

**ESTUDO SOBRE A OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE
FABRICO DE JUNTAS ADESIVAS DE SIMPLES
SOBREPOSIÇÃO PARA MAXIMIZAR A RESISTÊNCIA
MECÂNICA**

MAIKON MURIELL DE OLIVEIRA

Relatório Final de Dissertação apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

Para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Industrial

Este Trabalho foi efetuado sob orientação de:
Doutor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro

BRAGANÇA

2021

MAIKON MURIELL DE OLIVEIRA

**ESTUDO SOBRE A OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE
FABRICO DE JUNTAS ADESIVAS DE SIMPLES
SOBREPOSIÇÃO PARA MAXIMIZAR A RESISTÊNCIA
MECÂNICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado entre o Centro Universitário UniEvangélica e o Instituto Politécnico de Bragança, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial – Ramo Engenharia Mecânica.

Orientador: Professor Doutor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro

BRAGANÇA

2021

Resumo

Um Adesivo é uma substância utilizada para unir duas superfícies. Os adesivos estruturais são desenvolvidos para formar ligações que suportam elevadas cargas por meio de juntas. Esta dissertação teve como objetivo realizar estudos sobre os comportamentos dos aderentes colados com adesivos industriais (cianoacrilato e epóxi). Nesse sentido, determinou-se a combinação ótima de parâmetros de fabrico para maximizar a resistência mecânica da junta colada. Para alcançar esse objetivo, foram realizados ensaios experimentais em laboratório utilizando os adesivos Araldite (Epóxi) e Axston (Cianoacrilato) em aderentes de liga de alumínio com comprimento de 108mm e 120mm, as juntas adesivas tiveram comprimentos de sobreposição de 12.5mm e 25mm e a espessura dos adesivos foram de 0.3mm e 0.5mm. A matriz de ensaios utilizada para combinar estes parâmetros foi a matriz ortogonal de Taguchi L16. Do resultado conclui-se que quanto maior foi o comprimento de sobreposição, maior foi a força de ruptura da junta. Quando foi testado um aumento no comprimento de sobreposição, a tensão suportada na junta foi menor, devido à distribuição de tensões na junta. Analisando as melhores combinações, ambos tiveram bons resultados, porém o Epoxy se sobressaiu quanto ao valor máximo de força de ruptura. Sendo assim, a melhor combinação feita foi o Epoxy de 12.5cm.

Palavras-Chave: Adesivos estruturais; junta de simples sobreposição, aderentes; método de Taguchi; adesão; combinação de parâmetros.

Abstract

An Adhesive is a substance used to bond two surfaces. Structural adhesives are designed to form bonds that support high loads through joints. This dissertation aimed to carry out studies on the behavior of adherents bonded with industrial adhesives (cyanoacrylate and epoxy). In this sense, the optimal combination of manufacturing parameters was determined to maximize the mechanical strength of the glued joint. To achieve this objective, experimental tests were carried out in the laboratory using Araldite (Epoxy) and Axston (Cyanoacrylate) adhesives in aluminum alloy adherents with a length of 108mm and 120mm, the adhesive joints had overlapping lengths of 12.5mm and 25mm and the thickness of the stickers were 0.3mm and 0.5mm. The test matrix used to combine these parameters was the orthogonal matrix of Taguchi L16. From the result, it can be concluded that the greater the overlap length, the greater the joint rupture strength. When an increase in overlap length was tested, the stress supported in the joint was lower, due to the stress distribution in the joint. Analyzing the best combinations, both had good results, but Epoxy stood out in terms of the maximum value of braking force. Therefore, the best combination made was the 12.5cm Epoxy.

Keywords: Structural adhesives; simple overlap joint, adherent; Taguchi method; adhesion; combination of parameters.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS pela oportunidade de estar em uma etapa que nunca sonhei na minha vida. E que me manteve firme e me sustentou e cuidou mesmo longe de casa.

Segundamente agradecer a minha família, meus pais Darlei Ovidio de Oliveira, Luciélia Louça de Macedo Oliveira e minha irmã Sarah Rhayane de Oliveira, que sempre fizeram de tudo para eu ter um futuro de oportunidades profissionais e se esforçaram em me manter em Portugal mesmo com as dificuldades financeiras.

Aos amigos que nos ajudaram durante a longa caminhada e, também, a Segunda Igreja Batista em Anápolis que se mantiveram em orações por mim.

Agradecer as igrejas de Bragança, Igreja Assembleia de Deus ministério Santa, bem como, a Igreja Lusitana que me acolheram muito bem.

Agradecer a minha “segunda” família em Portugal que me acolheram e me supriram a ausência de casa. Um abraço a família do senhor Vitor Hugo Fernandes, sua esposa como a chamava de “Tita” Costa Fernandes e família.

Ao professor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro por me orientar neste projeto.

ÍNDICE

Resumo.....	iii
Abstract.....	iv
Agradecimento.....	vii
Lista de figuras.....	x
Lista de tabelas.....	xi
Nomenclatura.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações gerais.....	1
1.2 Objetivos da tese.....	1
1.3 Estado da arte.....	1
1.4 Estrutura da tese.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Juntas Coladas e definições de Adesivo.....	5
2.1.1 Aplicação de Juntas Adesivas.....	6
2.1.2 Tipos de adesivos.....	7
2.1.3 Adesivos termoendurecíveis.....	8
2.1.4 Adesivos Termoplásticos.....	9
2.1.5 Adesivos Elastoméricos.....	10
2.1.6 Adesivos Híbridos.....	10
2.2 Adesão.....	11
2.2.1 Teoria Mecânica.....	11
2.2.2 Teoria da Adsorção.....	12
2.2.3 Teoria da Difusão.....	12
2.3 Parâmetros de Resistência.....	13
2.3.1 Comprimento de Sobreposição.....	15
2.3.2 Cisalhamento.....	16
2.4 Clivagem e arranchamento.....	17
2.5 Tipos de Juntas.....	19
2.6 Tipos de Ruptura.....	19
2.7 Vantagens e Desvantagens das juntas coladas.....	20
2.7.1 Vantagens.....	20
2.7.2 Desvantagens.....	21

2.8 Ensaio.....	21
2.8.1 Ensaio de cisalhamento em uma junta de sobreposição simples.....	22
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	24
3.1 Materiais e métodos.....	24
3.1.1 Método experimental para teste de resistência de juntas adesivas	24
3.1.2 Substratos.....	29
3.1.3 Preparação dos corpos de prova	29
3.1.4 Análise de resultados.....	35
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1. Modos de ruptura de Cianoacrilato 12,5mm.....	37
4.1. Modos de ruptura de Epóxi 25mm	38
4.1. Modos de ruptura de Cianoacrilato 25mm e Epóxi 12.5mm.....	39
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	41
5.1 Conclusões	41
5.2 Linhas futuras de investigação.....	43
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

Lista de figuras

Figura 1: Nomeclatura de junta adesiva.....	6
Figura 2: Princípio da teoria mecânica de adesão.....	11
Figura 3: Princípio da teoria mecânica de adsorção	12
Figura 4: Princípios da teoria da difusão	13
Figura 5: Pontos de iniciação de fissuras em superfícies muito irregulares.....	14
Figura 6: Resistência de uma junta de simples sobreposição em função do comprimento de sobreposição.	15
Figura 7: Efeito do comprimento de sobreposição na força de ruptura, para adesivos dúcteis e frágeis.....	16
Figura 8: Distribuição de tensão de corte no adesivo numa junta de simples sobreposição.....	17
Figura 9: Forças de arrancamento e clivagem	18
Figura 10: Representação da deformação plástica dos substratos	18
Figura 11: Tipos de juntas adesivas.....	19
Figura 12: Tipos de Ruptura em juntas adesivas.....	20
Figura 13: Foto de um corpo de prova sendo preparado para ensaio no LERM.....	23
Figura 14: Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Araldite®.....	25
Figura 15: Foto do Adesivo Epóxi utilizado	26
Figura 16: Foto do Adesivo Axton utilizado.	28
Figura 17: Desenho dos comprimentos dos corpos de prova.....	30
Figura 18: Guilhotina Industrial utilizada	30
Figura 19: Corpos de Prova cortados	31
Figura 20: Corpos de prova sendo colados.....	32
Figura 21: Máquina utilizada para os ensaios de tração, SHIMADZU Autograph.....	33
Figura 22: Teste em andamento na shimadzu autograph	34
Figura 23: Software “Trapezium X” durante a realização dos testes	34
Figura 24: Dados transferidos para o formato Excell para análise.....	36
Figura 25: Corpos de prova fraturados (cianoacrilato 12.5mm).....	37
Figura 26: Corpos de provas fraturados Epóxi 25 mm através do ensaio de tração.....	38
Figura 27: Aderentes 5_1 e 5_2 epóxi de 12,5mm e 4_1 e 2_1 Cianoacrilato de 25mm.....	39
Figura 28: Aderentes com testes de cianoacrilato de 12,5mm e espessura do adesivo 0,5mm	39

Lista de tabelas

Tabela 1: Propriedades do adesivo Araldite.....	26
Tabela 2: Propriedades do adesivo Axston Cianoacrilato	28
Tabela 3: Matriz taguchi escolhida para a realização dos ensaios	32
Tabela 4: Resultados dos testes de acordo com a combinação.....	35

NOMENCLATURA

Lista de Abreviaturas

Lista de Unidades

°C	Grau Celsius
g	Grama
GPa	Gigapascal
kN	KiloNewton
ml	Mililitro
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
N	Newton
Pa	Pascal
<i>fps</i>	Fotogramas por segundo – (<i>Frames per second</i>)

Lista de Símbolos

A	Área de secção transversal da amostra
d	Diâmetro do grão de speckle
dm	Densidade da Matriz
D	Deslocamento por exposição
df	Densidade da Fibra
ε_{xx}	Componente cartesiana linear de deformação segundo o eixo xx
ε_{yy}	Componente cartesiana linear de deformação segundo o eixo yy
F	Função intensidade de referência
F_c	Fator de correção
$F_{máx}$	Força máxima obtida pelo material durante o ensaio mecânico
G	Função intensidade deformada
l_0	Comprimento das Fibras
m_1	Massa da amostra seca

m_2	Média de massa do picnômetro limpo e seco
m_3	Média de massa do picnômetro com água destilada
m_4	Massa do picnômetro com água destilada e amostra seca
P	Número de pixels analisados
p_f	Peso da Fibra
ρ_{H_2O}	Densidade da água destilada
ρ_{fibra}	Densidade da Fibra
u	Translação no eixo das abcissas
v	Translação no eixo das ordenadas
v_f	Fração volumétrica a ser encontrado
x	Coordenada cartesiana das abcissas de referência
χ	Valor da função objetivo
x'	Coordenada cartesiana das abcissas deformada
y	Coordenada cartesiana das ordenadas de referência
y'	Coordenada cartesiana das ordenadas deformada
σ_t	Resistência a tração

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

Atualmente, a utilização crescente de materiais leves aliada à necessidade de estruturas leves, fez com que o uso de juntas adesivas se tornasse amplo. Colagem de painéis metálicos, compostos automotivos e para aeronaves, onde a leveza e a alta resistência à fadiga são os requisitos principais, são algumas das aplicações das Juntas Adesivas. Para se entender sobre juntas adesivas é necessário saber o que são e suas aplicações, assim, podemos ter uma ideia de como conceituar. No entanto, o projeto dessas juntas continua a ser controverso pois a resistência depende de muitos fatores difíceis de quantificar, como o comprimento de sobreposição, a cedência do substrato, a plasticidade e a espessura do adesivo. As motivações para a realização a deste projeto foi a determinação da contribuição de cada um dos parâmetros referidos, bem como, a sua combinação ótima para maximizar a resistência mecânica das juntas adesivas de simples sobreposição.

1.2 Objetivos da tese

Este trabalho tem como objetivo caracterizar uma junta adesiva ou junta colada quanto à sua resistência mecânica, que é medida pela tensão suportada e análise dos modos de ruptura. É, também, efetuada uma análise do comportamento das juntas coladas, através, da avaliação do comprimento da sobreposição na tensão da junta. Estes estudos são efetuados para diferentes tipos de adesivos estruturais. Exemplos numéricos são fornecidos para mostrar a influência sobre as tensões nos corpos de prova usando adesivos de diferentes características que abrangem todo o espectro do comportamento viscoelástico.

1.3 Estado da arte

Em ordem cronológica o trabalho mais antigo buscou avaliar o comportamento em fadiga de juntas estruturais de ligas coladas com adesivo

epóxi [1]. Para isso, os autores compararam estaticamente juntas estruturais utilizando a norma NASM 1312-4 para organização dos corpos-de-prova que foram, por sua vez, submetidos a testes de fadiga, sob amplitude de carregamento constante e razão de tensão igual a 0,1 para análise da eficiência dos elementos estruturais durante sua vida em serviço. Os autores concluíram que a configuração híbrida proporciona maior resistência estática e um ciclo de vida em fadiga superior à configuração colada.

Dois anos depois, Prudence [2] estudou, em sua dissertação de mestrado, dois adesivos epóxi modificados estabelecendo um comparativo entre eles. Como método o autor optou por uma análise comparativa dos dois adesivos modificados com agentes elastoméricos, e outro sintetizado, comparando-os com um adesivo epóxi puro. A partir do desenvolvimento de análises mecânicas, térmicas e das superfícies de fratura por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a fim de avaliar os tipos de fraturas encontrados o autor constatou que o adesivo epóxi modificado por reação química apresenta os melhores resultados, demonstrando uma melhor compatibilidade com a matriz epóxi.

Bamberg [3] objetivou avaliar o efeito do comprimento de sobreposição, espessura da camada adesiva e tensão de escoamento do substrato, na resistência à tração da junta. Empregando ensaios mecânicos e análises de correlação digital de imagens para a análise do estado de tensão das juntas, os mestrados analisaram a tração em amostras contendo três diferentes comprimentos de sobreposição, três diferentes espessuras de camada adesiva e dois substratos com tensão de escoamento diferentes. Os autores concluíram que o comprimento de sobreposição possui a maior influência sobre a resistência à tração das juntas. O efeito é reduzido à medida que este comprimento aumenta, no entanto, há fatores a serem considerados como o seu impacto no custo, peso e propriedades de corrosão das juntas.

Lemos [4] em sua dissertação de mestrado buscou, por meio de simulações, analisar a propagação de trincas em modo misto de juntas coladas compósito-aço. Para isso, utilizou uma abordagem numérico-experimental considerando corpos de prova fabricados com o aço em cima e o compósito embaixo (de dimensões de 100mm e 60mm) em um segundo momento para a detecção da

propagação de fissuras e a estimativa da energia crítica de propagação de fissura, no regime elasto-plástico, foram adotados módulos de elasticidade dos materiais para fissuras diversas. Concluindo que a energia crítica de propagação de fissura pode ser estimada, sendo, o primeiro valor, aquele identificado pela comparação com o resultado experimental e o segundo aquele que corresponde ao avanço de uma unidade de área da fissura.

Recentemente, Oliveira [5] realizou estudos sobre os comportamentos dos aderentes colados com adesivos industriais (cianoacrilato e epóxi) sobre sua resistência e qualidade afim, também, de analisar qual a melhor combinação para uma melhor resistência ao corte. Utilizando testes laboratoriais em corpos de prova de tiras de alumínio com comprimentos de sobreposição (12.5mm e 25mm), comprimento dos aderentes (108mm e 120mm) e espessura dos adesivos (0.3mm e 0.5mm). Concluiu que quanto maior for o comprimento de sobreposição, maior foi a força necessária para provocar a ruptura da junta e, analisando as melhores combinações, ambos tiveram bons resultados, porém, o epóxi se sobressaiu quanto ao valor da tensão de ruptura.

1.4 Estrutura da Tese

A estrutura do trabalho encontra-se dividida em 6 capítulos, os quais se encontram descritos da seguinte maneira:

O primeiro capítulo apresenta a introdução, a significância do estudo, o objetivo do trabalho e descrição da sua estrutura.

No segundo capítulo foi feita uma pesquisa sobre juntas adesivas, suas principais propriedades incluindo as suas diversas propriedades e implicações e seus ensaios, em diversos livros, outros trabalhos acadêmicos e normas internacionais.

O terceiro capítulo apresenta os procedimentos experimentais utilizado.

Foi detalhado os experimentos, desde o material envolvido na fabricação dos corpos de prova e máquinas para realização dos testes, passando pela preparação dos corpos de prova no laboratório e a realização dos ensaios.

O quarto capítulo apresenta os resultados experimentais após o tratamento e análise dos dados discutidos e comparados com os valores encontrados na literatura.

O quinto capítulo são apresentadas as conclusões obtidas pela interpretação dos dados de todo o trabalho, e, são propostos estudos para o desenvolvimento do tema. Finalmente, são apresentadas as referências bibliográficas que serviram de base para o desenvolvimento da tese.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Juntas Coladas e definição de Adesivo

O adesivo é uma substância que apresenta uma textura pegajosa e é utilizada para unir superfícies. Os adesivos estruturais são os responsáveis por formar ligações que suportam cargas elevadas por meio de juntas. Eles são projetados para melhorar os processos de fabricação, desenvolvimento de produtos, montagens de elementos que podem ser fabricados em compósitos, plásticos e metais.

Adesivo estrutural é uma tecnologia emergente que permite solucionar muitos problemas associados às tecnologias tradicionais (parafusos, rebites, soldadura, etc.). A comunidade científica que investiga este tema está em franca expansão e contam-se inúmeras aplicações práticas desde as indústrias de ponta (aeronáutica, automóvel, etc.) até às indústrias mais tradicionais (calçado, móveis, etc.). A indústria aeronáutica tem sido a principal responsável pelo desenvolvimento de juntas adesivas estruturais. Até ao século XX não se verificaram avanços significativos na tecnologia de adesão. Os adesivos usados nas aeronaves do início do século XX eram adesivos baseados na caseína, substância derivada do leite. Estes adesivos naturais apresentavam problemas quando submetidos a ambientes húmidos. A absorção de água faz com que o adesivo se deteriore. Os adesivos atuais são todos baseados em polímeros sintéticos tais como os epóxidos, os fenólicos, os acrílicos e os uretanos. São, geralmente, modificados de modo a melhorar a sua tenacidade.

Para se entender o que são juntas adesivas é necessário conhecer as suas aplicações. Assim, podemos ter uma ideia de como conceituar:

- Adesivo: material polimérico que quando aplicado em superfícies pode ligá-las e resistir à separação.
- Adesivo estrutural: adesivo que resiste a forças substanciais e que é responsável pela resistência e rigidez da estrutura.
- Vedante: substância capaz de ligar duas superfícies, preenchendo o espaço entre elas e fornecendo uma barreira ou camada protetora.

- Substrato/Aderente: partes estruturais de uma junta que são ligados por um adesivo.
- Adesão: atração entre duas substâncias resultante das forças intermoleculares entre as substâncias.
- Coesão: só envolve as forças intermoleculares dentro de uma substância. Interfase: região perto do ponto de contato adesivo-aderente.
- Interface: plano de contato entre as superfícies de dois materiais.
- Primário: aplicado por vezes para melhorar a adesão ou proteger a superfície até à aplicação do adesivo [6].

Na Figura 1, encontra-se representada, esquematicamente, o exemplo de uma junta adesiva de simples sobreposição.

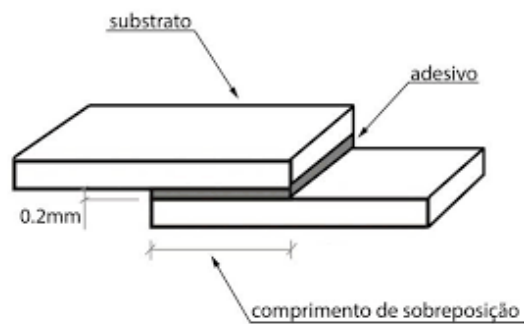


Figura 1 – Nomenclatura de uma junta adesiva [7]

2.1.1 Aplicações de juntas adesivas

Foi na indústria aeronáutica que surgiram as primeiras aplicações de adesivos em juntas, possibilitando, assim, o desenvolvimento das ligações adesivas e, atualmente, sua aplicação em diferentes segmentos industriais está diversificado [8]. Além, da indústria aeronáutica e automóvel, os setores da construção civil, naval e aeroespacial fornecem a evidência de propriedades da boa resistência das junções. A preocupação em reduzir o peso de veículos automotores, por exemplo, com o intuito de reduzir o consumo e ganhar velocidade, originou a utilização de materiais leves, como o alumínio e os compósitos reforçados com fibras. Um bom exemplo é a montadora FORD, De

modo a aumentar a eficiência dos transportes, reduzir o consumo de combustível e emissões de contaminantes, uma redução de peso associada a melhoria do desempenho em termos de segurança dos materiais em uso devem ser alcançados. Esta necessidade de estruturas com melhor desempenho resultou no desenvolvimento de uma nova variedade de estruturas e materiais híbridos. Estruturas multimaterial como aviões, barcos, carros e vagões usam vários tipos de materiais como aço, alumínio, magnésio, plásticos reforçados com fibras e estruturas sanduíche. A soldadura é simplesmente impossível de usar nestas situações por razões óbvias e rebites ou parafusos apresentam concentrações de tensão e oferecem baixa resistência à fadiga. A ligação adesiva é geralmente o método preferido nestes casos, uma vez que permite maior flexibilidade na concepção, é mais eficiente em aspetos mecânicos e de energia e torna-se mais resistente à corrosão. A união desses materiais é difícil, considerando os processos tradicionais. Nesse sentido, os adesivos são adotados como o método preferido de união [9].

Um dos exemplos das aplicações de juntas adesivas é na indústria aeronáutica. São utilizadas, por exemplo, na ligação de reforços à fuselagem e às asas de chapa fina, e permitem também a construção de estruturas em favos de abelhas [10].

Na indústria automóvel, a preocupação em diminuir consumos, alívio de peso e altas velocidades com consistência originou o recurso a materiais leves, como o alumínio ou plásticos reforçados com fibras. Porém, há uma dificuldade em ligar estes tipos de materiais por métodos tradicionais de fixação, levando os adesivos a ser a melhor opção para estes casos.

Outros meios de transporte como camiões e autocarros também são fabricados com materiais leves para controlar os níveis de emissão poluente utilizando adesivos industriais com os métodos citados de ligação.

2.1.2 Tipos de adesivos

De acordo com os mais variados métodos, os adesivos têm uma classificação específica. A classificação mais ampla consiste em distinguir entre

um adesivo fabricado à base de produtos naturais ou sintéticos. Os adesivos naturais, como o próprio nome indica, são fabricados a partir de materiais naturais (subprodutos animais ou de agricultura) e os sintéticos de materiais feitos pelo homem. Os de origem natural são os polímeros mais antigos. Muitas vezes, tem-se a ideia de que os adesivos naturais têm propriedades inferiores aos polímeros sintéticos devido à sua menor resistência e menor liberdade de processamento [11].

Porém, em diversas aplicações os adesivos naturais têm mais mercado, devido ao fato de, por exemplo, serem biodegradáveis, são excelentes na colagem de papel e madeira. Atualmente, os adesivos usados em aplicações estruturais muito rigorosas são feitos de polímeros sintéticos. A classificação dos adesivos entre sintéticos e naturais é muito ampla em diversas aplicações. Outras possíveis classificações estão de acordo com a função, modo de cura, forma física e composição química. A classificação funcional define os adesivos como sendo estruturais ou não estruturais. Os adesivos estruturais são materiais de elevada resistência e desempenho. Geralmente, os adesivos estruturais são definidos como aqueles que possuem uma resistência ao corte superior a 5-10 MPa e uma boa resistência aos meios ambientes mais comuns. A sua função principal é a de manter ligadas as estruturas e de serem capazes de resistir a cargas elevadas sem grande deformação. Os adesivos, também, se classificam relativamente ao modo como reagem ou solidificam (curam).

Os adesivos podem solidificar segundo vários métodos: por reação química (incluindo reação com um endurecedor ou reação com energia exterior tal como calor, radiação, catalisador de superfície, etc.), por perda de solvente, por perda de água, por arrefecimento a partir do estado fundido. O modo como um adesivo cura pode ser um fator muito importante no processo de seleção. O método de cura pode limitar significativamente as características do adesivo para uma aplicação particular. Os adesivos podem apresentar-se sob diversas formas físicas. As mais comuns são: várias partes sem solvente (líquido ou pasta), uma parte sem solvente (líquido ou pasta), uma parte em solução (líquido), sólido (pó, fita, filme, etc.).

A classificação dos adesivos, segundo a sua composição química, descreve os adesivos como sendo termoendurecíveis, termoplásticos, elastómeros ou misturas desses. Geralmente, a composição química está subdividida em tipos ou famílias dentro de cada grupo, tais como os cianoacrilatos, uretanos, neopreno e epóxidos

2.1.3 Adesivos termoendurecíveis

Os adesivos termoendurecíveis são materiais que não podem ser aquecidos e amolecidos repetidamente após a sua cura inicial. Uma vez curados e reticulados, o adesivo pode ser amolecido até certo ponto com calor, mas não pode ser refundido ou restaurado até atingir o estado fundido que existia antes da cura. Os materiais termoendurecíveis não são fundíveis e insolúveis. Esses adesivos degradam-se e, elevando a temperatura suficiente, tornam-se fracos devido à oxidação ou quebras nas cadeias moleculares

Os sistemas adesivos curam, por uma reação química irreversível, à temperatura ambiente ou a temperaturas elevadas, dependendo do tipo de adesivo. A reticulação que ocorre na reação de cura é devida à ligação de dois polímeros lineares, resultando numa estrutura tridimensional rígida algumas reações requerem calor para iniciar e completar a cura, outras, podem ser completadas a temperatura ambiente. Exemplo de resinas termoendurecíveis: fenólicas, epóxiidas, poliéster, etc.

2.1.4 Adesivos termoplásticos

Os termoplásticos são originalmente polímeros sólidos que amolecem ou fundem quando aquecidos. Diferem dos termoendurecíveis na medida em que não curam ou endurecem com calor. Como as moléculas não curam numa estrutura reticulada podem ser fundidos com a aplicação de calor e aplicados a um substrato. A exposição repetida a elevadas temperaturas requeridas para a fundição pode causar degradação do material por oxidação, e isto limita o número de ciclos térmicos. Uma vez aplicado no substrato, as partes são encostadas e o adesivo endurece por arrefecimento. Os adesivos termofusíveis,

muito usados nas embalagens, são exemplos de um material sólido termoplástico que é aplicado em um estado fundido [12].

A adesão desenvolve-se na solidificação gerada pelo arrefecimento. Os adesivos plásticos têm uma temperatura de serviço mais limitada do que os termoendurecíveis. Apesar de alguns termoplásticos originarem uma excelente resistência ao corte a temperaturas moderadas, esses materiais não são reticulados e tendem a fluir sob carga a baixas temperaturas. Essa fluência, ou deformação a longo prazo sob carga, pode ocorrer em temperatura ambiente ou até a mais baixas temperaturas, dependendo do adesivo. A fluência a longo prazo é, muitas vezes, a característica que impede esses adesivos de serem usados em aplicações estruturais. Os adesivos termoplásticos também não têm uma tão boa resistência a solventes ou agentes químicos como os termoendurecíveis. Exemplo de resinas termoplásticas: acrílicas, celulósicas, vinílicas, poliamidas, etc

2.1.5 Adesivos elastoméricos

Os adesivos elastoméricos têm uma classificação própria devido às suas características únicas. São baseados em polímeros elastoméricos que têm uma grande tenacidade e capacidade de deformação, retomam o seu comprimento inicial após a remoção da carga e dão uma boa resistência a juntas submetidas a um carregamento não uniforme. Os adesivos elastoméricos podem ser termoendurecíveis ou termoplásticos.

Devido ao fato de os adesivos elastoméricos serem materiais muito viscoelásticos, são caracterizados por terem um alto grau de deformação, baixo módulo de elasticidade e elevada tenacidade. Conseqüentemente, estes adesivos apresentam uma boa resistência a forças de arrancamento e uma boa flexibilidade que permite ligar substratos com coeficientes de expansão térmica diferentes. Também são usados para vedantes, amortecimento de vibrações e isolamento sonoro. Exemplo de elastômeros: poliuretanos, nitrilos, policloroprenos, silicones, etc

2.1.6 Adesivos híbridos

Os adesivos híbridos são feitos, combinando resinas termoendurecíveis, termoplásticas e elastoméricas num único adesivo. Foram desenvolvidos para tirar partido das propriedades mais úteis de cada componente. Geralmente, resinas rígidas e frágeis para altas temperaturas são combinadas com um adesivo elastomérico ou termoplástico flexível e tenaz para melhorar a resistência ao arrancamento e a capacidade de absorver energia.

Recentemente, foram melhoradas as propriedades de tenacidade de adesivos termoendurecíveis sem reduzir, substancialmente, a sua resistência a altas temperaturas. Esses sistemas consistem em híbridos reativos, onde dois componentes líquidos reagem, e híbridos de fase dispersa, onde um agente flexibilizante é incorporado na matriz com partículas discretas. Nos sistemas híbridos reativos, a resina flexibilizante reage com a resina base originando flexibilidade e tenacidade, sem redução significativa de outras propriedades. Um exemplo típico deste tipo de sistema é o adesivo epóxico - uretano. Outro método de melhorar a tenacidade é introduzir uma microestrutura específica no adesivo [11]. Adesivos híbridos têm resistências elevadas ao arrancamento, impacto e corte, sem sacrificar a resistência química e a resistência a altas temperaturas. Têm, também, a capacidade para ligar substratos oleosos. Pensa-se que o óleo no substrato é absorvido na formulação e age como outro flexibilizante no adesivo.

2.2 Adesão

Para relacionar todas as forças envolvidas numa adesão existem diversas teorias.

2.2.1 Teoria mecânica

Consiste em caracterizar a penetração do adesivo nas fendas e outras irregularidades da superfície do substrato, já que a superfície de um material

sólido nunca é totalmente lisa. Assim, fixa mecanicamente semelhante a peças de quebra-cabeça como representada na Figura 2 [11].

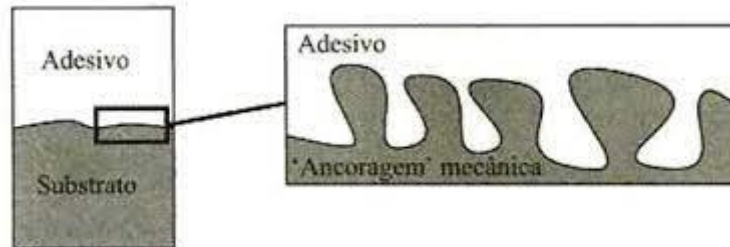


Figura 2 – Princípio da teoria mecânica de adesão [10]

2.2.2 Teoria da adsorção

É uma das principais teorias de adesão. Essa teoria ocorre entre as moléculas do adesivo e o substrato e tem dois tipos: adsorção física e adsorção química. A adsorção física ocorre quando ligações secundárias surgem na interface e é o mecanismo mais importante de adesão. A adsorção química, ou quimiossorção, ocorre quando ligações primárias surgem na interface. Estas ligações possuem caráter químico e são extremamente fortes. O uso de agentes de ligação e promotores de adesão (*primers*) ajuda a fixar o aderente à superfície por reação química (Figura 3).

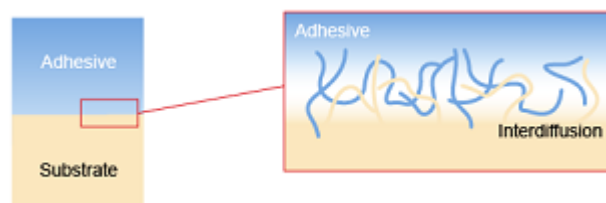


Figura 3 – Princípio da teoria mecânica de adsorção [13]

2.2.3 Teoria da difusão

Esta teoria não se aplica a ligações de adesivos com metais e sim por termoplásticos através de solvente ou calor. A extremidade de uma cadeia de uma molécula de polímero de uma superfície difunde na estrutura de uma segunda superfície formando uma ponte ou ligação através da interface. Esta teoria requer que os substratos e o adesivo sejam poliméricos, que tenham capacidade de movimento e que sejam compatíveis e miscíveis [10].

Quando se trata de adesão de um material com ele próprio, designa-se por 'auto adesão'. No caso de polímeros diferentes, o fenômeno é denominado por 'hetero adesão'. Importante lembrar que essa teoria da difusão não se aplica quando os materiais ligados não são solúveis ou o movimento da cadeia do polímero é restringida pela sua estrutura reticulada ou cristalina, ou quando o adesivo está abaixo da sua temperatura de transição vítrea. Na Figura 4 pode observar-se uma representação esquemática da teoria da difusão.

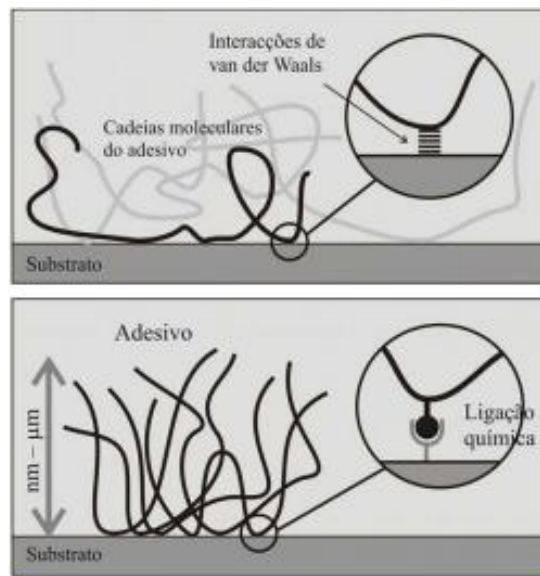


Figura 4 – Princípios da teoria da difusão [14]

2.3 Parâmetros de resistência

Através dos estudos realizados, podem notar-se três pontos mais frágeis considerando este processo, nomeadamente, uma camada fraca, distribuição de tensão em juntas não uniforme e irregularidades na superfície.

É possível analisar o conceito de camada fraca através do estudo de Bikerman em 1961. O estudo feito por ele aponta que a ideia de fases em contato serem isotrópicas e de composição uniforme é incorreto. Já que a superfície dos materiais é diferente do interior e, por isso, formariam a camada fraca por diversos motivos como: a inclusão de gases, formação de filme de e concentração de constituintes em pequenas proporções.

Por isso, é de suma importância, antes de aplicar o adesivo, preparar a superfície e isso inclui limpá-la e diminuir sua rugosidade. Principais impurezas em substratos poliméricos e metálicos [12].

A concentração de tensões é muito importante, pois a tensão das juntas se concentra nas extremidades e, por isso, a partir de um determinado valor o aumento do comprimento de sobreposição não irá resultar no aumento da tensão de rotura. As irregularidades de superfície causam bolsões de ar, como se pode ver na Figura 5, que não contribuem para a resistência da junta e, ainda, se comportam como pontos iniciadores de trinca. Conforme as teorias clássicas de Griffith e Irwin, uma trinca pode ter resultados catastróficos pela sua natureza de propagação rápida depois de um comprimento crítico.

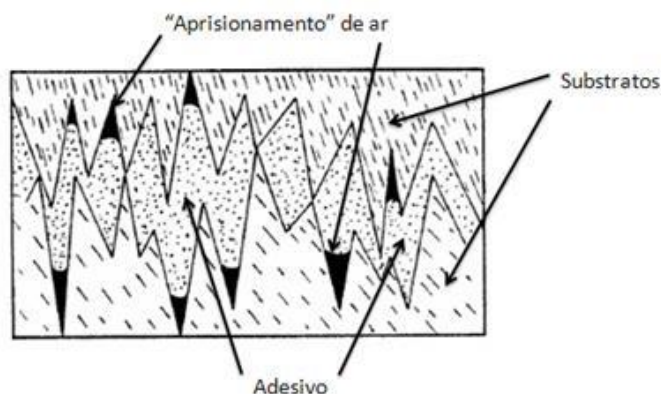


Figura 5 - Pontos de iniciação de fissuras em superfícies muito irregulares [15]

Como podemos ver, grande parte dos defeitos na colagem são, normalmente, causados por uma má molhabilidade ou presença de impurezas na superfície. A molhabilidade é a capacidade de um líquido molhar um sólido e é baseado na natureza das substâncias e sua limpeza. Empiricamente, estabeleceu-se que a tensão crítica da superfície do sólido deve ser no mínimo igual, numericamente, à tensão do líquido, caso contrário, o adesivo não irá molhar por completo e vão aumentar os vazios entre ele e o substrato.

Por exemplo, é muito simples fazer uma boa molhagem de um adesivo polimérico em um metal, mas deve se analisar os materiais no projeto de uma junta com substrato e adesivos poliméricos. Para diminuir a concentração de impurezas e, assim, garantir uma boa molhabilidade deve-se preparar a superfície antes da colagem. Dependendo do material e dos resultados desejados é necessário decidir se vai ser feito uma abrasão mecânica (esmerilhamento, jateamento, etc) ou até mesmo um ataque químico.

2.3.1 Comprimento de sobreposição

Um parâmetro necessário em juntas adesivas é o seu comprimento de sobreposição. A resistência da junta aumenta simbolicamente para pequenos valores entre a razão de espessura do substrato (t) e seu comprimento de sobreposição (l). Contudo, para alguns valores o ganho de resistência é baixo e o peso do conjunto sofre um aumento. Em casos, como os de adesivos frágeis, e substrato de aço duro, em um certo comprimento de sobreposição, o aumento deste não interfere na resistência da junta, onde a resistência será caracterizada pelas propriedades do adesivo, como se pode observar na Figura 6. Quando se trata dos substratos que se deformam plasticamente a resistência da junta é atribuída pelas propriedades do substrato e a resistência da junta não sofre interferências no aumento do comprimento de sobreposição.

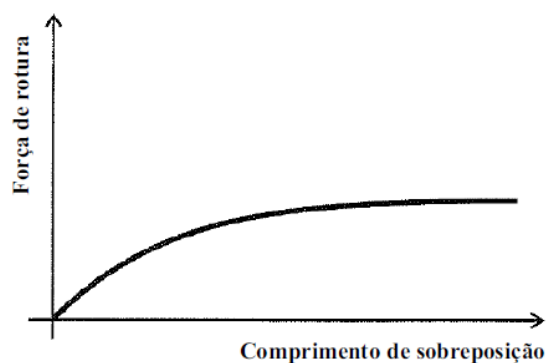


Figura 6 - Resistência de uma junta de simples sobreposição em função do comprimento de sobreposição [10]

Pode verificar-se, também, uma diferença entre a força de ruptura para adesivos frágeis e dúcteis em relação ao seu comprimento de sobreposição. O valor da força de ruptura vai aumentando, superior no começo para adesivos frágeis, porém, para comprimentos de sobreposição maiores, os adesivos dúcteis apresentam uma força de ruptura muito superior em relação aos frágeis (ver Figura 7).

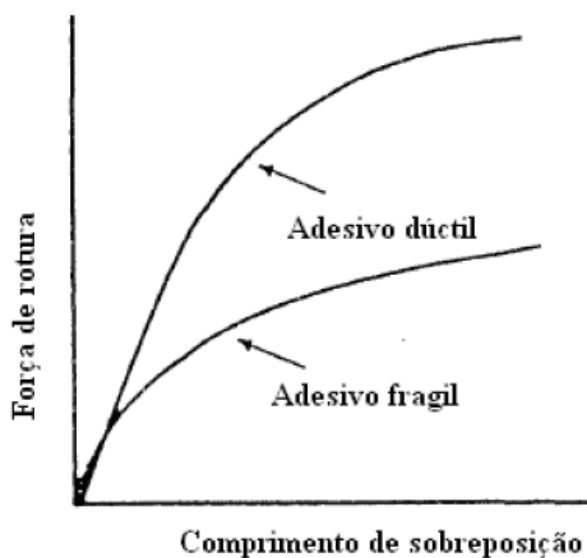


Figura 7 – Efeito do comprimento de sobreposição na força de ruptura, para adesivos dúcteis e frágeis [16].

2.3.2 Cisalhamento

As tensões de cisalhamento aparecem quando forças atuando no plano do adesivo tendem a separar os substratos. As juntas que dependem da resistência ao corte do adesivo são relativamente fáceis de fabricar e são muito usadas na prática. As juntas são, geralmente, mais resistentes quando solicitadas ao cisalhamento, porque toda a área colada contribui e é relativamente fácil manter os substratos alinhados. A junta de simples sobreposição, futuramente mostrada no tópico 6, representam o tipo de junta mais comuns [17].

Sobrepondo os substratos, o adesivo fica solicitado sobretudo ao cisalhamento. Note-se que, a maior parte da tensão está localizada nos extremos da sobreposição e a região central da sobreposição pouco contribui para a sustentação da carga, conforme Figura 8, na qual é usada a análise de Volkersen.

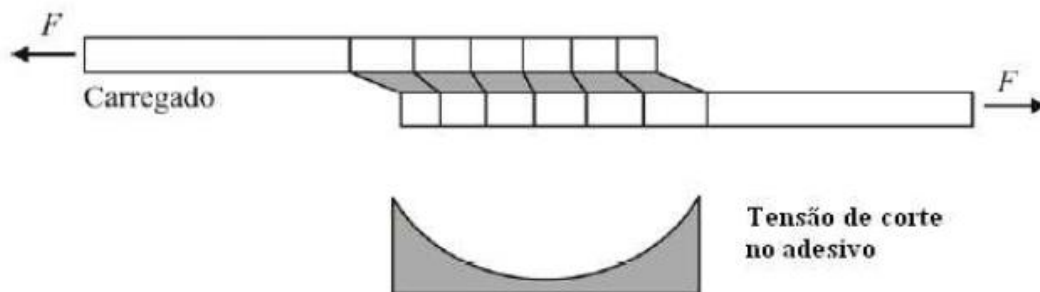


Figura 8 – distribuição de tensão de corte no adesivo numa junta de simples sobreposição [10]

2.4 Clivagem e arrancamento

As tensões de clivagem e de arrancamento são os principais inimigos das juntas adesivas. A clivagem é definida como a tensão que ocorre quando forças na extremidade de uma junta rígida atuam de modo a separar os substratos. As tensões de arrancamento são semelhantes às de clivagem, mas aplicam-se ao caso em que ambos os substratos são flexíveis.

Por conseguinte, o ângulo de separação pode ser muito maior para o arrancamento do que para a clivagem. As juntas sob clivagem ou arrancamento são muito menos resistentes do que aquelas sujeitas a corte, porque a tensão está concentrada numa área muito pequena. A distribuição de tensão no adesivo numa junta em clivagem é mostrada na Figura 9. Toda a tensão fica localizada na extremidade da junta, o adesivo que está na outra extremidade pouco contribui para a resistência da junta [10].

Os adesivos frágeis e rígidos são, particularmente, sensíveis às forças de arrancamento. Por outro lado, os adesivos mais dúcteis e flexíveis permitem uma distribuição de tensões menos concentrada e permitem uma maior resistência, conforme mostrado ilustrativamente na Figura 9. Os adesivos epóxis rígidos têm uma resistência ao arrancamento de apenas 0,35 N/mm de largura, enquanto os adesivos mais tenazes podem chegar aos 4-8 N/mm.

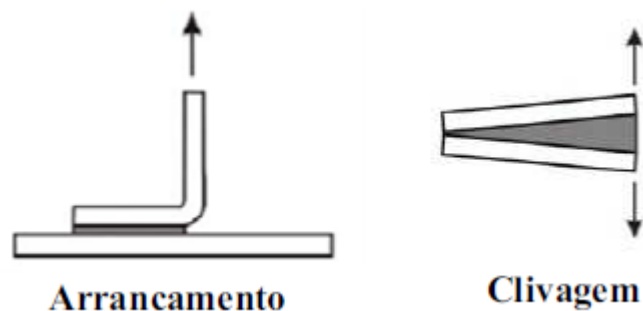


Figura 9 – forças de arrancamento e clivagem [10]

Conforme houve evolução nos modelos analíticos, notou-se a existência de deformação de substrato pela existência de um momento fletor que é originário da não linearidade dos substratos e suas forças, inclusive os rígidos (conforme Figura 10). Tal deformação introduz solicitações indesejadas até em juntas com solicitações simples como cisalhamento, os primeiros notarem esse fenômeno foram Goland e Reissner

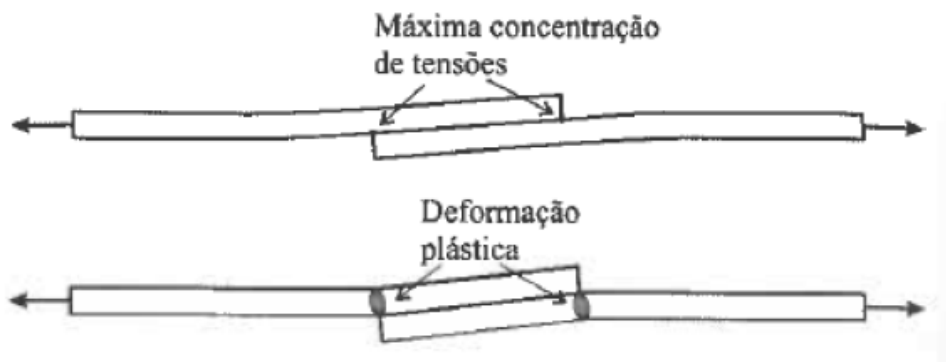


Figura 10 – Representação da deformação plástica dos substratos [10]

2.5 Tipos de juntas

A junta pode ter diversas formas dependendo de diversos fatores como: tensões envolvidas, intensidade da tensão e facilidade de fabricação. Os diversos formatos de juntas, ver Figura 11, foram evoluindo para diminuir as tensões envolvidas nela com base nos avanços teóricos dos modelos de tensões, porém, pelo limitante do custo ainda se usa muito juntas mais simples. As juntas mais comuns são sobreposição simples, dupla e chanfro [10].

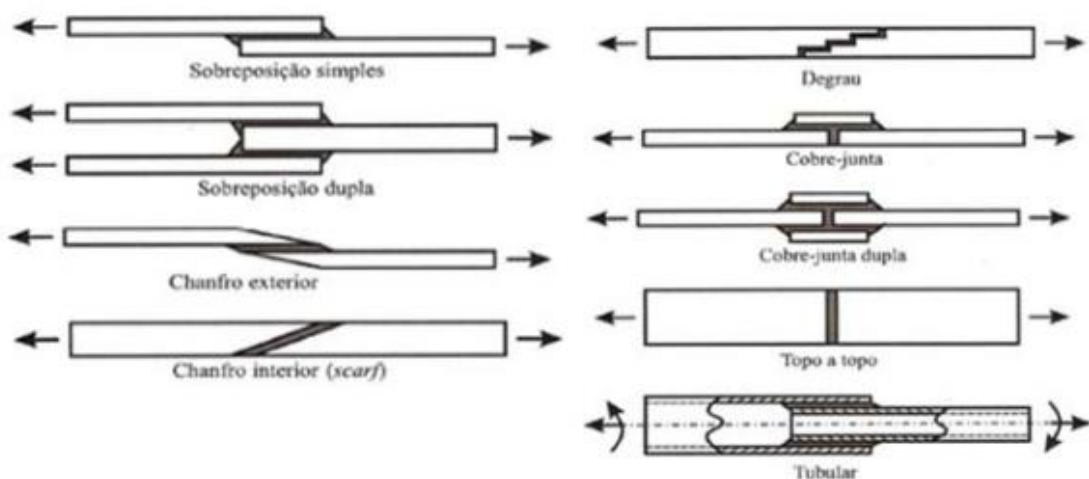


Figura 11 – Tipos de juntas adesivas [10].

2.6 Tipos de ruptura

Os tipos de ruptura ou modos de falha são determinados pela quantidade de materiais em cada interface, geometria e carregamento. É importante que seja feita a caracterização da falha para se ter um entendimento completo das propriedades da junta. Em juntas adesivas de compósitos, de acordo com a norma ASTM D5573, existem sete modos de falha caracterizados. Eles são falha adesiva, coesiva, coesiva na camada-fina, descolamento da fibra, descolamento da fibra leve, substrato ou uma mistura das anteriores [18].



Figura 12 – Tipos de Ruptura em juntas adesivas [19]

As principais falhas são: adesiva quando o adesivo apresenta falha ao aderir no substrato, coesiva quando rompe dentro do adesivo ou de substrato quando a junta se rompe e o adesivo mantém-se (Figura 12).

2.7 Vantagens e Desvantagens das juntas coladas

2.7.1 Vantagens

Distribuição mais uniforme das tensões ao longo da área ligada, ao contrário de ligações mecânicas, permite uma maior rigidez e transmissão de carga, possibilitando, assim, uma redução de peso, ou seja, um menor custo. Amortecimento de vibrações, o que permite que as tensões sejam parcialmente

absorvidas, aumentando a resistência à fadiga dos próprios componentes ligados [20].

Ligação de materiais diferentes em composição e com distintos coeficientes de expansão. Ligação eficiente de chapas, o que pode constituir uma aplicação importante dos adesivos para ligar materiais metálicos ou não.

Permitem ter estruturas com contornos regulares porque evitam furos (rebites, parafusos, etc) e marcas devidas à soldadura. Adesivo estrutural é o método mais eficiente para ligar materiais compósitos.

2.7.2 Desvantagens

É necessário um projeto da ligação que elimine ao máximo as forças de arrancamento (principal limitação das ligações adesivas), clivagem e impacto. Quando um dos dois materiais não é rígido, a ligação pode estar sujeita a forças de arrancamento. Quando os dois materiais são rígidos, a ligação pode estar sujeita a forças de clivagem [21].

É importante usar geometrias que evitem tensões localizadas e que garantam uma distribuição uniforme de tensões. Se as tensões não estiverem perfeitamente perpendiculares ao adesivo podem surgir forças de arrancamento ou de clivagem. A melhor solução é conceber uma ligação em que o adesivo esteja sujeito a tensões de corte. Neste caso, as tensões são paralelas à ligação adesiva e estão mais bem distribuídas. Apresentam limitada resistência a condições extremas, tais como a temperatura e a humidade, devido à natureza polimérica do adesivo.

A ligação, normalmente, não é realizada instantaneamente, o que leva à utilização de ferramentas de fixação para manter as peças. Os adesivos são frequentemente curados a elevadas temperaturas (forno, prensa, etc.). Para obter bons resultados é necessária uma cuidada preparação das superfícies através de, por exemplo, abrasão mecânica, desengorduramento com solvente, ataques químicos, etc.

O controle de qualidade e segurança são mais difíceis embora tenham sido desenvolvidas recentemente técnicas não destrutivas adequadas. Um dos grandes problemas da utilização mais frequente de adesivos estruturais é o fato

de não haver um critério de dimensionamento universal que permita projetar qualquer estrutura. Existem muitos que funcionam bem apenas em determinadas situações.

2.8 Ensaios

Os ensaios, em geral, consistem em avaliar e verificar as características dos materiais, podendo elas ser física, química, mecânicas, térmicas, entre outras. As propriedades físicas e térmicas são propriedades diretamente ligadas aos adesivos, que influenciam na sua preparação, utilização e como irá se comportar nas mais diversas condições ambientais e mecânicas. Os ensaios mais usuais requerem uma amostra real (corpo de prova), sendo assim destrutivos, demonstrando como será a ligação que será formada entre o adesivo e o substrato correto [22].

Os ensaios reais devem levar diversos fatores em consideração, entre eles, a geometria da junta, a interface, a camada primária, a preparação da superfície, o tempo de cura e o adesivo. Os principais ensaios são os de dureza (método Shore, método Barcol e Nanoindentação) com a função de se avaliando a dureza para saber se houve a cura correta do adesivo, temperaturas de transição para se ter a caracterização da variação do módulo de elasticidade e volume específico e de juntas que tem como objetivo ver como se comporta o material em diversos formatos de juntas sobre tensão. Por exemplo, ensaio de junta de sobreposição simples, Notched plate shear method (Arcan), topo em torção e outros.

2.8.1 Ensaio de cisalhamento em uma junta de sobreposição simples

O ensaio de cisalhamento por tração é o mais utilizado na determinação da resistência de junções adesivas por sobreposição simples. Os resultados obtidos são de extrema utilidade para determinação das condições geométricas da junta e do tipo de adesivo em aplicação na indústria. Através do ensaio de

cisalhamento é possível determinar características importantes dos adesivos e das juntas, como por exemplo, a tensão média de ruptura, τ média, propriedade do adesivo, dada pela relação entre a força máxima aplicada (F) e a área de sobreposição das chapas (τ média = $F/b \cdot l$) [19].

Este ensaio é regulamentado pelas normas ASTM D1002, ISO 4587 ou outras similares. O ensaio em junta de sobreposição simples pode ser usado como método comparativo para estudo de adesivos, desde que se garantam a padronização dos parâmetros restantes que podem afetar o resultado dos ensaios. Neste trabalho, foi realizado o ensaio de cisalhamento em 2 adesivos comerciais e 2 comprimentos de sobreposição de corpos de prova em liga de alumínio.

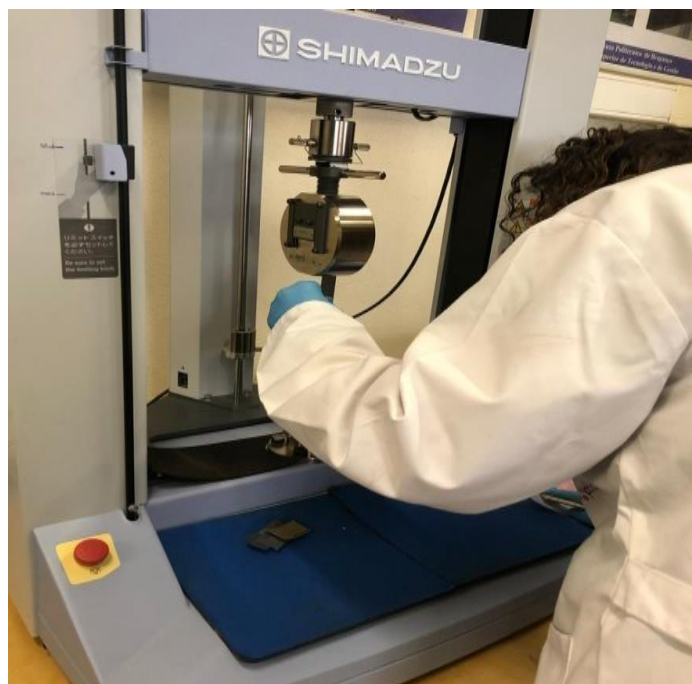


Figura 13 – Foto de um corpo de prova sendo preparado para ensaio no LERM

Neste trabalho foi realizado o ensaio de cisalhamento em 2 adesivos comerciais e 2 comprimentos de sobreposição de corpos de prova em liga de alumínio.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1.1 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1.1.1. Método experimental para teste de resistência de juntas adesivas

Os adesivos epóxicos são, provavelmente, a família de adesivos mais versátil que existe no mercado atualmente, porque aderem bem a diversos substratos, exceto os polímeros e os elastômeros que têm uma energia de superfície muito baixa e podem ser facilmente modificados para atingir uma grande variedade de propriedades. Têm uma excelente resistência à tração e ao cisalhamento, porém, têm uma fraca resistência ao arrancamento a não ser que sejam modificados com um polímero mais tenaz.

Têm uma excelente resistência ao óleo, humidade e muitos solventes. Têm uma baixa contração durante o processo de cura e uma elevada resistência à fluência. Os epóxidos comerciais são compostos por uma resina epóxida e um endurecedor. O endurecedor pode ser incorporado na resina originando um adesivo de um componente, ou pode ser fornecido em um recipiente separado que deve ser, posteriormente, misturado com a resina antes da aplicação. Os epóxidos podem ser líquidos, pastas, filmes e sólidos. Os adesivos de uma parte curam com calor enquanto os de duas partes podem curar à temperatura ambiente ou a altas temperaturas.

Os que curam a altas temperaturas têm uma maior temperatura de transição vítrea do que os que curam à temperatura ambiente. Os epóxidos que curam a temperaturas elevadas têm maior resistência ao corte, especialmente, a altas temperaturas, e uma maior resistência ao meio ambiente. No entanto, têm menos tenacidade e resistência ao arrancamento. Os epóxidos que curam à temperatura ambiente podem, em alguns casos, endurecer em segundos, mas, geralmente, é necessário um período de 18 a 72 horas. Podem ser curados a temperaturas mais altas com tempos mais curtos. Os epóxidos que curam à temperatura ambiente têm um tempo limite curto para aplicar o adesivo [27].

Para os adesivos de um componente o tempo permitido desde a mistura (feita pelo fabricante) até à aplicação é, relativamente, longo e depende das condições de armazenamento. Para se ter melhores propriedades pode se misturar adesivos epóxicos copolímeros como: nitrilo, fenólicos, nylon e polisulfeto, para reagir com o adesivo ou para ficarem incluídas como modificadores.

O Ceys Araldite Standard é um adesivo estrutural epóxi de alta qualidade em duas partes. Possui uma coloração transparente antes da cura e amarelo claro após a mesma, necessita de um tempo de fixação de 30 minutos em temperatura ambiente e a cura após 24 horas em temperatura ambiente, podendo ser menor quando aquecida. No final do tempo de cura, possui a resistência de 9,65 MPa, em substrato de alumínio.

Por mais que tenha uma boa qualidade em sua composição, ele ainda é caracterizado como um adesivo frágil, podemos perceber pela sua curva de tensão-deformação (σ - ϵ), conforme a Figura 14.

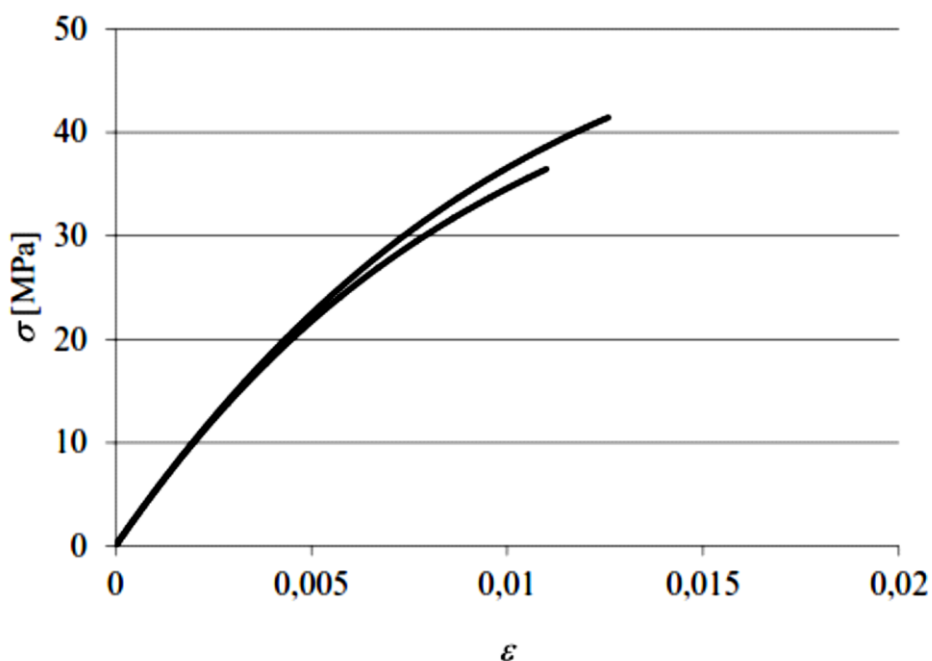


Figura 14 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços de Araldite® ^

A mistura da resina/endurecedor faz-se numa razão de 100g/40g, respetivamente (Figura 15). Estas informações foram retiradas da ficha técnica disponibilizada pelo fabricante. Na Tabela 1 apresentam-se os parâmetros relevantes do adesivo.

Tabela 1 – Propriedades do adesivo Araldite Epóxi [27]

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de <i>Young</i> , E [GPa]	4,89±0,81
Coefficiente de <i>Poisson</i> , ν^b	0,35
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	36,49±2,47
Tensão de rotura à tração, σ_r [MPa]	39,45±3,18
Deformação de rotura à tração, ϵ_r [%]	1,21±0,10
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	1,56±0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	25,1±0,33
Tensão de rotura ao corte, τ_r [MPa]	30,2±0,40
Deformação de rotura ao corte, γ_r [%]	7,8±0,7
Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm]	0,20 ^a
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	0,38 ^a
^a valores estimados na referência (Neto 2011)	
^b valor do fabricante	



Figura 15 – Foto do Adesivo Epóxi utilizado

No mercado, no início dos anos 70 do século passado, com a designação de 'supercola', os cianoacrilatos se tornaram mais conhecidos. São, geralmente, à base de cianoacrilato de metilo ou etilo. São líquidos de um só componente e têm uma cura rápida, excelente resistência ao corte e um bom tempo de prateleira. Embora muito parecidos, em termos de cura, com os anaeróbicos, os cianoacrilatos são mais rígidos e menos resistentes à humidade. Os cianoacrilatos estão disponíveis apenas como líquidos de baixa viscosidade que curam em poucos segundos à temperatura ambiente.

Os cianoacrilatos aderem bem a muitos substratos e têm, normalmente, uma baixa resistência ao calor e à humidade. A sua resistência ao arrancamento e ao impacto são também baixas. A sua aplicação estrutural restringe-se aos casos em que o meio ambiente não é muito severo e quando é fundamental ter uma ligação rápida de executar.

O Axton (Figura 16) é um adesivo instantâneo a base de cianoacrilato de etila, monocomponente de polimerização espontânea por ação da humidade ambiente. Possui um aspecto líquido de média viscosidade e com odor característico, é incolor e ligeiramente amarelado. É uma cola rápida, pois sua cura dá-se em menos de 30 segundos. O adesivo tem uma resistência máxima, depois de 24 horas de cura à temperatura ambiente, de 25 MPa em aço segundo a norma ASTM-D2095 e pode ser usado numa faixa de temperatura de – 50 a 80° C.

Em função das propriedades obtidas, é expectável que a resistência das juntas adesivas coladas com este adesivo seja elevada, pois este adesivo combina uma resistência média e com a elevada ductilidade dos poliuretanos. Assim, são obtidas tensões elevadas na camada de adesivo, bem como, um efeito acentuado de plastificação sem rotura das extremidades do adesivo com o carregamento progressivo das juntas, o que conduz a uma elevada resistência [28].

Tabela 2 – Propriedades do adesivo Axston Cianoacrilato

Propriedades	Axston
Módulo de <i>Young</i> , E [GPa]	0,49±0,09
Coefficiente de <i>Poisson</i> , ν	0,30
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	3,24±0,48
Tensão de rotura à tração, σ_r [MPa]	11,48±0,25
Deformação de rotura à tração, ϵ_r [%]	19,18±1,40
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	0,19±0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	5,16±1,14
Tensão de rotura ao corte, τ_r [MPa]	10,17±0,64
Deformação de rotura ao corte, γ_r [%]	54,82±6,38
Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm]	2,36±0,17
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	5,41±0,47

* valor do fabricante



Figura 16 – Foto do Adesivo Axton utilizado

3.1.2 Substratos

O alumínio, apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, é o metal mais jovem usado em escala industrial. Mesmo utilizado milênios antes de Cristo, o alumínio começou a ser produzido comercialmente há cerca de 150 anos. Sua produção atual supera a soma de todos os outros metais não ferrosos. Esses dados já mostram a importância do alumínio para a nossa sociedade. Antes de ser descoberto como metal isolado, o alumínio acompanhou a evolução das civilizações.

As características do alumínio permitem que ele tenha uma diversa gama de aplicações. Por isso, o metal é um dos mais utilizados no mundo todo. Material leve, durável e bonito, o alumínio mostra uma excelente performance e propriedades

Superiores na maioria das aplicações. Produtos que utilizam o alumínio ganham, também, competitividade, em função dos inúmeros atributos que este metal incorpora. Suas técnicas de fabricação permitem a manufatura do produto acabado a preços competitivos.

Cada segmento utiliza o metal na forma mais adequada às suas finalidades, de acordo com os diferenciais e propriedades de cada produto. O material utilizado neste trabalho será a liga de alumínio 1200 H 14. Este material é um material encruado e que foi temperado. Este material possui o limite, mínimo, de resistência a tração entre 75 e 110 MPa, limite, máximo, de resistência a tração entre 105 e 145 MPa e uma dureza máxima de 32 HB.

3.1.3 Preparação dos corpos de prova

Foram preparados 32 corpos de prova sendo a matriz L16 e 2 testes para cada combinação. Foi considerada como base a norma ASTM D1002. Os corpos de prova, têm as dimensões fixas: 25mm de largura e 1.5mm de espessura. Os comprimentos serão de 108 e 120mm, que são diferentes pela variação de comprimento colado de 12.5 e 25mm. Os substratos de alumínio serão cortados na guilhotina com as dimensões apresentadas na Figura 17.

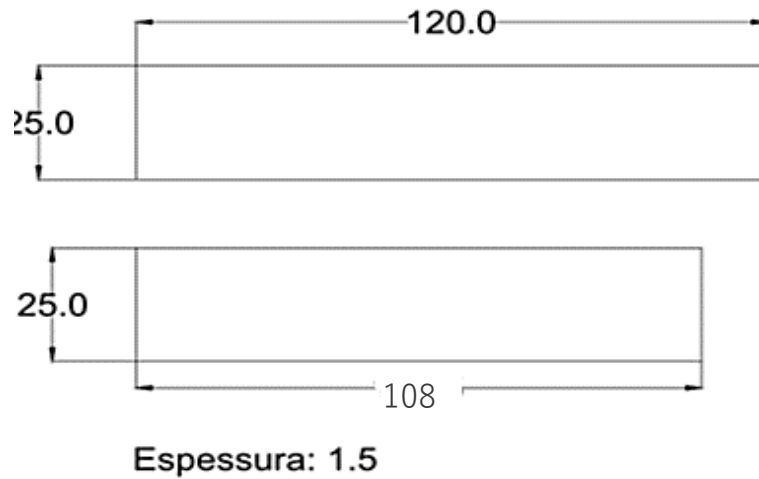


Figura 17 – Comprimentos dos corpos de prova para utilização de testes

Os corpos de prova foram cortados e preparados no laboratório de Tecnologia Mecânica na ESTIG em Bragança-PT. Foi a Guilhotina Industrial “Cutil Mini 320” para cortar as placas (corpos de prova) na liga de alumínio 1200 H14 com as dimensões referidas anteriormente.



Figura 18 – Guilhotina Industrial utilizada para preparação de provetes



Figura 19 – Corpos de Prova cortados e preparados para utilização dos aderentes.

Para aumentar a aderência do adesivo no substrato, os substratos têm que ser tratados mecanicamente e quimicamente, já que a maior parte dos problemas na colagem são decorrentes de uma má preparação dos substratos.

Para início dos testes, os substratos foram lixados com lixas d'água de 60 e 240 em ângulos de 45° em relação às dimensões do material, após se obter a superfície lixada foi realizada uma limpeza com acetona para eliminar qualquer impureza que tenha se depositado na superfície.

Para definir a combinação adequada para a realizações dos ensaios experimentais foi escolhida a matriz de Taguchi L16. Relativamente à matriz L16, que foi escolhida baseando-se no princípio de 4 fatores para se testar com todas as combinações possíveis ($4 \times 4 = 16$) a fim de se obter um resultado assertivo em variações de adesivo, aderente, comprimento de sobreposição e espessura. matriz L16 (2^4) / 4 fatores / 16 ensaios

Tabela 3 – Matriz de Taguchi escolhida para a realização dos ensaios

C1 (ADESIVO)	C2 (ADERENTES)	C3 (SOBREPOSIÇÃO)	C4 (ESPESSURA)
1	1	1	1
1	1	1	2
1	1	2	1
1	1	2	2
1	2	1	1
1	2	1	2
1	2	2	1
1	2	2	2
2	1	1	1
2	1	1	2
2	1	2	1
2	1	2	2
2	2	1	1
2	2	1	2
2	2	2	1
2	2	2	2

C1: 1-Epóxi / 2-Cianoacrilato

C2: 1-108mm / 2-120mm

C3: 1-12.5mm / 25mm

C4: 0.3mm / 0.5mm

A seguir foi realizada a colagem dos aderentes com os adesivos selecionados (Figura 20) de acordo com a matriz de Taguchi definida.



Figura 20 – Corpos de prova sendo colados

O ensaio de tração foi realizado, à temperatura ambiente (Figura 21 e 22), utilizando uma máquina de ensaio universal modelo Shimadzu Autograph AGS-X 10KN, conforme visto na 25, no laboratório de Estruturas e Resistência dos Materiais da ESTIG-IPB em Bragança – Portugal, segundo a norma ASTM D 3039M. A velocidade padrão sugerida pela norma para testes, onde a velocidade do travessão é constante a uma taxa de deslocamento padrão, é de 1 mm/min. A velocidade de ensaio utilizada, avaliados pelo movimento do travessão móvel foi de 1 mm/min.

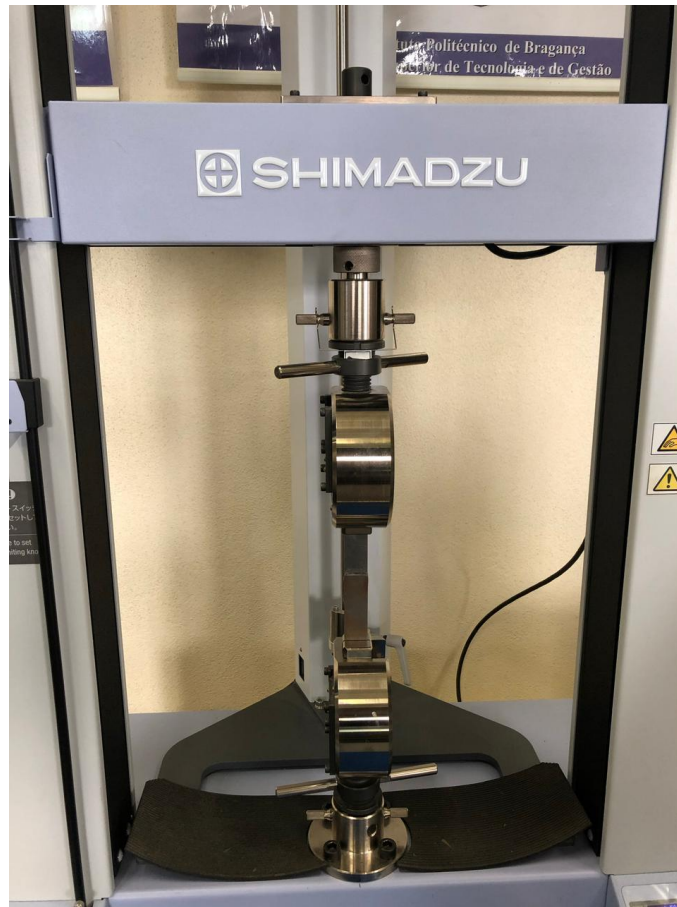


Figura 21- Máquina utilizada para os ensaios de tração, SHIMADZU Autograph

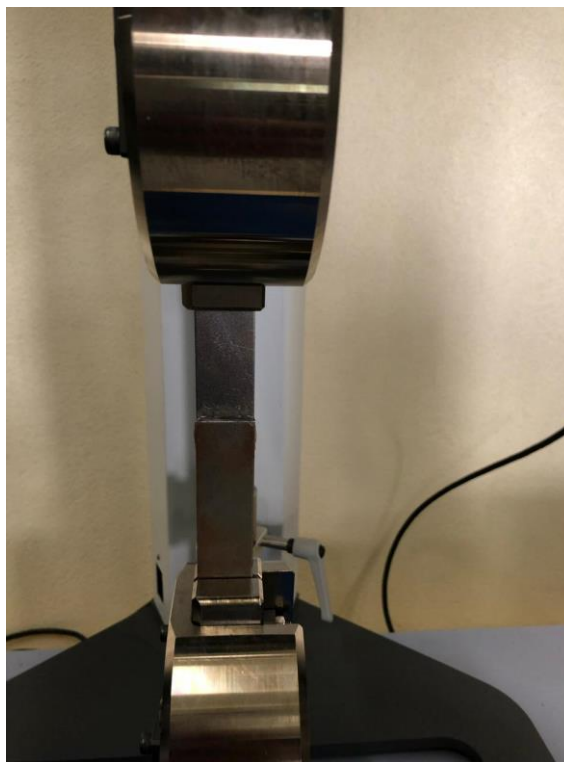


Figura 22 – Teste em andamento na shimadzu autograph

Durante o procedimento foram registradas a força e o deslocamento de forma produzir, posteriormente, a curva característica de cada ensaio efetuado com auxílio de um computador e um software específico (TRAPEZIUM X) como mostra a Figura 23.

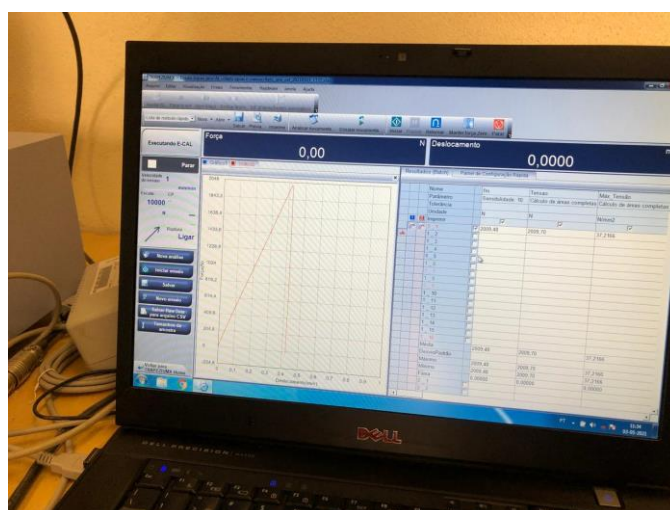


Figura 23 – Software “Trapezium X” durante a realização dos testes

3.1.4 Análise de resultados

Após os ensaios, foi necessário realizar uma análise utilizando o arquivo convertido do Software (TRAPEZIUM X) para Excell, para verificar os dados da Tabela 4 e da Figura 24, respectivamente.

Tabela 4 – Resultados dos testes de acordo com a combinação

combinação	TEMPO (S)	FORÇA(N) máx	DESLOCAMENTO (mm)
1_1	25,27	2007,545	0,4213
1_2	40,08	2160,724	0,667796
1_3	50,98	3029,316	0,8508
1_4	71,64	1844,193	1,1939
1_5	64,67	3542,917	1,078633
1_6	44,82	2269,5	0,7468333
1_7	49,48	3111,606	0,8249667
1_8	35,33	2192,817	0,5887667
1_9	27,61	1659,005	0,460067
1_10	25,65	1525,907	0,427467
1_11	44,53	2588,59	0,7421
1_12	40,08	2344,192	0,6678666
1_13	47,11	2365,875	0,7850333
1_14	29,87	1540,073	0,4977
1_15	34,28	2049,332	0,5712667
1_16	39,49	2283,792	0,6581
2_1	14,1	828,7684	0,2346667
2_2	6,25	453,7249	0,1040333
2_3	32,02	1934,729	0,5336334
2_4	37,47	1954,618	0,6244667
2_5	6,32	379,2794	0,1052
2_6	9,19	606,1649	0,1529667
2_7	42,81	2188,099	0,7134
2_8	51,24	79,89725	0,8539
2_9	13,84	850,8524	0,2304
2_10	6,7	431,7919	0,1115333
2_11	16,19	1012,017	0,2694667
2_12	19,72	1170,858	0,3287333
2_13	5,6	377,3308	0,09323333
2_14	9,47	388,608	0,1577333
2_15	47,72	3059,389	0,7952667
2_16	31,41	2035,203	0,5233333

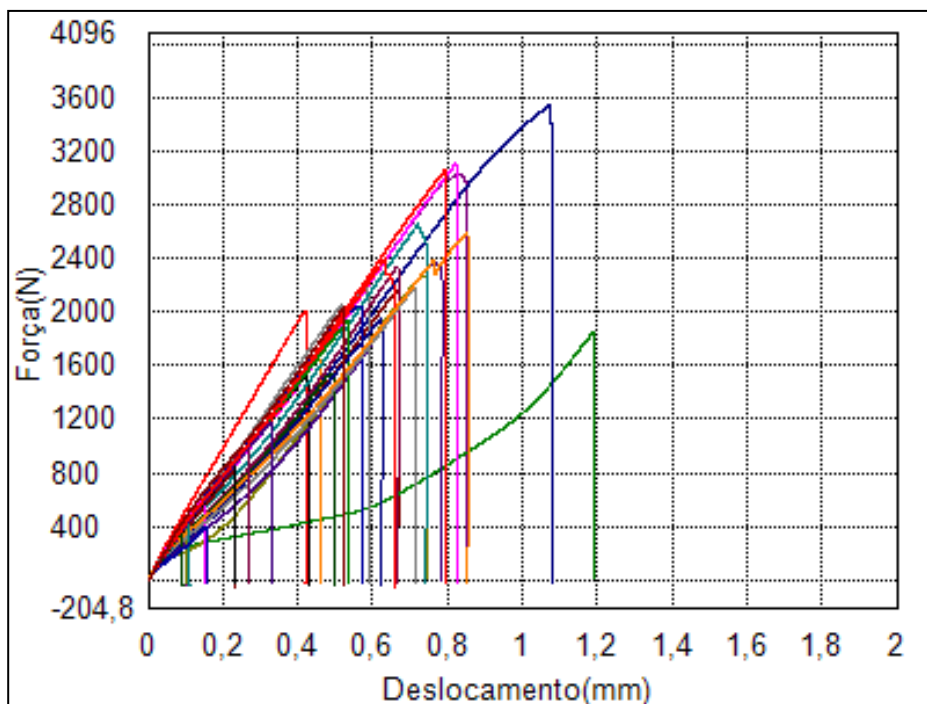


Figura 24 – Dados transferidos para o formato Excell para análise

Podemos analisar destes dados tanto da tabela 4 quanto da Figura 24, percebemos a variação dos testes graficamente e, também, numericamente, levando em conta a força (N) e o deslocamento (mm). De todos os testes realizados, 2 deles se destacaram. O teste 1_4 (linha verde) sendo sua composição: adesivo epóxi comprimento do aderente de 108mm, comprimento de sobreposição 25mm e espessura do adesivo 0.5mm, pois teve uma força máxima de 1844,193N com um deslocamento de 1,1939mm sendo o maior de todos os testes realizados.

O segundo teste em destaque foi a combinação 1_5 (linha azul) na qual sua composição foi: adesivo epóxi, comprimento do aderente de 120mm, comprimento de sobreposição de 12.5mm e espessura do adesivo de 0.3mm, que obteve uma força máxima de 3542,917N com um deslocamento de 1,0786mm.

Analisando estes dois casos percebemos uma superioridade do adesivo epóxi em diferentes comprimentos de aderência e sobreposição que obteve um comportamento semelhante, com maior resistência à ruptura e, conseqüentemente, um deslocamento maior.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico apresentam-se os resultados obtidos em laboratório. Fazendo uma observação na ruptura das ligações coladas com o adesivo, observa-se que houve uma ruptura em todos os provetes, pois em ambas as partes do corpo de prova há adesivo nas superfícies aderentes. verifica-se, também, que ficaram bem próximas da interface entre o adesivo e o substrato. Na Figura 25 são apresentados alguns exemplos das superfícies de ruptura dos corpos de prova de 12.5mm e 25.0mm.

4.1 Modos de ruptura de juntas de cianoacrilato 12.5mm



Figura 25 – Corpos de prova fraturados (cianoacrilato 12.5mm)

Na figura 25, vemos juntas coladas com adesivo a base de cianoacrilato A, B e C testes (1_9, 1_13, C 1_14) de acordo com a matriz Taguchi, e percebe-se que na imagem do teste “C” houve uma ruptura adesiva, restou pouco substrato no aderente, enquanto no teste “B” houve uma ruptura coesiva um desgaste menor e no Teste “A” houve uma ruptura adesiva, com a presença maior de substrato no aderente. Todos estes exemplos foram feitos com cianoacrilato com 12.5mm, a mesma força, porém, houve um deslocamento maior em “C”, para “B” e logo depois “A”, sendo assim, caracterizando em porcentagem com 25% de defeito(C), (B) 50% de defeito (A) e 75% de defeito

4.2 Modos de ruptura - Epóxi 25mm

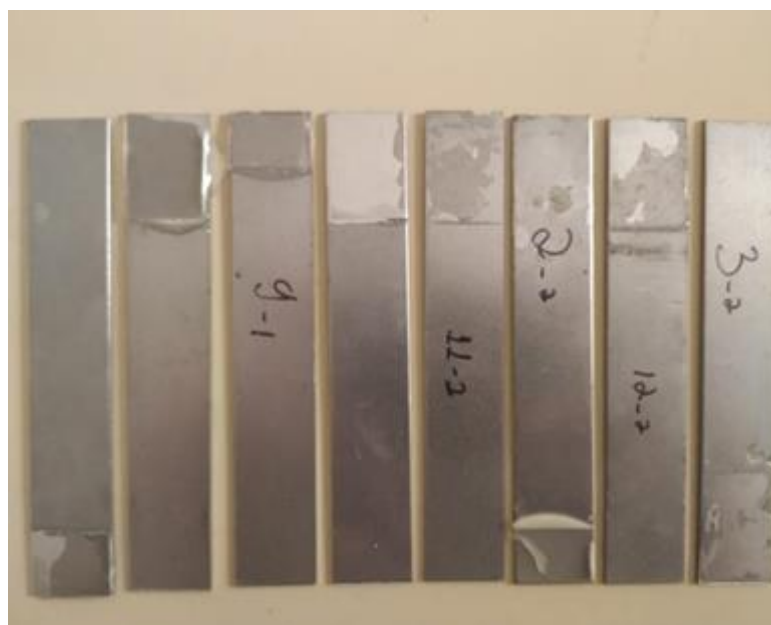


Figura 26 – Corpos de provas fraturados Epóxi 25 mm através do ensaio de tração

Podemos observar na figura 26 os corpos de prova à base do adesivo Epóxico com 25mm de comprimento de sobreposição e percebemos uma qualidade distinta entre os aderentes, no que se diz respeito à força aplicada para se descolar totalmente. Visualmente, o teste C (1_9 na matriz Taguchi) teve um maior valor de deslocamento quando submetido à força máxima de 1659,005, pois sua coloração, esbranquiçada, denota o desgaste da primeira camada do aderente junto ao adesivo colado classificado como uma ruptura coesiva. No teste B (2_11) verificou-se um desgaste um pouco menor sendo uma ruptura adesiva enquanto o teste A (2_12) teve uma porcentagem dos problemas referidos ao teste C como uma ruptura coesiva também.

Analisando estes dados percebemos uma maior resistência do adesivo epóxi sobre o cianoacrilato, além de uma aderência melhor em sua área de sobreposição do que seu concorrente através do modo de rupturas.

4.3 Modos de ruptura de Cianocrilato 25mm e epóxi de 12.5mm



Figura 27 – Aderentes 5_1 e 5_2 epóxi de 12,5mm e 4_1 e 2_1 Cianocrilato de 25mm

Na figura 27 temos mais exemplos de rupturas adesivas em epóxi e coesivas no cianoacrilato.



Figura 28 - Aderentes com testes de cianoacrilato de 12,5mm e espessura do adesivo 0,5mm

Neste teste podemos observar as roturas mistas, com apenas 1 teste permanecendo colado e levemente deslocado. Todos os testes foram realizados com 12.5mm de sobreposição, 0.5mm de espessura do adesivo e 108mm de comprimento dos aderentes. Em nenhum dos casos os aderentes tiveram deformações.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Este trabalho de investigação centra-se análise do efeito do comprimento de sobreposição e tipo de adesivo em juntas coladas de sobreposição simples na resistência mecânica das juntas, nos modos de ruptura e na sua deformação.

Após os ensaios dos testes de simples sobreposição, os modos de ruptura foram avaliados visualmente. É possível verificar, partir da análise das figuras 25 e 27, no teste com o Cianoacrilato em 25mm e 12.5mm, que uma parte substancial do adesivo ficou ligado ao substrato após o teste. Esse tipo de ruptura acontece quando há uma má adesão do adesivo ao substrato. Assim, conclui-se que, neste caso, a operação não foi de total êxito e satisfação para os materiais utilizados, já que não houve uma ruptura coesiva.

Quanto ao epóxi do, tanto em 12.5mm quanto em 25mm observou-se uma taxa menor destas “más adesões” percebendo, pelas figuras 26 e 27, que o adesivo teve uma ruptura mais resistente e consistente.

Verifica-se o comportamento linear da junta até à rotura. No que toca aos substratos, não se verificou qualquer dano visível. De uma forma geral, existe uma boa repetibilidade das curvas no que diz respeito à rigidez e à carga máxima.

O adesivo Epóxico tem comportamento não linear na proximidade de $P_{máx}$, devido à elevada plasticidade que possui. Para o caso em que $L_0 = 25$ mm esta não apresenta um comportamento linear muito evidente. Do mesmo modo, no adesivo Epóxico, ocorrem pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas devido, provavelmente, à ocorrência de escorregamento entre as amarras e os provetes. Para este adesivo, ocorreu menos escorregamento das juntas, sendo possível ver isso nas curvas obtidas. Em termos de carga máxima e rigidez, há uma boa repetibilidade das curvas, em especial para o $L_0 = 25$ mm.

Conclui-se que, tal como esperado, quanto maior o comprimento de sobreposição, maior a força necessária para provocar a ruptura da junta. Quando

foi testado um aumento no comprimento de sobreposição, a tensão suportada na junta foi menor. Estes dois fatos contraditórios, ocorreram devido à distribuição de tensões na junta, pois as tensões do adesivo se concentram mais nas extremidades da sobreposição, assim, resultando em um aumento não linear de resistência. Verificou-se que o adesivo Epóxico teve uma resistência e alongamento maior que a do adesivo de cianoacrilato. Sendo assim, a melhor combinação foi o Epóxico com aderentes de 12.5cm de comprimento.

Nas gráficos da figura 24 verifica-se o destaque deste adesivo nos provetes (1_4 = adesivo epóxico, 108mm de comprimento de aderente, comprimento de sobreposição de 25mm e espessura do adesivo 0.5mm) e também (1_5 = adesivo epóxi, comprimento de aderente 120mm comprimento de sobreposição 12.5mm e espessura do adesivo de 0.3mm), a combinação 1_5 teve uma maior resistência à rotura, sendo necessário uma força maior que os demais para alcançar o descolamento total do adesivo relativamente ao aderente.

Iniciando uma comparação, verifica-se que o adesivo Epóxico tem o valor de $P_{máx}$ com uma menor variação com uma certa percentagem de defeito em relação ao adesivo de Cianoacrilato em torno de 52%, quanto às rupturas, o adesivo Epóxico mostra-se com uma fragilidade maior quando atinge os picos de tensões na junta. Para o Epóxico, o pequeno aumento de $P_{máx}$ registrado deve-se ao aumento das concentrações de tensões com o aumento de LO e falta de capacidade de plastificação deste adesivo. Por outro lado, o Cianoacrilato, também, apresenta estes picos de tensão, mas permite a plastificação quase completa da camada de adesivo quando $P_{máx}$ é atingido o que resulta em incrementos significativos de $P_{máx}$ em função de LO. A percentagem de defeito, tem uma influência na resistência muito mais significativa para o adesivo Cianoacrilato, tendo em conta que o comportamento dúctil deste adesivo faz com que a rotura ocorra em condições muito próximas da cedência generalizada. Como tal, o valor de $P_{máx}$ é, aproximadamente, proporcional à área de corte da camada de adesivo. Por outro lado, o adesivo Epóxico, devido à sua fragilidade, provoca rotura com na zona interior do adesivo. Assim, a resistência não é tão afetada pela presença de defeito. Apenas para dimensões de defeito

significativas se observa uma redução digna de registo em $P_{m\acute{a}x}$. Como tal, finalizando esta conclus\~ao, a melhor combina\~ao utilizada foi o adesivo Ep\~oxido, comprimento de aderente 120mm, comprimento de sobreposi\~ao 12.5mm e espessura do adesivo de 0.3mm

5.2 Linhas futuras de investiga\~ao

Neste projeto, verificou-se que h\~a a necessidade de melhorar e complementar alguns aspectos do trabalho, nomeadamente:

- Realizar os ensaios com juntas de sobreposi\~ao Dupla
- Realizar os ensaios com os corpos de prova vazados, para que sua fixa\~ao ocorra de maneira mais r\~igida e evitar o cisalhamento paralelo.
- Realizar os ensaios com os corpos de provas com diferen\~a de temperatura, a fim de avaliar se este efeito interfere nos resultados dos testes de tra\~ao.
- Variar combina\~oes com ep\~oxido, trazendo novas medidas e comprimentos de sobreposi\~ao

REFERÊNCIAS

- [1] Marchezin, E.; Pardini, L. C.; Guimarães, V. A. **“Avaliação do comportamento em fadiga de juntas estruturais de ligas de Al2024T3 coladas com adesivo epóxi.”** Matéria (Rio de Janeiro), v. 17, p. 889–900, (2012).
- [2] Prudente, I.F. **“Comparação de adesivos epoxidícos tenacificados.”** Dissertação (mestrado) - Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. UFRJ/COPPE, (2014).
- [3] Bamberg, P.A.M.G.P. **“Estudo da caracterização mecânica de juntas sobrepostas simples dissimilares e similares unidas por adesivo estrutural de epóxi: Uma abordagem experimental.”** Dissertação (mestrado profissional). Centro Universitário Senai Cimatec. Salvador, (2016).
- [4] Lemos, B.C. **“Análise de propagação de trincas em modo misto de juntas coladas compósito-aço.”** Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais. Centro Federal de educação Tecnológico Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ, (2018).
- [5] Oliveira, M.M. **“Estudo sobre a otimização de parâmetros de fabrico de juntas adesivas de simples sobreposição para maximizar a resistência mecânica.”** Dissertação (mestrado). Programa de Mestrado entre o Centro Universitário UniEvangélica e o Instituto Politécnico de Bragança. Bragança, (2021).
- [6] Curiel Sosa, J. L. e Karapurath, N. **“Delamination modelling of GLARE using the extended (finite element method)”** (2012). Disponível em: (https://www.academia.edu/13311388/Delamination_modelling_of_GLARE_using_the_extended_finite_element_method_Composite_Science_Technology_72_7_788_791_2012). Acesso em: (20/01/2021), responsável : www.academia.edu
- [7] Duarte Ferreira, A.B. **“Comprimento de sobreposição”** (2010). Disponível em:https://estudomec.info/files/PF_PF2_CSobreposicao.pdf 1 Acesso em: (08/04/2022), responsável: www.estudomec.com.br
- [8] Fernandes, R. L. **“Estudo numérico da adequação de diferentes tipos de leis coesivas na previsão de resistência de juntas adesivas por Modelos**

de Dano Coesivo.” Tese de Mestrado – em curso, Instituto Superior de Engenharia do Porto. (2015)

[9] Da Silva, L.F.M “**Processo de ligação de metais juntas adesivas estruturais**” (2013). Disponível em: https://estudomec.info/files/PF_PF2_adesivos_2013.pdf. Acesso em: (10/01/2022), responsável: www.estudomec.com.br

[10] Da Silva, L. F. M., de Magalhães, A. G. e de Moura, M. F. S. F. “**Juntas adesivas estruturais.**” Editora: Publindústria edições técnicas, Porto, Abril (2017). v 1, p 25-50.

[11] Neto, J. A. B. P. “**Estudo paramétrico de juntas adesivas em material compósito.**” Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (2011).

[12] BANEJA, M.D; SILVA, L.F.M. “**Adhesively bonded joints in compositematerials: an overview.**” Journals.sagepub.com, (2016). Disponível em: (<https://journals.sagepub.com/doi/10.1243/14644207JMDA219>) Acesso em: (20/01/2021), responsável: www.journals.sagepub.com

[13] Oliveira Dantas, D.A, “**Adesivos Estruturais Industriais – Informações Básicas e Melhores Práticas.**” (2017). Disponível em:<https://www.lord.com/latam/pt/adesivos/estruturais/melhores-praticas#:~:text=Os%20adesivos%20estruturais%20s%C3%A3o%20desenvolvidos,de%20comp%C3%B3sitos%2C%20metais%20e%20pl%C3%A1sticos.> Acesso em: (10/01/2021), responsável: www.lord.com

[14] Duarte Ferreira, A.B. “**Comprimento de sobreposição v2**” (2012). Disponível em:https://estudomec.info/files/PF_PF2_CSobreposicao.pdf Acesso em: (10/05/2022), responsável: www.estudomec.com.br

[15] Couvrat, P. “**Le Collage Strutral Moderne: théorie et pratique**”, Editora:Tec&Doc -Lavoisier, Paris, (1992). v 1, p 60-92.

[16] Charles, C.A, “**Adhesives Manufactured**” (2016). Disponível em: http://www.permabondadesivos.com.br/index.php?page=shop.product_detai>ls&category_id=54&flypage=flypage.tpl&product_id=265&option=com_virtuemart&Itemid=81. Acesso em: (15/01/2022). Responsável: www.Permabondad.com

- [17] Campilho, R. D. S. G. "**Modelação da Execução de Reparações em Materiais Compósitos**". Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. (2005).
- [18] Gonçalves, J. P. M., de Moura, M. F. S. F. e de Castro, P. M. S. T. "**A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesive joints.**" *International Journal of Adhesion and Adhesives*. (2002). Disponível em: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143749602000155>). Acesso em: (13/09/2020). Responsável: www.sciencedirect.com
- [19] Karachalios, E. F., Adams, R. D. e da Silva, L. F. M. "**Strength of single lap joints with artificial defects**" *International Journal of Adhesion and Adhesives*. (2013). Disponível em: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014374961300078X>). Acesso em: (15/04/2021), responsável: www.sciencedirect.com
- [20] Quini, G. J. – "**Adesivos estruturais uretânicos aplicado a combinação de compósitos, plásticos e metais**" Tese Doutorado- Catálogo USP – SP, (2011).
- [21] Panigrahi, S. K. e Pradhan, B. (2007). "**Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites.**" *journals.sagepub.com*, (2007). Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0731684407070026> Acesso em: (15/04/2021), responsável: www.journals.sagepub.com
- [22] Fernandes, R. L. "**Estudo numérico da adequação de diferentes tipos de leis coesivas na previsão de resistência de juntas adesivas por Modelos de Dano Coesivo.**" Tese de Mestrado – em curso, Instituto Superior de Engenharia do Porto. (2015).
- [23] Campilho, R. D. S. G., Banea, M. D., Pinto, A. M. G., da Silva, L. F. M. e de Jesus, A. M. P. (2011). "**Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling.**" *International Journal of Adhesion and Adhesives*. (2011). Disponível em: (https://www.researchgate.net/publication/232383115_Strength_prediction_of_single_and_double-lap_joints_by_standard_and_Extended_finite_element_modelling). Acesso em: (12/05/2021), responsável: www.researchgate.net

[24] Quini, Josué Garcia – “**Adesivos estruturais uretânicos aplicado a combinação de compósitos, plásticos e metais.**” (2011). Disponível em: (<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-16092011-130634/pt-br.php>). Acesso em: (12/05/2022). Responsável: www.teses.usp.br

[25] Wingifield, J.R.J. “**Treatment of composite surfaces for adhesive bonding.**” (1993). Disponível em: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0143749693900369>) . Acesso em: (12/05/2021). Responsável: www.sciencedirect.com

[26] Feraren, P. e Jensen, H. M. "**Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints.**", (2020). Disponível em: (<https://pdf.sciencedirectassets.com/314029/1-s2.0-S2452321620X00102/>). Acesso em: (06/06/2020). Responsável: www.sciencedirectassets.com

[27] Hogberg, J. L. e Stigh, U. "**Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer.**" Engineering Fracture Mechanics, (2006). Disponível em: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013794406001676>). Acesso em: (06/06/2020). Responsável: www.sciencedirect.com

[28] Ji, G., Ouyang, Z., Li, G., Ibekwe, S. e Pang, S.-S. "**Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints.**" International Journal of Solids and Structures, (2010). Disponível em: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768310001769>). Acesso em: (06/06/2020). Responsável: www.sciencedirect.com

[29] Liljedahl, C. D. M., Crocombe, A. D., Wahab, M. A. e Ashcroft, I. A. "**Damage modelling of adhesively bonded joints.**" Int J Fract. link.springer.com, (2006). Disponível em: (<https://link.springer.com/article/10.1007/s10704-006-0072-9>). Acesso em: (06/06/202). Responsável: www.springer.com

[30] Neto, J. A. B. P., Campilho, R. D. S. G. e da Silva, L. F. M. "**Parametric study of adhesive joints with composites.**" International Journal of Adhesion and Adhesives.", (2012). Disponível em: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143749612000206>). Acesso em: (01/02/2021). Responsável: www.sciencedirect.com

[31] Pocius, A. V. “**Adhesion and Adhesives Technology, An Introduction.**” onlinelibrary.wiley.com, (2004). Disponível em:

(<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/pi.1458>). Acesso em: (01/02/2021).
Responsável: www.onlinelibrary.wiley.com

[32] Vable, M. e Reddy Maddi, J. "**Boundary element analysis of adhesively bonded joints.**" International Journal of Adhesion and Adhesives, (2004).
Disponível em:
(https://www.researchgate.net/publication/248333976_Boundary_element_analysis_of_adhesively_bonded_joints). Acesso em: (01/02/2021), Responsável:
www.researchgate.net

[33] Voyiadjis, G. Z. e Kattan, P. I. "**Damage Mechanics. New York, Marcell Dekker.**". Editora: Elsevier, Porto, maio (2005). V 51, p 848-855.

[34] Xu, W. e Wei, Y. "**Strength analysis of metallic bonded joints containing defects.**" Computational Materials Science. Editora: ScenceDirect, Inglaterra, Fevereiro (2012). V 53, p 100-105.

[35] FAUNER, G.; ENDLICH, W. "**Techniques de Collage**". Editora: Soproge SA, Paris, Abril (1984). V 5, p 13-54.

[36] Fucuhara, K. A. "**Aplicação De Adesivos Estruturais Em Painéis De Carros.**". (2015). Disponível em:
(<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/123058>). Acesso em: (01/02/2022).
Responsável: www.repositorio.unesp.br

[37] Gonçalves Neto, J.A "**The Definitive Guide to ASTM D1002 Lap Shear Testing of Adhesively Bonded Materials**" (2017). Disponível em:
<http://www.instron.com/pt-br/testing-solutions/by-test-type/peel-tear--friction/astm-d1002?region=Brasil> . Acesso em: (08/01/2021). Responsável:
www.instron.com

[38] Wadley, L; Hodgskiss, T; Grant, M. "**From the Cover: Implications for complex cognition from the hafting of tools with compound adhesives in the Middle Stone Age, South Africa.**" Tese mestrado- National Academy of Sciences of the United States of America (2009).

