Resistência a solventes	E	E	M
Efeito da temperatura	E	E	F
Facilidade de reparação	B	F	F
Qualificação dos operadores	E	B	E

Legenda: E - excelente; B- bom; M-moderado; F- fraco

2.1.4. Tendências atuais

A tendência atual em projeto é combinar diferentes materiais (aço, ligas de metais leves, compósitos ou polímeros) criando uma estrutura altamente otimizada. Esta abordagem requer em simultâneo o uso de técnicas de união diferentes, como soldadura, deformação plástica e ligação adesiva. Na Figura 3 apresenta-se uma estrutura automóvel onde foram empregues diferentes técnicas de ligação.

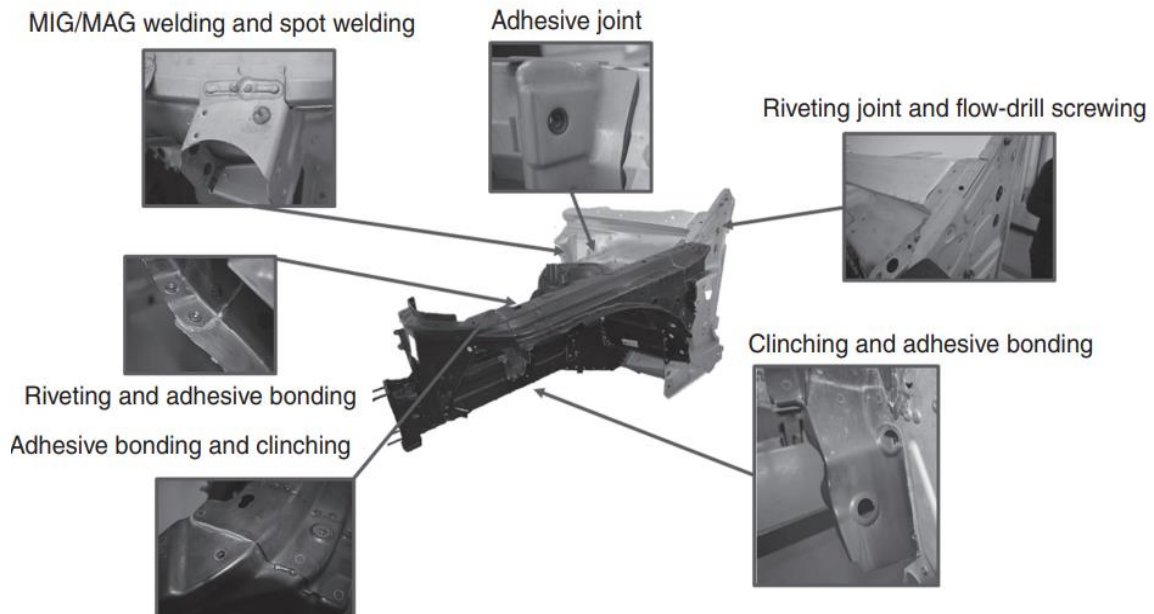


Figura 3 - Tipo de ligações empregues numa estrutura automóvel [11].

Quando comparada com as indústrias aeroespacial, marítima e automóvel, a indústria ferroviária apresenta uma lenta adoção de novos materiais, como por exemplo, compósitos em componentes estruturais de suporte de carga. De facto, até há bem pouco tempo os comboios eram exclusivamente feitos de estruturas de metal unidas por processos de soldadura, rebites e parafusos [11]. As novas regulamentações ambientais, combinado com o custo do combustível, tem levado a que este setor de mercado opte por materiais leves para aumentar a eficiência e diminuir as emissões [13]. Na Figura 4 encontra-se a estrutura de uma carruagem de comboio atual onde são combinados diferentes materiais.

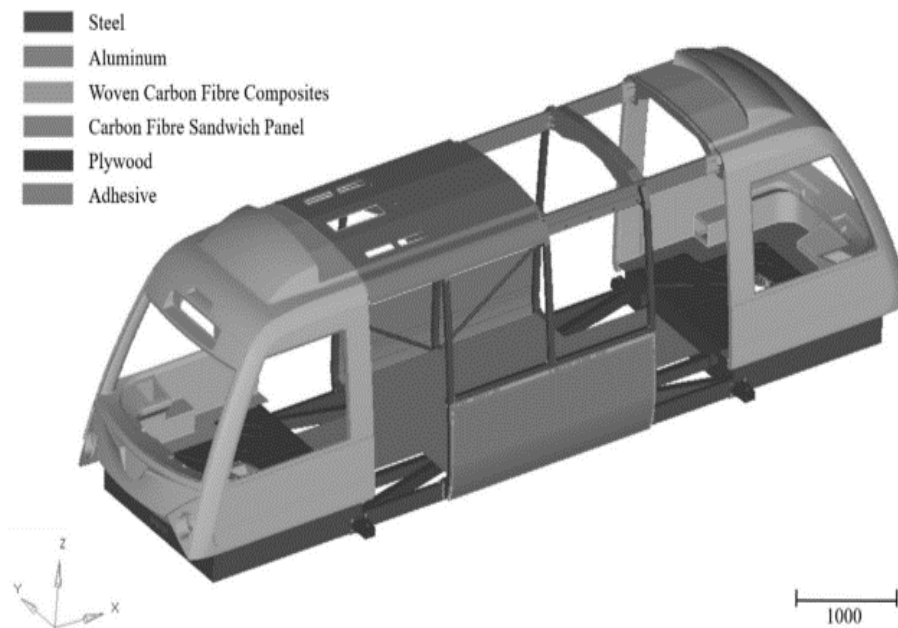


Figura 4- Combinação de vários tipos de materiais numa carruagem de comboio [13].

Em aeronaves, a rebitagem é a principal tecnologia de união de estruturas principais. No entanto, com o aumento do uso de materiais compósitos, a ligação adesiva tornou-se indispensável para unir estruturas secundárias. Define-se estrutura secundária como uma estrutura que, em caso de falha funcional não seja prejudicial para a segurança da aeronave [14]. Na Figura 5 apresenta-se alguns tipos de ligações em aeronaves.

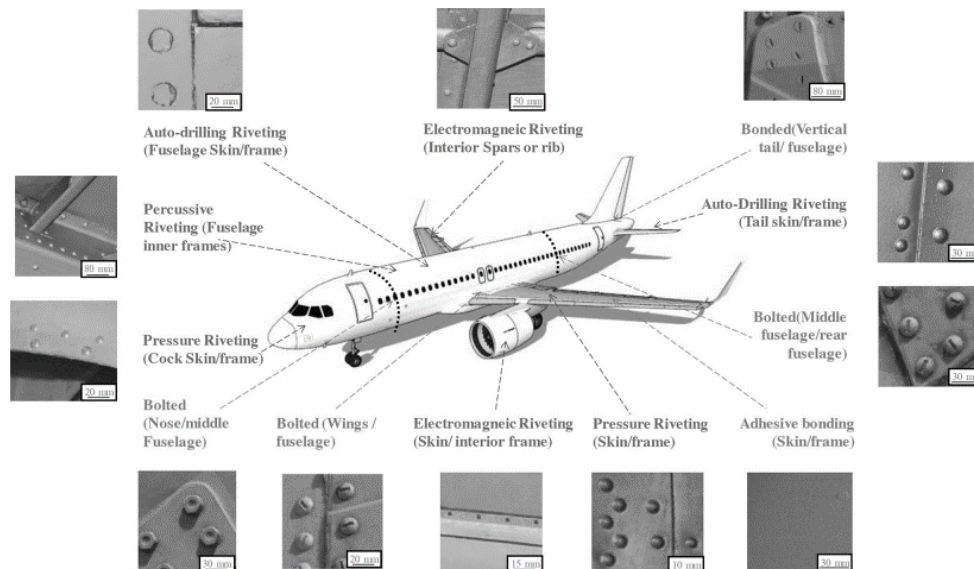


Figura 5- Tipos de ligações em aeronaves [15].

2.2. Ligações adesivas

2.2.1. Caracterização das ligações adesivas

Junta adesiva ou ligação adesiva são os termos utilizados na designação de uma união por intermédio de um adesivo. Os materiais, que são ligados entre si através do adesivo, dá-se o termo de substratos ou aderentes, sendo que o termo substrato é geralmente utilizado para designar os componentes da junta antes da ligação, e o termo aderentes como designação após a ligação. Os substratos são por norma materiais metálicos ou compósitos, enquanto os adesivos são, por natureza, materiais poliméricos com elevada polaridade [16]. Na Figura 6 encontra-se uma configuração típica da uma junta adesiva.

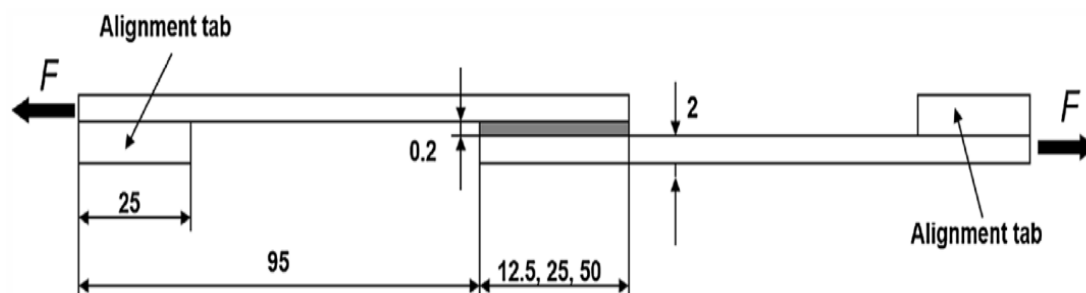


Figura 6 - Ligação adesiva [12].

O tratamento adequado da superfície do substrato é um dos fatores mais importantes para garantir a durabilidade e resistência mecânica das juntas adesivas de alto desempenho. Para uma boa preparação da superfície: (1) a superfície deve ser limpa de qualquer contaminação ou material que possa interferir com a ligação adesiva, (2) o adesivo deve molhar a superfície do substrato, (3) a preparação da superfície deve possibilitar e promover a formação de ligações químicas e/ou físicas através do substrato/ interface adesivo [14, 17].

Para que ocorra a molhagem do substrato pelo adesivo, deve ser garantido que a tensão superficial do adesivo é inferior à tensão superficial (ou energia) do substrato. Uma boa adesão ocorre quando o ângulo de contacto é inferior a 60 °. Na Figura 7 apresenta-se uma representação esquemática do ângulo de contacto.

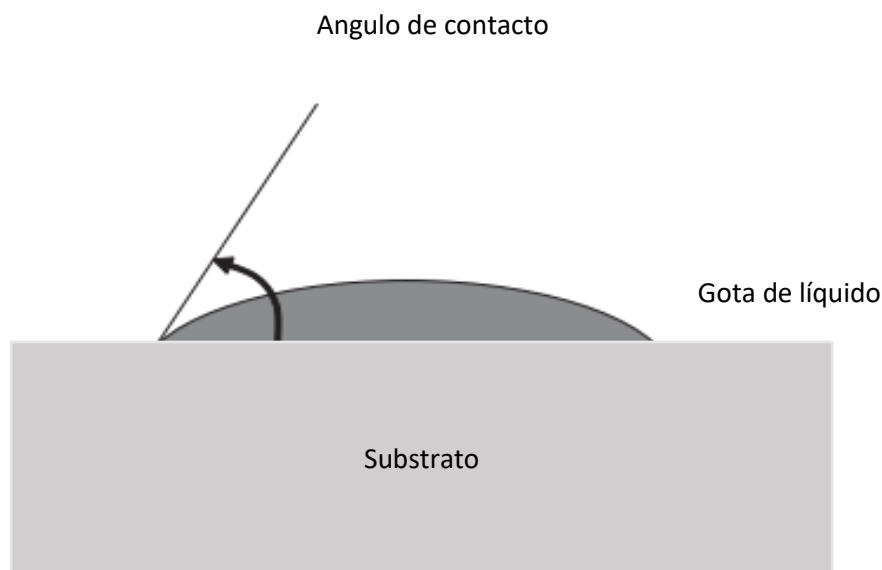


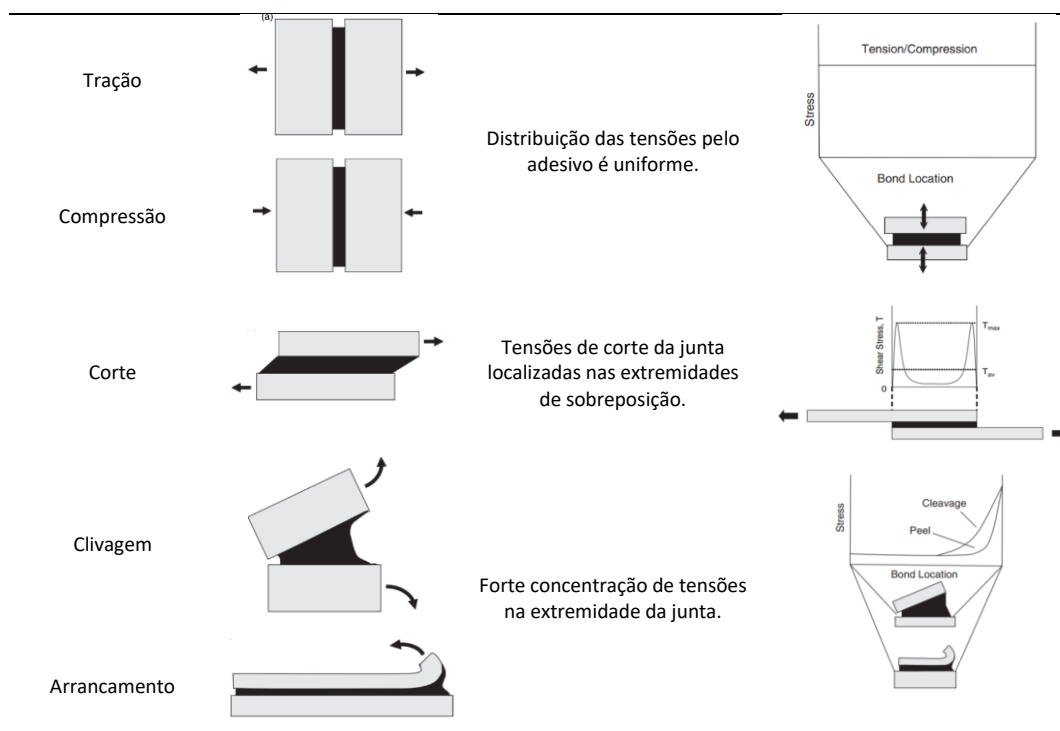
Figura 7 - Representação esquemática do ângulo de contacto (adaptado de [18]).

Numa ligação adesiva os esforços mais comuns são:

- Tração,
- Compressão,
- Corte,
- Clivagem (*cleavage*),
- Arrancamento (*peel*).

O principal requisito no projeto de uma ligação adesiva é que o adesivo seja maioritariamente submetido a esforços ao corte. As solicitações de clivagem e arrancamento são altamente prejudiciais e devem ser evitadas. A Tabela 4 sumaria os possíveis esforços a que uma junta adesiva pode ser sujeita, assim com a distribuição de tensões associada a cada tipo de esforço.

Tabela 4 - Representação do tipo de solicitações mecânicas que uma pode ocorrer numa junta adesiva [18].



As juntas adesivas podem apresentar três modos de rotura distintos nomeadamente, rotura coesiva no interior do adesivo, rotura adesiva na interface entre o adesivo e o substrato, e rotura de um dos substratos. Na Figura 8 estão representando esquematicamente os modos de rotura das ligações adesivas.

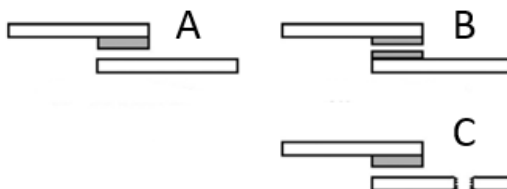


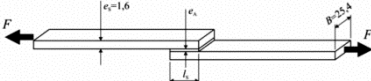

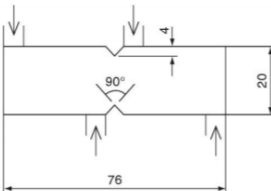
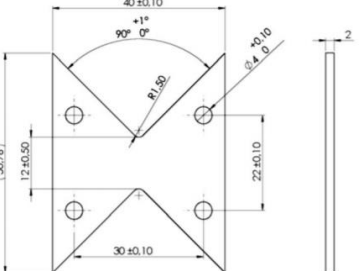
Figura 8 - A adesiva, B coesiva C rotura do substrato [18].

A rotura coesiva ocorre quando a resistência da ligação é mais forte que a resistência interna do adesivo. Por vezes a rotura ocorre por uma combinação dos referidos modos, designando-se neste caso por rotura mista. A avaliação das propriedades mecânicas ao corte das ligações adesivas pode ser efetuada através dos seguintes ensaios:

- Junta de sobreposição simples (JSS),
- Ensaio *Thick Adherend Shear Test* (TAST),
- Ensaio Iosipescu ou *V-Notched beam shear method*,
- Ensaio de borboleta ou *Notched plate shear method* (Arcan).

Na Tabela 5 é efetuada uma comparação entre os vários métodos utilizados para avaliar a tensão de corte de uma ligação adesiva, tendo em conta a aplicabilidade do método, custos e dificuldade da preparação dos ensaios.

Tabela 5 - Métodos utilizados para avaliar a tensão de corte de uma ligação adesiva (adaptado [19]).

Ensaio				
	JSS	TAST	V-Notched beam	Arcan
				
Propriedades	Resistência ao corte	Resistência ao corte/ módulo de corte	Resistência ao corte/ módulo de corte	Resistência ao corte/ módulo de corte
Dimensões típicas	Comprimento: 100 mm, largura: 25 mm, espessura do substrato: 2 mm, comprimento de sobreposição: 25 mm	Comprimento: 110 mm, largura, 25 mm, espessura do substrato: 12 mm, junta de sobreposição: 5x25 mm ²	Comprimento: 76 mm, largura: 20 mm, largura do entalhe: 12 mm, espessura do substrato: 5 mm	Comprimento: 52 mm, largura: 40 mm, largura do entalhe: 12 mm, espessura do substrato: 6 mm
Custo do fabrico	Baixo	Baixo-moderado	Moderado	Moderado
Aquisição de dados	Simples	Simples	Simples	Simples
Exatidão (estimada)	Moderada	-	Baixa - moderada (10 a 20%)	Baixa - moderada (10 a 20%)
Norma de ensaio aplicável	BS 5350: parte C5 /EN 1465/ EN ISO 9664/ ASTM D 1002/ ASTM D 3166	ISO 11003 / ASTM D 3165	Sem norma de ensaio para adesivos	Sem norma de ensaio para adesivos

2.2.2. Tipos de adesivos

Os adesivos podem ser classificados quanto à composição química, método de reação, forma física, custo, aplicação final e função. Quanto à função, os adesivos podem ainda ser subdivididos em estruturais e não estruturais. Os adesivos estruturais apresentam elevada resistência, comparativamente aos não estruturais, sendo utilizados em ligação onde é requerido elevada responsabilidade mecânica [20]. Para se considerar um adesivo como estrutural, este tem de apresentar uma resistência ao corte superior a 7 MPa [21]. Na Tabela 6 encontram-se os principais adesivos estruturais e não estruturais utilizados na indústria.

Tabela 6 - Principais adesivos estruturais e não estruturais (adaptado [18]).

Estruturais	Epóxidos	Não estruturais	Inorgânicos
	Fenólicos		Poliésteres
	Acrílicos		Silicone
	Poliuretano		Polisulfureto
	Poliimida		Policloropreno

2.2.2.1. Epóxidos

Os adesivos epóxidos podem ser formulados para atender a uma ampla variedade de requisitos de ligação, como por exemplo ser projetados para funcionarem a temperaturas baixas (por exemplo, -150°C) e altas (por exemplo, 200°C). Estes polímeros apresentam excelente ligação a aços, alumínio, cobs e compósitos. As temperaturas de cura relativamente baixas, baixa volatilidade, baixa contração e excelente resistência mecânica são algumas da vantagem deste tipo de adesivos [22].

2.2.2.2. Fenólicos

Os adesivos fenólicos resultam de um processo de condensação entre um fenol ou resol e um formaldeído. Quando utilizados em metais, estes apresentam resistência mecânica satisfatória, boa resistência à temperatura, boa estabilidade dimensional e boa resistência a fungos. Embora sejam relativamente baratos, os adesivos fenólicos apresentam alguns aspetos negativos tais como baixa resistência ao impacto e vibrações, formando assim uma junta frágil [23].

2.2.2.3. Acrílicos

Os adesivos acrílicos são obtidos por um processo de polimerização por adição. Estes apresentam excelente adesão a metais, compósitos e a maioria dos termoplásticos mesmo quando a superfície dos mesmos não é submetida previamente a um tratamento superficial. Destes adesivos podem ser subdivididos em cianoacrilatos e anaeróbicos. Informação adicional sobre estes polímeros pode ser consultada na referência [22].

2.2.2.4. Poliuretano

Os adesivos poliuretanos (PU) são obtidos por uma reação de policondensação entre um poliol e um isocianato. Alterando a proporções de poliol e isocianato podem-se obter PU mais rígidos ou mais flexíveis. Geralmente, a temperatura de transição vítrea (T_g) dos poliuretanos é superior à dos silicones, mas inferior à dos epóxidos estruturais. As características mais marcantes destes adesivos são boas propriedades mecânicas a baixas temperaturas, alta capacidade de absorção de energia, alta resistência em ambientes agressivos, estabilidade térmica e resistência química [22].


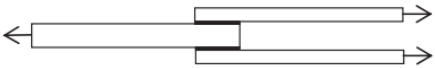





2.2.2.5. Poliimida

As Poliimidias apresentam temperaturas de serviço até 290°C. Estes adesivos, utilizados sobre a forma de filme, são curados sob pressão a 175 - 200°C e conferem uma resistência ao corte de 15 MPa à temperatura máxima admissível de serviço. Esta classe de adesivos não é utilizada amplamente devido aos elevados custos e dificuldades de processamento [22].

2.2.3. Configurações de junta mais comuns

As juntas adesivas apresentam diversas geometrias que, ajustadas à aplicação pretendida, permitem melhorar a resistência da ligação. Contudo, nem sempre a melhor geometria é aplicada, visto que a geometria ideal pode ser de difícil fabrico ou ter um custo associado elevado. Na Tabela 7 apresentam-se as configurações típicas das juntas adesivas.

Tabela 7- configurações típicas das juntas adesivas (adaptado de [23, 24]).

A junta de sobreposição simples é fácil de fabricar e é aplicada extensivamente na indústria. O adesivo é solicitado principalmente a esforços de corte. A principal desvantagem decorre das elevadas concentrações de tensões nas extremidades da sobreposição.	
Para reduzir os efeitos de flexão, pode-se utilizar a sobreposição dupla. Os tempos de produção são, no entanto, superiores aos observados para sobreposição simples.	
Com chanfro exterior diminui-se a concentração de tensões nas extremidades e obtém-se uma distribuição mais uniforme das mesmas. A necessidade de maquinar os substratos aumenta o tempo e custo de produção.	
Juntas com chanfro interior reduzem o gradiente de esforço ao longo do adesivo.	
As cobre juntas são sujeitas a esforços de arrancamento.	
A cobre-junta dupla reduz o aparecimento de esforços de flexão, mas implica tempo de fabrico mais elevado.	
As juntas topo a topo são as mais simples de fabricar, mas apresentam elevadas tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da ligação.	






2.2.4. Aplicações estruturais

As principais indústrias onde são utilizados adesivos para aplicações estruturais são:

- Automóvel,
- Naval,
- Construção,
- Aeronáutica.

Na Tabela 8 encontram-se exemplos de aplicações estruturais de ligações adesivas.

Tabela 8 - Exemplos de aplicações de ligações adesivas estruturais [10].

Sector	Exemplo	Descrição
Naval		Montagem de um convés de uma embarcação
Aeroespacial		Revestimento de um tanque criogénico
Petroquímica		União de tubos utilizados em plataforma petrolífera
Construção		Junção de placas de cimento de elevado desempenho
Automóvel		Ligação de uma estrutura em compósito ao metal na zona do B pilar

2.3. Previsão de resistência de ligações adesivas

Como falado anteriormente a utilização de juntas adesivas, tem ganhado um crescente interesse devido às suas vantagens relativamente às técnicas de convencionais de ligação, nomeadamente estruturas mais leves e concentrações de tensões reduzidas. Como consequência, a previsão da resistência de juntas adesivas tem sido extensivamente estudada. Os métodos de previsão da resistência das juntas podem ser divididos em métodos analíticos e numéricos. Os primeiros focam-se em avaliações iniciais de projeto ou juntas simples. Os métodos numéricos são mais utilizados quando o projeto da junta é complexo [25].

2.3.1. Mecânica dos meios contínuos

Na abordagem da mecânica dos meios contínuos, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, previstos pelas análises de elementos finitos (EF), são geralmente usados no critério de falha e são comparados com os valores admissíveis dos materiais [26]. Neste modelo, o adesivo e os substratos são modelados com elementos contínuos, assumindo que o adesivo está perfeitamente ligado aos substratos, não tendo em conta as propriedades de adesão da interface.

Esta técnica desconsidera conceitos energéticos necessários para prever a resistência para adesivos dúcteis. Além disso, os valores de tensão nas zonas de singularidade tendem a aumentar com o refinamento da malha sem que a convergência de valores seja alcançada. Em outras palavras, os valores de resistência obtidos por estes modelos são fortemente dependentes do refinamento da malha [25].

2.3.2. Mecânica da fratura

O conceito deste modelo foi baseado no trabalho de Griffiths, que foi posteriormente refinado. A mecânica da fratura prevê a carga crítica que leva à propagação de um defeito existente quando sujeito a uma carga estática ou a taxa de crescimento do defeito quando este está sobre ação de uma carga cíclica [25,27]. Estes defeitos (fendas) são causados durante os processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. A mecânica da fratura está limitada a problemas com defeitos inicial, de modo que os critérios impostos possam propagá-lo. Assim, em estruturas intactas sem defeitos iniciais, a coalescência da fratura não é possível [25].

No ramo da indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projeto com tolerância ao dano, que se baseava em conceitos da fratura linear elástica. No caso de materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final [28]. Como a teoria da mecânica da fratura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, então foi criada a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) por Hutchinson [29] e por Rice [30] para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia, G_I ou G_{II} , e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura, G_c [31], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fratura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte e também pelo efeito dos substratos, pelo que se torna necessário introduzir o conceito de envelope da fratura. Este fornece uma função para a rotura que

envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes na sollicitação.

2.3.3. Mecânica do dano

A mecânica do dano utiliza parâmetros de dano que diminuem gradualmente a rigidez do material até uma dada tensão/deformação. Este método tem em conta diferentes mecanismos de dano, tais como rotura coesiva do adesivo e rotura do substrato. Estes métodos também são capazes de determinar a propagação de fenda através de caminhos aleatórios e podem fornecer previsões precisas da resistência em juntas adesivas com condições arbitrárias de geométrica e de materiais [25]. Na Figura 9 apresenta-se uma comparação entre a propagação de uma fenda numericamente e uma experimental.

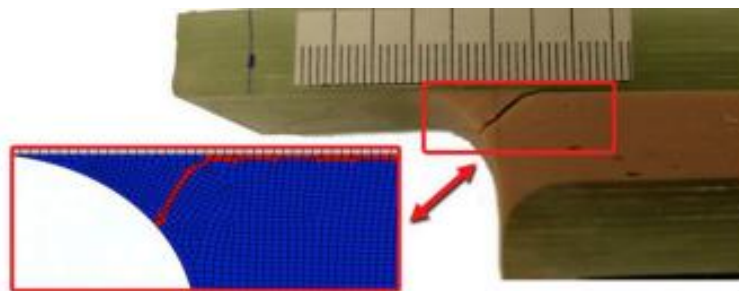


Figura 9 - Propagação da fissura [25].

As variáveis de dano podem-se dividir-se em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, embora estas não estejam diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [32]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [33] ou do número de ciclos para análises de fadiga [34, 35]. Comparativamente aos MDC e, em aplicações específicas, a mecânica do dano pode ser recomendada caso o dano seja generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido já que, pelos MDC, a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-definidos [36].

2.3.4. Modelos de dano coesivo

Os modelos de dano coesivo (MDC) apareceram no início da década de 1960 devido aos trabalhos de Barenblatt na análise de fissuras em materiais frágeis e de Dugdale no estudo da tensão de cedência em chapas de aço contendo fissuras. Este método é geralmente em combinação com o EF, tendo um conjunto especial de nós emparelhados que se comportam de acordo com a lei coesiva estabelecida, ou seja, lei de tração-separação. Elementos coesivos têm um critério de tensão que define o início do dano e um critério de fratura que define a propagação de fissura [25]. As técnicas de modelação do dano podem ser locais ou contínuas. A abordagem local utiliza elementos coesivos para conectar nós de elementos sobrepostos, representando assim uma interface de espessura zero. Na abordagem contínua, os elementos coesivos simulam toda a ligação adesiva, que possui espessura finita, conectando os dois substratos. As diferenças entre essas duas

abordagens são ilustradas na Figura 10. Na abordagem local os elementos coesivos apenas simulam o crescimento de dano entre os elementos conectados por eles, e as propriedades plásticas do adesivo são simuladas por elementos finitos sólidos; na abordagem contínua, a rigidez dos elementos coesivos representa a rigidez da camada adesiva em cada modo de carregamento [25].

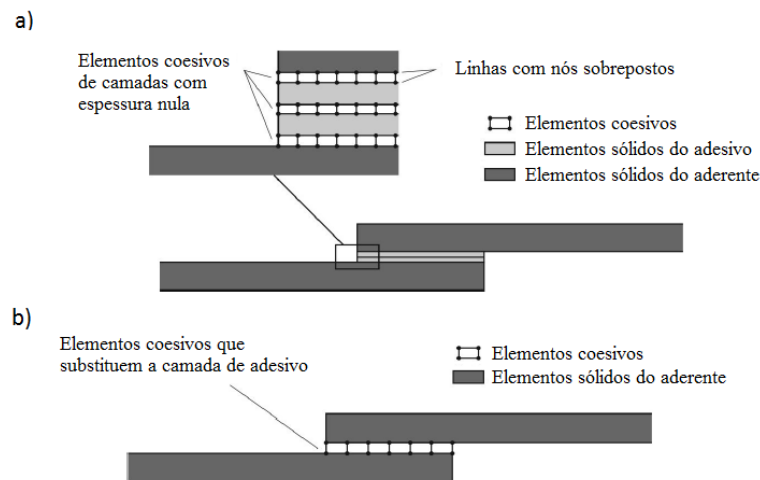


Figura 10 - Elementos coesivos para simular uma espessura nula de material: a) aproximação local e b) aproximação contínua (modificado de [25]).

Uma das principais vantagens que os MDC apresentam, relativamente aos restantes métodos de previsão, devem da obtenção de previsões de comportamento não dependentes das dimensões da malha, tal como é observado na Figura 11.

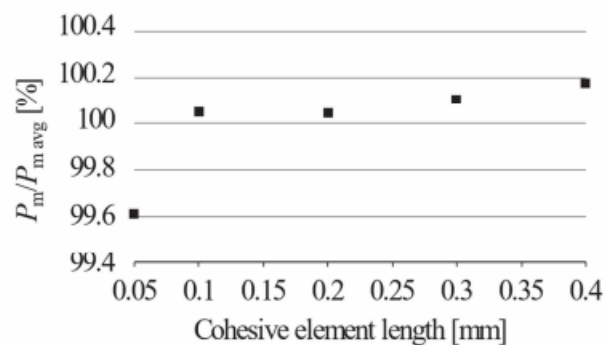


Figura 11 - Influência do tamanho da malha nos valores de resistência de junta adesiva utilizando elementos coesivos [25].

2.3.4.1. Tipos de leis coesivas

Como mencionado, os MDC utilizam leis coesivas ou de tração-separação que podem apresentar forma triangular, linear-parabólica, polinomial, exponencial ou trapezoidal [27]. A lei triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [37]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em EF de interface [38] de quatro nós e espessura nula, compatíveis com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do Abaqus®. Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto. Na Figura 12 apresenta-se o modelo coesivo com forma triangular.

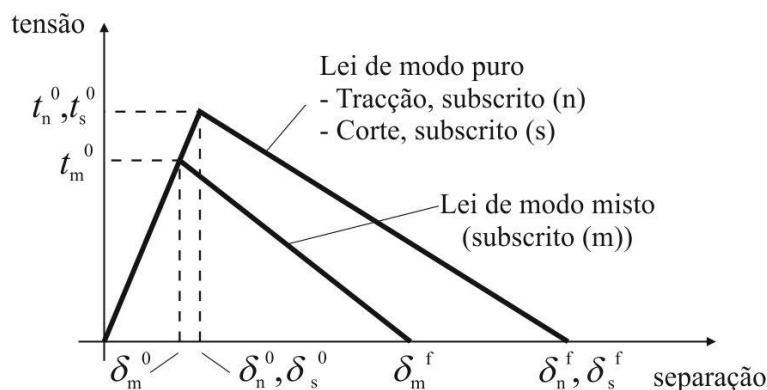


Figura 12 - Modelo coesivo de dano triangular [26].

O modo puro (lei de maiores dimensões) caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto é a lei de menores dimensões e caracteriza-se por utilizar critérios de tensões e energéticos para combinar os modos puros de tração e corte [39].

Outro tipo de lei coesiva bastante utilizada é a lei coesiva trapezoidal, que visa a simulação do comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis. Estas leis simulam adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I [40] e modo II [41].

2.3.4.2. Determinação dos parâmetros coesivos

As análises por MDC permitem reproduzir o comportamento do dano em juntas adesivas. Contudo, os parâmetros coesivos devem ser calibrados com ensaios experimentais e validados, de forma a simular com maior precisão a rotura da ligação [42]. Vários estudos têm sido publicados sobre a definição dos parâmetros coesivos (t_n^0 , t_s^0 , G_{Ic} e G_{IIc}). Contudo, segundo Lee et al., Jung Lee, Min Cho [43], alguns parâmetros como t_n^0 e t_s^0 ainda não se encontram devidamente padronizados. Assim surgem algumas técnicas de análise de dados, como por exemplo o método de definição individual de parâmetros, o método direto e o método indireto, que apresentam diferentes graus de complexidade e de precisão. Alguns trabalhos realizados para validar ensaios em modo misto, estimando os MDC em modo puro através de ensaios DCB, ENF e JSS, alcançaram bons resultados [44, 45].

O método de definição individual dos parâmetros consiste na definição isolada dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios adequados. No entanto, este método é particularmente crítico devido aos desvios entre os parâmetros do adesivo em material maciço e a camada fina de adesivo [46]. Este problema surge causado pelo efeito de restrição às deformações de uma camada fina de adesivos entre dois substratos, e também devido ao modo misto de propagação de fendas em ligações adesivas. De facto, as fendas em materiais maciços tendem a crescer numa direção perpendicular à direção de tensão principal máxima [47]. Por outro lado, em ligações adesivas finas, como o adesivo é tipicamente mais fraco e flexível do que os substratos, as fendas são obrigadas a propagar do sentido longitudinal da ligação. O método inverso consiste num procedimento iterativo de ajuste entre as previsões numéricas e os dados experimentais, considerando por exemplo a curva $P-\delta$ o que permite a estimativa de leis coesivas simplificadas para as condições

específicas em que se está a executar o ajuste de parâmetros. Nos métodos de definição dos parâmetros e inverso é selecionada uma forma parametrizada da lei coesiva (por exemplo, bilinear ou trilinear) para obter o MDC, com base no comportamento do material a ser simulado. Por outro lado, o método direto define a forma exata as leis coesivas, na medida que este método calcula os MDC da ligação adesiva a partir da informação fornecida pelos ensaios de caracterização à fratura [46], pela diferenciação das curvas $G_I-\delta_n$ ou $G_{II}-\delta_s$ (em que δ_n é deslocamento em tração e δ_s é deslocamento em corte). No entanto, no que respeita aos parâmetros dos MDC, G_{Ic} e G_{IIc} são normalmente os principais parâmetros a determinar, em função do papel preponderante que desempenham nos resultados globais. Para avaliação de G_{Ic} e G_{IIc} , os métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) são geralmente mais simples de aplicar, embora estes só possam ser utilizados em adesivos que não apresentem uma ductilidade muito acentuada. De facto, a MFLE não é viável em adesivos com grande plastificação e, nestas condições, o integral-J surge como alternativa para definição de G_{Ic} e G_{IIc} .

Independentemente da técnica utilizada para avaliação dos parâmetros coesivos, os ensaios tipicamente usados para a determinação de G_{Ic} e G_{IIc} são o ensaio DCB (tração) e ENF (corte). O ensaio DCB é o mais utilizado para determinar G_{Ic} pois apresenta uma geometria simples e de fácil fabrico dos provetes. Existem vários métodos para obter G_{Ic} , como métodos baseados na teoria de vigas (corrigida ou não), métodos baseados no comprimento equivalente ou integral-J [48]. Rice [30] tornou possível obter uma expressão para o valor de G_{Ic} em provetes DCB através do método de integral-J, que também permite obter a relação entre as tensões transmitidas e os deslocamentos na extremidade da fenda, ou seja, a lei coesiva [49]. O ensaio DCB é constituído por dois substratos colados entre si com uma camada fina de adesivo. Durante a fabricação do provete, é provocada uma fenda inicial numa das extremidades do adesivo. Todavia, podem ser sentidas algumas dificuldades quando se determina o valor de G_{Ic} . Por vezes a propagação da fenda pode ser instável e, nesses casos, a medição do comprimento de fenda durante o ensaio torna-se difícil. Em alguns ensaios DCB, a ponta da fenda pode não ser claramente visível, dependendo do adesivo utilizado [50]. A norma referente ao ensaio DCB é a norma ASTM D3433-99 [51], que enuncia o método para execução de ensaio. O esquema definido para este ensaio encontra-se representado na Figura 13. Na mesma norma é indicada a forma de determinar a altura mínima do substrato (h), de forma a evitar deformação plástica dos substratos durante o ensaio, pela equação (1) em que T corresponde a 150% da carga máxima necessária para iniciar a fenda na ligação adesiva, a é o comprimento da fenda, B é a largura do substrato e σ_y corresponde à tensão de cedência do material do substrato.

$$h = \sqrt{\frac{6Ta}{B\sigma_y}} \quad (1)$$

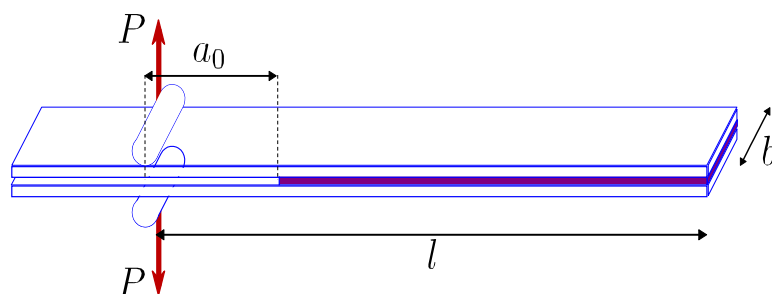


Figura 13 - Geometria do provete DCB [52].

O ensaio ENF descreve-se como uma viga simplesmente apoiada nas extremidades e carregada a meio vão, com um comprimento da pré-fenda inicial (a_0) definido, e carga P a meio vão (Figura 14). A solicitação aplicada origina a propagação da fenda sem haver a separação dos substratos. Para que a propagação da fenda seja estável, é necessário que a_0 seja pelo menos igual a 70% do comprimento total do provete ($2l$) [53]. Como os métodos utilizados para determinação dos parâmetros coesivos tipicamente requerem a medição de G_{IIC} durante a propagação, podem-se observar dificuldades na estimativa de G_{IIC} por esta medição [54].

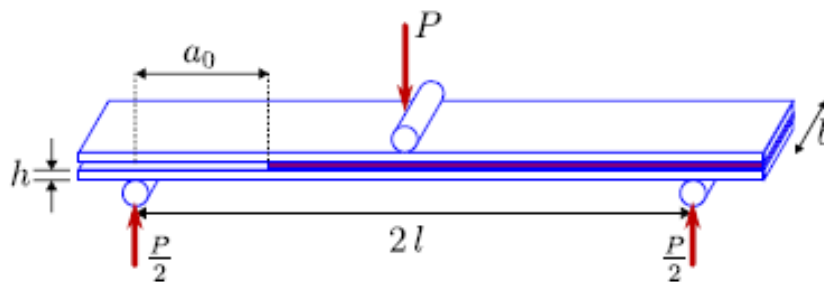


Figura 14 - Geometria do provete ENF [52].

2.3.5. Método de elementos finitos estendido

O método de elementos finitos estendido (MEFX) é uma evolução recente do EF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 (deslocamentos de tração e corte correspondentes a $P_{máx}$, respetivamente) utilizados no MDC. No MEFX, comparativamente com os MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que constitui uma vantagem significativa. Assim, a fenda passa a poder se propagar livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das discontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha [75]. O MEFX considera um comportamento linear elástico inicial dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas, enquanto as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [26].

2.3.6. Estado-da-arte

2.4. Ligações adesivas tubulares

A análise numérica, tornou-se, na segunda metade do século XX o método mais utilizado para estudar o comportamento de uma junta adesiva. Com a capacidade computacional existente atualmente é possível prever rapidamente a resistência de uma junta adesiva e, por conseguinte, otimizar a sua configuração. Na Tabela 9 são mostrados estudos numéricos recentes realizados em juntas adesivas.

Tabela 9- Estudos computacionais realizados em juntas adesivas entre 2018-2022.

Akhavan Safar et al., 2018 [55]	Este estudo teve como objetivo prever a falha de juntas de sobreposição simples (JSS) utilizando o método de EF com o critério de deformação longitudinal crítica (<i>critical longitudinal strain - CLS</i>). Foram analisadas 120 configurações diferentes de JSS nas quais foram consideradas juntas com diferentes adesivos, incluindo dúctil, frágil e intermédio. Também foram considerados diferentes comprimentos de sobreposição, larguras de junta e espessuras de substrato. Segundo os autores, os resultados mostraram que o método CLS pode prever muito bem a carga de falha de com diferentes configurações de juntas com adesivos intermedio e frágeis.
Barbosa et al.,2018 [56]	Neste trabalho, foi realizada uma comparação experimental e numérica (MDC) entre várias configurações de juntas adesivas considerando três adesivos: um dúctil (SikaForce® 7752), um com moderada ductilidade (Araldite® 2015) e um frágil (Araldite® AV138). A partir dos resultados obtidos experimentalmente, foi possível concluir que o desempenho das juntas é influenciado pela escolha do adesivo. As simulações realizadas com a lei coesiva triangulares mostraram uma boa correlação com os obtidos experimentais exceto para o adesivo SikaForce® 7752, devido à ductilidade deste adesivo, que não é modelado corretamente com MDC triangular.
Brito et al., 2021 [57]	O objetivo principal deste trabalho foi avaliar, experimentalmente e numericamente (MDC), a influência do comprimento de sobreposição no comportamento mecânico de juntas adesivas em compósito com uma configuração em degrau. Contatou-se que com o aumento do comprimento de sobreposição (L_0) se observa um aumento da carga máxima. A maior diferença entre os valores obtidos experimentalmente e os numéricos foi de 16,7% para um a comprimento de sobreposição de 12,5 mm. No estudo utilizou-se o adesivo epóxico Araldite® 2015. Foi possível ainda constatar que com o aumento do comprimento de sobreposição verifica-se uma redução da concentração de tensão ou longo de L_0 quando comparado com uma junta de sobreposição simples. No entanto segundo os autores as concentrações de tensão existentes em cada degrau podem ser capazes de iniciar o processo de delaminação do compósito, fenómeno normalmente catastrófico para este tipo de materiais.
Antunes et al.,2021 [58]	Neste estudo científico, foi realizada uma análise numérica com elementos coesivos para verificar o efeito da variação da espessura do adesivo na tenacidade à fratura por tração (G_{nc}) de uma junta adesiva. No geral, as curvas $P-\delta$ extraídas numericamente corroboraram com o comportamento experimental verificando-se, apesar de pequenas variações devido a problemas experimentais de fabrico ou de ensaio.
Campilho et al.,2021 [59]	O principal objetivo deste trabalho foi verificar, através MDC qual o parâmetro de potência (α) que mais se adequa para o critério energético de propagação de dano de juntas de sobreposição simples (JSS) e dupla (JSD) com substratos de alumínio e coladas com três diferentes adesivos. Dos três adesivos um é frágil (Araldite® AV138), um é moderadamente dúctil (Araldite® 2015) e outro é dúctil

	<p>(SikaForce® 7752). Comparou-se os valores obtidos experimentalmente com os numéricos. No adesivo Araldite® AV138 conclui-se que o expoente de 0,5 era o que mais se adequa ao adesivo, para o adesivo Araldite® 2015 o expoente que mais se adequa é o 0,5 e para o adesivo SikaForce® 7752 o expoente que mais se adequa é o 2.</p>
Valente et al.,2020 [60]	<p>Este trabalho comparou os resultados de diferentes mudanças geométricas aplicadas a uma junta de sobreposição simples (JSS), quando submetida a simulações de impacto, através de MDC. Três adesivos com diferentes propriedades foram empregues no estudo: um frágil (Araldite® AV138), um dúctil (3M® DP8005), e um de elevada tenacidade (Nagase Chemtex® XNR6852 E-2). As modificações geométricas das juntas resultam da introdução de chanfros externos e internos nos adesivos para além da adição de filetes adesivos. Fez-se variar o ângulo dos chanfros (interno e externo) e do filite adesivo entre 7,5° e 90°. Das três configurações empregues, os autores concluíram que a introdução de filete adesivo com ângulo 7,5° apresenta os melhores resultados de resistência ao impacto para todos os adesivos em estudo.</p>
Xará,2018 [61]	<p>Neste estudo utilizou-se o método MEFX para analisar a resistência de juntas adesivas em L a esforços de arrancamento. A estrutura foi obtida através da união de um substrato de alumínio em L e um outro de compósito de fibra de carbono colocado na base. Foram utilizados dois adesivos neste estudo, um frágil (Araldite® AV138) e um dúctil (SikaForce® 7752) a espessura do adesivo variou-se de 1 a 4 mm. O MEFX usou critérios de tensão ou de deformação para descrever a iniciação do dano. Os resultados de MEFX foram comparadas com os de MDC e ensaios experimentais. Experimentalmente verificou-se que com o aumento da espessura do adesivo há um aumento de P_{max}. Numericamente, através de MEFX e MDC também se observou um aumento de P_{max} com o aumento da espessura do adesivo. Comparando os resultados experimentais com os numéricos por MEFX para o adesivo frágil, conclui-se que MEFX é preciso quando usado com o critério quadrático de tensão (QUADS) ou critério de tensão nominal máxima (MAXS). Com o critério QUADS a variação máxima de P_{max} foi de 8,2% e para MAXS 7,8%. Para o adesivo SikaForce® 7752 a diferença entre os resultados experimentais e MEFX com o critério QUADS foi 9,7% e para o critério MAXS 10,1%. O MEFX registou uma diferença máxima para o MDC de 8,1% no caso do adesivo epóxico e para o adesivo de poliuretano de 3,3%. Os autores concluíram que o modelo MEFX é preciso para o caso de estudo em análise.</p>

2.4.1. Contextualização

Embora existam múltiplas configurações de juntas adesivas, a seleção de uma configuração em detrimento da outra depende dos requisitos de projeto. A configuração mais comum é a junta de sobreposição simples, que é considerada de fabricação simples e carrega o adesivo principalmente ao corte. No entanto, os substratos não colineares (característica específica desta configuração) dão origem a um momento fletor que gera tensões de arrancamento nas extremidades de sobreposição. De forma a ultrapassar estes inconvenientes, podem ser utilizadas alternativamente

juntas de sobreposição dupla, sobreposição em degrau ou ressalto. Em aplicações mais específicas, é possível usar configurações de juntas de topo, juntas em T, juntas de canto e juntas adesivas tubulares. Em geral, as juntas tubulares apresentam maiores áreas coladas e maior resistência à flexão devido à sua rigidez global [62].

As juntas adesivas tubulares têm aplicações variadas, como em tubulações, treliças, eixos de máquinas e chassis de veículos, como por exemplo aviões e automóveis [63,64]. No setor dos transportes, o peso reduzido deste tipo de ligação resulta na redução do consumo de combustível e melhora o controle do veículo [65].

2.4.2. Configurações de junta tubular mais comuns

A junta tubular sobreposta (JTS), uma das mais comuns, tem um princípio de funcionamento semelhante à junta de sobreposição simples (JSS), mas é axisimétrica. Essas juntas podem ser submetidas a cargas axiais e de torção. As JTS carregadas axialmente apresentam concentrações de tensão na camada adesiva tal como as como JSS. A resistência da junta JTS pode então ser melhorada através da introdução de um chanfro. Um dos inconvenientes das juntas tubulares é a necessidade de maquinagem dos substratos. Por outro lado é difícil inspecionar a qualidade desta junta na sua forma final [66]. Na Figura 15 encontram-se algumas configurações de juntas adesivas tubulares.

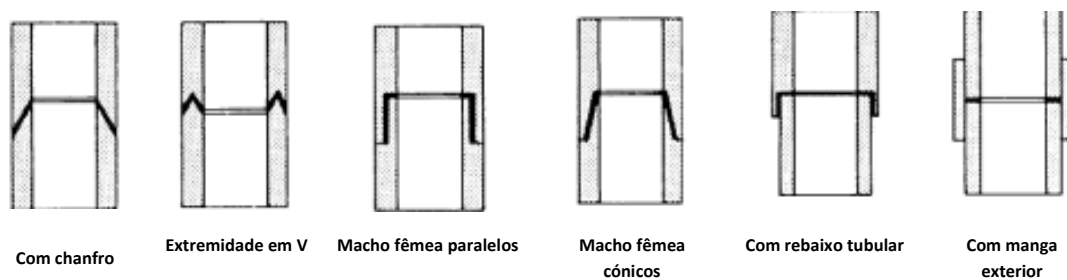


Figura 15 - Configuração mais comuns de juntas adesivas tubulares [9].

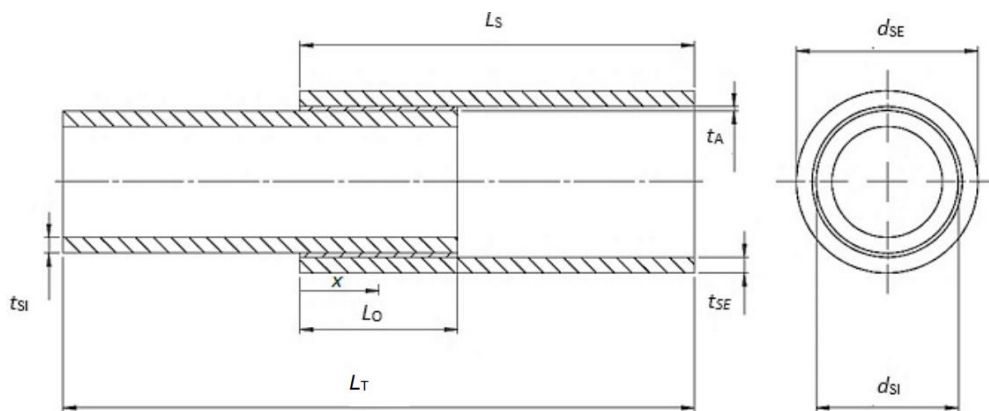
Na Figura 16 encontram-se algumas configurações de juntas cilíndricas do tipo em varões/veios.



Figura 16 - Juntas cilíndricas em varões/veios [9].

2.4.3. Procedimentos de fabrico de juntas tubulares

Na Figura 17 encontra-se uma representação esquemática de uma junta tubular de sobreposição simples.



Legenda: Comprimento total da junta adesiva tubular (L_T); Comprimento dos substratos (L_S); Espessura do substrato interior (t_{SI}); Espessura do substrato exterior (t_{SE}); Espessura do adesivo (t_A); Diâmetro externo do substrato exterior (d_{SE}); Diâmetro externo do substrato interior (d_{SI}).

Figura 17 - Parâmetros de uma junta tubular de sobreposição [67].

Para o fabrico desta geometria de junta, recomenda-se maquinar o diâmetro dos tubos até à cota desejada, através de várias passagens para obter alguma precisão e acabamento superficial [67]. Por vezes é necessário criar orifícios para libertar o ar que fica aprisionado de maneira a permitir que o adesivo preencha a cavidade da junta, estes orifícios podem ser observados na Figura 18.

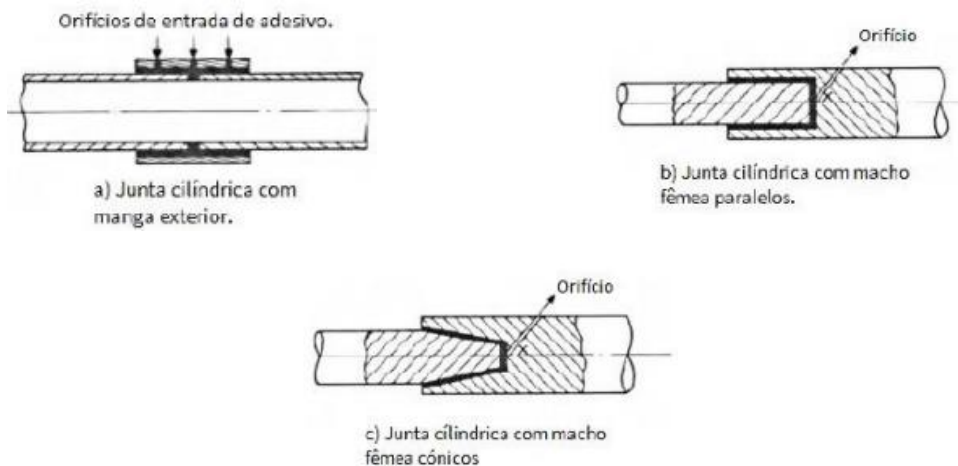


Figura 18 - Localização de orifício para escape de ar [68].

No fabrico manual é aconselhável utilizar espaçadores, como por exemplo fios, de forma a garantir uma espessura de adesivo o mais uniforme possível em torno de toda a área de colagem. No final da montagem da junta deve-se efetuar a rotação entre os substratos cilíndricos de modo a espalhar o adesivo e uniformizá-lo na junta [68]. O fabrico que uma junta adesiva pode ainda ser efetuado através de um processo de injeção. Os passos no fabrico deste sistema com elevado grau de automatismo encontram-se descritos na Figura 19.

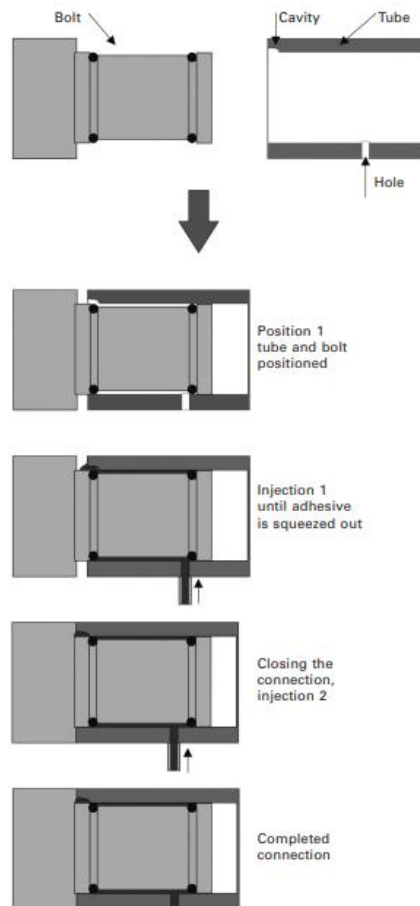


Figura 19 - Fabrico de juntas tubulares por injeção [69] .

Uma incorreta montagem pode resultar em imperfeições tais como, excentricidade da junta e inclinação. Na Figura 20 encontram-se representadas estas duas imperfeições.

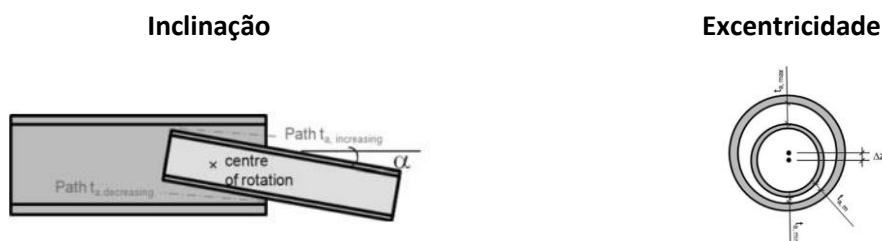


Figura 20 - Imperfeições possível de ocorrer durante o processo de fabrico de uma junta adesiva tubular[69].

2.4.4. Procedimento numérico de modelação de juntas tubulares

Devido à ampla aplicação do MDC na análise do dano de estruturas, programas comerciais de elementos finitos como o Abaqus® e Ansys® já incluíram elementos coesivos nas suas bibliotecas. Além destes dois programas de EF bem conhecidos, existem também outros, como o Warp3D® e Zebulon®, nos quais se podem encontrar alguns modelos de base coesiva para análise de danos de estruturas. Em termos da forma de leis coesivas, como já referido anteriormente no ponto 2.3.4.1, o Abaqus® suporta leis bilineares, exponenciais e trapezoidais. Este programa também cobre as condições em modo misto (apenas para a lei triangular). O COMSOL®, um programa multifísico comercial, também incluiu elementos coesivos na sua biblioteca. No entanto, os elementos

presentes são usados principalmente para delaminação e análise de falhas interfaciais. Em alguns programas, como o Franc2D®, apenas a condição 2D pode ser simulada e em outros, como o WARP3D®, apenas os problemas 3D podem ser abordados [70]. O Abaqus® tem sido o programa de EF utilizado na maioria das teses de mestrado do ISEP relacionadas com a modelação numérica de juntas adesivas. Nos casos em que se utiliza o MDC os substratos são considerados como elementos deformáveis e os adesivos como elementos coesivos. Na Tabela 10 apresentam-se as etapas necessárias para realizar uma simulação numérica utilizando MDC para juntas adesivas tubulares em ambiente Abaqus®.

Tabela 10 - Etapas seguidas na simulação numérica utilizando MDC de juntas adesivas tubular.


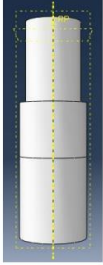
Etapa	Descrição
<p><i>Part</i></p>	<p>O primeiro passo é a criação da peça a estudar. O Abaqus® permite criar peças tubulares em 3D ou em 2D axisimétricas (simetria em relação ao eixo de rotação). A modelação com elementos 2D axisimétricos requer menores recursos computacionais, motivo pelo qual esta é mais utilizada em artigos científicos realizados sobre esta temática. A Figura 21 apresenta as diferenças entre uma junta tubular modelada com elementos 3D e outra com elementos 2D axisimétricos. De forma a simplificar as operações de simulação, a junta é desenhada como um único corpo, o qual é posteriormente dividido em partições. As partições criadas isolam diferentes zonas da junta, como os substratos e a camada de adesivo.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p data-bbox="651 1039 842 1070">2D axisimétrico</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p data-bbox="1018 1039 1054 1070">3D</p>  </div> </div>
<p><i>Property</i></p>	<p>Posteriormente definem-se as propriedades dos materiais. Os substratos, no caso de metais, são modelados como isotrópicos e define-se a sua rigidez e comportamento plástico. O adesivo, por outro lado, é modelado com uma única linha de elementos coesivos, e uma lei de tração-separação que inclui a rigidez da camada adesiva. De seguida criam-se as secções para os materiais e atribui-se a partição em causa. O substrato é definido como <i>Solid</i> e <i>Homogeneous</i>, o Adesivo como <i>Cohesive</i>.</p>
<p><i>Assembly</i></p>	<p>Este campo tem como função unir diferentes partes de um conjunto. No entanto como os modelos são compostos por um só componente, dividido em partições, não foi necessário efetuar nenhuma operação.</p>
<p><i>Step</i></p>	<p>Nesta etapa são introduzidos os parâmetros de computação da simulação. No caso de juntas carregadas uni axialmente á tração seleciona-se a opção <i>Static</i>.</p>

Figura 21 - Representação de juntas tubulares desenhadas em 2D axisimétrico e em 3D [71,72].

<i>Load</i>	Neste módulo aplicam-se as condições de fronteira à junta adesiva de forma a simular o carregamento em estudo.
<i>Mesh</i>	Posteriormente define-se o tipo de malha e o seu refinamento. Aos substratos é atribuída uma malha do tipo <i>Structured</i> e à camada adesiva uma malha do tipo <i>Sweep</i> . As zonas onde ocorrem os maiores gradientes de tensão devem apresentar um alto refinamento de malha.
<i>Job</i>	Neste módulo são inicializados e monitorizados dos modelos criados.

2.4.5. Estado-da-arte

2.4.5.1. Trabalhos experimentais

Na Tabela 11 são descritos estudos experimentais recentes realizados sobre juntas tubulares adesivas.

Tabela 11 - Trabalhos experimentais realizados sobre juntas tubulares adesivas.

Lavalette et al., 2020 [73]	Os autores deste artigo pretenderam verificar experimentalmente a influência de modificações geométricas em juntas adesivas tubulares sujeitas à tração. Entre elas é possível destacar o aumento de L_0 e a existência de chanfros interiores nos substratos. Diferentes diâmetros e espessuras de substratos também foram testadas. A junta em análise é composta por substratos de alumínio e compósito reforçado com fibras de carbono ligadas por um adesivo epóxico comercializado como Araldite® 2015. Deste estudo concluiu-se que com o aumento de L_0 e do diâmetro interior, a resistência da junta aumenta significativamente. A alteração de espessura do adesivo não influencia significativamente a resistência da junta.
Dantas et al., 2021 [74]	Este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento à torção uma junta tubular flexível metal-polímero. Segundo os autores este tipo de junta é empregue na construção de sistemas de refrigeração e é especificamente projetada para suportar grandes deflexões em torção. Foram considerados três configurações de junta diferentes (Figura 22), a fim de avaliar a influência do procedimento de fabricação no desempenho da junta. O L_0 também foi variado entre 5 e 15 mm.

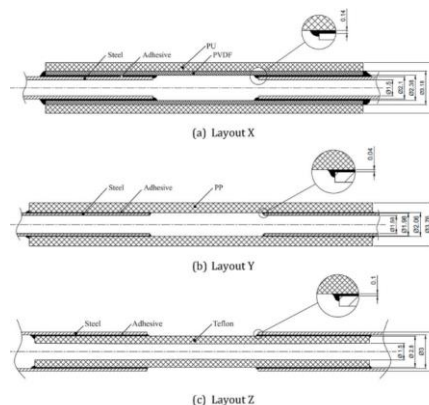


Figura 22 - Configurações utilizadas no estudo [74].

Foi utilizado um adesivo de silicone com a referência comercial Loctite SI 5699® nos três casos. Os resultados em torção para as configurações X e Z são similares para todos os L_0 (≈ 25 Nmm). De acordo com os autores, a título exemplificativo, para $L_0=15$ mm, mais de 90% das tensões de von-Mises existente na junta são suportadas por menos de 20% do comprimento total de sobreposição da junta. Os resultados em torção para a configuração y são similares para todos os L_0 ($\approx 1,5$ Nmm). Os resultados mostram que a configuração da junta, considerando a sua geometria e materiais empregues, tem grande influência no desempenho mecânico da junta em torção.

Albiez et al., 2019 [75]

O objetivo deste trabalho foi verificar a influência de modificações geométricas na resistência mecânica de juntas adesivas tubulares sujeitas esforços de tração. O comprimento de sobreposição, espessura dos tubos, espessura da camada adesiva foram as variáveis estudadas. Para unir as juntas em aço foram utilizados dois adesivos (um epóxico e um poliuretano). Constatou-se que com o aumento de L_0 o valor P_{max} aumenta para os dois adesivos em estudo. Por outro lado, com o aumento da espessura do adesivo em combinação com o aumento do diâmetro do tubo exterior, o valor de P_{max} tende a diminuir. Esta situação observou-se para os dois adesivos empregues.

2.4.5.2. Trabalhos analíticos

O número de estudos analíticos sobre juntas adesivas tem diminuído circunstancialmente nos últimos anos. Realizando uma pequena pesquisa no motor de busca científico *Web of Science* apenas foram encontrados 14 artigos científicos sobre esta temática. O período temporal selecionado foi de 2018-2022. Na Tabela 12 encontram-se 2 artigos recentes sobre previsão da resistência juntas tubulares adesivas recorrendo a modelos analíticos.

Tabela 12 - Estudos analíticos realizados sobre juntas tubulares.

Pinheiro et al., 2022 [76]

Este artigo compara o desempenho à tração de juntas tubulares de alumínio (AW6082-T651), em função de diferentes comprimentos de sobreposição (L_0). Na previsão da resistência da junta foi efetuada uma análise analítica cujos resultados, numa fase posterior, foram comparados com uma análise numérica e com a resistência da junta obtida experimentalmente. A previsão da resistência da junta numericamente foi realizada partir da mecânica dos meios contínuos e MDC. Neste estudo foram utilizados um adesivo (Araldite® AV138) um dúctil (Araldite® 2015) e um de resistência intermédia e grande ductilidade (SikaForce® 7752). Relativamente aos métodos analíticos, foram analisados os modelos de Nayeb-Hashemi, de Pugno e Carpinteri e da tensão de cedência generalizada. Este estudo permitiu verificar que os métodos analíticos preveem um comportamento ligeiramente diferente, em termos de distribuições de tensões de corte, relativamente aos obtidos numericamente. De acordo com os autores, tanto os resultados obtidos com métodos analíticos como o EF apresentaram uma grande discrepância dos valores de P_{max} em relação aos valores obtidos

experimentalmente, uma vez que na modelação não se considera a plastificação dos adesivos e substratos. Globalmente o MDC foi o modelo que forneceu resultados mais próximos dos obtidos experimentalmente, apresentando um desvio máximo percentual face os resultados experimentais de 18% (adesivo dúctil).

Zhang et al., 2020 [77]

Neste artigo científico analisaram juntas tubulares ligadas topo a topo, sujeitas a ciclos de fadiga uniaxial e multiaxial. Os efeitos de amplitude de tensão equivalente, tensão média equivalente e a frequência de carga foi analisado. Os autores utilizaram métodos experimentais e métodos analíticos. Foi possível concluir que a amplitude de tensão equivalente, a tensão média equivalente e a frequência de carga tiveram todas influência na durabilidade da junta. Comparando os resultados obtidos experimentalmente com os resultados do modelo de previsão, conclui-se que o modelo analítico é fiável.

2.4.5.3. Trabalhos numéricos

Na validação de modelos numéricos e critérios de falha é comum realizar testes experimentais a juntas adesivas, de forma a medir forças máximas e globais nos substratos e adesivos. Na Tabela 13 apresenta-se alguns estudos experimentais recentes realizados em juntas tubulares adesivas.

Tabela 13 - Estudos recentes realizados a juntas tubulares adesivas.

Barbosa et al., 2019 [78]

Neste trabalho realizou-se um estudo experimental e numérico (MDC) a juntas tubulares carregadas axialmente à tração. Numericamente efetuou-se uma comparação entre o modelo axisimétrico 2D e o modelo de elementos sólidos em 3D. Foram utilizados três adesivos com propriedades mecânicas distintas para unir substratos de alumínio. Fez-se variar o comprimento de sobreposição entre 20 e 40 mm para analisar o efeito desta variável na resistência da junta. Os adesivos empregues foram: um dúctil (SikaForce® 7752), um com moderada ductilidade (Araldite® 2015) e um frágil (Araldite® AV138). Utilizou-se uma análise contínua elástica para prever as tensões de arrancamento e corte no adesivo. Posteriormente foi empregue o MDC para prever a evolução do dano da junta utilizando o critério de degradação geral da rigidez (SDEG). O maior desvio percentual para P_{max} entre os resultados experimentais e os numéricos foi 18,4% para o adesivo dúctil ($L_0=20$ mm). Os autores referem que esta diferença se deve à utilização de um MDC triangular o qual não é o mais adequado para modelar adesivos dúcteis. A maior diferença percentual para P_{max} entre o modelo 2D e o 3D foi de 0,75%, para o Araldite® 2015 ($L_0=40$ mm).

Rosas et al., 2021 [62]

Este artigo científico teve como objetivo avaliar o desempenho à tração de juntas tubulares de alumínio unidas com o adesivo Araldite® 2015 através de MDC, considerando alterações geométricas que potencialmente promovem uma melhoria de resistência. Para validar o modelo MDC utilizado, utilizaram juntas tubulares com L_0 de 20 e 40 mm e posteriormente comparam os resultados de P_{max} obtidos experimentalmente com os obtidos das simulações. A diferença máxima de P_{max} registada foi 6,1% para L_0 de 20 mm. As mudanças geométricas testadas neste

trabalho consistiram na adição de um chanfro externo, um chanfro interno (ambos nos substratos), e adição de um filete adesivo nas extremidades de sobreposição. Além disso, foi avaliado o efeito combinado do chanfro interno e do filete de adesivo. A espessura do adesivo foi mantida em 2 mm e o $L_0=40$ mm. A introdução de chanfros internos e externos não resultou em melhorias de P_{max} . O ângulo do filete adesivo nas extremidades sobrepostas foram $7,5^\circ$, 15° , 30° , 45° , 60° e 90° . Verificou-se um aumento de P_{max} de 3,5% para o filete com ângulo de $7,5^\circ$ quando comparado com 90° . Combinado a utilização de um chanfro interno com ângulo de 30° com um filete adesivo e um ângulo de $7,5^\circ$ constatou-se um aumento de P_{max} de 3,5% em relação à configuração de junta não modificada.

Oliveira et al., 2022 [63]

Este trabalho comparou o desempenho à torção de juntas tubulares de alumínio (AW6082-T651) unidas com o adesivo Araldite® 2015, considerando a variação dos parâmetros geométricos principais, nomeadamente comprimento de sobreposição e espessura dos substratos. O comprimento de sobreposição variou entre 20 e 40 mm e a espessura dos substratos entre 1 e 5 mm. Na previsão da resistência das juntas recorreu-se ao método de elementos finitos com MDC, cuja análise recaiu sobre as tensões internas do adesivo, nomeadamente a análise às tensões de corte e resistência da junta, medida pelo momento torsor máximo (M_m). O comprimento de sobreposição não tem influência no valor de M_m . Comparando o M_m para juntas com substrato interior (t_{si}) e substrato exterior (t_{se}) igual a 2m, com uma junta em que se reduziu $t_{si}=1$ mm verificou-se uma redução em 44,4% do momento torsor. Por outro lado, quando se aumenta para $t_{si}=5$ mm M_m aumenta em 51,2%. Diminuindo $t_{se}=1$ mm verificou-se uma redução de M_m em 29,8%, para $t_{se} > 2$ mm não se observou melhorias no M_m .

Silva et al., 2021 [79]

Neste trabalho estudou-se a resistência ao impacto de juntas adesivas tubulares em liga de alumínio AW6082-T651 unidas pelo adesivo epóxico Araldite® AV138. Utilizou-se o MDC para prever P_{max} . A energia absorvida (U) foi obtida através da integração da área das curvas $P-\delta$ utilizando o RStudio®. O efeito do L_0 e da espessura do substrato exterior em U também foi analisado. Variou-se L_0 entre 10 e 20 mm e t_{se} entre 1 e 4mm. Com o aumento de L_0 de 10 para 20mm, U tende a aumentar em 108,3% por outro lado com o aumento de t_{se} de 1 para 4 mm, U diminuiu 20,3.

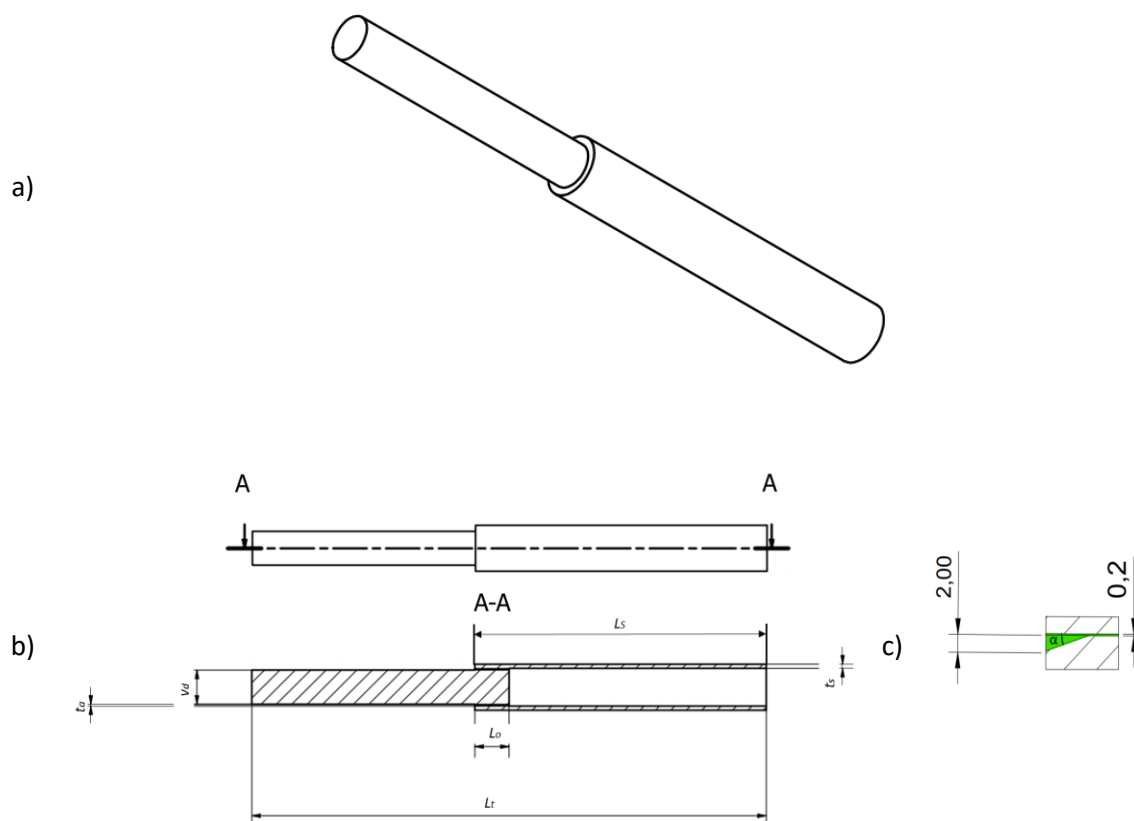
3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Objetivos e procedimentos

O principal objetivo deste trabalho é efetuar um estudo numérico de juntas do tipo varão-tubo sujeito a esforços de tração. Para avaliar o desempenho destas juntas procedeu-se a um estudo paramétrico. No início deste capítulo, apresenta-se a junta do tipo varão-tubo a utilizar no estudo numérico, seguindo-se uma descrição dos fundamentos do método de Taguchi. Posteriormente são descritos os materiais selecionados, indicando também as suas propriedades. Depois, serão enunciadas todas as etapas utilizadas na criação dos modelos numéricos. De seguida, indicam-se as várias dimensões, geometrias e configurações de junta, utilizadas para a realização deste trabalho. Por último, efetua-se uma análise detalhada dos resultados obtidos.

3.2. Geometria da junta

Na Figura 23 encontra-se a geometria genérica das juntas em estudo. O comprimento da junta adesiva foi fixado em 80 mm e a espessura do adesivo em 0,2 mm, em alguns casos foram adicionados chanfros adesivos. Adesivos estruturais apresentam espessura compreendidas entre 0,1-0,2 mm [99]. As várias configurações de junta estudadas encontram-se no ponto 3.6.1.



Legenda: Comprimento total da junta adesiva tubular (L_T); Comprimento dos substratos (L_S); Espessura do tubo (t_s); diâmetro do varão (v_d); Espessura do adesivo (t_A).

Figura 23 - a) Vista isométrica da junta varão-tubo; b) corte da junta; c) representação do chanfro adesivo interior.

3.3. Materiais selecionados

3.3.1. Substratos

Para os substratos selecionou-se a liga de alumínio AW6082-T651 devido às suas boas propriedades mecânicas. Este material é normalmente utilizado em estruturas de forma extrudida ou laminada. Esta liga de alumínio é obtida após ser submetida a um recozimento, têmpera, estiramento e por fim envelhecimento artificial a uma temperatura de 180°C [90]. Campilho et al. [91] caracterizaram esta liga de alumínio em trabalhos anteriores e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14 - Propriedades da liga de alumínio AW6082-T651 [91].

Propriedade	Unidade	AW6082-T651
Módulo de elasticidade	MPa	70000
Coefficiente de Poisson	-	0,3
Tensão de cedência à tração	MPa	261,67
Tensão de rotura à tração	MPa	324
Deformação de rotura à tração	%	21,70

3.3.2. Adesivos

De forma a promover a união entre os substratos, foram selecionados três tipos de adesivos com comportamento mecânico e de fratura distintos: Araldite® AV138 (adesivo epóxico frágil), Araldite® 2015 (adesivo epóxico dúctil) e SikaForce®472 FR (adesivo poliuretano estrutural, combina alta ductilidade e resistência moderada).

3.3.2.1. Araldite® AV138

O adesivo estrutural epóxico Araldite® AV138 é fabricado pela empresa americana Huntsman. Este adesivo é obtido pela combinação por dois componentes: resina AV138 e endurecedor HV998. De acordo com o fabricante, a mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 1:0,4 em peso. A baixa emissão de gases torna este adesivo indicado para aplicações no setor das telecomunicações, eletrónica e aeroespacial [92]. Na Tabela 15 estão apresentadas as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo.

Tabela 15 - Propriedades mecânicas do epóxico Araldite® AV138 [65].

Propriedade	Unidade	Araldite® AV 138
Módulo de elasticidade	MPa	4890
Coefficiente de Poisson	-	0,35
Tensão de cedência em tração	MPa	36,49
Tensão de rotura em tração	MPa	39,45
Módulo de corte	MPa	1560
Tensão de cedência em corte	MPa	25,1
Tensão de rotura em corte	MPa	30,2
Tenacidade à tração	N/mm	0,2
Tenacidade ao corte	N/mm	0,38

3.3.2.2. Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 epóxico estrutural, fabricado pela Huntsman, apresenta ductilidade moderada. Devido à sua elevada resistência a cargas dinâmicas e a condições ambientais adversas este adesivo é ideal para aplicações marítimas. De acordo com o fabricante, a mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 1:1 em peso [93]. A ductilidade apresentada por este epóxico é importante para as juntas adesivas, pois permite redistribuição das concentrações de tensões nas extremidades da camada de adesivo, o que se traduz numa resistência da junta muito aceitável. Na Tabela 16 estão apresentadas as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo.

Tabela 16 - Propriedades mecânicas do epóxico Araldite® 2015 [65].

Propriedade	Unidade	Araldite® 2015
Módulo de elasticidade	MPa	1850
Coefficiente de Poisson	-	0,33
Tensão de cedência em tração	MPa	12,63
Tensão de rotura em tração	MPa	21,63
Módulo de corte	MPa	650
Tensão de cedência em corte	MPa	14,60
Tensão de rotura em corte	MPa	17,9
Tenacidade à tração	N/mm	0,43
Tenacidade ao corte	N/mm	4,7

3.3.2.3. SikaForce®472 FR

O adesivo SikaForce®472 FR, anteriormente comercializado como SikaForce® 7752, é usado principalmente para colagem industrial de materiais como metais, cerâmica, madeira e derivados de madeira. Este adesivo é um poliuretano obtido através da mistura de um polioli/isocianato numa razão em massa de 1/0,2 [94]. Na Tabela 17 apresentam-se as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo.

Tabela 17 - Propriedades mecânicas do SikaForce®472 FR [65].

Propriedade	Unidade	SikaForce®472 FR
Módulo de elasticidade	MPa	490
Coefficiente Poisson	-	0,3
Tensão de cedência em tração	MPa	3,24
Tensão de rotura em tração	MPa	11,48
Módulo de corte	MPa	190
Tensão de cedência em corte	MPa	5,16
Tensão de rotura em corte	MPa	10,50
Tenacidade à tração	N/mm	2,36
Tenacidade ao corte	N/mm	5,41

3.4. Taguchi

O desenho de experiências (*design of experiments* - DOE) consiste na análise de um sistema (processo ou produto), através da realização de um teste ou uma série de testes nos quais se alteram, deliberadamente, as variáveis de entrada do sistema de modo a observar e identificar as razões que provocaram as alterações obtidas nas variáveis de saída (respostas). Este conceito foi introduzido por Fisher na década de 1920 [80, 81]. Genechi Taguchi introduziu, na década de 40 do século XX, o conceito de design paramétrico de experiências.

Este método não só minimiza os ensaios experimentais, mas também permite perceber a influência das diferentes variáveis nas respostas [82]. A nível exemplificativo, se forem identificados 7 fatores com 2 níveis cada, e se for utilizado o plano fatorial completo, o número total de experiências seria de $N_t=2^7=128$ testes. No entanto, para este caso específico, Taguchi apresenta uma matriz ortogonal L_8 , em que o índice 8 diz respeito ao número de experiências a realizar.

O primeiro passo desta metodologia é identificar os fatores que podem ter um efeito significativo na resposta. Posteriormente seleciona-se a matriz ortogonal, procura-se que esta seja a mais pequena possível, mas que consiga conter a informação necessária. A escolha da matriz está sempre dependente do número de fatores e níveis associados. Taguchi definiu as várias matrizes ortogonais que podem ser utilizadas. Estas podem ser consultadas na referência [83].

Realizados os ensaios, procede-se à análise dos dados. Para tratar dos dados obtidos, Taguchi considera dois tipos de estudo: respostas médias e razão sinal-ruído. A primeira análise, também conhecida como análise estática, é utilizada em desenhos em que só é possível efetuar uma medição por ensaio ou quando não se consideram fatores de ruído e cuja característica da qualidade seja do tipo contínuo. Com este tipo de abordagem é possível identificar os efeitos dos fatores que afetam de forma significativa a resposta média, e determinar a combinação de fatores e interações que produzem o melhor resultado [83].

A utilização da razão sinal-ruído permite identificar os fatores que afetam a variação. Esta abordagem é utilizada em desenhos onde se realizam várias medições por ensaio. O objetivo desta abordagem é reduzir a variabilidade das respostas [83]. Para se efetuar uma análise utilizando a razão Sinal-Ruído (S/N) é necessário transformar os dados obtidos. Taguchi desenvolveu várias expressões que permitem a transformação dos dados numa razão sinal-ruído, dependendo do tipo de característica da qualidade, sendo as mais conhecidas as seguintes: Menor-é-melhor, Nominal-é-melhor e Maior-é-melhor [81]. Seleciona-se a característica Nominal-Melhor, quando se pretende atingir um valor previamente definido. Por sua vez, com a característica Menor-Melhor, pretende-se atingir o menor valor possível. Ao optar-se pela característica Maior-Melhor, pretende-se atingir o maior valor possível [81]. Conforme cada caso, são aplicadas as seguintes fórmulas matemáticas:

$$Menor - Melhor = -10 \log \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (2)$$

$$Nominal - Melhor = 10 \log \frac{\bar{y}^2}{\sigma^2} \quad (3)$$

$$Maior - Melhor = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (4)$$

onde,

y_i é o resultado obtido,

\bar{y} é a média e,

σ^2 a variância.

Independentemente de se utilizar a média das respostas ou a razão sinal-ruído, o passo seguinte do procedimento consiste na análise da média (*analysis of mean ANOM*) para identificar os melhores níveis dos fatores. A título exemplificativo, a ANOM à razão S/N de um fator l no nível i é dada por:

$$(M)_{Fator=l}^{Nivel=i} = \frac{1}{n_{il}} \sum_{j=i}^n [(S/N)_{F=l}^{N=i}]_j \quad (5)$$

onde,

n_{il} Representa o número de experiências realizadas com o fator l no nível i , e,

$\left(\frac{S}{N}\right)_{F=l}^{N=i}$ é a razão S/N da j experiência realizada com o fator l no nível i .

Os melhores níveis são aqueles que apresentam maior valor de médio de S/N [81]. A análise das respostas médias e da razão sinal ruído não considera a evidência estatística (ANOVA), sendo necessário recorrer à análise de variância, onde os efeitos dos fatores significativos são identificados considerando um nível de significância 5% [84].

Para se realizar a análise da variância, é necessário calcular a soma dos quadrados dos fatores e do erro. Para o caso da razão S/N, a soma dos quadrados da variação total é dada pela equação 6:

$$SS_T = \sum_{i=1}^N (S/N_i - \overline{S/N})^2 \quad (6)$$

onde,

N é o número de experiências,

$N-1$ é o número dos graus de liberdade ($G.l$),

S/N_i é a razão sinal-ruído da experiência i , e,

$\overline{S/N}$ é a média das razões sinal-ruído das N experiências.

A soma dos quadrados de um fator A é obtida utilizando a equação 7:

$$SS_A = \sum_{i=1}^a n_a (\overline{S/N_{Aa_i}} - \overline{S/N})^2 \quad (7)$$

onde,

a representa o número de níveis do fator A,

n_a representa o número de experiências realizadas com o fator A no nível a_i , e,

$\overline{S/N}$ representa a média das razões sinal-ruído do fator A no nível a .

O fator A tem $a-1$ graus de liberdade ($G.L_A$). A soma dos quadrados do erro calcula-se pela equação 8:

$$SS_{erro} = SS_T - \sum SS_{fatores}. \quad (8)$$

Os graus de liberdade do erro são obtidos subtraindo os graus de liberdade de todos os fatores aos graus de liberdade totais. Calcula-se também o quadrado médio dos fatores, neste caso para um fator A, MS_A , a partir da equação 9:

$$MS_A = \frac{SS_A}{G.L_A}. \quad (9)$$

A significância de um fator é avaliada a partir da comparação entre o quadrado médio do fator e a variância residual (MS_{ERRO}), pela equação 10:

$$F_A = \frac{MS_A}{MS_{ERRO}}. \quad (10)$$

A percentagem de contribuição de um fator A, é definida pela expressão 11:

$$P_A = \frac{SS_A - G.L_A(MS_{ERRO})}{SS_T} * 100. \quad (11)$$

Ao longo dos anos, têm sido publicados vários estudos paramétricos de juntas adesivas, tendo por base o método de Taguchi. Silva et al. [85] utilizaram este método para determinar os fatores que maior influência tem na resistência ao corte da juntas adesivas de sobreposição simples. O aumento L_o , da tensão de cedência dos ardentes e a redução da espessura do adesivo, contribuíram em 20, 19,7 e 8,7% para o aumento da resistência ao corte. Silva et al. [86] publicaram um artigo científico em que se pretendia avaliar o efeito do material, geometria, tratamento de superfície e ambiente na resistência ao corte de juntas de sobreposição simples. Os autores concluíram que o comprimento de sobreposição contribuir em 40% para o aumento da resistência ao corte. De acordo com o reportado no artigo, o tratamento de superfície não apresenta significância na resistência ao corte. Outros trabalhos realizados envolvendo juntas adesivas e o método de Taguchi podem ser consultados nas referências [87-89].

Neste trabalho optou-se por efetuar a análise das respostas médias, recorreu-se ao programa estatístico Minitab 19 para tratamento dos dados.

Na Figura 24 encontra-se uma representação esquemática das etapas a seguir na aplicação do Método de Taguchi.

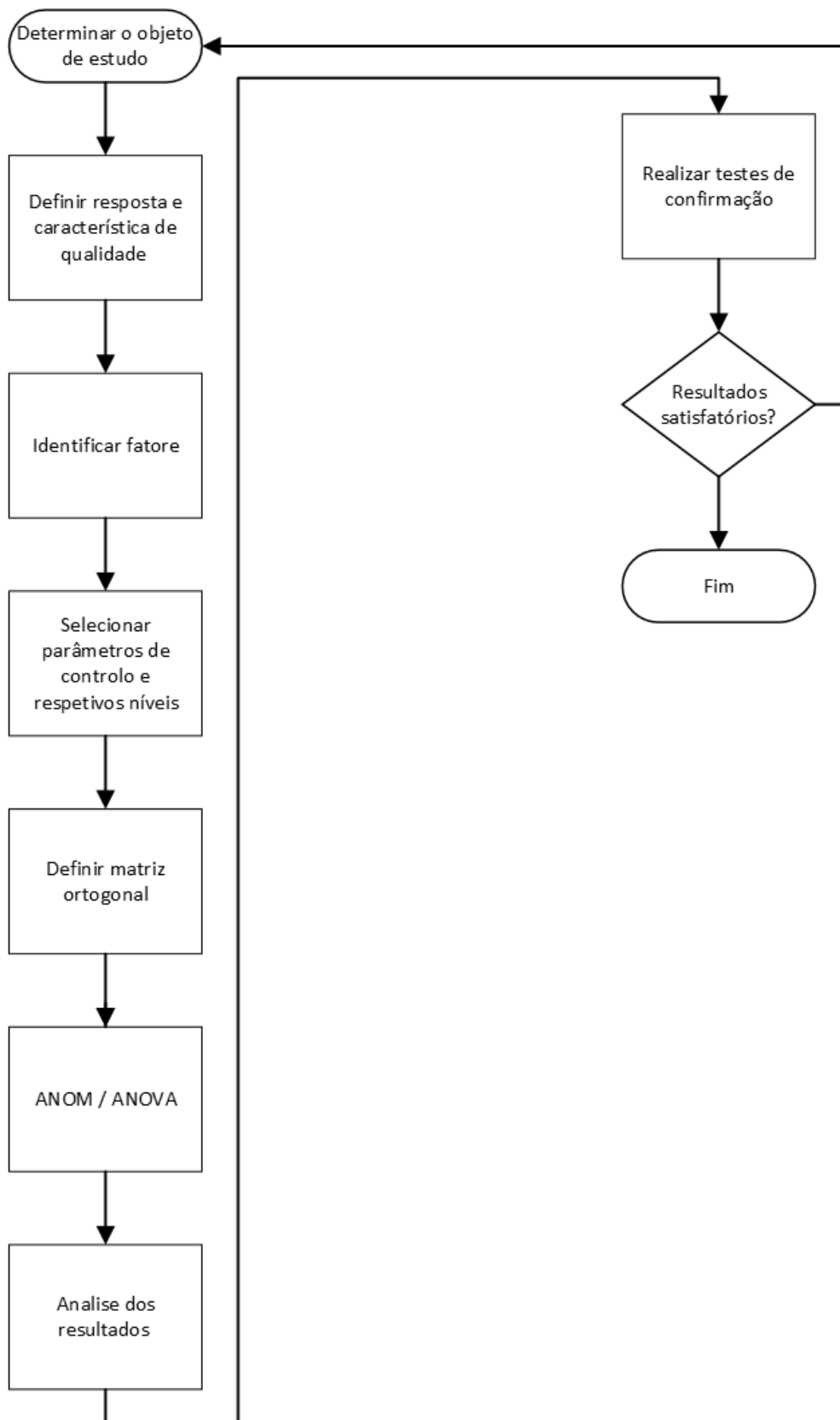


Figura 24 - Representação esquemática das etapas do método de Taguchi.

3.5. Técnica numérica

3.5.1. Modelo de dano coesivo

Os MDC baseiam-se numa relação entre tensões e deslocamentos entre nós homólogos dos elementos coesivos, de forma a simular o comportamento elástico do material até este atingir um pico de carga e subsequente a degradação deste até ocorrência de rotura [95]. As leis de tração-separação podem apresentar forma triangular, linear-parabólica, polinomial, exponencial ou trapezoidal [27]. Na Figura 25 encontram-se representações gráficas de alguma das leis de tração separação [37].

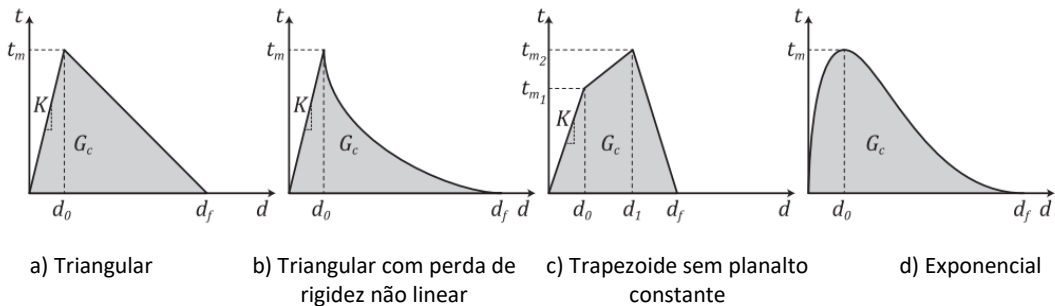


Figura 25 - Representação de leis de tração separação [96].

A lei triangular, também denominada por bilinear, é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [37]. A lei coesiva triangular pode ser descrita graficamente através da Figura 26. Em O, o material não se encontra sujeito a solicitações mecânicas. Ao longo da linha OA, o material encontra-se em carga, mas não corre dano (regime elástico). No ponto A, a tração coesiva atinge o valor máximo permitido. A partir deste ponto, o material começa a sofrer dano e a rigidez coesiva diminui. Quando a tração admissível cai para zero no ponto C, ocorre a separação completa do material. Então, uma nova fenda é nucleada ou a ponta de uma fenda existente avança. Qualquer ponto depois do ponto C, por exemplo ponto D, está fora da zona coesiva e pertence às superfícies da fenda atrás da ponta da mesma [97].

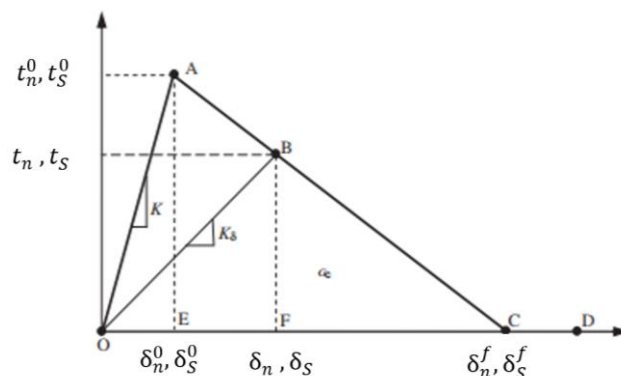


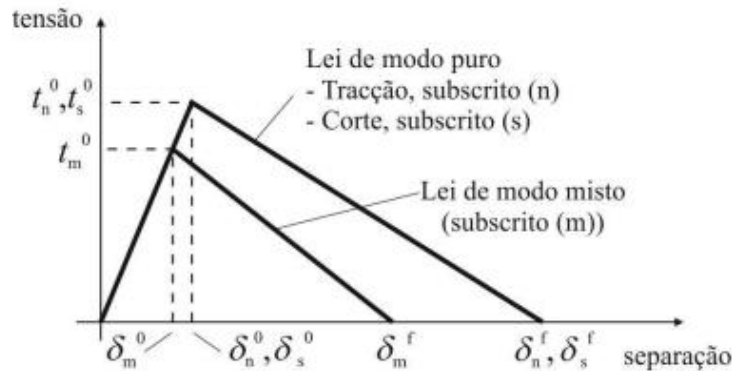
Figura 26 - Representação gráfica da lei coesiva triangular [97].

A tenacidade à fratura, G_c , dada pela área do triângulo, é relacionada com outros dois parâmetros através da relação $G_c = t^0 \times \delta^f / 2$. Além dos parâmetros t^0 e δ^f , outro parâmetro tem de ser definido para descrever completamente a forma da lei coesiva triangular. Este parâmetro pode ser a rigidez

coesiva inicial K ou a separação normal característica δ^0 , que corresponde à tração máxima. Estes parâmetros relacionam-se por $\delta^0 = t^0/K$.

3.5.2. Formulação do modelo

Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto. Na Figura 27 apresenta-se o modelo coesivo com forma triangular.



O modo puro (lei de maiores dimensões) caracteriza-se pela propagação do dano num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto é a lei de menores dimensões e caracteriza-se por utilizar critérios de tensões e energéticos para combinar os modos puros de tração e corte [39].

O comportamento linear elástico do MDC é definido por uma matriz constitutiva que relaciona as tensões e deformações em tração e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida da seguinte forma:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{COH} \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (12)$$

t_n e t_s correspondem à resistência coesiva em tração e corte respetivamente, ao passo que ε_n e ε_s são as deformações em tração e corte. A matriz \mathbf{K} contém os parâmetros de rigidez do adesivo. Uma boa aproximação para camadas finas de adesivo é dada por $K_{nn}=E$, $K_{ss}=G$ e $K_{ns}=0$. A iniciação do dano pode ser definida por um critério quadrático de tensões definido pela expressão (13):

$$\left(\frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_s^0} \right)^2 = 1. \quad (13)$$

“ $\langle \rangle$ ” são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. Atingida a resistência máxima em modo misto, a rigidez do material é degradada. A separação completa de um par de nós homólogo é prevista por um critério linear energético, definido pela equação 14 [38].

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (14)$$

3.5.3. Leis coesivas para simulação do adesivo

Os parâmetros coesivos dos adesivos foram determinados anteriormente através do método inverso [98]. Na Tabela 18 encontram-se as propriedades coesivas em tração e em corte para cada um dos adesivos estudados.

Tabela 18 - Propriedades coesivas dos adesivos em estudo [65].

Propriedade	Unidades	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce®472 FR
E	MPa	4890	1850	490
G	MPa	1560	560	190
t_n^0	MPa	39,45	12,63	11,48
t_s^0	MPa	30,2	17,9	10,50
G_{IC}	N/mm	0,2	0,43	2,36
G_{IIC}	N/mm	0,38	4,7	5,41

3.5.4. Validação da técnica numérica

A técnica numérica foi validada por Ferreira et al. [65], comparando os valores de P_{max} de juntas tubulares sujeitas à tração obtidos computacionalmente com os experimentais. Neste estudo paramétrico variou-se o L_o entre 20 e 40 e o tipo de adesivo. O comprimento total da junta fixou-se em 80, a espessura do adesivo em 0,2 mm, o diâmetro do tubo interior em 20 mm e o diâmetro do tubo exterior em 22,4 mm. Na Figura 28 apresenta-se um dos modelos numéricos e um do ensaio realizado experimentalmente.

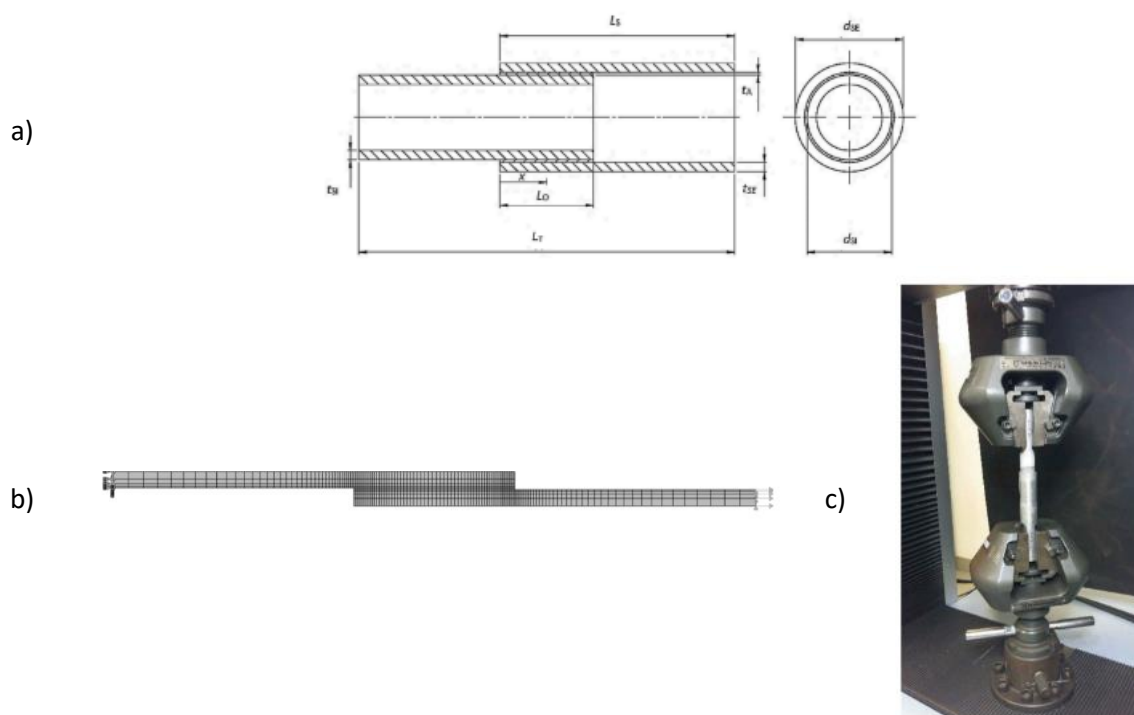


Figura 28 - a) Desenho técnico da junta tubular utilizada no estudo; b) modelo numérico; c) ensaio experimental de uma das juntas tubulares.

Na Tabela 19 apresentam-se os resultados obtidos no estudo realizado. Existe uma boa correlação de resultados (numéricos vs. experimentais) para os adesivos epóxicos. No caso das juntas com o adesivo de PU SikaForce®472 FR, a diferença entre os resultados obtidos pelo método numérico e os experimentais é acentuada. Esta discrepância acontece porque, para juntas adesivas com adesivos dúcteis simulados com leis coesivas triangulares, podem surgir previsões aquém do expectável, dada a depreciação imediata da tensão dos elementos coesivos após atingida a resistência coesiva. Os adesivos dúcteis são normalmente modelados com leis coesivas trapezoidais [65].

Tabela 19 - Valores de P_{max} [N] experimentais e numéricos, para os três adesivos em função de L_0 , e respetiva diferença relativa [65].

Adesivo	Araldite® AV138		Araldite® 2015		SikaForce®472 FR		
	L_0	20	40	20	40	20	40
Experimental (N)		32797	37857	27238	39067	23856	35930
Numérico (N)		33568	39631	28897	40210	19455	30779
Diferença (%)		2,4	4,7	6,1	2,9	18,4	14,3

Em função dos resultados obtidos, e apesar das diferenças observadas para o adesivo mais dúctil, considera-se a técnica numérica proposta validada para efeito do estudo numérico que se segue.

3.5.5. Criação do modelo numérico axisimétrico

Na criação dos modelos numéricos foi utilizado o *programa* ABAQUS®, versão de 2021, desenvolvido pela Dassault Systèmes. Este *programa* de EF permite utilizar o módulo integrado de MDC para prever a resistência das juntas adesivas. Neste trabalho optou-se por utilizar a lei coesiva com forma triangular em modo misto, a qual permite descrever adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivo e respetivas ligações adesivas com poucos parâmetros para a simulação. O ABAQUS® possui uma interface tipo árvore, que permite criar o modelo de forma sequencial e em etapas tal como é representado na Figura 29.

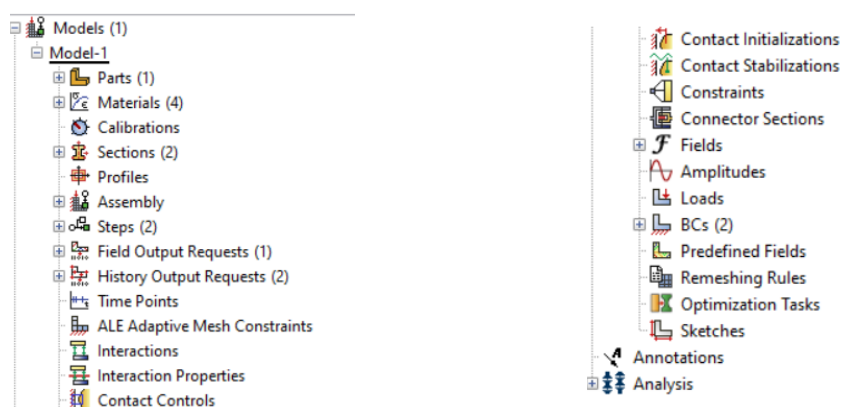


Figura 29 - Interface em árvore do *programa* Abaqus®.

3.5.5.1. Part

A primeira etapa passa pela criação das linhas gerais do modelo 2D axisimétrico, como exemplificado na Figura 30.

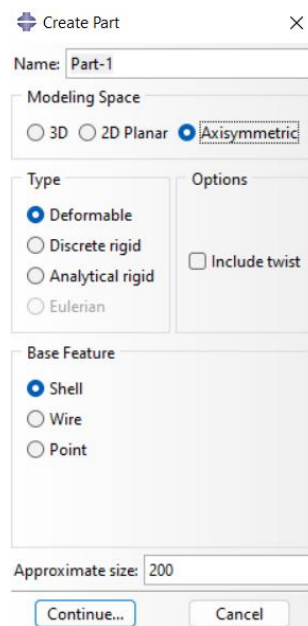


Figura 30 - Definição do tipo de modelo.

Optou-se pela modelação com elementos 2D axisimétricos pois esta requer menores recursos computacionais. Criada a forma final pelos contornos externos esta é dividida em partições através do comando *Partition face*. As partições criadas isolam diferentes zonas da junta (substratos e camada de adesivo). Na Figura 31 é possível observar uma peça criada e as suas partições. A utilização de partições facilita ainda a criação da malha.

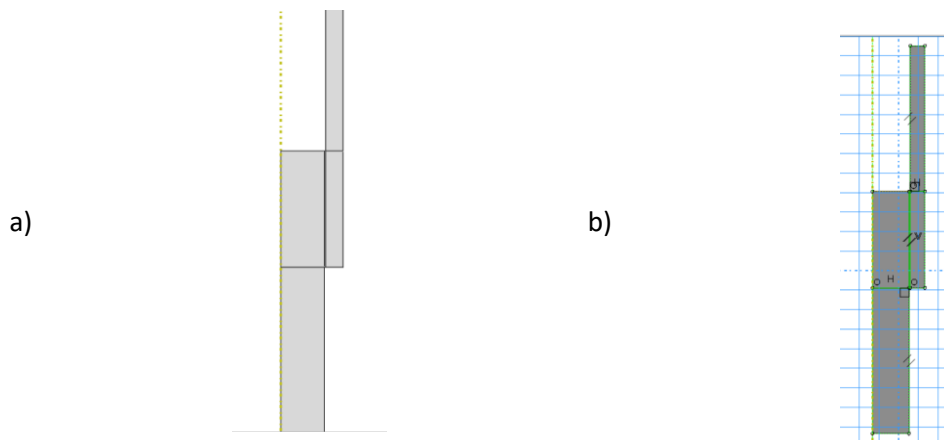


Figura 31 - a) Junta adesiva tubular modelada no ABAQUS®; b) partição de uma junta adesiva tubular com $L_0=20$ mm no ABAQUS®.

3.5.5.2. Property

Nesta etapa são criados os materiais a atribuir a cada partição. Para este efeito, utiliza-se o comando *Create Material*. Os substratos são considerados como materiais isotrópicos e tem-se em conta a sua rigidez e plasticidade, de forma a aferir se estes cedem antes ou depois da camada adesiva. O adesivo, por outro lado, é modelado com MDC (aproximação contínua), com uma única linha de elementos coesivos, e uma lei de tração-separação triangular que inclui a rigidez da camada adesiva. No caso de a junta apresentar um chanfro inteiro de adesivo, este é modelado como um material sólido isotrópico. Para a obtenção das distribuições de tensões de corte e arrancamento,

as propriedades do adesivo alocado à sobreposição são redefinidas como isotrópicas e usados elementos sólidos idênticos aos substratos.

3.5.5.3. Sections

Neste passo faz-se a atribuição dos materiais a cada secção. O substrato é definido como *Solid Homogeneous* e o Adesivo como *Cohesive*. Na Figura 32 encontra-se uma representação desta etapa.



Figura 32 - Representação do programa ABAQUS® da geometria da junta na etapa Sections.

3.5.5.4. Assembly

Este campo tem como função unir diferentes partes de um conjunto. No entanto como os modelos são compostos por um só componente, dividido em partições, não foi necessário efetuar nenhuma operação.

3.5.5.5. Step

Nesta etapa são definidos os parâmetros de computação dos modelos. Para evitar que a análise termine por exceder o número de incrementos permitido, foi considerado um valor de 100000 para o número máximo de incrementos a realizar na análise. O tamanho inicial do incremento foi definido como 1% do deslocamento imposto ao modelo e o tamanho máximo foi fixado em 3%. O tamanho mínimo do incremento foi definido como $1 \cdot 10^{-20}$, para permitir a redução do tamanho do incremento até este valor e assim evitar erro do modelo por dificuldade de convergência. Na Figura 33 estão descritos os incrementos utilizados e o tamanho dos incrementos.

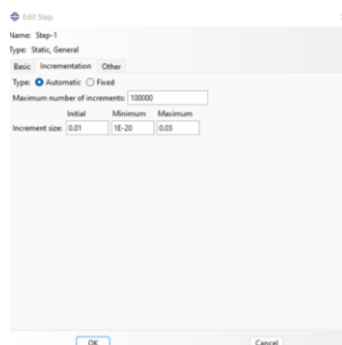


Figura 33 - Definição de incrementos para análise no ABAQUS®.

3.5.5.6. Load

No módulo *Load* são definidas as condições de fronteira do modelo. Numa das extremidades do varão não sobreposta foi aplicada uma restrição em Y. Na extremidade do tubo foi aplicado um deslocamento na direção longitudinal. Na Figura 34 é possível observar as restrições impostas ao modelo assim como os parâmetros selecionados. O deslocamento aplicado variou de 0,5 a 5 mm.



Figura 34 - Condições fronteira na simulação.

3.5.5.7. Mesh

Neste ponto é gerada a malha de elementos finitos do modelo. Para se criar a malha, inicialmente, é necessário selecionar a técnica de malha para cada uma das partições. Para os substratos, seleciona-se o tipo estrutural e para o adesivo o tipo *sweep*. Caso a junta apresente um chanfro interior de adesivo, a técnica de malha selecionada corresponde ao tipo *free*, devido à geometria triangular da partição respectiva. Posteriormente, através do comando *Assign element type*, seleciona-se o tipo de elemento para cada uma das partições, para os substratos seleciona-se o tipo *axisymmetric* e para os adesivos o tipo coesivo. De forma a evitar problemas convergência é introduzida viscosidade aos elementos. As zonas onde ocorrem os maiores gradientes de tensão devem ser o mais refinadas possível. Para aumentar a densidade da malha nas extremidades utiliza-se o comando *seed*. Por último cria-se a malha através do comando *Create Mesh*. Na Figura 35 encontra-se uma representação da malha na zona de sobreposição.

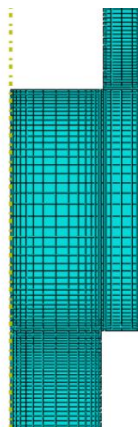
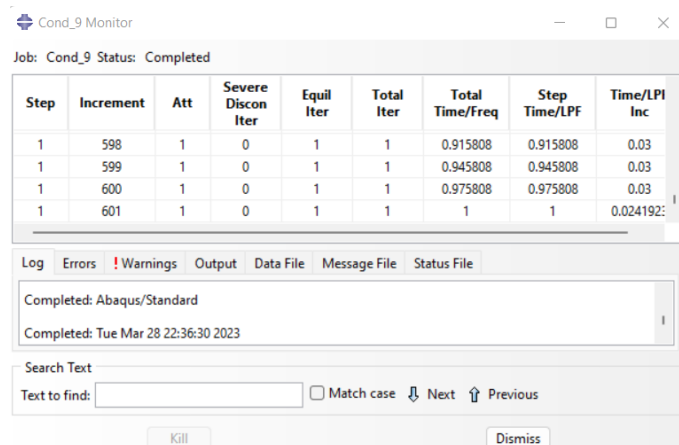


Figura 35 - Detalhe da malha de EF na zona de sobreposição para L_0 de 20 mm.

Para a obtenção das distribuições de tensões de corte e arrancamento, altera-se o tipo de elemento do substrato de coesivo para *axisymmetric*, através do comando *Assign element type*.

3.5.5.8. Job

A etapa *Job* corresponde ao processamento do modelo numérico, que conduz à apresentação dos resultados. Na Figura 36 encontra-se uma apresentação do comando *Job*.



Cond_9 Monitor

Job: Cond_9 Status: Completed

Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LPI Inc
1	598	1	0	1	1	0.915808	0.915808	0.03
1	599	1	0	1	1	0.945808	0.945808	0.03
1	600	1	0	1	1	0.975808	0.975808	0.03
1	601	1	0	1	1	1	1	0.024192

Log Errors !Warnings Output Data File Message File Status File

Completed: Abaqus/Standard
Completed: Tue Mar 28 22:36:30 2023

Search Text
Text to find: Match case

Figura 36 - Representação do programa ABAQUS® da ferramenta Monitor do comando *Job*.

3.5.5.9. Visualization

Por último, na etapa *Visualization* é possível visualizar os resultados obtidos. Através do comando *Create XY Data* é possível criar as curvas $P-\delta$ (Figura 37) e curvas das tensões de corte e arrancamento. Os resultados obtidos podem ser posteriormente exportados para Excel.

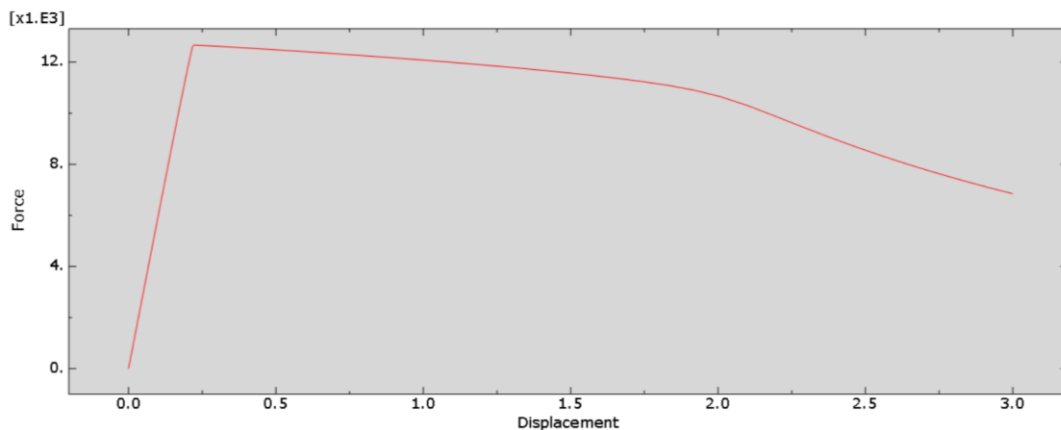


Figura 37 - Curva $P-\delta$ de um dos modelos.

3.6. Estudo paramétrico numérico

3.6.1. Desenho de experiências

Como fatores de controlo, foram selecionados: diâmetro do varão, comprimento de sobreposição, espessura do tubo, tipo de adesivo e chanfro interior adesivo. Para facilitar a leitura das tabelas foi atribuído a cada parâmetro de controlo uma letra do alfabeto. Na Tabela 20 encontram-se os níveis

selecionados para cada fator. Os fatores e níveis foram definidos com base no trabalho de Ferreira et al. [65]. As variáveis desse estudo estão assinaladas com um *.

Tabela 20 - Níveis selecionados para cada fator em estudo.

Nível	Fatores				
	A	B	C	D	E
1	10	10	1	Araldite® 138*	90*
2	20*	15	2*	Araldite® 2015*	60
3	40*	20*	3	SikaForce®472 FR*	30

Legenda: Comprimento de sobreposição (A), Diâmetro do varão (B), Espessura do tubo (C), Tipo de adesivo (D), Ângulo do chanfro interior adesivo (E).

Com base no número de fatores e níveis selecionados, consultou-se qual a matriz ortogonal a utilizar, de acordo com o método de Taguchi a matriz ortogonal a adotar é uma L_{27} . Com fatores e níveis identificados, obtêm-se as condições de simulação, representadas na Tabela 21.

Tabela 21 - Matriz ortogonal L_{27} .

Condição	A	B	C	D	E
1	10	10	1	Araldite® 138	90
2	10	10	1	Araldite® 138	60
3	10	10	1	Araldite® 138	30
4	10	15	2	Araldite® 2015	90
5	10	15	2	Araldite® 2015	60
6	10	15	2	Araldite® 2015	30
7	10	20	3	SikaForce®472 FR	90
8	10	20	3	SikaForce®472 FR	60
9	10	20	3	SikaForce®472 FR	30
10	20	10	2	SikaForce®472 FR	90
11	20	10	2	SikaForce®472 FR	60
12	20	10	2	SikaForce®472 FR	30
13	20	15	3	Araldite® 138	90
14	20	15	3	Araldite® 138	60
15	20	15	3	Araldite® 138	30
16	20	20	1	Araldite® 2015	90
17	20	20	1	Araldite® 2015	60
18	20	20	1	Araldite® 2015	30
19	40	10	3	Araldite® 2015	90
20	40	10	3	Araldite® 2015	60
21	40	10	3	Araldite® 2015	30
22	40	15	1	SikaForce®472 FR	90
23	40	15	1	SikaForce®472 FR	60
24	40	15	1	SikaForce®472 FR	30
25	40	20	2	Araldite® 138	90
26	40	20	2	Araldite® 138	60
27	40	20	2	Araldite® 138	30

3.6.2. Resistência da junta

Os resultados de P_{max} para cada uma das condições de teste encontram-se na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados de P_{max} para cada condição em estudo.

Condição	A	B	C	D	E	P_{max} (kN)
1	10	10	1	Araldite® 138	90	12,66
2	10	10	1	Araldite® 138	60	12,64
3	10	10	1	Araldite® 138	30	12,16
4	10	15	2	Araldite® 2015	90	10,82
5	10	15	2	Araldite® 2015	60	10,46
6	10	15	2	Araldite® 2015	30	9,94
7	10	20	3	SikaForce® 472 FR	90	10,15
8	10	20	3	SikaForce® 472 FR	60	9,44
9	10	20	3	SikaForce® 472 FR	30	7,26
10	20	10	2	SikaForce® 472 FR	90	10,63
11	20	10	2	SikaForce® 472 FR	60	10,46
12	20	10	2	SikaForce® 472 FR	30	9,34
13	20	15	3	Araldite® 138	90	37,06
14	20	15	3	Araldite® 138	60	49,53
15	20	15	3	Araldite® 138	30	49,46
16	20	20	1	Araldite® 2015	90	23,78
17	20	20	1	Araldite® 2015	60	23,77
18	20	20	1	Araldite® 2015	30	23,76
19	40	10	3	Araldite® 2015	90	27,52
20	40	10	3	Araldite® 2015	60	27,22
21	40	10	3	Araldite® 2015	30	26,69
22	40	15	1	SikaForce® 472 FR	90	18,22
23	40	15	1	SikaForce® 472 FR	60	18,80
24	40	15	1	SikaForce® 472 FR	30	18,17
25	40	20	2	Araldite® 138	90	45,91
26	40	20	2	Araldite® 138	60	46,40
27	40	20	2	Araldite® 138	30	45,30

Após determinar P_{max} para cada simulação, importou-se os valores para o programa Minitab 19 e efetuou-se a análise das médias (ANOM), para cada nível dos fatores de controlo. Posteriormente, calculou-se a diferença entre o maior e o menor valor de cada parâmetro, para os 5 fatores. Os resultados da ANOM estão expostos na Tabela 23. O valor delta é a diferença entre o maior nível de um fator e o menor. A linha *Rank* permite identificar os fatores mais significativos para o sistema em análise.

Tabela 23 - Resultados da ANOM para a resposta P_{max} .

Nível	A	B	C	D	E
1	10,62	16,60	18,22	34,57	21,87
2	26,43	24,72	22,14	20,44	23,20
3	30,47	26,20	27,15	12,50	22,46
Delta (Δ)	19,85	9,61	8,93	22,07	1,33
<i>Rank</i>	2	3	4	1	5

O tipo de adesivo é o fator que maior influência tem no P_{max} seguido do comprimento de sobreposição. O aumento do comprimento de sobreposição aumentou a rigidez da junta, reduzindo a deformação e aumentando a carga de rotura. Como é possível verificar através da Figura 38, a melhor combinação dos níveis dos parâmetros de controle é $A_3B_3C_3D_1E_2$.

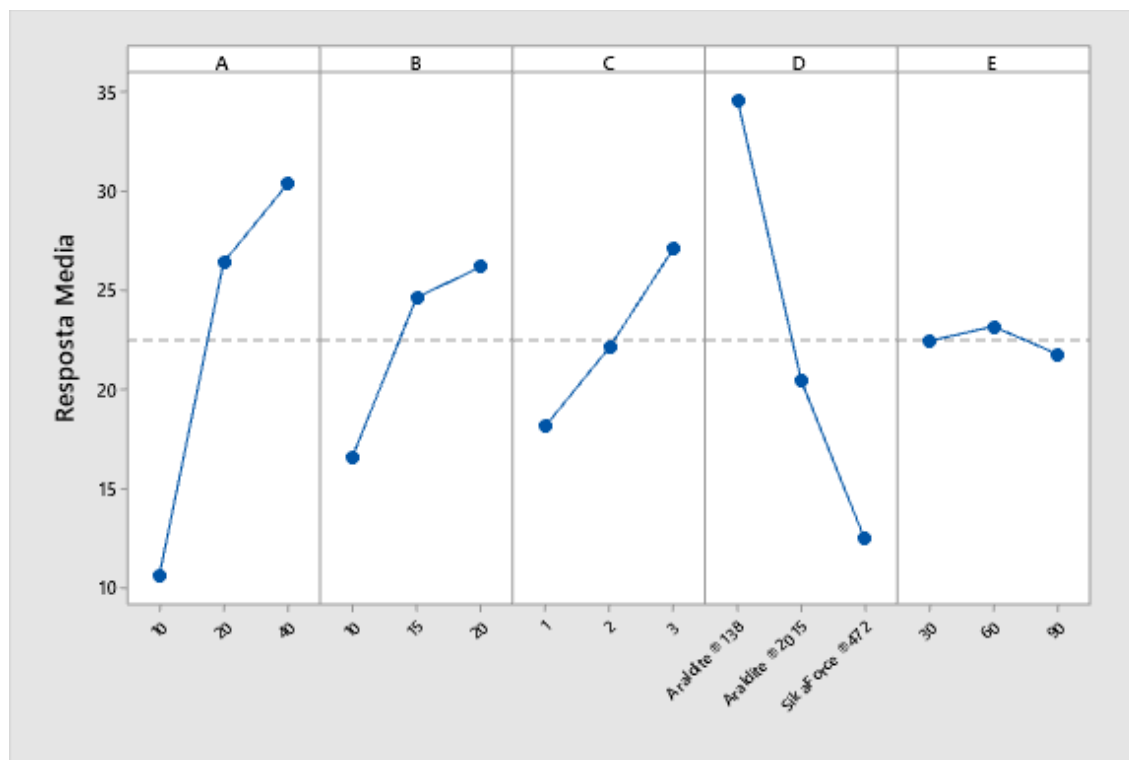


Figura 38 – Influência dos fatores e respetivos níveis em P_{max} .

Para verificar se a variação dos níveis de cada fator tem um efeito significativo, realizou-se a análise de variância (ANOVA). Como é possível observar na Tabela 24, o único fator não significativo é o chanfro adesivo uma vez que o valor de P é superior a 0,05%.

Tabela 24 - Análise da variância (ANOVA) para a resposta P_{max} .

Fonte	G.I	SS	MS	F	P
A	2	1980,92	990,46	154,78	0,000000000034
B	2	481,50	240,75	37,62	0,000000898402
C	2	360,40	180,20	28,16	0,000005740967
D	2	2249,37	1124,68	175,75	0,000000000012
E	2	7,99	4,00	0,62	0,548183716278
Erro residual	16	102,39	6,40		
Total	26	5182,57			

Resultados semelhantes foram obtidos por Silva et al. [66], que demonstraram que a introdução de filete adesivo em juntas tubulares não apresenta influência no valor de P_{max} . Por outro lado, o aumento do diâmetro do varão, da espessura do tubo e do comprimento de sobreposição aumentam a resistência da junta, maximizando o P_{max} . Fonseca et al. [65] conseguiram maximizar P_{max} através do aumento da espessura dos substratos e do comprimento de sobreposição de juntas tubulares.

Deste modo, o teste de confirmação que permitirá maximizar o P_{max} deve ser do tipo A₃B₃C₃D₁E₁. Quando um fator não apresenta influência do ponto de vista estatístico opta-se por utilizar sempre o 1 nível do fator correspondente. Na Figura 39 encontra-se o modelo utilizado no teste de confirmação.



Figura 39 - Configuração do teste de confirmação para P_{max} .

O valor de P_{max} para este modelo foi de 61 kN, o que corresponde a um aumento da resistência da junta em 33% face ao maior valor de P_{max} presente na Tabela 22. Na Figura 40 encontra-se a curva P - δ do modelo.

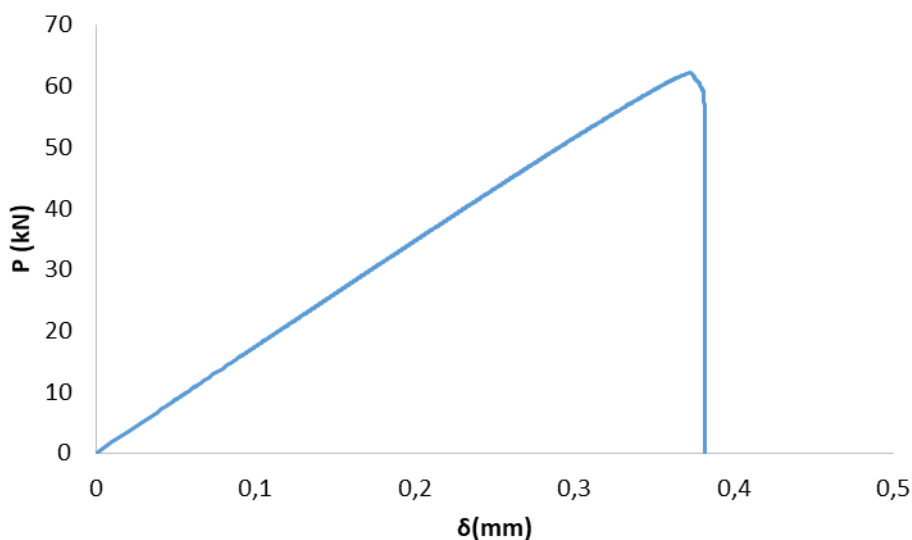


Figura 40 - Curva P - δ para a configuração do teste de confirmação.

3.6.3. Análise da variável de dano

Através do uso da variável SDEG no programa ABAQUS® é possível avaliar a evolução do dano dos elementos coesivos da camada de adesivo ao longo de x/L_0 . O estudo de SDEG é avaliado quando é alcançado P_{max} . Esta variável está relacionada com a degradação da rigidez dos elementos coesivos e assume valores de 0 a 1. Quando SDEG=0, o material está no estágio elástico, portanto nenhum dano ocorreu, enquanto SDEG=1 corresponde à degradação total dos elementos coesivos, ou seja, o elemento entra em colapso [78]. Como era esperado, o dano é iniciado na extremidade do adesivo o que se encontra de acordo com a localização dos picos de tensão σ_y e τ_{xy} (ver Figura 44 e Figura 49). Na Figura 41 apresenta-se a variável SDEG para uma condição sem chanfro de adesivo (a) e outra com chanfro adesivo (b).

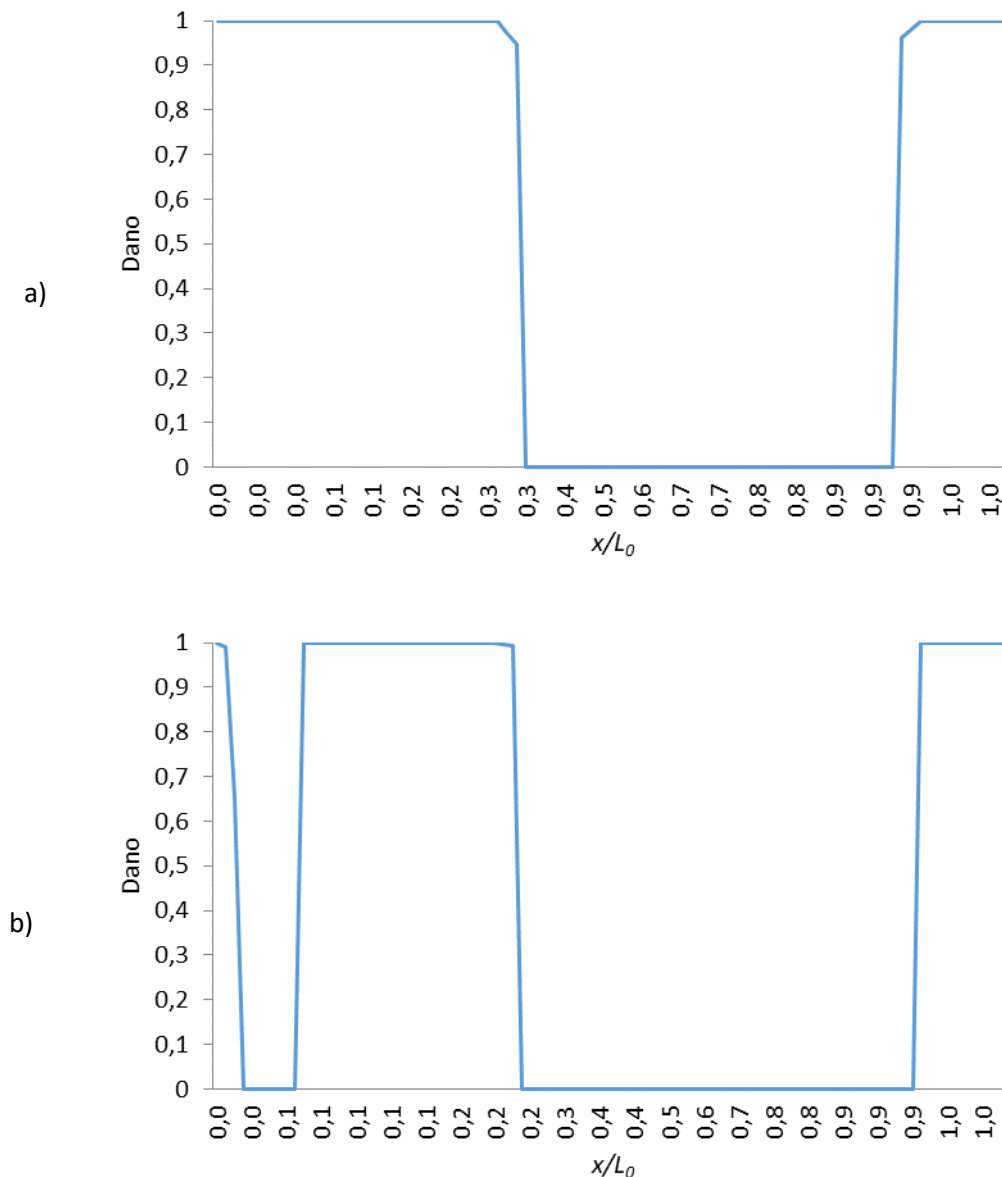


Figura 41 – SDEG nas camadas de adesivo para P_{max} : a) Condição 25; b) condição 27.

Na Tabela 25 encontra-se a área em dano para cada condição.

Tabela 25 - Valores de SDEG e de área em dano para cada condição em estudo.

Condição	A	B	C	D	E	Área em dano
1	10	10	1	Araldite® 138	90	69
2	10	10	1	Araldite® 138	60	76
3	10	10	1	Araldite® 138	30	89
4	10	15	2	Araldite® 2015	90	90
5	10	15	2	Araldite® 2015	60	90
6	10	15	2	Araldite® 2015	30	85
7	10	20	3	SikaForce®472 FR	90	91
8	10	20	3	SikaForce®472 FR	60	64
9	10	20	3	SikaForce®472 FR	30	72
10	20	10	2	SikaForce®472 FR	90	90
11	20	10	2	SikaForce®472 FR	60	86
12	20	10	2	SikaForce®472 FR	30	85
13	20	15	3	Araldite® 138	90	95
14	20	15	3	Araldite® 138	60	95
15	20	15	3	Araldite® 138	30	84
16	20	20	1	Araldite® 2015	90	64
17	20	20	1	Araldite® 2015	60	68
18	20	20	1	Araldite® 2015	30	65
19	40	10	3	Araldite® 2015	90	66
20	40	10	3	Araldite® 2015	60	90
21	40	10	3	Araldite® 2015	30	92
22	40	15	1	SikaForce®472 FR	90	56
23	40	15	1	SikaForce®472 FR	60	68
24	40	15	1	SikaForce®472 FR	30	93
25	40	20	2	Araldite® 138	90	37
26	40	20	2	Araldite® 138	60	35
27	40	20	2	Araldite® 138	30	25

Na Tabela 26 apresentam-se os resultados da ANOM para a área em dano.

Tabela 26 - Resultados da ANOM para a resposta dano para P_{max} .

Nível	A	B	C	D	E
1	80,67	82,56	72,00	67,22	73,11
2	81,33	84,00	69,22	78,89	74,67
3	62,44	57,89	83,22	78,33	76,67
Delta (Δ)	18,89	26,11	14,00	11,67	3,56
Rank	2	1	3	4	5

Na Figura 42 é possível observar a influência dos fatores e respectivos níveis no dano da junta para P_{max} . O diâmetro do varão é o fator que maior influência tem no dano da junta, seguido do comprimento de sobreposição e a espessura do tubo. Com o aumento da rigidez da junta, menor é a área em dano.

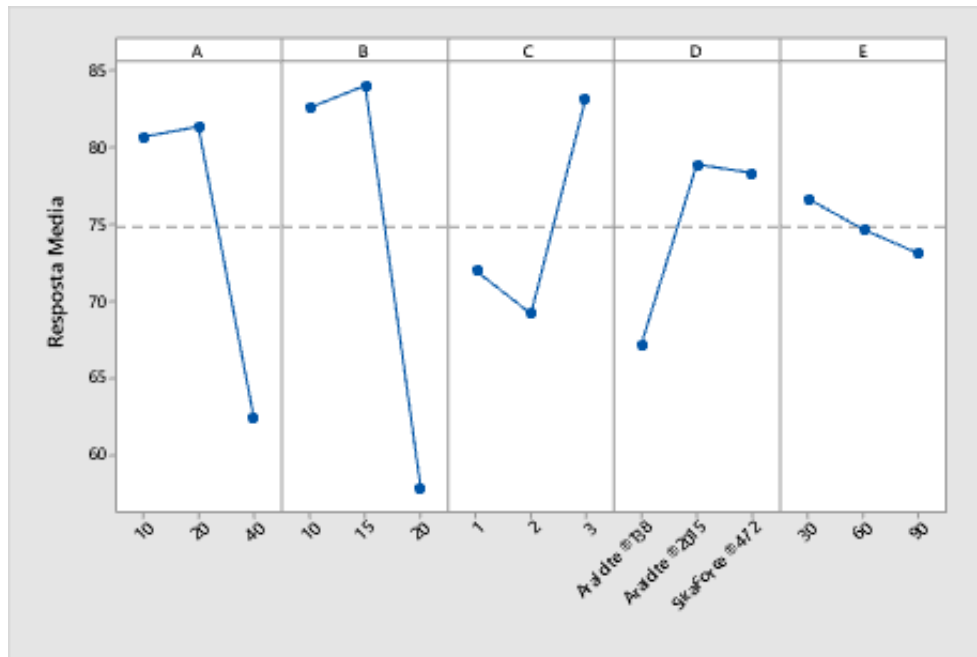


Figura 42 - Influência dos fatores e respetivos níveis no dano para P_{max} .

3.6.4. Tensão de arrancamento

Na Figura 43, é possível observar uma curva de arrancamento de uma condição com chanfro interior adesivo. Verifica-se uma diminuição das tensões σ_y para os valores de x/L_0 que corresponde à zona do chanfro interior adesivo. Isto deve-se ao facto de a rigidez do adesivo ser inferior à do substrato, diminuindo por sua vez a concentração de tensões nessa zona.

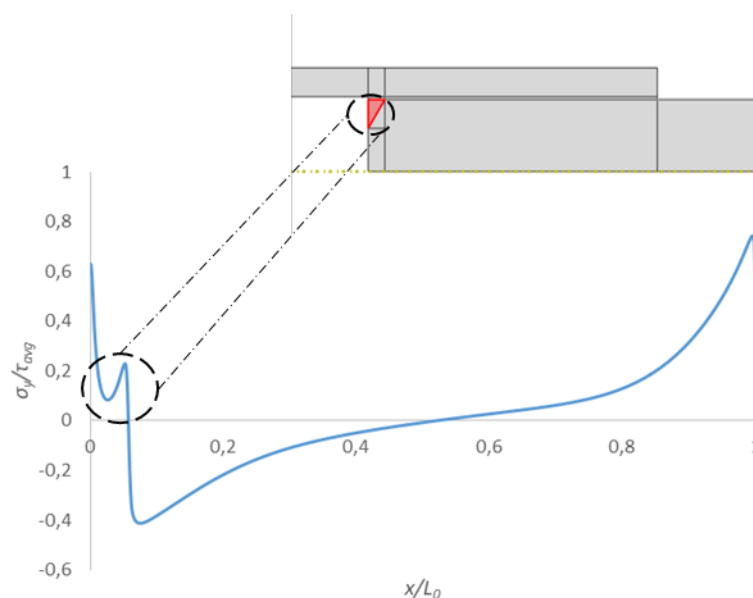


Figura 43 - Tensão de arrancamento da condição 11.

As condições sem chanfro interior por sua vez apresentam uma curva característica como a presente na Figura 44. Observam-se neste tipo de curva picos compressivos na proximidade das singularidades. Na Tabela 27 encontram-se os valores da tensão de arrancamento a meio da espessura do adesivo para cada uma das condições estudadas.

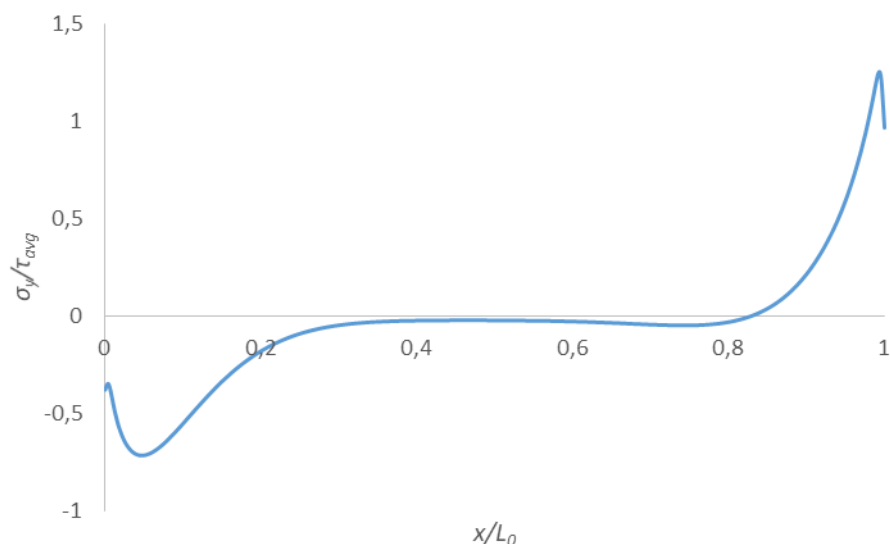


Figura 44 - Tensão de arrancamento da condição 1.

Tabela 27 - Resultados de σ_y/τ_{avg} para cada condição em estudo.

Condição	A	B	C	D	E	σ_y/τ_{avg}
1	10	10	1	Araldite® 138	90	1,25
2	10	10	1	Araldite® 138	60	1,56
3	10	10	1	Araldite® 138	30	1,45
4	10	15	2	Araldite® 2015	90	1,10
5	10	15	2	Araldite® 2015	60	1,16
6	10	15	2	Araldite® 2015	30	1,40
7	10	20	3	SikaForce®472 FR	90	0,86
8	10	20	3	SikaForce®472 FR	60	0,77
9	10	20	3	SikaForce®472 FR	30	0,93
10	20	10	2	SikaForce®472 FR	90	0,73
11	20	10	2	SikaForce®472 FR	60	0,74
12	20	10	2	SikaForce®472 FR	30	0,77
13	20	15	3	Araldite® 138	90	2,59
14	20	15	3	Araldite® 138	60	0,79
15	20	15	3	Araldite® 138	30	0,82
16	20	20	1	Araldite® 2015	90	0,75
17	20	20	1	Araldite® 2015	60	1,03
18	20	20	1	Araldite® 2015	30	1,04
19	40	10	3	Araldite® 2015	90	3,64
20	40	10	3	Araldite® 2015	60	3,66
21	40	10	3	Araldite® 2015	30	3,65
22	40	15	1	SikaForce®472 FR	90	1,34
23	40	15	1	SikaForce®472 FR	60	1,36
24	40	15	1	SikaForce®472 FR	30	1,37
25	40	20	2	Araldite® 138	90	3,18
26	40	20	2	Araldite® 138	60	3,19
27	40	20	2	Araldite® 138	30	3,16

Os resultados da ANOM para σ_y/τ_{avg} estão expostos na Tabela 28.

Tabela 28 - Resultados da ANOM para a resposta σ_y/τ_{avg} .

Nível	A	B	C	D	E
1	1,1679	1,9429	1,2451	2,0008	1,7241
2	1,0304	1,3314	1,7184	1,9390	1,5851
3	2,7349	1,6588	1,9697	0,9934	1,6240
Delta (Δ)	1,7045	0,6115	0,7246	1,0075	0,1389
Rank	1	4	3	2	5

O comprimento de sobreposição é o fator que mais influencia σ_y/τ_{avg} . O aumento de L_o tende a aumentar a rigidez da junta adesiva e, como tal, passa a existir uma maior capacidade de absorção da energia imposta pelo carregamento e, conseqüentemente, um aumento de tensões instaladas. O tipo de adesivo é o segundo fator que mais influencia a σ_y/τ_{avg} . Adesivos que apresentem maior E tendem a gerar valores de σ_y/τ_{avg} mais elevados. O diâmetro do varão e a espessura do tubo são os outros fatores que apresentam influência na resposta final. Elevadas diferenças entre os fatores B e C tendem a provocar diferenciais de rigidez elevados que resultam em maiores tensões geradas na camada de adesivo. Como é possível verificar através da Figura 45, a melhor combinação dos níveis dos parâmetros de controle é $A_2B_2C_1D_3E_2$.

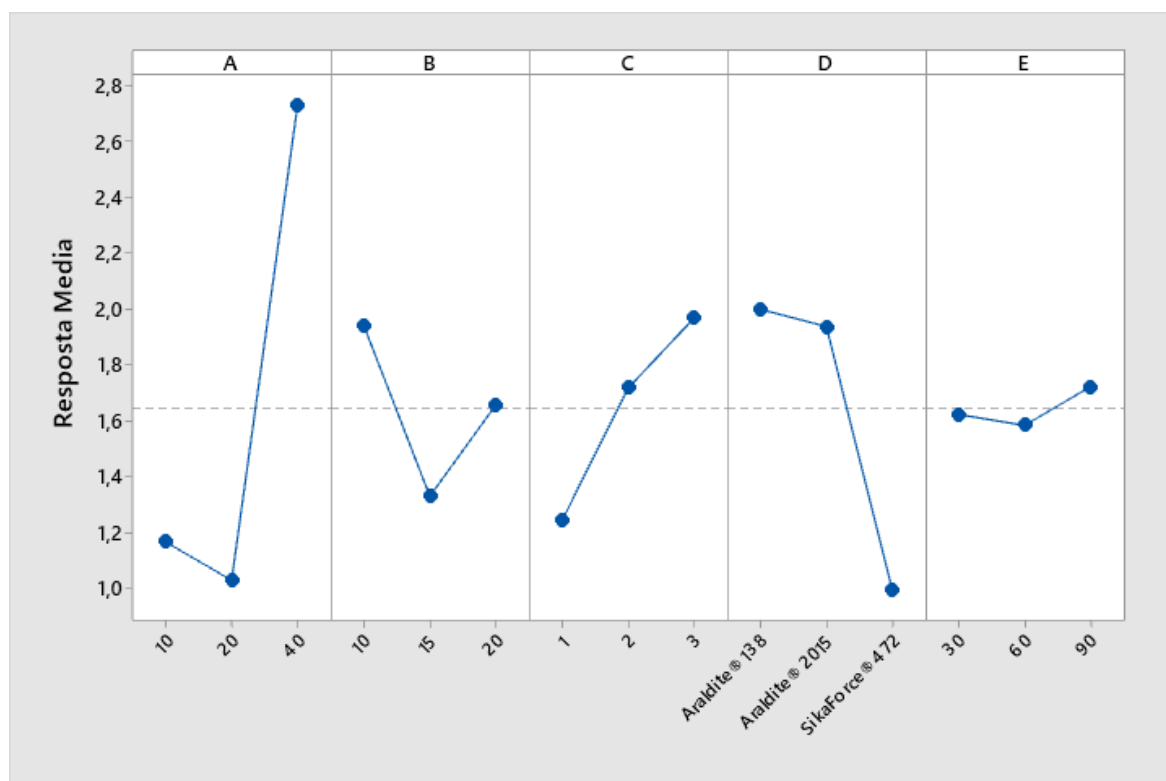


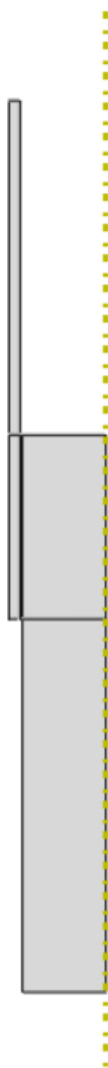
Figura 45 - Influência dos fatores e respectivos níveis em σ_y/τ_{avg} .

Para verificar se a variação dos níveis de cada fator tem um efeito significativo no resultado, realizou-se a análise de variância (ANOVA). Como é possível observar através da Tabela 29, o único fator não significativo do ponto de vista estatístico é o ângulo do chanfro interior adesivo uma vez que $P > 0,05$.

Tabela 29 - Análise da variância (ANOVA) para a resposta σ_y/τ_{avg} .

Fonte	G.I	SS	MS	F	P
A	2	16,1384	8,06920	58,12	0,00000004595
B	2	1,6857	0,84285	6,07	0,01092188633
C	2	2,4364	1,21819	8,77	0,00267752432
D	2	5,7391	2,86954	20,67	0,00003678717
E	2	0,0925	0,04624	0,33	0,72157973746
Erro residual	16	2,2216	0,13885		
Total	26	28,3136			

A condição otimizada que permitirá minimizar σ_y/τ_{avg} deve ser do tipo $A_2B_2C_1D_3E_1$. Na Figura 46 encontra-se a configuração de junta testada.

Figura 46 - Configuração do teste de confirmação para σ_y/τ_{avg} .

Na Figura 47 encontra-se a curva do teste de confirmação para σ_y/τ_{avg} . Para esta junta varão-tubo obteve-se um σ_y/τ_{avg} máximo de 0,5. Face às configurações anteriormente testadas verifica-se uma redução da σ_y/τ_{avg} em cerca de 28.4%.

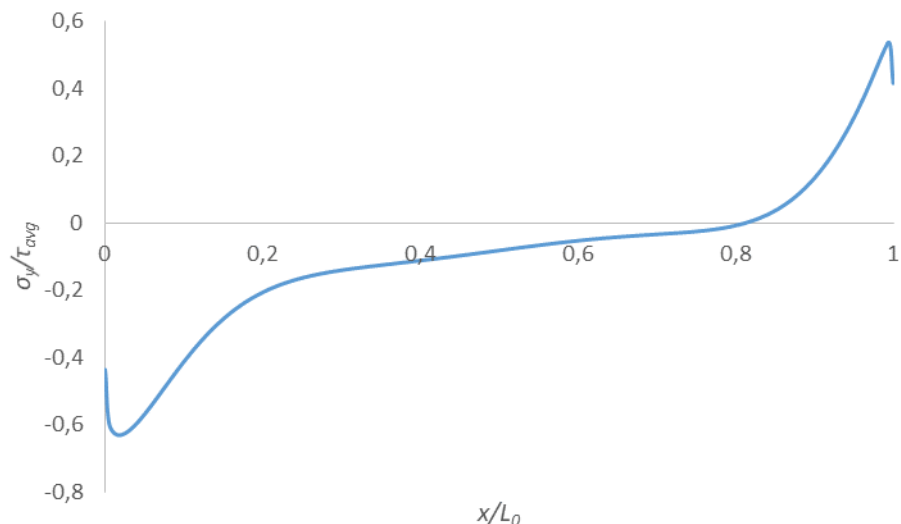


Figura 47 - Curva σ_y/τ_{avg} para a configuração do teste de confirmação.

3.6.5. Tensões de corte

De uma forma geral, verifica-se que as tensões τ_{xy} são superiores às σ_y . Na Figura 48 é possível observar uma curva de corte de uma condição com chanfro interior adesivo. Verifica-se uma diminuição das tensões τ_{xy} para os valores de x/L_0 que correspondem aos chanfros adesivos. Isto deve-se ao facto de a rigidez do adesivo ser inferior ao do substrato, o que por sua vez diminui a concentração de tensões nessa zona.

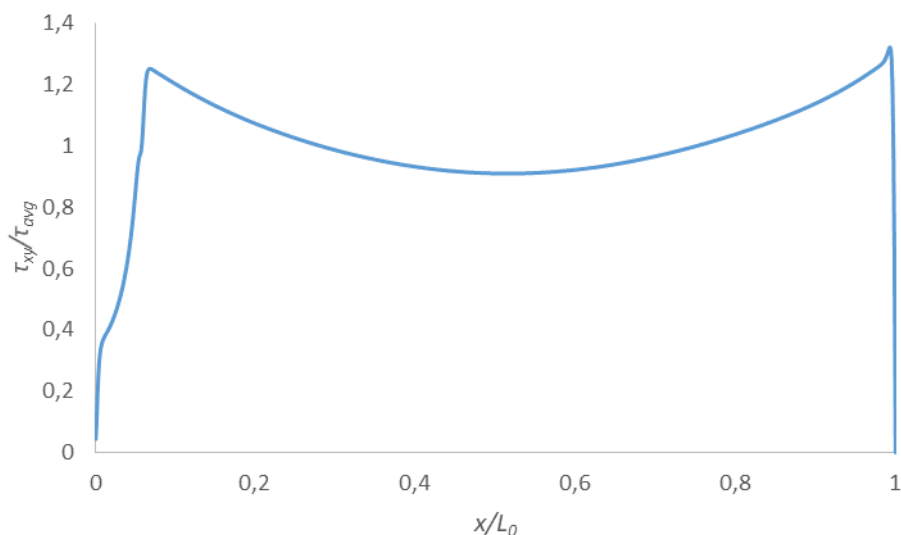


Figura 48 - Curva de corte da condição 11.

As condições sem chanfro por sua vez apresentam uma curva característica como a presente na Figura 49. Observa-se picos de concentração de tensões mais elevadas em $x/L_0=0$, decorrentes do diferencial de rigidez entre os substratos nesta extremidade da ligação que por sua vez provocam um aumento das tensões geradas na camada de adesivo. Na Tabela 30 encontram-se os valores das tensões de corte máximas presentes para cada condição.

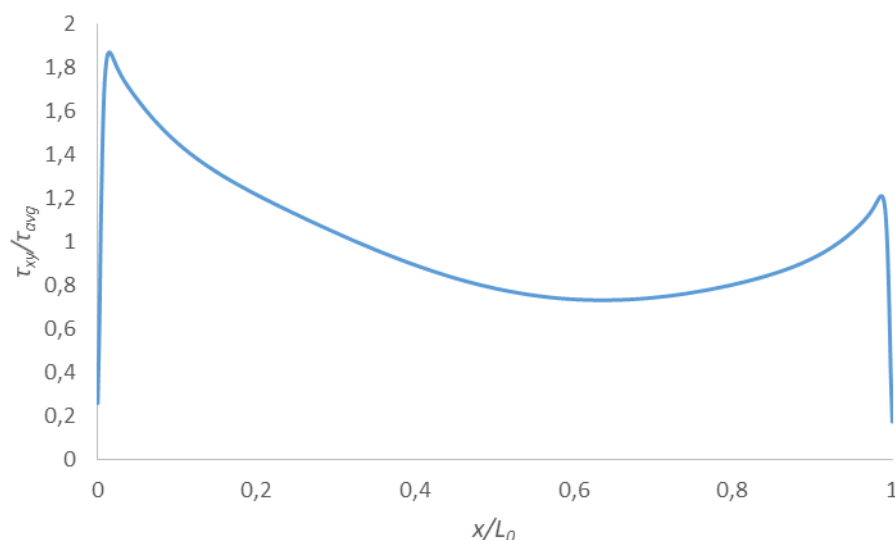


Figura 49 - Curva de corte da condição 1.

Tabela 30 - Resultados de τ_{xy}/τ_{avg} para cada condição em estudo.

Condição	A	B	C	D	E	τ_{xy}/τ_{avg}
1	10	10	1	Araldite® 138	90	1,87
2	10	10	1	Araldite® 138	60	1,94
3	10	10	1	Araldite® 138	30	1,60
4	10	15	2	Araldite® 2015	90	1,20
5	10	15	2	Araldite® 2015	60	1,20
6	10	15	2	Araldite® 2015	30	1,43
7	10	20	3	SikaForce® 472 FR	90	1,29
8	10	20	3	SikaForce® 472 FR	60	1,12
9	10	20	3	SikaForce® 472 FR	30	1,39
10	20	10	2	SikaForce® 472 FR	90	1,29
11	20	10	2	SikaForce® 472 FR	60	1,32
12	20	10	2	SikaForce® 472 FR	30	1,40
13	20	15	3	Araldite® 138	90	2,05
14	20	15	3	Araldite® 138	60	1,22
15	20	15	3	Araldite® 138	30	1,31
16	20	20	1	Araldite® 2015	90	2,82
17	20	20	1	Araldite® 2015	60	2,55
18	20	20	1	Araldite® 2015	30	2,51
19	40	10	3	Araldite® 2015	90	3,78
20	40	10	3	Araldite® 2015	60	3,79
21	40	10	3	Araldite® 2015	30	3,79
22	40	15	1	SikaForce® 472 FR	90	2,25
23	40	15	1	SikaForce® 472 FR	60	2,26
24	40	15	1	SikaForce® 472 FR	30	2,27
25	40	20	2	Araldite® 138	90	4,65
26	40	20	2	Araldite® 138	60	4,04
27	40	20	2	Araldite® 138	30	3,97

Os resultados da ANOM para τ_{xy}/τ_{avg} estão expostos na Tabela 31.

Tabela 31 - Resultados da ANOM para a resposta τ_{xy}/τ_{avg} .

Nível	A	B	C	D	E
1	1,454	2,314	2,234	2,522	2,361
2	1,834	1,692	2,284	2,568	2,164
3	3,427	2,709	2,198	1,625	2,191
Delta	1,972	1,017	0,086	0,943	0,197
Rank	1	2	5	3	4

Os fatores que têm maior influência em τ_{xy}/τ_{avg} são o L_o , diâmetro do varão e tipo de adesivo. Verifica-se uma relação quase linear entre o aumento de L_o e o aumento de τ_{xy}/τ_{avg} . O aumento de L_o provoca um aumento da rigidez global da junta fazendo com que surjam picos acentuados de tensões τ_{xy} . O diâmetro do varão é o segundo fator com maior influência no sistema em análise. A variação do diâmetro do varão provoca alterações na secção transversal do substrato, o que conduz a deformações longitudinais de tal ordem que pode provocar um aumento dos picos de tensão. O tipo de adesivo é o terceiro fator com maior influência para τ_{xy}/τ_{avg} do sistema em estudo. O SikaForce® 472 FR é o adesivo que apresenta os menores valores de τ_{xy}/τ_{avg} e este resultado está relacionado com a sua menor rigidez. O ângulo do chanfro adesivo e a espessura do tubo são os fatores com menor relevância.

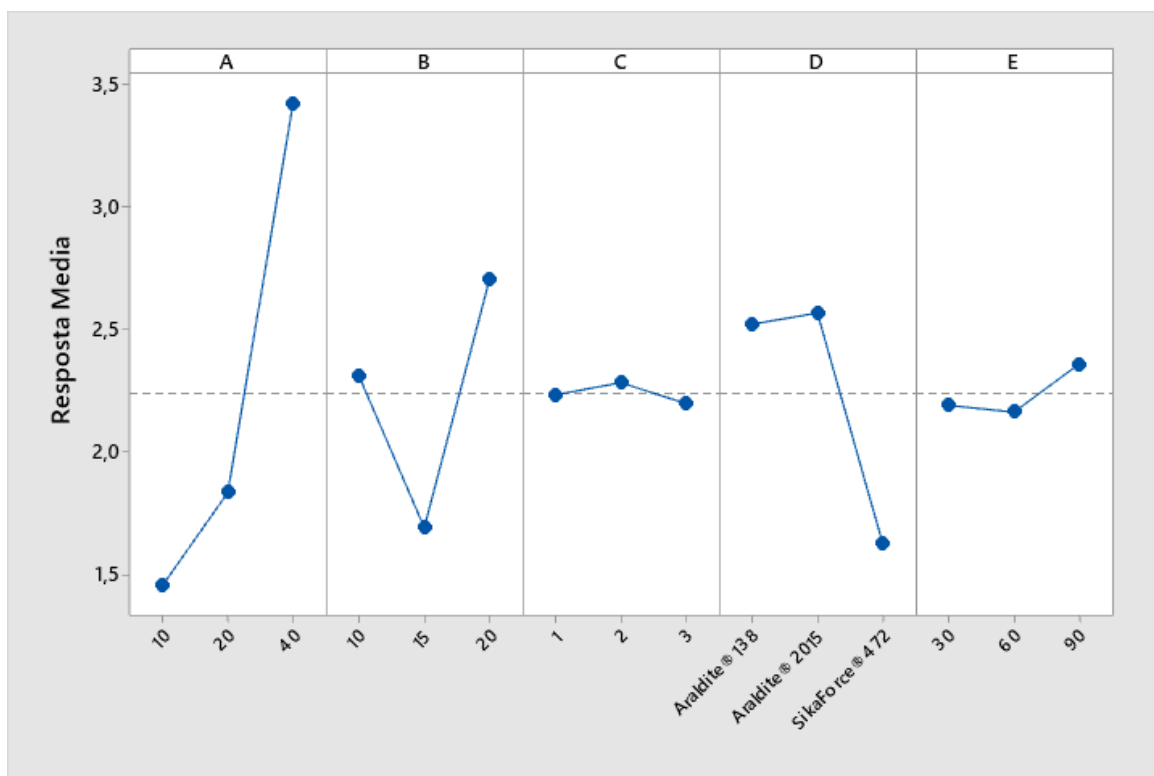


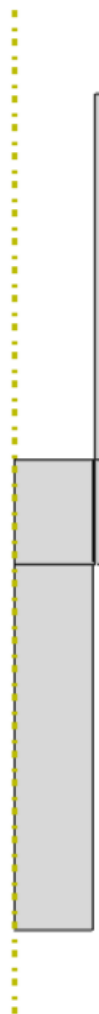
Figura 50 - Influência dos fatores e respectivos níveis em τ_{xy}/τ_{avg} .

Para verificar se a variação dos níveis de cada fator tem um efeito significativo no resultado, realizou-se a análise de variância (ANOVA). Como é possível observar através da Tabela 32 os fatores não significativos do ponto de vista estatístico são diâmetro do tubo e ângulo do chanfro adesivo.

Tabela 32 - Análise da variância (ANOVA) para a resposta τ_{xy}/τ_{avg} .

Fonte	G.I	SS	MS	F	P
A	2	19,7079	9,85397	226,27	0,00000000000018
B	2	4,7322	2,36612	54,33	0,0000000736362
C	2	0,0336	0,01679	0,39	0,6861717832905
D	2	5,0862	2,54308	58,39	0,0000000444301
E	2	0,2055	0,10274	2,36	0,1265179370042
Erro residual	16	0,6968	0,04355		
Total	26	30,4622			

Uma vez que a espessura do tubo e o chanfro adesivo não têm influência estatística, a condição otimizada é do tipo $A_1B_2C_1D_3E_1$. Quando um fator não apresenta influência do ponto de vista estatístico, opta-se por utilizar sempre o 1 nível do fator correspondente. Na Figura 51 apresenta-se a geometria da junta do teste de confirmação.

Figura 51 - Configuração do teste de confirmação para τ_{xy}/τ_{avg} .

O valor máximo de τ_{xy}/τ_{avg} para este modelo foi de 1,24586, o que significa um aumento em 10% desta face ao valor mais baixo de τ_{xy}/τ_{avg} presente na Tabela 30. Na Figura 52 encontra-se a distribuições das tensões τ_{xy}/τ_{avg} modelo de confirmação.

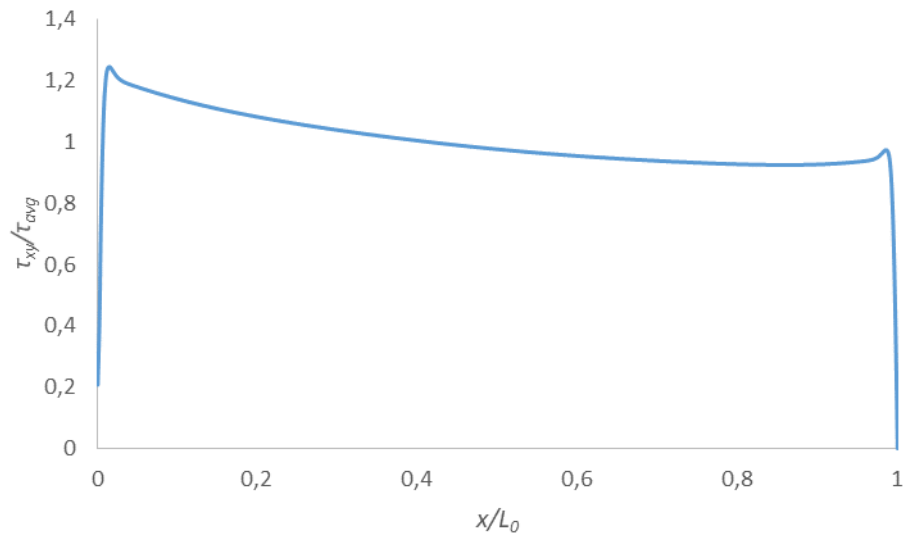


Figura 52 - Curva τ_{xy}/τ_{avg} para a configuração do teste de confirmação.

3.6.6. Previsão da energia dissipada

Além do P_{max} , o U é outro parâmetro para avaliar o desempenho das juntas tubulares. Quanto maior for a capacidade de um adesivo dissipar energia, mais difícil é a sua remoção e mais resistente será a ligação [100]. Este é um parâmetro de grande relevância, que indica a capacidade da junta em absorver energia no impacto, e ganha especial relevância em estruturas de absorção de impacto, por exemplo. Os valores da energia dissipada foram obtidos através da área das curvas $P-\delta$ obtidas numericamente pelo programa ABAQUS® [1]. Para evitar efeitos de plastificação dos substratos na determinação de U . O calculado foi realizado desde o início do teste até se atingir P_{max} [66]. A energia dissipada foi determinada através da equação 15.

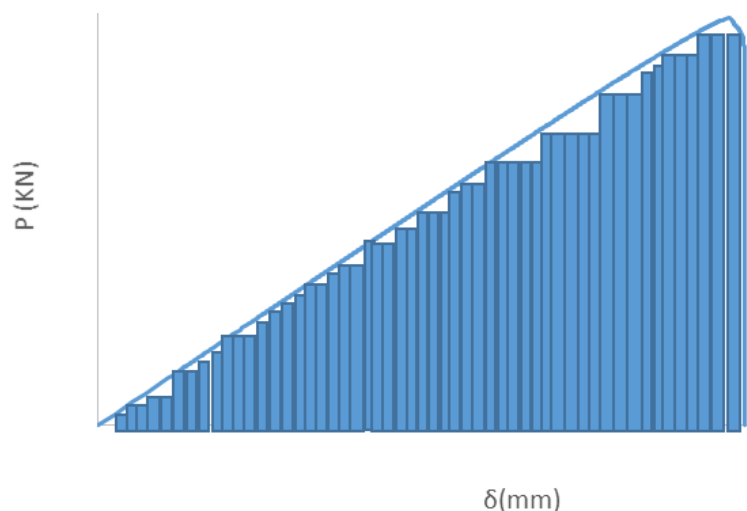
$$U = \sum_{i=1}^n (\delta_i - \delta_{i-1}) * P_i \quad (15)$$

onde,

$\delta_i - \delta_{i-1}$, corresponde à diferença de dois deslocamentos sucessivos,

P_i , corresponde ao valor de carga para $\delta_i - \delta_{i-1}$.

A Figura 53 mostra de forma simplificada o método utilizado para obtenção de U . Para determinação de U , foi utilizado o programa Microsoft® Excel. Na Tabela 33 encontram-se as respostas para cada condição estudada.

Figura 53 - Representação simplificada do cálculo de U .Tabela 33 - Resultados de U para cada condição estudada.

Condição	A	B	C	D	E	U
1	10	10	1	Araldite® 138	90	1,54
2	10	10	1	Araldite® 138	60	2,16
3	10	10	1	Araldite® 138	30	1,79
4	10	15	2	Araldite® 2015	90	1,97
5	10	15	2	Araldite® 2015	60	0,53
6	10	15	2	Araldite® 2015	30	0,70
7	10	20	3	SikaForce® 472 FR	90	0,23
8	10	20	3	SikaForce® 472 FR	60	0,22
9	10	20	3	SikaForce® 472 FR	30	0,22
10	20	10	2	SikaForce® 472 FR	90	0,80
11	20	10	2	SikaForce® 472 FR	60	0,82
12	20	10	2	SikaForce® 472 FR	30	0,68
13	20	15	3	Araldite® 138	90	4,44
14	20	15	3	Araldite® 138	60	1,68
15	20	15	3	Araldite® 138	30	1,70
16	20	20	1	Araldite® 2015	90	3,37
17	20	20	1	Araldite® 2015	60	3,26
18	20	20	1	Araldite® 2015	30	3,31
19	40	10	3	Araldite® 2015	90	6,60
20	40	10	3	Araldite® 2015	60	6,36
21	40	10	3	Araldite® 2015	30	6,27
22	40	15	1	SikaForce® 472 FR	90	3,56
23	40	15	1	SikaForce® 472 FR	60	3,11
24	40	15	1	SikaForce® 472 FR	30	2,89
25	40	20	2	Araldite® 138	90	8,66
26	40	20	2	Araldite® 138	60	8,64
27	40	20	2	Araldite® 138	30	7,94

Os resultados da ANOM para U estão expostos na Tabela 34.

Tabela 34 - Resultados da ANOM para a resposta U .

Nível	A	B	C	D	E
1	1,040	3,002	2,777	4,283	3,463
2	2,229	2,287	3,416	3,597	2,976
3	6,003	3,983	3,080	1,392	2,833
Delta	4,963	1,697	0,639	2,891	0,630
Rank	1	3	4	2	5

Os fatores que mais influência têm na energia dissipada são o comprimento de sobreposição, diâmetro do tubo e o tipo de adesivo. Como é possível verificar através da Figura 54, a melhor combinação dos níveis dos parâmetros de controlo é $A_3B_3C_2D_1E_1$. Um aumento da rigidez da junta provoca uma maior capacidade de absorver energia, o que se traduz numa maior capacidade de suportar solicitações mais elevadas.

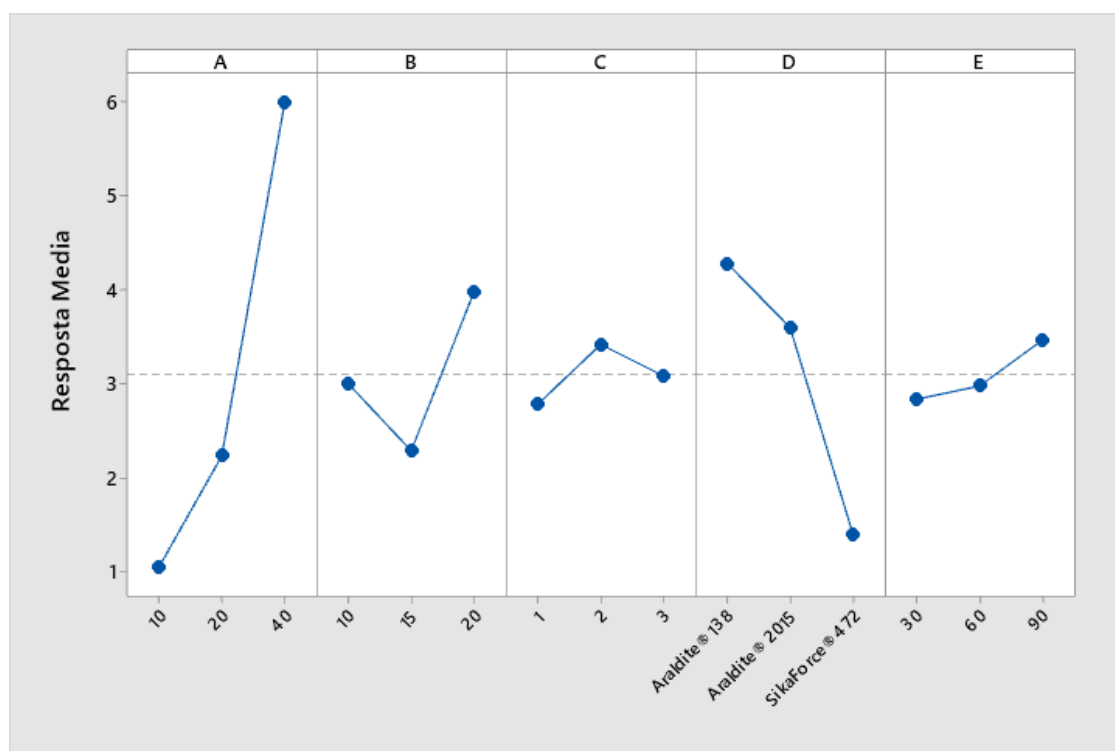


Figura 54 - Influência dos fatores e respetivos níveis em U .

Os resultados da ANOVA encontram-se na Tabela 35.

Tabela 35 - Análise da variância (ANOVA) para a resposta U .

Fonte	G.I	SS	MS	F	P
A	2	120,855	60,4276	187,02	0,00000000001
B	2	13,064	6,5322	20,22	0,00004175803
C	2	1,838	0,9192	2,84	0,08768440708
D	2	41,079	20,5395	63,57	0,00000002438
E	2	1,976	0,9880	3,06	0,07505546582
Error residual	16	5,170	0,3231		
Total	26	183,983			

Como é possível constatar, os fatores C e o E não têm significado do ponto de vista estatístico, uma vez que o valor de P é superior a 0,05%. A condição ótima que permitirá maximizar U deve ser do tipo $A_3B_3C_3D_1E_1$. Selecionou-se o nível 3 para a espessura do tubo de forma a evitar a sua plastificação. Na Figura 55 encontra-se a geometria empregue no teste de confirmação. O valor da energia dissipada para a condição otimizada foi de 12,53 J, o que representa um incremento em 44,6% face à melhor condição presente na Tabela 33.



Figura 55- Configuração do teste de confirmação para U .

3.6.7. Análise dos resultados obtidos

Na Tabela 36 são expostas todas as propriedades determinadas para as configurações do teste de confirmação. O delta é a diferença entre o maior e menor valor para cada uma das propriedades em módulo. Como é possível observar, a configuração $A_3B_3C_3D_1E_1$ é a que apresenta melhor combinação de propriedades. Para juntas do tipo varão-tubo, um aumento da rigidez da junta tende a favorecer P_{max} , U e área não danificada. Verifica-se também que estes três fatores estão diretamente relacionados: um aumento de P_{max} , provoca um aumento de U e uma redução da área danificada. O aumento da rigidez do adesivo eleva as concentrações de tensões de corte e arrancamento. No entanto, este aumento não é significativo.

Tabela 36 - Tabela resumo com todas as propriedades das condições de teste.

Configurações	P_{max}	σ_y/τ_{avg}	τ_{xy}/τ_{avg}	U (J)
$A_3B_3C_3D_1E_1$	62,00	3,90	3,50	12,53
$A_2B_2C_1D_3E_1$	12,17	0,50	1,62	1,27
$A_1B_2C_1D_3E_1$	8,35	0,02	1,25	0,60
Delta	53,65	3,88	2,25	11,93

As juntas adesivas varão-tubo do tipo $A_3B_3C_3D_1E_1$ poderão ser uma alternativa às juntas tubulares estruturais soldadas sujeitas a impacto empregues na indústria automóvel. Na Figura 56

apresentam-se algumas peças tubulares automóveis [101]. A utilização de juntas adesivas permite uma redução dos tempos de produção, melhor acabamento superficial, menor concentração de tensões e boa compatibilidade com matérias poliméricas, metálicas e compósitos.

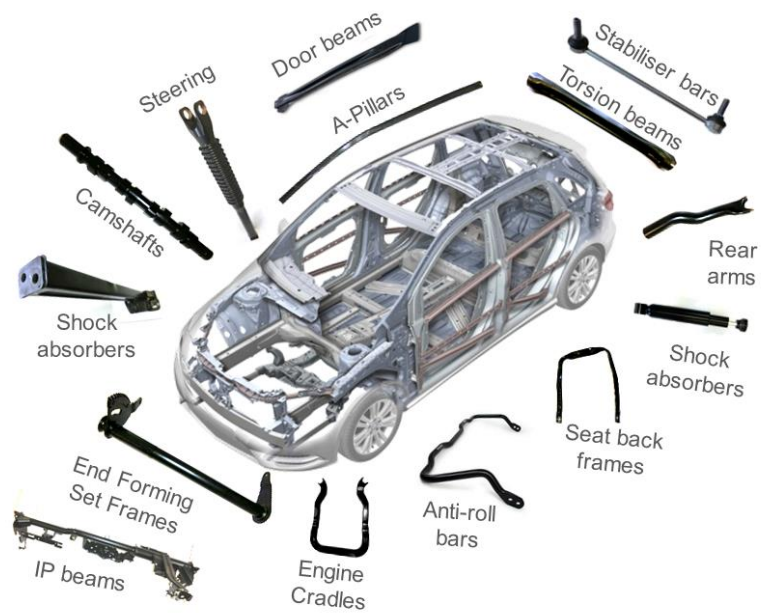


Figura 56 - Peças tubulares em automóveis [102].

4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como principal objetivo realizar um estudo paramétrico numérico de juntas adesivas do tipo varão-tubo, e submeter as mesmas a esforços de tração. Recorreu-se ao método de Taguchi para avaliar a influência que as variáveis em estudo têm no comportamento deste tipo de juntas. As variáveis estudadas foram: comprimento de sobreposição, a espessura do tubo, diâmetro do varão tipo de adesivo e chanfro interior adesivo. O estudo numérico foi realizado recorrendo ao programa de EF ABAQUS®, e efetuou-se uma análise detalhada da resistência por modelação de MDC, variável de dano, energia dissipada, das tensões de arrancamento e corte. Com base no *output* do método de Taguchi foi possível criar juntas otimizadas para as propriedades analisadas. As principais conclusões resultantes do estudo efetuado são as seguintes:

- O diâmetro do varão, da espessura do tubo, comprimento de sobreposição e tipo de adesivo são os fatores que maior influência tem na resistência da junta. Com o aumento da rigidez da junta verifica-se um aumento de P_{max} . Com o método de Taguchi foi possível obter uma configuração otimizada para esta propriedade;
- A variável dano (SDEG) foi determinada para P_{max} . Todas as juntas apresentam dano em pelo menos numa das extremidades da junta, devido à concentração de tensões de corte e arrancamento nessa zona. Através da análise dos fatores, percebe-se que um aumento da rigidez da junta adesiva tem um efeito positivo na zona não danificada da camada adesiva;
- No caso das tensões de arrancamento, o valor L_o , tipo de adesivo, diâmetro do varão e espessura do tubo são os outros fatores que apresentam influência. Constatou-se que uma diminuição da rigidez das juntas provocou uma redução das concentrações de tensão. Com o método de Taguchi foi possível obter uma configuração otimizada para esta propriedade, obtendo-se uma redução da σ_y/τ_{avg} máxima em cerca de 28,4%;
- Os picos das concentrações das tensões de corte verificam-se nas extremidades das juntas, os fatores que apresentam maior influência para esta propriedade são L_o , tipo de adesivo e diâmetro do varão. Obteve-se um valor máximo de τ_{xy}/τ_{avg} de 1,24. Para esta propriedade não foi possível otimizar as τ_{xy}/τ_{avg} . Um novo DOE seria necessário realizar, com vista a determinação dos fatores ótimos que minimizassem as τ_{xy}/τ_{avg} ;
- Energia dissipada é um parâmetro de grande relevância, que indica a capacidade da junta em absorver energia no impacto e ganha especial relevância em estruturas de absorção de impacto. Constatou-se que com o aumento da rigidez da junta constatou-se um aumento de U . Os fatores que apresentam influência estatística em U são, L_o , tipo de adesivo e diâmetro do varão. Para esta propriedade foi possível obter uma configuração ótima;
- A junta tubular do tipo varão-tubo com uma configuração $A_3B_3C_3D_1E_1$, é a que apresenta a melhor combinação de propriedades na sua generalidade. Este tipo de junta pode ser uma alternativa às juntas tubulares estruturais soldadas, empregues em peças automóveis sujeitas a impacto.

Como proposta de trabalhos futuros apresentam-se as seguintes possibilidades:

- Validar os resultados numéricos com ensaios experimentais para as mesmas condições materiais e geométricas;
- Realizar estudo paramétrico numérico utilizando por base um DOE que avalie a influência da interação de fatores;
- Estudo numérico onde se simule defeitos em juntas varão-tubo, para reproduzir defeitos de fabrico;
- Estudar a influência do envelhecimento do adesivo na resistência mecânica de uma junta adesiva tubular.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Lopes, J.P.M., et al., *Geometrical parameter study of adhesively-bonded T-joints by cohesive models*. Procedia Structural Integrity, 2022. **37**: p. 714-721.
2. Shrivastava, A., *Introduction to plastics engineering*. 2018: William Andrew.
3. Mair, G., *Essential manufacturing*, in *Mastering Manufacturing*. 1993, Springer. p. 3-13.
4. *EAA Aluminium Automotive Manual – Joining 2015*.
5. Silva, F.J., *Tecnologia da soldadura: Uma abordagem técnico-didática*. Porto: Publindustria, Edições Técnicas, 2014.
6. Verma, R.P. e M.K. Lila, *A short review on aluminium alloys and welding in structural applications*. Materials Today: Proceedings, 2021. **46**: p. 10687-10691.
7. Jindal, U., *Machine design*. 2010: Pearson Education India.
8. Melhem, G.N., et al., *Field Trials of Aerospace Fasteners in Mechanical and Structural Applications*. 2018.
9. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2007: McGraw-Hill Education.
10. Da Silva, L.F., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Introduction to adhesive bonding technology*, in *Handbook of adhesion technology*. 2018, Springer. p. 1-7.
11. Eduardo André Sousa Marques, A.S.Q.F.B., Ricardo Joao Camilo Carbas, Alireza Akhavan-Safar, e Lucas Filipe Martins da Silva, *Introduction to Adhesive Bonding*. 1 ed. 2021: WILEY-VCH GmbH.
12. Banea, M.D., et al., *Effect of material on the mechanical behaviour of adhesive joints for the automotive industry*. Journal of adhesion science and Technology, 2017. **31**(6): p. 663-676.
13. Liu, Y., et al., *Investigation of adhesive joining strategies for the application of a multi-material light rail vehicle*. Materials, 2021. **14**(22): p. 6991.
14. Marques, A.C., et al., *Review on adhesives and surface treatments for structural applications: Recent developments on sustainability and implementation for metal and composite substrates*. Materials, 2020. **13**(24): p. 5590.
15. Zhao, H., et al., *A review on solid riveting techniques in aircraft assembling*. Manufacturing Rev., 2020. **7**: p. 40.
16. Chaves, F., et al., *Problemas e Trabalhos Práticos de Juntas Adesivas Estruturais*. Publindústria. Portugal, 2017.
17. da Silva, L.F.M., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. Vol. 1. 2011: Springer.
18. Troughton, M.J., *Handbook of plastics joining: a practical guide*. 2008: William Andrew.
19. Morais, J.F.A., *Desenvolvimento de ferramentas e provetes para o ensaio Thick Adherend Shear Test (TAST)*. 2013, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
20. Wahab, M.A., *The mechanics of adhesives in composite and metal joints: finite element analysis with ANSYS*. 2014: DEStech Publications, Inc.
21. Dvorak, G.J., J. Zhang, and O. Canyurt, *Adhesive tongue-and-groove joints for thick composite laminates*. Composites science and technology, 2001. **61**(8): p. 1123-1142.
22. Maggiore, S., et al., *A Review of Structural Adhesive Joints in Hybrid Joining Processes*. Polymers, 2021. **13**(22): p. 3961.
23. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, e M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007: Publindústria Portugal.
24. He, X., *A review of finite element analysis of adhesively bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(4): p. 248-264.
25. Ramalho, L.D., et al., *Static strength prediction of adhesive joints: A review*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020. **96**: p. 102451.
26. Da Silva, L.F. e R.D. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*, in *Advances in numerical modeling of adhesive joints*. 2012, Springer. p. 1-93.

27. Tserpes, K., et al., *A review on failure theories and simulation models for adhesive joints*. The Journal of Adhesion, 2022. **98**(12): p. 1855-1915.
28. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.
29. Hutchinson, J., *Plastic stress and strain fields at a crack tip*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1968. **16**(5): p. 337-342.
30. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Journal of Applied Mechanics, 1968. **35**(2): p. 379-386.
31. Fernlund, G. e J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
32. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.
33. Raghavan, P. e S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
34. Wahab, M.M.A., et al., *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(7): p. 763-781.
35. Imanaka, M., et al., *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003. **17**(7): p. 981-994.
36. Shenoy, V., et al., *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
37. Liljedahl, C.D.M., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
38. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
39. Rocha, R.J.B. e R.D.S.G. Campilho, *Evaluation of different modelling conditions in the cohesive zone analysis of single-lap bonded joints*. The Journal of Adhesion, 2018. **94**(7): p. 562-582.
40. Fernandes, R.L. e R.D.S.G. Campilho, *Testing different cohesive law shapes to predict damage growth in bonded joints loaded in pure tension*. The Journal of Adhesion, 2017. **93**(1-2): p. 57-76.
41. Fernandes, R.L. e R.D.S.G. Campilho, *Accuracy of cohesive laws with different shape for the shear behaviour prediction of bonded joints*. The Journal of Adhesion, 2019. **95**(4): p. 325-347.
42. Carlberger, T. e U. Stigh, *Influence of Layer Thickness on Cohesive Properties of an Epoxy-Based Adhesive—An Experimental Study*. The Journal of Adhesion, 2010. **86**(8): p. 816-835.
43. Jung Lee, M., et al., *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(5): p. 322-328.
44. Zhu, Y., K.M. Liechti, e K. Ravi-Chandar, *Direct extraction of rate-dependent traction-separation laws for polyurea/steel interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(1): p. 31-51.
45. Nunes, S.L.S., et al., *Comparative failure assessment of single and double-lap joints with varying adhesive systems*. The Journal of Adhesion, 2016. **92**: p. 610-634.
46. Pandya, K.C. e J.G. Williams, *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*. Polymer Engineering & Science, 2000. **40**(8): p. 1765-1776.
47. Chai, H., *Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds*. Experimental Mechanics, 1992. **32**(4): p. 296-303.

48. Campilho, R.D.S.G., et al., *Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **53**: p. 15-22.
49. Stigh, U., et al., *Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers*. International Journal of Fracture, 2010. **165**(2): p. 149-162.
50. Constante, C.J., R.D.S.G. Campilho, e D.C. Moura, *Tensile fracture characterization of adhesive joints by standard and optical techniques*. Engineering Fracture Mechanics, 2015. **136**: p. 292-304.
51. ASTM D3433-99, *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2012: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
52. Gustafson, P.A. e A.M. Waas, *The influence of adhesive constitutive parameters in cohesive zone finite element models of adhesively bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(10): p. 2201-2215.
53. Yoshihara, H., *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(13-14): p. 2065-2077.
54. Leal, A.J.S. e R.D.S.G. Campilho, *Numerical evaluation of the ENF and 4ENF tests for the shear toughness estimation of adhesive joints*. Composite Structures, 2018. **202**: p. 333-343.
55. Akhavan-Safar, A., L.F.M. da Silva, e M.R. Ayatollahi, *An investigation on the strength of single lap adhesive joints with a wide range of materials and dimensions using a critical distance approach*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017. **78**: p. 248-255.
56. Barbosa, N., et al., *Comparison of different adhesively-bonded joint types for mechanical structures*. Applied Adhesion Science, 2018. **6**(1): p. 1-19.
57. Brito, R., et al., *Composite stepped-lap adhesive joint analysis by cohesive zone modelling*. Procedia Structural Integrity, 2021. **33**: p. 665-672.
58. Antunes, R., et al., *Numerical validation of cohesive laws for adhesive layers with varying thickness in bonded structures*. Procedia Manufacturing, 2021. **55**: p. 213-220.
59. Campilho, R., et al., *Validation of fracture envelopes of structural adhesives for mixed-mode strength prediction of bonded joints*. Frattura ed Integrità Strutturale, 2019. **13**(48): p. 332-347.
60. Valente, J., et al., *Geometrical optimization of adhesive joints under tensile impact loads using cohesive zone modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020. **97**: p. 102492.
61. Xará, J.T.S. e R.D.S.G. Campilho, *Strength estimation of hybrid single-L bonded joints by the eXtended Finite Element Method*. Composite Structures, 2018. **183**: p. 397-406.
62. Rosas, M.F.M.O., R.D.S.G. Campilho, e R.D.F. Moreira, *Numerical analysis of geometrical modification combinations of the tensile strength of tubular adhesive joints*. Procedia Structural Integrity, 2021. **33**: p. 115-125.
63. Oliveira, T.J.S., et al., *Cohesive zone analysis of torsional tubular joints with an epoxy adhesive*. Procedia Structural Integrity, 2022. **41**: p. 72-81.
64. Oliveira, T.J.S., R.D.S.G. Campilho, e M.G. Cardoso, *Three-dimensional numerical analysis of tubular adhesive joints under torsional loads*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021. **1193**(1): p. 012082.
65. Ferreira, L.R.F., et al., *Geometrical and material optimization of tensile loaded tubular adhesive joints using cohesive zone modelling*. The Journal of Adhesion, 2019. **95**(5-7): p. 425-449.
66. Silva, J.E.S.M., et al., *Numerical evaluation of tensile-loaded tubular scarf adhesive joints*. Procedia Structural Integrity, 2022. **41**: p. 36-47.
67. Gomes, C.F.F., *Estudo do efeito do material dos aderentes em juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração*. 2022, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
68. Silva, J.E.S.M.d., *Estudo paramétrico numérico de juntas tubulares com chanfro sujeitas a esforços de tração*. 2021, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.

69. Gardner, L., *Tubular structures XIV*. 2012: CRC Press [Imprint].
70. Akhavan-Safar, A., et al., *Cohesive Zone Modelling for Fatigue Life Analysis of Adhesive Joints*. 2022, Springer.
71. Silva, T.V.d., *Estudo de juntas adesivas tubulares com defeito: análise experimental e numérica por modelos de dano coesivo*. 2018, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
72. OLIVEIRA, T.J.D.S., *Análise numérica de juntas adesivas tubulares sujeitas a um carregamento de torção*. 2019, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
73. Lavalette, N.P., et al., *Influence of geometrical parameters on the strength of Hybrid CFRP-aluminium tubular adhesive joints*. *Composite Structures*, 2020. **240**: p. 112077.
74. Dantas, M.A., et al., *Flexible tubular metal-polymer adhesive joints under torsion loading*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2021. **105**: p. 102787.
75. Albiez, M., et al., *Adhesively bonded steel tubes — Part I: Experimental investigations*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2019.
76. Pinheiro, A.E.S., et al., *Validation of theoretical models for the strength prediction of tubular adhesive joints*. *Procedia Structural Integrity*, 2022. **41**: p. 60-71.
77. Zhang, J., et al., *Investigation on fatigue performance of adhesively bonded butt-joints and multiaxial life estimation using stress-based failure models*. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020. **107**: p. 102498.
78. Barbosa, D., et al., *Experimental and numerical assessment of tensile loaded tubular adhesive joints*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2019. **233**(3): p. 452-464.
79. Silva, A.F.M.V., et al., *Impact loading analysis of tubular adhesive joints*. *Procedia Structural Integrity*, 2021. **33**: p. 138-148.
80. Jamil, M. e E.Y.K. Ng, *Statistical modeling of electrode based thermal therapy with Taguchi based multiple regression*. *International Journal of Thermal Sciences*, 2013. **71**: p. 283-291.
81. Vieira, A., *Pultrusão de perfis para aplicações avançadas a partir de towpregs de elevado desempenho*. 2015, Universidade do Minho.
82. Rangaswamy, H., et al., *Experimental analysis and prediction of strength of adhesive-bonded single-lap composite joints: Taguchi and artificial neural network approaches*. *SN Applied Sciences*, 2020. **2**(6): p. 1055.
83. Roy, R.K., *Design of Experiments Using The Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement*. 2001: Wiley.
84. Jorge, F.d.S., *Métodos de Taguchi Aplicados à Análise Cromatográfica na Identificação de Isocianatos*. 2010, Universidade Nova de Lisboa: Lisboa.
85. da Silva, L.F.M., G.W. Critchlow, e M.A.V. Figueiredo, *Parametric Study of Adhesively Bonded Single Lap Joints by the Taguchi Method*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2008. **22**(13): p. 1477-1494.
86. da Silva, L.F.M., et al., *Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2009. **29**(6): p. 621-632.
87. Imanaka, M., M. Omiya, e N. Taguchi, *Determination of traction-separation laws on an acrylic adhesive under shear and tensile loading*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2019. **33**(6): p. 646-659.
88. Kim, M.-H., H.-S. Hong, e Y.-C. Kim, *Determination of failure envelope of functionally graded adhesive bonded joints by using mixed mode continuum damage model and response surface method*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2021. **106**: p. 102815.
89. Imanaka, M., M. Omiya, e N. Taguchi, *Estimation of static strength of adhesively bonded single lap joints with an acrylic adhesive under tensile shear condition based on cohesive zone model*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2019. **33**(6): p. 660-674.
90. Requena, G., *Thermo-Mechanical Behaviour of Structural Lightweight Alloys*. 2019: Mdpi AG.

91. Campilho, R.D.S.G., et al., *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
92. Araldite®AV138[Ficha técnica do produto], Data de acesso [02-05-2023], Disponível em: https://www.maxepoxi.com.br/pdf/araldite_av138_hv998_portugues.pdf
93. Araldite® 2015. [Ficha técnica do produto], Data de acesso [02-05-2023], Disponível em: <https://www.bag-distribution.com/Files/108113/153601310146458.pdf>
94. SikaForce®472 FR. [Ficha técnica do produto], Data de acesso [02-05-2023], Disponível em: <https://industry.sika.com/content/dam/dms/deaddconst01/b/sikaforce-472-fri60.pdf>
95. Fernandes, T.A.B., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
96. Costa, M., et al., *A cohesive zone element for mode I modelling of adhesives degraded by humidity and fatigue*. International Journal of Fatigue, 2018. **112**: p. 173-182.
97. Chen, X., X. Deng, e M.A. Sutton, *Simulation of stable tearing crack growth events using the cohesive zone model approach*. Engineering Fracture Mechanics, 2013. **99**: p. 223-238.
98. Araújo, I.R.S., *Utilização do Método de Elementos Finitos Extendido para a previsão da resistência de juntas adesivas de chanfro interior*. 2022, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
99. *The 5 Steps for Achieving Safe and High-Quality Bonds (Overview)*, in *Adhesive Bonding in Five Steps*. 2022. p. 49-58.
100. Silva, T.P.V.d., *Estudo de juntas adesivas tubulares com defeito: análise experimental e numérica por modelos de dano coesivo*. 2018, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
101. Urapakam Ramakrishnan, M. e P. Mallick, *Behavior of Adhesive Lap Joints in Aluminum Tubes for Crashworthy Structures*. 2022, SAE International.
102. Tubular products [Informação técnica], Data de Acesso [04-06-2023], Disponível em: <https://automotive.arcelormittal.com/products/tubular>.