



# UFBA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
ESCOLA POLITÉCNICA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

MESTRADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

MICHELE DAMIANA MOTA MARTINS

**Avaliação da Influência da Espessura de Adesivos Estruturais  
em Juntas Metálicas com Diferentes Preparações Superficiais**



**SALVADOR  
2024**





**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL**

**MICHELE DAMIANA MOTA MARTINS**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DE ADESIVOS ESTRUTURAIS EM JUNTAS**  
**METÁLICAS COM DIFERENTES PREPARAÇÕES SUPERFICIAIS**

**Salvador**  
**2024**



**MICHELE DAMIANA MOTA MARTINS**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DE ADESIVOS ESTRUTURAIS EM JUNTAS  
METÁLICAS COM DIFERENTES PREPARAÇÕES SUPERFICIAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Industrial.

Área de concentração: Desenvolvimento sustentável de processos e produtos

Orientadores

Prof. Dr. Marcio Luis Ferreira Nascimento

Prof. Dr. Luciano Pisanu

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Josiane Dantas Viana Barbosa

**Salvador**

**2024**



Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Damiana Mota Martins, MICHELE  
AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DE ADESIVOS  
ESTRUTURAIS EM JUNTAS METÁLICAS COM DIFERENTES  
PREPARAÇÕES SUPERFICIAIS / MICHELE Damiana Mota  
Martins. -- SALVADOR, 2024.  
83 f. : il

Orientador: MARCIO Luis Ferreira Nascimento.  
Coorientador: LUCIANO Pisanu e JOSIANE Dantas  
Viana Barbosa .

Dissertação (Mestrado - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA INDUSTRIAL) -- Universidade Federal da  
Bahia, ESCOLA POLITÉCNICA, 2024.

1. Adesivos Estruturais. 2. Juntas Metálicas. 3.  
Tratamento Mecânico. 4. Espessura de Juntas Adesivas.  
5. Modo de Falha. I. MARCIO Luis Ferreira Nascimento,  
. II. JOSIANE Dantas Viana Barbosa , LUCIANO Pisanu  
e. III. Título.



# **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DE ADESIVOS ESTRUTURAIS EM JUNTAS METÁLICAS COM DIFERENTES PREPARAÇÕES SUPERFICIAIS**

**MICHELE DAMIANA MOTA MARTINS**

Dissertação submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de mestre em Engenharia Industrial.

Examinada por:



Prof. Dr. Luciano Pisanu

Doutor em Engenharia Industrial pela Universidade Federal da Bahia, Brasil, 2018



Profa. Dra. Josiane Dantas Viana Barbosa

Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Campina Grande, Brasil, 2011



Prof. Dr. Marcio Luis Ferreira Nascimento

Doutor em Ciência e Engenharia dos Materiais pela Universidade Federal de São Carlos, Brasil, 2004



Prof. Dr. Rodrigo Santiago Coelho

Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade de Bochum, Alemanha, 2008



Prof. Dr. Vladimir Mikhaïlovich Fokin

Doutor em Ciências Químicas pelo Instituto de Química de Silicatos Ilja Vassiljewitsch Grebenshchikov da Academia de Ciências da URSS, Rússia, 1981

Salvador, BA - BRASIL  
junho/2024



*Josué 1:9 NVI: Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o SENHOR, o seu Deus, estará com você por onde você andar.*



## DEDICATÓRIA

*A minha mãeinha, Nete, por todo amor dado a mim.*



## AGRADECIMENTOS

A Deus, Cristo Senhor, autor e consumidor da minha fé. Àquele que me deu o dom da vida e a alegria de viver.

A minha família. Minha mãe Nete, irmãos Nena, Dinda e Sandrinho. Obrigada por todo carinho e torcida. Vocês sempre acreditaram em mim. Amo muito vocês.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcio Luis Ferreira Nascimento por contribuir valiosamente com a minha formação.

Aos meus orientadores Prof. Dra. Josiane Dantas Viana Barbosa e Prof. Dr. Luciano Pisanu. Pais acadêmicos que me fizeram ver além dos emaranhados de hidrocarbonetos. Meu coração é recheado de ligações  $\text{CH}_n$  graças a vocês e a Prof. Dra. Joyce Batista Azevedo.

Aos meus amigos irmãos por todo incentivo e alegria em viver essa história comigo.

Ao SENAI CIMATEC, em especial a Pollyana e Marcela pela confiança na disponibilidade dos laboratórios.

Aos meus colegas de trabalho Daniel Marques, Ana Paula Gonçalves, Ygor Tadeu, Thatiana Cristina e Marcus Vinícius pelo material cedido, auxílio, calos nas mãos e boas risadas.

A um dos melhores alunos de engenharia mecânica que conheci, Marco Aurélio, por ajudar nos ensaios com boas conversas.

A todos que torceram por mim meu sincero carinho.



MARTINS, M. D. M. **Avaliação da influência da espessura de adesivos estruturais em juntas metálicas com diferentes preparações superficiais**. 83 f. 2024. Dissertação (Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial – PEI), Universidade Federal da Bahia. 2024.

## Resumo

Os adesivos estruturais apresentam a capacidade de unir materiais por longa duração, suportar grandes esforços e oferecem vantagens frente aos métodos mais comuns de união, como soldagem e rebiteagem, proporcionando as juntas adesivas uma excelente resistência à fadiga. Esses adesivos são encontrados nas indústrias com processos de manufatura mais avançados como automobilística, aeronáutica, eletrônica, naval e construção civil. Adesivos eficientes devem molhar a superfície penetrando nas imperfeições superficiais do material promovendo assim maior adesão entre as partes para em seguida endurecer até tornar-se um único sólido coesivamente forte. Em vista disso, a metodologia utilizada neste estudo buscou avaliar juntas simples sobrepostas com diferentes espessuras de 0,1, 0,25 e 0,5 mm em amostras metálicas preparadas mecanicamente com lixa ou Bristle Blaster®, a fim de identificar o mecanismo de preparação que possibilitou melhor resistência mecânica ao cisalhamento (*lap shear*). Os resultados obtidos por *lap shear* foram comparados pelo método estatístico teste de Tukey, o modo de falha foi caracterizado com o auxílio da norma ISO/DIS 10365:2020(E) e as superfícies de fratura examinadas por microscopia eletrônica de varredura. Além disso, com o apoio da ferramenta estatística PCA - Análise de Componentes Principais, foi possível reduzir sete variáveis (formulação, preparação de amostra, tipo de adesivo, classificação, espessura, média de resistência ao cisalhamento e modo de falha) a apenas duas componentes, representando 85,65% dos dados, e separar claramente os tipos de adesivos em quadrantes bem determinados. A melhor média de resistência ao cisalhamento proveio das amostras com substrato preparado por lixas 360 e 600 e 0,25 mm de espessura de adesivo acrílico, e com substrato preparado por Bristle Blaster® e 0,1 mm de espessura de epóxi. Quanto ao modo de falha, observou-se predominância coesiva nos acrílicos, e falha mista ou adesiva nas amostras com epóxi. Em ambos os casos, esse perfil foi independente da preparação mecânica realizada. Nas micrografias das superfícies de fratura das amostras de melhor desempenho percebeu-se fratura dúctil na junta com 0,25 mm do adesivo acrílico e presença expressiva de vazios no formato esférico e fratura frágil na amostra com 0,1 mm do adesivo epóxi. Nas duas formulações, não se identificou regiões com ausência de adesivo.



MARTINS, M. D. M. **Evaluation of different adhesive thicknesses in metallic joints with different surface preparations.** 83 f. 2024. Dissertation (Master's Degree in the Postgraduate Program in Industrial Engineering – PEI), Federal University of Bahia. 2024.

## **Abstract**

Structural adhesives have the ability to bond materials for a long time, withstand great stresses and offer advantages over the most common joining methods, such as welding and riveting, providing adhesive joints with excellent fatigue resistance. These adhesives are found in industries with more advanced manufacturing processes, such as the automotive, aerospace, electronics, naval, and civil construction industries. Efficient adhesives must wet the surface, penetrating the surface imperfections of the material, thus promoting greater adhesion between the parts and then hardening until becoming a single cohesively strong solid. In view of this, the methodology used in this study sought to evaluate simple lap joints with different thicknesses of 0.1, 0.25 and 0.5 mm in metal samples mechanically prepared with sandpaper or Bristle Blaster®, in order to identify the preparation mechanism that enabled the best mechanical resistance to shear (lap shear). The results obtained by lap shear were compared by the statistical method Tukey's test, the failure mode was characterized with the aid of the ISO/DIS 10365:2020(E) standard and the fracture surfaces examined by scanning electron microscopy. In addition, with the support of the PCA - Principal Component Analysis statistical tool, it was possible to reduce seven variables (formulation, sample preparation, adhesive type, classification, thickness, average and failure mode) to only two components, representing 85.65% of the data, and clearly separate the adhesive types into well-defined quadrants. The best average shear strength came from the samples with substrate prepared by 360 and 600 sandpaper with 0.25 mm thickness of acrylic adhesive, and with substrate prepared by Bristle Blaster® with 0.1 mm thickness of epoxy. Regarding the failure mode, cohesive predominance was observed in acrylics, and mixed or adhesive failure in the samples with epoxy. In both cases, this profile was independent of the mechanical preparation performed. In the micrographs of the fracture surfaces of the best performing samples, ductile fracture was observed in the joint with 0.25 mm of acrylic adhesive and significant presence of spherical voids and brittle fracture in the sample with 0.1 mm of epoxy adhesive. In both formulations, no regions with absence of adhesive were identified.



## TRABALHOS PUBLICADOS

- **MARTINS, M. D. M.;** NASCIMENTO, M. L. F.; PISANU, L.; BARBOSA, J. D. V. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES ESPESSURAS DE ADESIVO ACRÍLICO EM JUNTAS SIMPLES SUBMETIDAS A CISALHAMENTO. In: 24°COBEQ/19°ENBEQ, 2023, Salvador. Anais do 24°COBEQ/19°ENBEQ, 2023.
- **MARTINS, M. D. M.;** SILVEIRA, M. A.; NASCIMENTO, M. L. F.; BARBOSA, J. D. V.; PISANU, L. EVALUATION OF EPOXY ADHESIVE THICKNESS IN SIMPLE OVERLAP JOINTS SUBJECTED TO LAP SHEAR. In: IX Simpósio Internacional de Inovação e Tecnologia, 2023, Salvador. Blucher Engineering Proceedings, p. 350. DOI: 10.5151/siintec2023-306146.



# SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	13
2.	OBJETIVO GERAL .....	15
2.1	Objetivos Específicos .....	15
3.	REVISÃO DA LITERATURA .....	15
3.1	Adesivos Estruturais .....	15
3.2	Ligação Adesiva.....	19
3.3	Modos de carregamentos em juntas adesivas .....	22
3.4	Tipos de juntas.....	23
3.5	Influência da espessura e do material do substrato em juntas coladas .....	25
3.6	Espessura do adesivo .....	26
3.7	Comprimento de sobreposição ( <i>Overlap</i> ) .....	28
3.8	Teoria da adesão .....	31
3.9	Teoria Mecânica .....	31
3.10	Teoria eletrostática .....	32
3.11	Teoria da difusão .....	33
3.12	Molhabilidade .....	33
3.13	Ligação química .....	35
3.14	Teoria ácido-base .....	36
3.15	Camada limite fraca ( <i>weak boundary layer</i> ).....	36
3.16	Tipos de adesivos estruturais .....	37
3.16.1	Epóxi .....	38
3.16.2	Acrílicos .....	40
3.17	Preparação mecânica e química de substratos metálicos .....	41
3.18	Aplicação dos adesivos estruturais .....	42
3.19	Análise de Componentes Principais (PCA) .....	44
4.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	46
4.1	Adesivos estruturais bicomponentes .....	46



4.2	Substrato metálico .....	46
4.3	Preparação dos corpos de prova .....	47
4.3.1	Preparação mecânica e química .....	47
4.3.2	Preparação química e mecânica com lixa .....	47
4.3.3	Preparação química e mecânica com Blister Blaster® .....	48
4.3.4	Aplicação da camada adesiva nos corpos de prova .....	48
4.4	Formulações desenvolvidas .....	50
4.5	Caracterização das amostras .....	52
4.5.1	Resistência ao cisalhamento ( <i>Lap shear</i> ) .....	52
4.5.2	Teste de Tukey .....	53
4.5.3	Modo de falha .....	53
4.5.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	53
4.5.5	Análise de Componentes Principais (PCA) .....	54
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	55
5.1	Resistência ao cisalhamento ( <i>Lap shear</i> ) .....	55
5.2	Modo de falha .....	60
5.3	Análise de Componentes Principais (PCA) .....	66
5.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	68
6.	CONCLUSÕES .....	71
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	72
	REFERÊNCIAS .....	73
	APÊNDICE 1 – ANÁLISE QUÍMICA DO SUBSTRATO METÁLICO ESTUDADO .....	78
	APÊNDICE 2 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA RUGOSIDADE DOS SUBSTRATOS APÓS PREPARAÇÃO MECÂNICA COM BRISTLE BLASTER® .....	79
	APÊNDICE 3 – OVERLAP DAS FORMULAÇÕES ESTUDADAS .....	81
	APÊNDICE 4 – 24°C OBEQ/19°ENBEQ, 2023. ....	82
	APÊNDICE 5 – IX INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INNOVATION AND TECHNOLOGY. ....	83
	ANEXO 1 - PROPRIEDADES DO ADESIVO LORD® 852/25GB E FUSOR® 380NS/383NS. ....	84



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comparação das distribuições de tensões obtidas ao longo de juntas soldadas, rebitadas e juntas adesivas em plano tipo perfil e horizontal, respectivamente.....	13
Figura 2: Distribuição de tensão em uma junta rebitada (acima) e em uma junta colada (abaixo), conforme planos tipo perfil e horizontal, respectivamente.....	16
Figura 3: Avião Mosquito. ....	17
Figura 4: Processo de mistura em um misturador estático para adesivos bicomponentes. ..	19
Figura 5: Conceitos de adesão e coesão numa junta adesiva. ....	20
Figura 6: Representação esquemática das regiões típicas de uma junta adesiva com ênfase na camada limite.....	20
Figura 7: Modos de carregamentos e distribuição de tensões. ....	22
Figura 8: Adesivos flexíveis e tenazes permitem uma tensão mais distribuída.....	23
Figura 9: Representação esquemática do momento fletor. ....	25
Figura 10: Deformação plástica dos substratos. ....	26
Figura 11: Resistência ao cisalhamento versus espessura do adesivo (aço de alta resistência HC680 + ZE75/75 1,0 mm de espessura).....	27
Figura 12: Microesferas de vidro para obtenção de uma espessura adesiva uniforme em uma SLJ. ....	28
Figura 13: Juntas de sobreposição simples.....	28
Figura 14: Efeito do comprimento de sobreposição na carga de ruptura usando adesivos dúcteis e frágeis. ....	29
Figura 15: Força de tração na junta sobreposta; (a) junta sem carga; (b) junta sob tensão e (c) distribuição de tensão no adesivo. ....	29
Figura 16: Correlação entre resistência ao cisalhamento e relação $lt$ .....	30
Figura 17: Teoria da adesão mecânica, exemplificada pela ancoragem mecânica (direita)...	32
Figura 18: Teoria da adesão eletrostática, sendo $\delta^+$ e $\delta^-$ cargas positivas e negativas, respectivamente. ....	33
Figura 19: Tensões superficiais que atuam em uma gota líquida sobre uma superfície sólida. ....	34
Figura 20: Variação do ângulo de contato. ....	34



Figura 21: Molhabilidade (a) boa e (b) ruim na superfície do substrato. Na opção (b), o aprisionamento de ar, formando bolhas, dificulta a ancoragem do adesivo.....	35
Figura 22: Distribuição da tensão de corte no adesivo em uma junta de sobreposição simples. .....	37
Figura 23: Pontos de iniciação de fissuras em superfícies muito irregulares.....	37
Figura 24: Aplicações de adesivos estruturais no Audi e-tron com chapéu alto de alumínio representado nos destaques em vermelho. ....	43
Figura 25: Exemplo de aplicação de adesivos estruturais na área náutica. ....	43
Figura 26: Tiras de PTFE fixadas nos corpos de prova. ....	49
Figura 27: Preparação dos corpos de prova, indicando a fixação de tiras PTFE, seguido da aplicação por injeção de adesivo entre as amostras e o uso de um fixador. ....	49
Figura 28: Resumo da metodologia desenvolvida neste estudo. ....	54
Figura 29: Degradação do adesivo, indicado pelas setas vermelhas, devido ao perfil de empenamento após preparação com Bristle Blaster® nas juntas com adesivo acrílico.....	57
Figura 30: Biplot da aplicação da técnica de componentes principais (PCA) aos dois tipos de adesivos: acrílico (quadrados verdes, ■, no segundo e terceiro quadrantes) e epóxi (círculos vermelhos, ●, no primeiro e quarto quadrantes). ....	66
Figura 31: Microscopia eletrônica de varredura da F13 em 100 e 200 vezes. ....	68
Figura 32: Microscopia eletrônica de varredura da F17 em 100 e 200 vezes. ....	69



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Padrões de falha em uma junta adesiva. ....	21
Tabela 2: Tipos de junta e suas vantagens e desvantagens. ....	23
Tabela 3: Teorias de adesão.....	31
Tabela 4: Vantagens e desvantagens dos adesivos epóxi. ....	40
Tabela 5: Vantagens e desvantagens dos adesivos acrílicos reativos. ....	41
Tabela 6: Principais elementos identificados na análise química do aço em estudo. ....	47
Tabela 7: Experimento fatorial completo 22 com triplicata no ponto central desenvolvido para esse estudo envolvendo diferentes espessuras (três ao todo), tipo de preparação mecânica (A: Bristle Blaster; ou B: lixas) e tipo de adesivo (epóxi ou acrílico), compondo um bloco (blc) de experimento.....	51
Tabela 8: Formulações desenvolvidas neste trabalho e discutidas no próximo capítulo, envolvendo diferentes espessuras (três ao todo), tipo de preparação mecânica (Bristle Blaster® ou lixas) e tipo de adesivo (epóxi ou acrílico).....	51
Tabela 9: Valores de média (MPa) da resistência ao cisalhamento das juntas simples com adesivo acrílico nas preparações mecânicas Bristle Blaster® e lixa após análise por teste de Tukey. ....	56
Tabela 10: Valores de média (MPa) da resistência ao cisalhamento das juntas simples com adesivo epóxi nas preparações mecânicas Bristle Blaster® e lixa após análise por teste de Tukey. ....	58
Tabela 11: Valores de média (MPa) da resistência ao cisalhamento das juntas simples com adesivo acrílico e epóxi na preparação mecânica Bristle Blaster® após análise por teste de Tukey. ....	59
Tabela 12: Valores de média (MPa) da resistência ao cisalhamento das juntas simples com adesivo acrílico e epóxi na preparação mecânica lixa após análise por teste de Tukey.....	59
Tabela 13: Modo de falha observado nas formulações desenvolvidas. ....	61



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FS	Falha do substrato
FCS	Falha coesiva do substrato
FD	Falha de delaminação
FC	Falha coesiva
FCE	Falha coesiva especial
FBAE	Falha com branqueamento do adesivo sob estresse
FA	Falha adesiva
FACP	Falha adesiva e coesiva com <i>peel</i>
COR	Corrosão na interface
SLJ	<i>Single lap joint</i>
Tg	Transição vítrea
HCl	Ácido clorídrico
PTFE	Politetrafluoretileno
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
FE	Ferro
DP	Desvio Padrão
PCA	<i>Principal Component Analysis</i>
PC	<i>Principal Component</i>
BIW	<i>Body in white</i>

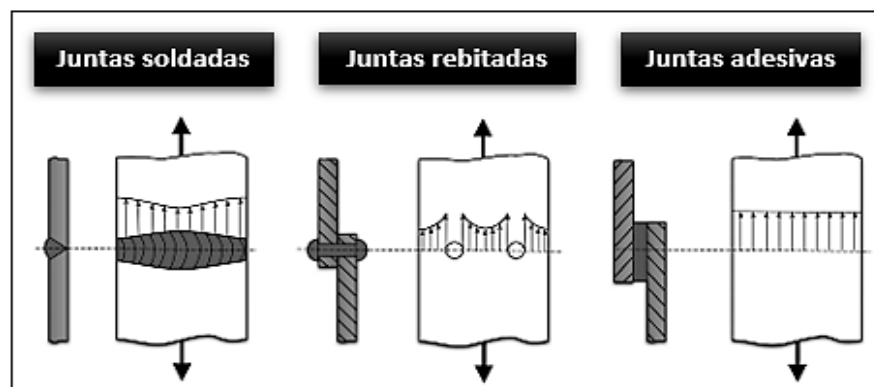


## 1. INTRODUÇÃO

Os adesivos são substâncias capazes de unir dois materiais por períodos prolongados mesmo que estejam expostos a elevados esforços. Estes podem ser projetados para ter diferentes resistências, desde adesivos temporários fracos para manter papéis fixados até sistemas estruturais de alta resistência que unem carros e aviões (DUNN, 2003). As juntas adesivas oferecem inúmeras vantagens quando comparadas com métodos tradicionais de união como parafusos, soldaduras, rebites e outros (SILVA *et al.*, 2007).

Quando aplicados corretamente, apresentam a capacidade de proporcionar uma distribuição mais uniforme de tensões, com redução das concentrações de tensão, já que a ligação obtida é praticamente contínua, conferindo às juntas adesivas uma excelente resistência à fadiga (MARQUES *et al.*, 2021), conforme ilustrado na Figura 1. Certos adesivos, que apresentam a função de unir materiais com elevado grau de resistência mecânica, demonstram a capacidade de garantir por longos períodos a sobrevivência das juntas estruturais em condições normais de utilização e expostas a elevados graus de esforços (SILVA *et al.*, 2018).

Figura 1: Comparação das distribuições de tensões obtidas ao longo de juntas soldadas, rebitadas e juntas adesivas em plano tipo perfil e horizontal, respectivamente.



Fonte: (Adaptado de Marques *et al.*, 2021).

Além da distribuição mais uniforme de tensões, as juntas adesivas apresentam outras vantagens, como amortecimento de vibrações, devido à absorção parcial de tensões, formação de estruturas com contornos regulares e união facilitada de materiais dissimilares. Todavia, podem apresentar desempenho limitado em condições que envolvam calor e umidade, dada a natureza polimérica do adesivo (SILVA *et al.*, 2007).



Os adesivos, quanto à sua função, podem ser estruturais ou não estruturais. As ligações adesivas estruturais precisam transmitir tensões sem perda de integridade dentro dos limites projetados, e precisam ser duráveis ao longo da vida útil dos materiais que unem, devendo essa vida útil ser maximizada. Assim, a colagem adesiva estrutural se refere a aplicações nas quais os aderentes podem sofrer grandes tensões até seu ponto de escoamento. Já os adesivos não estruturais apresentam a capacidade de manter materiais leves fixos, sem a necessidade de suportar cargas substanciais (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015). Dentre os principais adesivos estruturais existem os epóxis, fenólicos, poliuretanos, cianoacrilatos, acrílicos modificados e poliésteres.

Quando dispostos nas superfícies a serem unidas, os adesivos devem exercer duas ações fundamentais: molhar as superfícies, promovendo um ângulo de contato próximo a zero e, posteriormente, endurecer para formar um sólido coesivamente forte. A molhabilidade é o resultado de forças atrativas entre o adesivo e o substrato. Com boa molhabilidade, o adesivo adentra nos vales e aumenta a superfície de adesão, visto que, em uma colagem perfeita, tem-se a ausência de espaços vazios ou aprisionamento de ar ou sujeira (COGNARD, 2006).

Silva *et al.* (2007) descrevem que o desempenho de uma junta adesiva está relacionado à soma de um conjunto de forças que sobrepõem e se influenciam. As inúmeras capacidades físicas, reológicas, mecânicas e químicas exigidas aos adesivos e juntas coladas podem ser sintetizadas a duas características essenciais: adesão e coesão (SILVA et al., 2018). A adesão ocorre entre os diferentes materiais que compõem a superfície do substrato e o adesivo (COGNARD, 2006; PETRIE, 2000). Já a coesão é definida como a força de ligação entre átomos ou moléculas dentro do adesivo (COGNARD, 2006; PETRIE, 2000).

Extrapolando esses conceitos, os estudos mostram que a resistência da junta deriva da configuração, modo e taxa de carregamento, condições ambientais, acabamento superficial do substrato e espessura do adesivo (SEONG, 2008 e SILVA, 2007 *apud* ALMEIDA *et al.*, 2019). No que tange a espessura, Silva *et al.* (2007) relatam que a espessura ótima para o adesivo está entre 0,1 e 0,5 mm. Gleich *et al.* (2001) *apud* Silva *et al.* (2007) informaram que a maioria dos fabricantes recomendam espessuras de 0,1 a 0,2 mm para obtenção da resistência máxima. Já o acabamento superficial do substrato é crítico por estar diretamente relacionado à presença de descontinuidade na junta adesiva, como bolhas, vazios e impurezas (ALMEIDA *et al.*, 2019). Müller *et al.* (2018) demonstraram que a inclusão de ar pode reduzir significativamente a adesão entre o adesivo e o substrato ou diminuir a coesão dentro do adesivo.



Sendo assim, esse trabalho se propõe a investigar a influência da espessura do adesivo e da preparação superficial do substrato à resistência ao cisalhamento de juntas metálicas de aço laminado à frio unidas por adesivos estruturais bicomponentes de bases químicas epóxi e acrílico.

## 2. OBJETIVO GERAL

Esse trabalho visa desenvolver um estudo comparativo, por meio de experimentos elaborados em escala laboratorial, em juntas simples sobrepostas unidas através de adesivos estruturais bicomponentes. Sendo assim, foram confrontados dois tipos de preparação mecânica do substrato, dois adesivos de bases químicas acrílico e epóxi e três espessuras de cada adesivo.

### 2.1 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência de três espessuras de um adesivo acrílico e um epóxi em substrato de aço laminado à frio com 1,2 mm de espessura.
- Analisar a resistência mecânica sob cisalhamento (*lap shear test*) em juntas de sobreposição simples.
- Analisar a influência das diferentes preparações mecânicas na resistência máxima das juntas simples sobrepostas sob *lap shear test*.

## 3. REVISÃO DA LITERATURA

Para melhor compreensão do conteúdo apresentado nesta dissertação, faz-se necessária uma abordagem teórica sobre os conceitos relacionados a adesivos estruturais e juntas simples sobrepostas.

### 3.1 Adesivos Estruturais

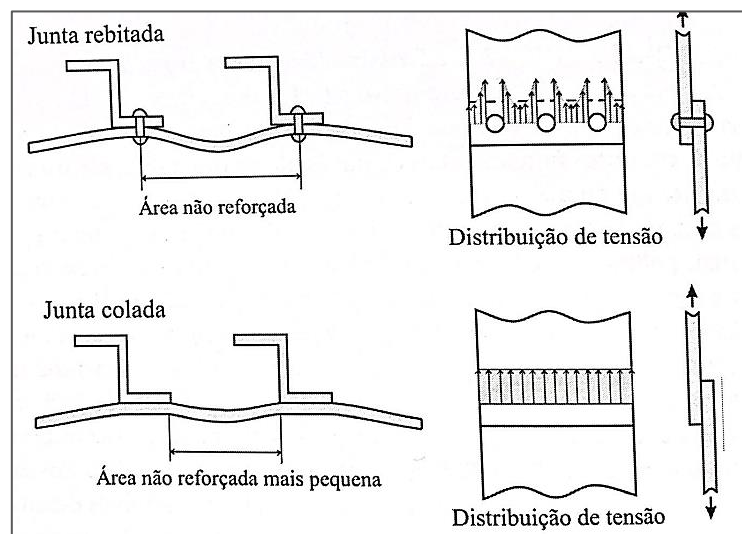
As ligações adesivas mostram diversas vantagens ao ser comparadas com os métodos tradicionais de ligação como parafusos, soldadura, brasagem e rebites (SILVA *et al.*, 2007).



Segundo Silva *et al.* (2007) os adesivos têm sido utilizados há muitos séculos, porém este método de ligação só se desenvolveu significativamente nos últimos 60 anos, devido ao surgimento dos polímeros sintéticos em meados dos anos 40. Estes polímeros apresentam propriedades que lhes permitem aderir com facilidade à maioria dos materiais e uma resistência capaz de transmitir grandes esforços. Aplicações estruturais estão relacionados com alta resistência ou desempenho. Pressupõe-se que as juntas adesivas estruturais permitam uma vida útil equivalente à do produto da junta adesiva (PETRIE, 2000). Aplicações não estruturais requerem apenas baixa resistência ou fixação temporária (PETRIE, 2000).

Conforme já mencionado, as ligações adesivas estruturais apresentam uma distribuição mais uniforme das tensões ao longo da área ligada, promovendo uma maior rigidez e transmissão de carga, permitindo uma redução de peso (SILVA *et al.*, 2007). Na Figura 2 é possível avaliar o perfil de distribuição de tensão numa junta rebitada e em uma junta colada, sendo visível a distribuição de tensão mais uniforme na junta colada.

Figura 2: Distribuição de tensão em uma junta rebitada (acima) e em uma junta colada (abaixo), conforme planos tipo perfil e horizontal, respectivamente.



Fonte: (SILVA *et al.*, 2007).

Outra vantagem ou destaque das ligações adesivas estruturais é a capacidade de amortecer vibrações, melhorando a resistência à fadiga dos componentes ligados, a possibilidade de ligar materiais dissimilares com variados coeficientes de expansão, já que a flexibilidade do adesivo compensa a divergência, e um contato contínuo entre as superfícies ligadas (SILVA *et al.*, 2007). Todavia, a ligação com adesivos necessita de um projeto que retire as forças de arrancamento, clivagem e impacto, pois, quando um dos materiais não são rígidos,



a ligação pode estar sujeita a força de arrancamento e quando ambos os materiais são rígidos, têm-se forças de clivagem (SILVA *et al.*, 2007).

Outro fator importante é a geometria da junta. Para garantir uma distribuição uniforme de tensões é fundamental geometrias que evitem tensões localizadas, já que tensões não perpendiculares ao adesivo podem promover o surgimento de forças de arrancamento ou de clivagem (SILVA *et al.*, 2007). O comportamento mecânico da junta não depende unicamente do adesivo, mas também de outros fatores, como o desenho da junta, tipo de substrato empregado e do método de aplicação (QUINI, 2011). O processo de ligação passa pelas etapas de seleção do adesivo, projeto da junta, preparação da superfície, fabricação da junta e controle do processo (SILVA *et al.*, 2007).

Os adesivos estruturais podem ser encontrados nas indústrias que apresentam as tecnologias mais avançadas como automobilística, aeronáutica, eletrônica, naval e construção civil. Campos emergentes como a biologia e a medicina também estão utilizando processos de desenvolvimento baseados na adesão celular e na adesão de proteínas na biocompatibilidade de materiais para próteses, órgãos artificiais e colas cirúrgicas (SILVA *et al.*, 2018).

A chegada dos adesivos sintéticos poliméricos nos anos 1940 veio como uma solução para o problema da fraca durabilidade dos adesivos proveniente de produtos naturais (SILVA *et al.*, 2007; NETO, 2011). O caça britânico *Mosquito* (Figura 3) da Segunda Guerra Mundial utilizava uma resina ureia-formaleído para colar a sua estrutura de madeira, resina esta frágil e que fraturava com facilidade (SILVA *et al.*, 2007; NETO, 2011), embora este fosse o mais rápido bombardeiro da Segunda Guerra, com velocidade máxima de 703 km/h e atingindo alturas de 8.900 m. Tal performance se dava em parte pelo peso reduzido da aeronave, que também tinha poucos rebites e uma fuselagem mais lisa.

Figura 3: Avião Mosquito.



Fonte: (FANTON, 2012).



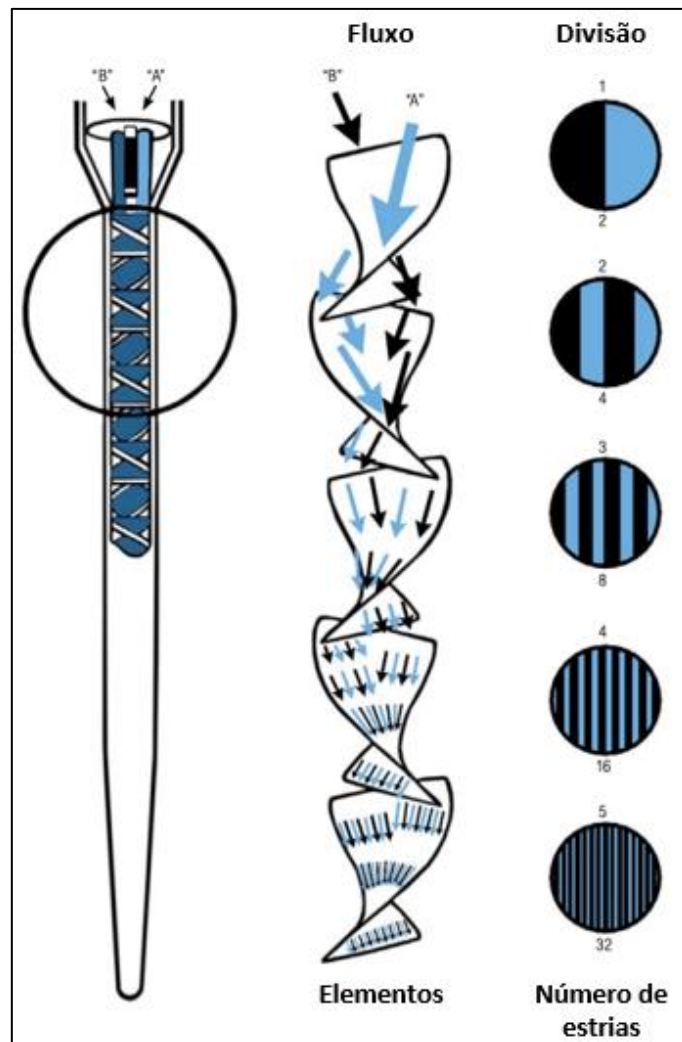
O problema da fragilidade dos primeiros adesivos utilizados também foi superado pelo Bruyne e a seus colegas nos anos 40, que modificaram a química dos adesivos adicionando polímeros com boa tenacidade (SILVA *et al.*, 2007). Este avanço representou um desenvolvimento significativo na tecnologia dos adesivos, possibilitando a ligação de materiais metálicos em madeira com muito sucesso (SILVA *et al.*, 2007). A indústria aeronáutica permitiu um crescimento expressivo às ligações adesivas e hoje sua aplicação se estende a outras áreas da indústria.

O método de aplicação do adesivo estrutural deve permitir uma deposição constante e uniforme. Essa aplicação pode ser manual ou automatizada. Os adesivos estruturais bicomponentes vendidos em formato de cartuchos podem ser extrudados e depois misturados em um bico misturador conectado a saída do cartucho. Os bicos misturadores apresentam entre 10 e 15 mm de diâmetro e, a depender da viscosidade, tixotropia e tempo de reação do adesivo, estes bicos contém entre 10 e 50 elementos de mistura que proporcionam uma combinação homogênea dos dois componentes do adesivo (QUINI, 2011).

A Figura 4 demonstra o processo de mistura em um bico misturador. Esse tipo de misturador foi utilizado neste estudo para o adesivo acrílico. Trata-se de um dos mais comuns para sistemas com resinas reativas e são compostos por vários elementos helicoidais alternados à direita e à esquerda, orientados a 90° entre si (GRACO INC., 2011). Nesses misturadores não há partes móveis e estão disponíveis em diferentes tamanhos. A operação ocorre com o fluxo principal dos componentes “A” e “B” separados em fluxos menores (GRACO INC., 2011). Estes são divididos, reorientados, reunidos novamente e então, o ciclo é repetido continuamente até que os componentes estejam completamente misturados (GRACO INC., 2011).



Figura 4: Processo de mistura em um misturador estático para adesivos bicomponentes.



Fonte: (Adaptado de GRACO INC. 2011).

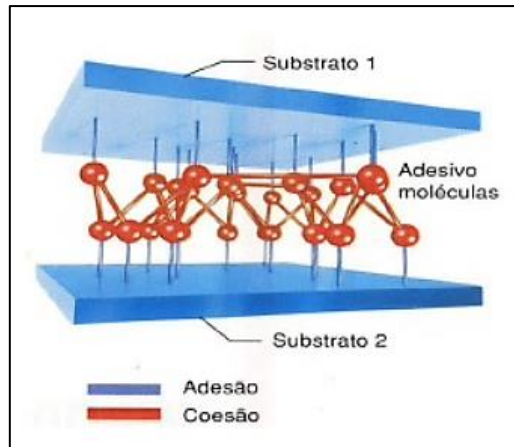
### 3.2 Ligação Adesiva

Em uma junta adesiva é indispensável a compreensão de dois conceitos: adesão e coesão. Eles estão diretamente relacionados às ligações adesivas. A adesão está associada a atração entre dois elementos que provém das forças intermoleculares estabelecidas entre elas (SILVA, 2018), ou seja, refere-se ao processo de atração entre espécies moleculares diferentes. A coesão se refere às forças intermoleculares que existem dentro de uma substância (SILVA, 2018), tratando-se, portanto, da atração existente entre moléculas semelhantes, proveniente de ligações químicas entre os componentes individuais do adesivo. As forças de adesão e coesão estão relacionadas à resistência mecânica das juntas adesivas. A Figura 5 mostra com



clareza a distinção entre esses dois conceitos. Substrato é o material a ser ligado e, após a ligação, ele passa a ser denominado frequentemente de aderente (SILVA *et al.*, 2007).

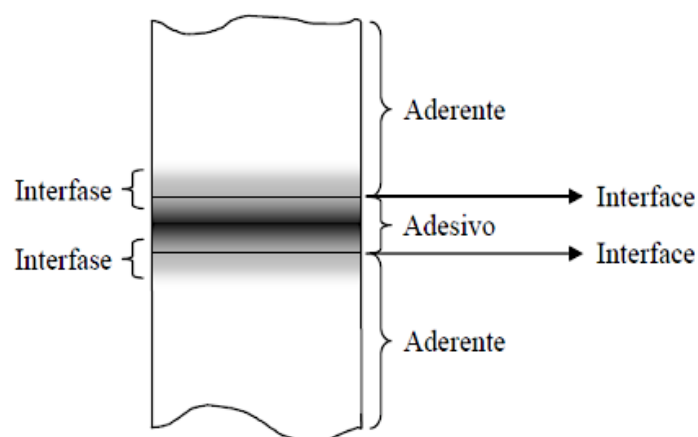
Figura 5: Conceitos de adesão e coesão numa junta adesiva.



Fonte: (SILVA, 2018).

Existem duas regiões distintas em uma ligação adesiva, são elas a interfase e a interface. A interfase é uma região fina na zona de contato adesivo-aderente (SILVA *et al.*, 2007). A interface, conhecida também como camada limite, é o plano de contato de duas superfícies de materiais diferentes, estando está contida na interfase (SILVA, 2018; SILVA *et al.*, 2007). Na Figura 6 é possível observar uma representação esquemática desses dois conceitos.

Figura 6: Representação esquemática das regiões típicas de uma junta adesiva com ênfase na camada limite.



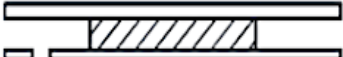

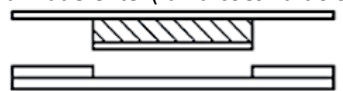

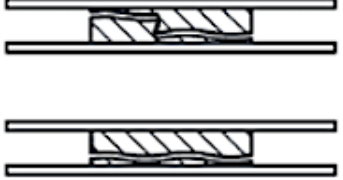

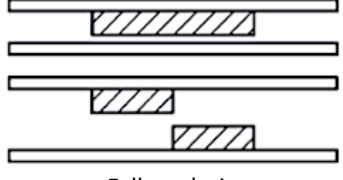
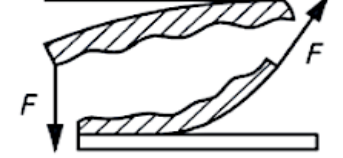

Fonte: (SILVA, 2018).

A principal característica para se atingir uma resistência de junta elevada e robusta esta na resistência de adesão (resistência interfacial entre o adesivo e o aderente) que deve ser



superior à resistência coesiva (resistência no interior do adesivo) (SIKA®, 2023). Isto é verificado em tipos de amostras simples, geralmente por cisalhamento. A classificação das superfícies de fratura é regulamentada nas normas DIN EN ISO 10365 e DVS 3302 (SIKA®, 2023). Os perfis de fratura descritos na norma ISO/DIS 10365:2020(E) estão demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1: Padrões de falha em uma junta adesiva.

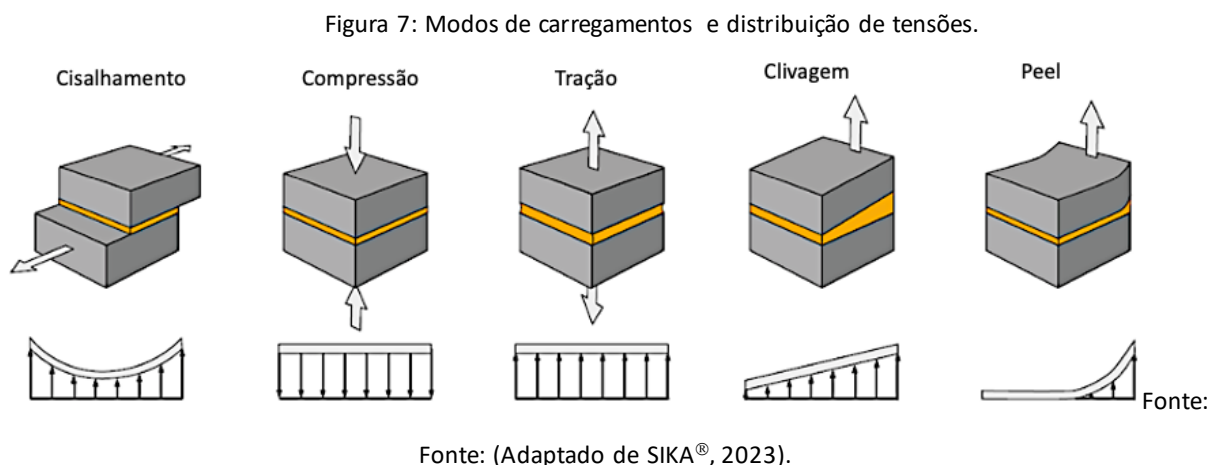
	<b>Padrões de falha</b>	<b>Sigla</b>
Aderente	 Falha de um ou ambos os aderentes (falha do substrato)	FS
	 Falha de um aderente (falha coesiva do substrato)	FCS
	 Falha por laminação (falha de delaminação)	FD
Adesivo	 Falha coesiva	FC
	 Falha coesiva especial	FCE
	 Falha com branqueamento do adesivo sob estresse	FBAE
	 Falha adesiva	FA
	 Falha adesiva e coesiva com <i>peel</i>	FACP
	 Descolamento devido à corrosão da linha de ligação	COR
Corrosão na interface		

Fonte: (Adaptado de ISO/DIS 10365:2020(E)).



### 3.3 Modos de carregamentos em juntas adesivas

Em uma junta adesivada é possível a ocorrência de tensões de cisalhamento, compressão, tração, clivagem e arrancamento (*peel*). A Figura 7 demonstra os modos de carregamentos citados e a distribuição de tensões resultantes.



A primeira explicação moderna do conceito de cisalhamento se deve ao matemático francês Antoine Parent (1666 - 1716) em 1713. As tensões de cisalhamento ocorrem quando forças atuando no plano do adesivo tendem a separar os substratos (SILVA *et al.*, 2007). A junta de sobreposição simples ou SLJ do termo em inglês *Single Lap Joint* representa o tipo de junta mais comum. Grande parte da tensão está localizada nos extremos da sobreposição, a região central da sobreposição da junta contribui pouco para a sustentação da carga (SILVA *et al.*, 2007).

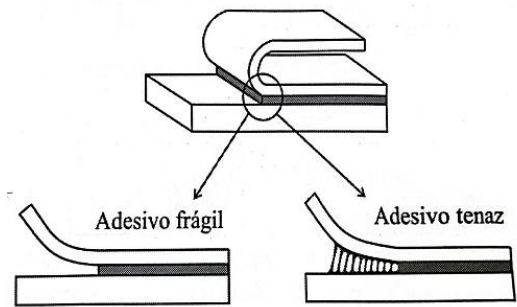
As tensões de tração surgem devido a forças perpendiculares ao plano da junta e apresentam distribuição uniforme sobre toda a área colada (ALMEIDA, 2012; SILVA *et al.*, 2007). O projeto da junta deve garantir um carregamento axial, pois quando não há a uniformidade no carregamento, surgem tensões indesejadas de arrancamento e clivagem (ALMEIDA, 2012; SILVA *et al.*, 2007). Similar as forças de tração, as forças de compressão devem-se manter uniformes, permitindo que o adesivo permaneça em compressão pura, sendo que, em uma junta adesiva submetida a compressão, a ruptura só ocorrerá se a distribuição de tensões não for uniforme (SILVA *et al.*, 2007).

As tensões de clivagem e de arrancamento (*peel*) devem ser evitadas ou minimizadas sempre que possível, pois estas oferecem menor resistência a junta adesivada quanto comparadas às juntas submetidas as tensões de cisalhamento (ALMEIDA, 2012; SILVA *et al.*,



2007). Isto ocorre devido as tensões estarem concentradas em uma área muito menor em relação a área colada (ALMEIDA, 2012; SILVA *et al.*, 2007). A tensão de clivagem ocorre quando forças na extremidade de uma junta rígida atuam de forma a separar os substratos; toda tensão fica concentrada na extremidade da junta (Figura 7), e o adesivo existente na outra extremidade pouco contribui para a resistência da junta (SILVA *et al.*, 2007). Semelhante a clivagem, têm-se o arrancamento, porém, para este caso, um ou ambos os substratos são flexíveis (SILVA *et al.*, 2007). Adesivos frágeis e rígidos são particularmente sensíveis às forças de arrancamento, já os mais dúcteis e flexíveis possibilitam menor concentração de tensões e uma maior resistência (Figura 8) (SILVA *et al.*, 2007). A distribuição de tensão em cisalhamento, clivagem ou *peel* dependem da rigidez do adesivo e dos substratos (SILVA *et al.*, 2007).

Figura 8: Adesivos flexíveis e tenazes permitem uma tensão mais distribuída.



Fonte: (SILVA *et al.*, 2007).






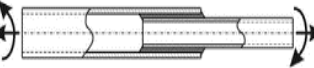

### 3.4 Tipos de juntas

As configurações mais comuns de juntas adesivas, bem como suas vantagens e desvantagens estão expostas na Tabela 2.

Tabela 2: Tipos de junta e suas vantagens e desvantagens.

Tipos de juntas	Vantagens	Desvantagens
<p>Topo a topo</p>	<p>Simples de fabricar</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Concentração de tensões de arrancamento (<i>peel</i>) e ruptura nas extremidades;</li> <li>Não permite esforços de flexão (clivagem).</li> </ul>
<p>Chanfro interior</p>	<p>Diminui os gradientes de esforço ao longo do adesivo.</p>	
<p>Chanfro exterior</p>	<p>Diminui os efeitos de arrancamento (<i>peel</i>) nas extremidades.</p>	



 <p>Degrau</p>	<p>Diminui os efeitos de arrancamento (<i>peel</i>)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo de fabricação mais elevado e caro;</li> <li>• Em materiais compósitos, o equipamento pode danificar as fibras.</li> </ul>
 <p>Sobreposição simples</p>	<p>Simples de fabricar</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicação de carga não centrada provoca efeitos de flexão;</li> <li>• Flexão origina tensões de arrancamento (<i>peel</i>), ou seja, menor resistência da junta.</li> </ul>
 <p>Sobreposição dupla</p>	<p>Reduz os efeitos de flexão;</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produção com maior tempo quando comparado as juntas de sobreposição simples.</li> </ul>
 <p>Cobre junta</p>	<p>Resistência superior às juntas de sobreposição simples</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sujeita a esforços de arrancamento (<i>peel</i>).</li> </ul>
 <p>Cobre junta dupla</p>	<p>Reduz o aparecimento de esforços de flexão</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo de fabricação mais elevado.</li> </ul>
 <p>Tubular</p>	<p>Muito útil na ligação de tubos</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para a união das partes aderentes, pelo menos uma delas deve ser chanfrada num ângulo de 15-30° e os aderentes devem ser unidos sob movimentos circulares lentos;</li> <li>• Algumas das soluções para assegurar que o adesivo preenche toda a cavidade, passam pela utilização de orifícios para a injeção do adesivo e a abertura de canais para facilitar a saída do ar.</li> </ul>
 <p>De ressalto</p>	<p>Garante o alinhamento de forças.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldade em fabricar o ressalto;</li> <li>• Substratos frágeis ou de alta resistência aumentam a dificuldade de produção.</li> </ul>

Fonte: (SILVA, 2018).

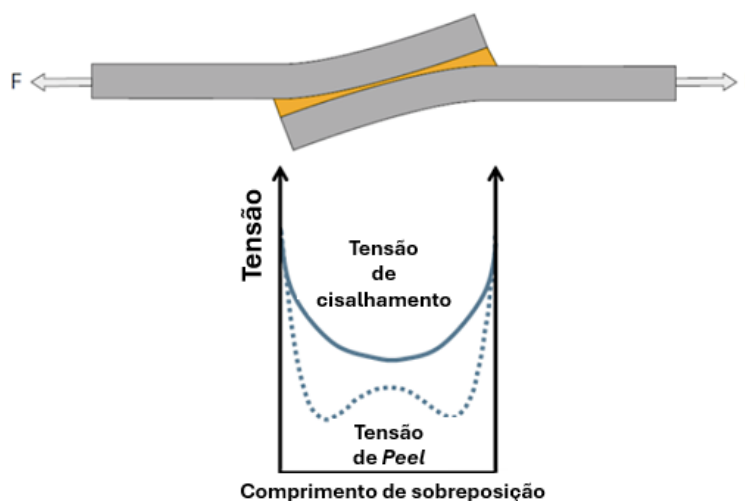
Perante a complexidade existente a um sistema não linear, multimaterial, com tamanho finito e sujeito a um carregamento de fronteira descontínuo, uma solução analítica precisa é algo muito difícil, porém métodos numéricos, como o de elementos finitos consistem em um dos mais utilizados para análises de juntas adesivas, e, apesar de poder modelar qualquer tipo de problema, é difícil de ser implementado (SILVA *et al.*, 2007).



### 3.5 Influência da espessura e do material do substrato em juntas coladas

Devido a geometria das juntas de sobreposição simples (SLJ) têm-se a ocorrência de um momento fletor que dependerá da espessura tanto do adesivo quanto do substrato. A relação é proporcional, quando essas espessuras são aumentadas, o momento fletor também aumenta, resultando em uma redução da resistência da junta conforme ilustrado na Figura 9 (CARBAS, 2008). Todavia, para substratos de aço macio (aços de baixa resistência mecânica), o aumento da espessura promove maior resistência e menor risco à deformação plástica (CARBAS, 2008).

Figura 9: Representação esquemática do momento fletor.

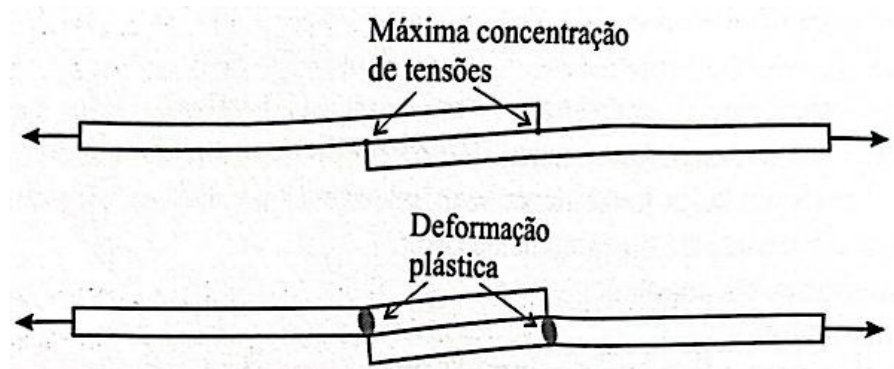


Fonte: (Adaptado de SIKA®, 2023).

Em aços de baixa resistência mecânica (aço macio) a resistência da junta adesivada independe do adesivo; todavia, para aços de alta resistência mecânica (aço duro) a resistência da junta aumenta com adesivos mais resistentes e mais dúcteis (CARBAS, 2008). No aço macio, a deformação plástica do substrato promoverá uma fratura prematura do adesivo que apresenta deformação limitada quando comparado ao do aço (Figura 10) (CARBAS, 2008). Porém, um aço duro não deforma plasticamente, permitindo que o adesivo trabalhe ao longo de todo o comprimento de sobreposição, principalmente se este for dúctil, sendo a fratura controlada pelo adesivo (CARBAS, 2008).



Figura 10: Deformação plástica dos substratos.



Fonte: (SILVA et al., 2007).

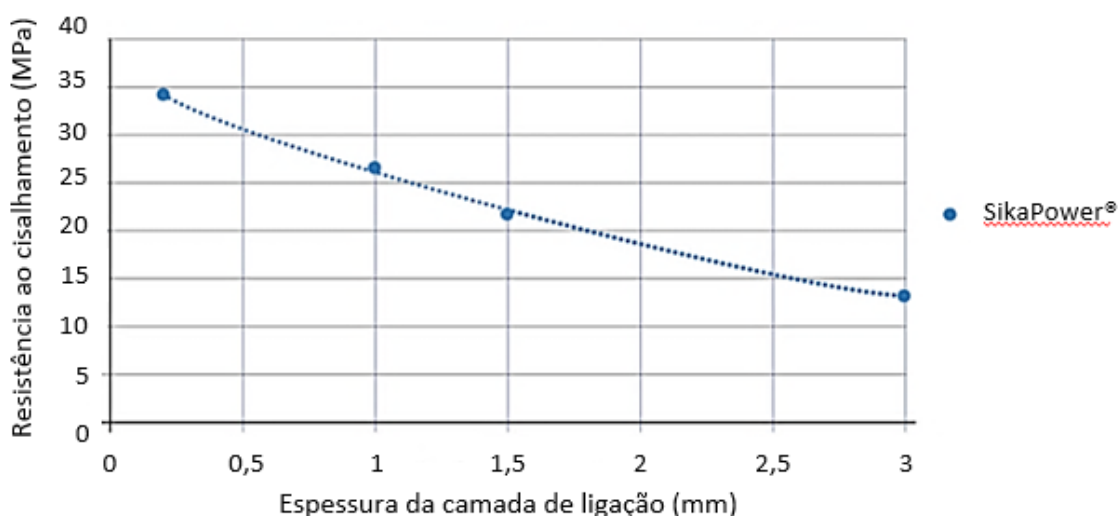
### 3.6 Espessura do adesivo

Dentre as características para que uma junta adesiva apresente o melhor desempenho, a espessura da camada adesiva é um fator importante. Silva *et al.* (2018) relatam que foi demonstrado de forma experimental por muitos autores que a resistência da junta reduz com o aumento da espessura. Além disso, Silva *et al.* (2018) também relataram que a taxa de deformação a um deslocamento constante é afetada pela espessura do adesivo. Reporta-se que a resistência ideal da junta é obtida com espessuras entre 0,1 e 0,2 mm (SILVA *et al.*, 2018). Silva *et al.* (2007) descrevera que a espessura ideal irá depender do adesivo, mas está entre 0,15 e 0,25 mm.

Conforme já descrito no tópico anterior, quanto maior espessura do adesivo, têm-se um aumento do momento fletor, promovendo picos de tensão mais elevados, resultando em uma menor força de transferência, conforme mostra a Figura 11.



Figura 11: Resistência ao cisalhamento versus espessura do adesivo (aço de alta resistência HC680 + ZE75/75 1,0 mm de espessura).



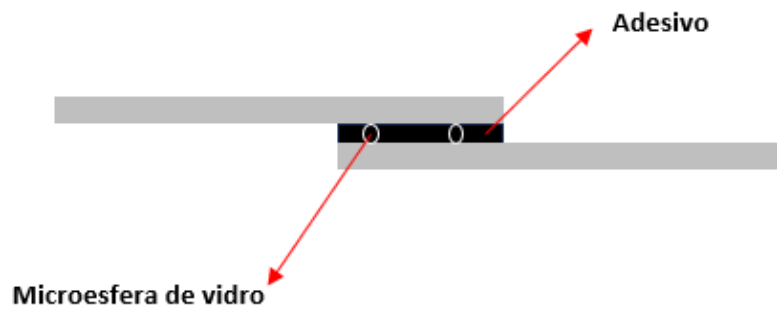
Fonte: (Adaptado de SIKA®, 2023).

Existem várias teorias que buscam explicar a redução da resistência da junta com o aumento da espessura do adesivo. Por exemplo, Adams e Peppiatt (1974) *apud* Silva *et al.* (2018) descreveram que elevadas espessuras aumentam a probabilidade de ocorrer defeitos na junta, como vazios e microfissuras. Crocombe (1989) *apud* Silva *et al.* (2018) mostram que uma SLJ mais espessa apresenta menor resistência, considerando a plasticidade do adesivo. Gonçalves (2000) *apud* Carbas (2008) informou que nas extremidades da junta o momento fletor cresce com a diminuição da resistência da junta, a depender da espessura do adesivo e do substrato. Já Gleich *et al.* (2001) *apud* Silva *et al.* (2007) propôs uma explicação fundamentada nas tensões interfaciais.

Há vários mecanismos para se controlar a espessura do adesivo em uma junta adesivada, entre eles: esferas de vidro, calços metálicos, folhas de Teflon® ou dispositivos desenvolvidos para esta função. Esferas de vidro com diâmetro conhecido são dispersas no adesivo e limitam sua espessura, porém estes elementos podem fragilizar a junta, pois as esferas de vidro podem atuar como um defeito na camada adesiva, concentrando tensões (Figura 12) (SILVA *et al.*, 2007).



Figura 12: Microesferas de vidro para obtenção de uma espessura adesiva uniforme em uma SLJ.

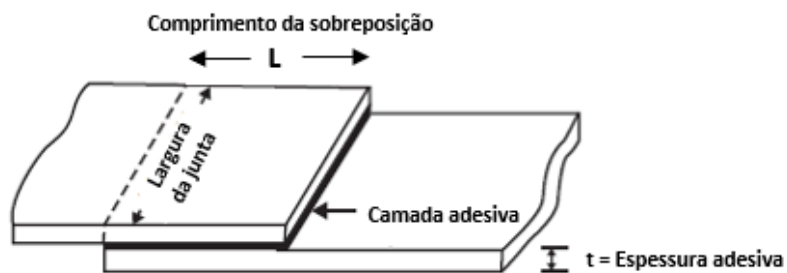


Fonte: (Adaptado de SILVA *et al.*, 2007).

### 3.7 Comprimento de sobreposição (*Overlap*)

Compondo os fatores que interferem na resistência de uma junta têm-se o comprimento de sobreposição. A SLJ demonstrada na Figura 13 é característica da maioria das juntas adesivas.

Figura 13: Juntas de sobreposição simples.

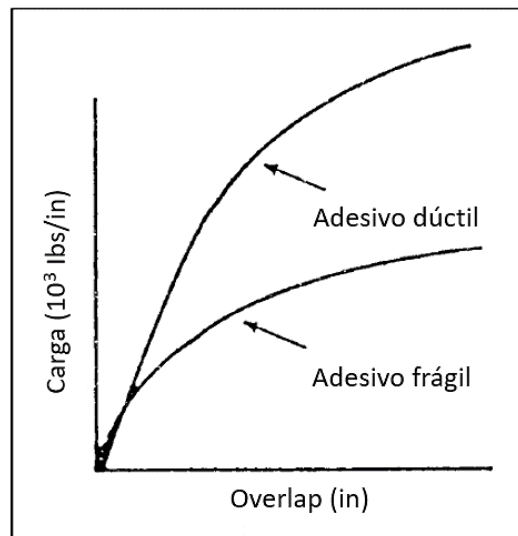


Fonte: (Adaptado de EBNEAJJAD e LANDROCK, 2015).

Ao aumentar o comprimento da sobreposição aumenta-se a resistência da junta até um determinado ponto onde não se observa aumentos significativos, tanto em adesivos dúcteis quanto frágeis. A Figura 14 demonstra essa relação.



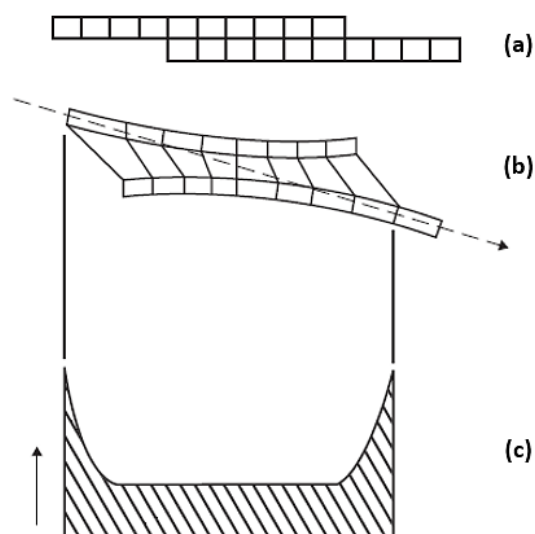
Figura 14: Efeito do comprimento de sobreposição na carga de ruptura usando adesivos dúcteis e frágeis.



Fonte: (Adaptado de PETRIE, 2000).

Nas juntas de sobreposição simples, a região de borda compreende a zona de maior concentração de tensões, sendo a tensão média da junta mais baixa do que a tensão nas bordas (Figura 15). Essa distribuição sem uniformidade das tensões ao longo da camada adesiva promove uma ruptura geralmente inferior à capacidade que o adesivo possui (CARBAS, 2008).

Figura 15: Força de tração na junta sobreposta; (a) junta sem carga; (b) junta sob tensão e (c) distribuição de tensão no adesivo.

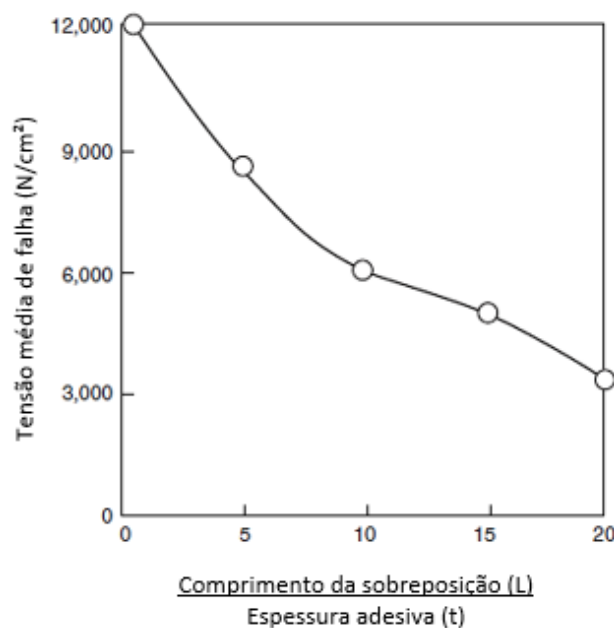


Fonte: (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015).



Na razão entre o comprimento de sobreposição ( $l$ ) e a espessura do substrato ( $t$ ), é possível obter um aumento significativo da resistência da junta com valores pequenos dessa razão, porém, a partir de determinados valores de  $l/t$ , o aumento da resistência não é expressivo (CARBAS, 2008; AMARAL, 2018). A Figura 16 demonstra a relação entre o estresse médio de falha e a relação  $l/t$ . A queda na capacidade de carga efetiva da junta de sobreposição é geralmente expressa como uma correlação entre a resistência ao cisalhamento e a relação  $l/t$  (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015).

Figura 16: Correlação entre resistência ao cisalhamento e relação  $l/t$ .



Fonte: (Adaptado de EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015).

Ebnesajjad e Landrock (2015) informam que aumentar a largura da junta resulta em um crescimento proporcional da resistência, enquanto aumentar o comprimento de sobreposição ( $l$ ) além de um certo limite tem pouquíssimo efeito. Os autores ainda descreveram que para além do comprimento e largura da sobreposição, a resistência da junta sobreposta depende da resistência ao escoamento do aderente, não devendo exceder a resistência da junta, no qual o módulo e a espessura do aderente determinam o limite de escoamento.



### 3.8 Teoria da adesão

Historicamente, teorias de intertravamento ou ancoragem mecânica, eletrostática, difusão e adsorção/reação de superfície foram conjecturadas para descreverem mecanismos de adesão. Atualmente, outras teorias foram apresentadas para explicar os mecanismos de ligação adesiva. A Tabela 3 mostra exemplos de teorias tradicionais e recentes que apresentam alguns pontos em comum e algumas diferenças, bem como uma escala de ação para cada teoria.

Tabela 3: Teorias de adesão.

<b>Tradicional</b>	<b>Recente</b>	<b>Escala de ação</b>
Intertravamento mecânico	Intertravamento mecânico	Microscópica
Eletrostática	Eletrostática	Macroscópica
Difusão	Difusão	Molecular
Adsorção/reação de superfície	Molhabilidade	Molecular
	Ligação química	Atômica
	Ácido-Base	Molecular
	Camada limite fraca	Molecular

Fonte: (Adaptado de EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015).

O aspecto mais importante de uma ligação por adesão é a interação entre o adesivo e o aderente. No parâmetro microscópico, o intertravamento ou ancoragem mecânica trata-se da superfície de contato do adesivo e do aderente (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015). Através da rugosidade da superfície é possível ocorrer o intertravamento podendo ser identificado por microscopia óptica ou eletrônica (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015). A carga superficial é o fator macroscópico de interesse no mecanismo eletrostático (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015).

### 3.9 Teoria Mecânica

Essa teoria relata sobre a ocorrência de adesão devido a cavidades, porosidades e outras irregularidades na superfície do substrato que permite a entrada do adesivo, deslocando o ar preso na interface, unindo dois aderentes, conforme mostra a Figura 17 (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015). Os adesivos tendem a apresentar ligações mais fortes com superfícies porosas desgastadas, porém boa adesão também ocorre em superfícies lisas (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015; SILVA *et al.*, 2007).



Figura 17: Teoria da adesão mecânica, exemplificada pela ancoragem mecânica (direita).



Fonte: (PEIXOTO, 2009).

Após a abrasão da superfície de um aderente, o mecanismo de adesão pode ser determinado por alguns fatores, sendo estes o intertravamento mecânico, formação de uma superfície limpa, de uma superfície altamente reativa e aumento da área de superfície de contato (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015). Silva *et al.* (2007) informara que o adesivo deve molhar de forma adequada o substrato e ter as propriedades reológicas adequadas para adentrar nos poros em um tempo razoável. Ebnesajjad e Landrock (2015) relataram que há dados na literatura relacionando a resistência da junta e a durabilidade da união com o aumento da rugosidade superficial, como também colocações contrárias, onde o aumento da rugosidade pode diminuir a resistência da junta.

### 3.10 Teoria eletrostática

Nesta teoria, a força provém da transferência de elétrons por meio da interface adesivo e aderente criando cargas negativas e positivas que se atraem, conforme mostra a Figura 18 (SILVA *et al.*, 2007). Um exemplo desse fenômeno é quando um polímero é colocado em contato com um metal. Forças eletrostáticas na forma de uma dupla camada elétrica são assim formadas na interface do adesivo aderente, sendo estas forças responsáveis pela resistência à separação (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015).



Figura 18: Teoria da adesão eletrostática, sendo  $\delta^+$  e  $\delta^-$  cargas positivas e negativas, respectivamente.



Fonte: (PISANU, 2018).

### 3.11 Teoria da difusão

Na teoria da difusão, a ponta de uma cadeia polimérica superficial difunde na estrutura da outra superfície formando uma ponte ou ligação por meio da interface (SILVEIRA *et al.*, 2019). Aplica-se essa teoria para adesivos e aderentes poliméricos com moléculas de cadeia longa, miscíveis, quimicamente compatíveis e capazes de se movimentar (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015; PETRIE, 2000; SILVA *et al.*, 2007). Sendo assim, a teoria da difusão não se aplica à materiais que não forem solúveis ou o movimento da cadeia do polímero for restringida pela sua estrutura reticulada ou cristalina, ou quando o adesivo está abaixo da sua temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) (SILVA *et al.*, 2007).

### 3.12 Molhabilidade

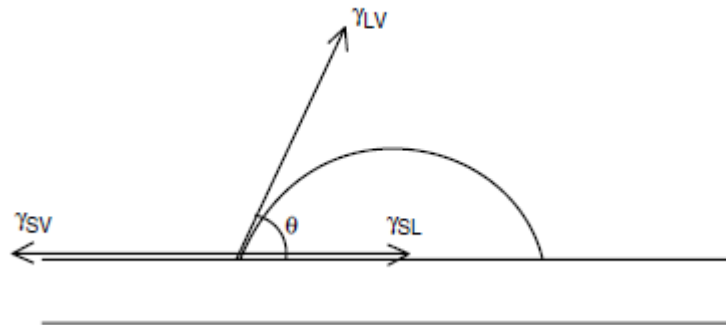
Segundo SILVA *et al.*, 2007 molhagem pode ser definido como a capacidade de um líquido se espalhar em uma superfície sólida. Para um adesivo molhar uma superfície sólida, este deve apresentar uma tensão superficial inferior à tensão superficial crítica do sólido, portanto, na formação da ligação, o ponto de partida é promover forças interfaciais entre o adesivo e os substratos (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015). A formação de uma gota de líquido em uma superfície é determinada pelo ângulo de contato,  $\theta$ , formado entre uma superfície sólida e a tangente à superfície do líquido no ponto de contato (Figura 19) (SILVA *et al.*, 2007). Essa relação é representada pela equação de Young (YOUNG, 1805), reproduzida abaixo.

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (1)$$



Onde  $\gamma_{LV}$  representa a tensão superficial do líquido em equilíbrio com o seu vapor e  $\gamma_{SV}$  é a do sólido. Já a tensão interfacial entre o sólido e o líquido é simbolizado por  $\gamma_{SL}$ . Tal expressão foi obtida independentemente por Dupré em 1869.

Figura 19: Tensões superficiais que atuam em uma gota líquida sobre uma superfície sólida.



Fonte: (COGNARD, 2006).

Silva *et al.* (2007) descreveram que o valor de  $\theta$  pode variar entre:  $0 \leq \theta \leq 180^\circ$ , sendo zero a molhagem completa e  $180^\circ$  o líquido não molha de todo o sólido, conforme mostra a Figura 20.

Figura 20: Variação do ângulo de contato.

Ângulo	Molhabilidade	Esquema
Superior a $90^\circ$	Gota não molha a superfície	
Inferior a $90^\circ$	Gota molha a superfície	
$0^\circ$ ou próximo de $0^\circ$	Gota molha totalmente a superfície	

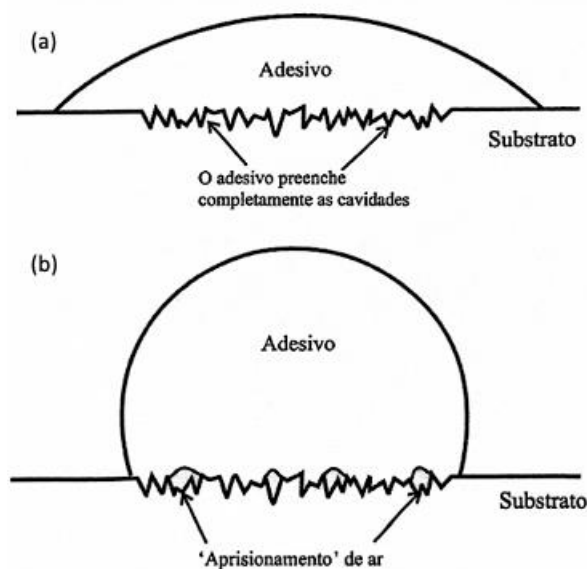
Fonte: (BRANDÃO, 2012).

O espalhamento de um líquido em um sólido pode ser elevado através do aumento da energia de superfície do sólido (SILVA *et al.*, 2007). A contaminação da superfície por pós, gorduras, óleos, gases adsorvidos, umidade, aprisionamento de ar (formando bolhas), entre outros, causam a redução da energia de superfície (SILVA *et al.*, 2007). Sendo assim, os



tratamentos superficiais possibilitam a retirada dos contaminantes. Alguns tratamentos superficiais permitem também modificar quimicamente a superfície, aumentando a energia superficial (SILVA *et al.*, 2007). Quando o adesivo adentra nos vales e fendas da superfície do substrato, têm-se um bom molhamento do adesivo (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015). Um pré-requisito para uma boa adesão é a capacidade do adesivo alcançar a maior parte da superfície aderente, chegando a máxima área de colagem, reduzindo ou eliminando vazios (BAMBERG, 2016), resultando em maior resistência da união. A Figura 21 ilustra um exemplo de quando há um ruim (a) e bom (b) molhamento do adesivo na superfície do substrato. O aprisionamento de ar impede o alcance do adesivo no aderente, interferindo no bom ancoramento do adesivo e na transferência de tensões de uma face para outra em uma junta.

Figura 21: Molhabilidade (a) boa e (b) ruim na superfície do substrato. Na opção (b), o aprisionamento de ar, formando bolhas, dificulta a ancoragem do adesivo.



Fonte: (SILVA *et al.*, 2007).

### 3.13 Ligação química

Essa teoria está relacionada com as forças químicas superficiais que promovem a formação de uma ligação por adesão. Nas ligações químicas podem ocorrer as seguintes interações: ligações covalentes, ligações de hidrogênio, forças de Lifshitz-van der Waals e interações ácido-base, e o que determinará a natureza da ligação adesiva será a composição química da interface (adesivo/aderente).



As ligações covalentes e iônicas exemplificam tipos de ligações químicas que promovem valores de adesão muito mais elevados do que forças secundárias, como as ligações de hidrogênio (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015). As interações que asseguram a união do adesivo e os aderentes também podem estar atreladas a mecanismos de intertravamento, difusão ou eletrostáticos (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015). Em adesivos reticulados e revestimentos termofixos formam-se as ligações químicas covalentes na interface, sendo a ligação mais forte e durável, em geral; porém, para existirem é necessário grupos químicos mutualmente reativos (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015). Superfícies previamente revestidas, madeira, compósitos e alguns plásticos apresentam vários grupos funcionais que podem promover ligações químicas com o adesivo, nas condições apropriadas (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015). Além disso, tratamentos superficiais como corona ou chama podem ser utilizados em plásticos para gerar essas condições (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015; SILVA *et al.*, 2007).

### 3.14 Teoria ácido-base

A teoria ácido-base tem como fundamento o conceito químico de ácido e base de Lewis (LEWIS, 1923). Lewis definiu que um ácido pode aceitar um par de elétrons de uma base e a base por sua vez, pode doar um par de elétrons (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015). Sendo assim, cada cátion e compostos químicos como  $\text{BF}_3$  e  $\text{SiO}_2$  são ácidos, já ânions e compostos como  $\text{NH}_3$ ,  $\text{PH}_3$  e  $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{NH}_2$  são bases (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015). De acordo com essa teoria, a adesão ocorre devido a atração polar de ácidos e bases de Lewis na interface, ou seja, elementos pobres e ricos em elétrons, que são capazes de doar e aceitar elétrons (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015).

### 3.15 Camada limite fraca (*weak boundary layer*)

O conceito sobre a camada limite fraca foi descrita pela primeira vez por Bikerman (1961). A teoria relata que a falha na ligação interfacial é advinda de uma ruptura coesiva ou por uma camada limite fraca (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015). Camadas limites fracas podem acontecer no adesivo ou aderente se uma impureza se concentrar próximo à superfície de ligação, formando uma ligação fraca ao substrato (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015).

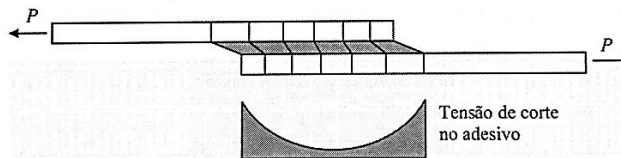


Segundo Silva *et al.*, 2007, as principais características para sua ocorrência são:

- 1) Inclusão de ar ou outros gases em vazios ou bolhas na região ligada;
- 2) Formação de filmes de óxidos fracos ou fracamente ligados aos seus metais básicos;
- 3) Concentração de plastificantes, antioxidantes, diluentes etc., na superfície.

Os autores também observaram que a menor resistência está associada à concentração de tensões e irregularidades na superfície. Essas características, por sua vez, estão ligadas às tensões geradas por uma junta, que são restritas a uma área muito menor em comparação com a área total de contato (Figura 22) (SILVA *et al.*, 2007).

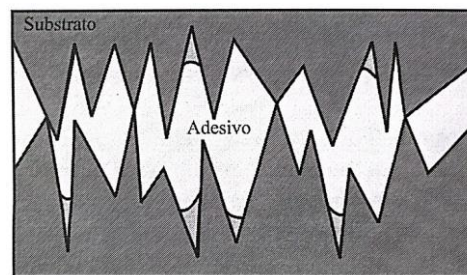
Figura 22: Distribuição da tensão de corte no adesivo em uma junta de sobreposição simples.



Fonte: (SILVA *et al.*, 2007).

Já sobre irregularidades de superfície, os autores relataram que a existências dessas irregularidades provocam pontos de iniciação para propagação de fendas (SILVA *et al.*, 2007). Esses defeitos, vazios ou outras irregularidades geométricas (Figura 23) podem promover concentração de tensões durante o carregamento mecânico (SILVA *et al.*, 2007), em parte devido à falta de molhamento eficiente no preenchimento entre adesivo e substrato.

Figura 23: Pontos de iniciação de fissuras em superfícies muito irregulares.



Fonte: (SILVA *et al.*, 2007).

### 3.16 Tipos de adesivos estruturais

A indústria classifica os adesivos por sua função, composição química, modo de aplicação ou reação, forma física, custo e aplicação. Na engenharia, os adesivos são



caracterizados conforme o seu desempenho entre estruturais e não estruturais. Suas definições foram tratadas na introdução dessa dissertação.

Quanto às propriedades mecânicas, os adesivos epóxis, cianoacrilatos, acrílicos reativos e os poliuretanos podem, em muitos casos, apresentar resistência ao cisalhamento entre 20 e 35 MPa (3.000-5.000 psi) (DUNN, 2003). Já para a aplicação de força de *peel*, alguns adesivos, a exemplo dos acrílicos reativos e os poliuretanos, exibem excelentes performances associada às suas estruturas elastoméricas (DUNN, 2003). Todavia, os cianoacrilatos e epóxis apresentam força de *peel* baixa (DUNN, 2003).

Na revisão da literatura desta dissertação serão destacados os adesivos estruturais epóxis e acrílicos.

### 3.16.1 Epóxi

As resinas epóxis são termofixas, geralmente obtidas pela reação de dois componentes, onde o primeiro componente trata-se de uma resina epóxi e o segundo um agente de cura (endurecedor) (DUNN, 2003). Essas resinas são bifuncionais ou multifuncionais incluindo mais de um grupo epóxi (também chamado de anel oxirano ou grupo glicidil) (DUNN, 2003). A síntese dessa resina, frequentemente, utiliza epicloridrina e di- e poli-hidroxifenóis (DUNN, 2003).

De forma geral, as resinas epóxi apresentam polifenóis ou, com menor frequência, poliglicóis e epicloridrina ou oligômeros com grupos epóxi pendentes (PIZZI e MITTAL, 2018). Tais resinas são endurecidas também por agentes de cura como aminas, amidas e poliamidas, e endurecedores de anidrido, além de certos ácidos e base de Lewis (PIZZI e MITTAL, 2018). As resinas endurecidas são insolúveis e infusíveis, significativamente adesivas a praticamente todos os tipos de materiais, como metais, vidros, cerâmica ou madeira, quimicamente resistentes e apresentam ótimas propriedades dielétricas (PIZZI e MITTAL, 2018).

Os adesivos epóxi, no âmbito geral, são limitados a aplicações abaixo de 121 °C, sendo que alguns adesivos apresentam tolerância de serviço, em curto prazo, de 260°C e longo prazo de 149 – 260°C (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015). Esses adesivos apresentam algumas vantagens, sendo estas: temperatura de cura relativamente baixas, com ausência de formação de voláteis durante a cura, e baixo custo (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015).



A literatura reporta três métodos para a obtenção de resinas epóxi na indústria, são estes:

- Reações catalisadas por base de epicloridrina e compostos com hidrogênio reativo, subsequente a oligomerização dos demais componentes (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015);
- Oxidação direta com ácidos orgânicos de hidrocarbonetos alifáticos ou cicloalifáticos insaturados de compostos epóxi específicos (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015);
- Adição de Ácido Hipocloroso a compostos insaturados e base- desidrohalogenação induzida (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015).

Há distintos critérios para classificar adesivos epóxi. Quanto ao número de componentes, têm-se: monocomponente, bicomponente e multicomponente (PIZZI e MITTAL, 2018). Referente ao método de cura, estes podem ser classificados como mais propensos à temperatura ambiente, temperatura média elevada e temperatura altamente elevada (PIZZI e MITTAL, 2018). A temperatura de cura dependerá, em grande parte, do tipo de agente de cura. Quando os adesivos são curados a temperatura ambiente apresentam menor resistência ao cisalhamento (entre 10-20 MPa), já os adesivos curados a temperaturas elevadas, ou seja, acima de 100°C, apresentam alta resistência ao cisalhamento, entorno de 25-45 MPa, além de apresentar resistência ao impacto (PIZZI e MITTAL, 2018).

As resinas epóxi curadas com endurecedores à temperatura ambiente se caracterizam por serem materiais rígidos e quebradiços contendo altas resistências à flexão, tração e compressão, bem como alto módulo de elasticidade; todavia, apresentam alongamento à ruptura e resistência ao impacto baixo (PIZZI e MITTAL, 2018). Em temperatura ambiente, as resinas epóxi curadas estão em estado vítreo e apenas acima dessa temperatura elas se tornam bastante plásticas, sendo que, a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) pode variar entre 70°C e 280°C e tal variação dependerá da densidade de reticulação da resina curada; quanto maior for tal densidade, mais elevada será a  $T_g$  (PIZZI e MITTAL, 2018). Conforme pode ser visto na Tabela 4, dentre as vantagens dos adesivos epóxi têm-se a excelente resistência ao calor, água e solventes e como desvantagens a cura lenta e resistência reduzida em superfícies sujas.



Tabela 4: Vantagens e desvantagens dos adesivos epóxi.

Vantagens	Desvantagens
Alta resistência de união Excelente preenchimento de lacunas Une uma ampla variedade de materiais Excelente resistência a solventes e água Excelente resistência ao calor Fácil preenchimento 100% sólidos - sem solventes	Bicomponente - requer mistura precisa Cura lenta Apresenta certa fragilidade Desempenho limitado em plásticos Resistência reduzida em superfícies sujas Viscosidades muito baixas inatingíveis Alguns endurecedores são tóxicos Muitos endurecedores têm forte odor

Fonte: (Adaptado de DUNN, 2003).

Os epóxis apresentam entre boas a até excelentes ligações ao aço, alumínio, latão, cobre e na maioria dos outros metais (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015). Além desses substratos, esses adesivos apresentam semelhantes resultados em plásticos termofixos e termoplásticos, vidro, madeira, concreto, papel, tecido e cerâmica (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015).

### 3.16.2 Acrílicos

Os adesivos acrílicos caracterizam-se por serem polimerizados com monômeros de acrilato e metacrilato, sendo esses adesivos classificados como monocomponente (adesivos anaeróbicos, cianoacrilatos e adesivos fotopolimerizáveis por luz ultravioleta) ou bicomponente (acrílicos reativos) (DUNN, 2003). Os adesivos acrílicos apresentam ótimas ligações em uma variedade de substratos. Alumínio, latão, cobre, aço inoxidável e aço carbono são ligados facilmente a metais semelhantes ou diferentes com este adesivo (EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015).

A literatura reporta que essa capacidade de adesão na maioria dos metais e polímeros se dá pela baixa viscosidade, boa molhabilidade e capacidade de penetração que contribuem no espalhamento sobre a superfície do substrato (PIZZI e MITTAL, 2018). Todavia, esses adesivos apresentam fraca coesão e baixa resistência ao cisalhamento, além de reduzida resistência a temperaturas elevadas, alta inflamabilidade e mau odor do adesivo não curado (PIZZI e MITTAL, 2018). Dentre os pontos que difere os adesivos acrílicos reativos aos epóxis e uretanos é a capacidade de se unir a inúmeros metais com preparação mínima de superfície em condições ambientais (PIZZI e MITTAL, 2018).



Os acrílicos reativos são adesivos estruturais utilizados para uma ampla gama de aplicações como colagem de fibra de vidro e chapa de aço, imãs, alto-falantes, artigos esportivos, montagem de metais e plásticos diversos, principalmente quando se busca uma cura rápida sem preparação de superfície (DUNN, 2003). As limitações desses adesivos compreendem resistência a altas temperaturas apenas até, aproximadamente, 120°C e resistência limitada a solventes muito agressivos, sendo que, nesses ambientes, os adesivos epóxis de alto desempenho se destacam (DUNN, 2003).

A Tabela 5 demonstra algumas vantagens e desvantagens dos adesivos acrílicos reativos.

Tabela 5: Vantagens e desvantagens dos adesivos acrílicos reativos.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Cura muito rápida e controlável Alta resistência ao descascamento  Colar superfícies não preparadas Excelente ligação em plásticos Sem a necessidade de mistura precisa 100% sólidos - sem solventes	Bicomponente Desempenho em alta temperatura – 120 °C Odor e inflamabilidade Resistência limitada a fluidos

Fonte: (Adaptado de DUNN, 2003).

### 3.17 Preparação mecânica e química de substratos metálicos

As superfícies metálicas apresentam alta capacidade de absorverem óleos e outros contaminações da atmosfera, sendo necessário a remoção de camadas de óxidos, limpeza, aplicação de primer para proteção de oxidação e melhoria da molhabilidade. A preparação adequada da superfície é fundamental para garantir ligações fortes e duradouras. Antes de realizar a aplicação do adesivo, a limpeza do substrato é essencial. Ebnesajjad e Landrock (2015) relatara que após o processo de limpeza, ou seja, remoção de contaminantes, como sujeiras, graxa, óleo e marcas de dedos, os tratamentos químicos ou físicos são realizados para promover uma superfície receptiva à adesão. Ainda segundo os autores, qualquer preparação de superfície requer a conclusão de um, dois ou três das seguintes operações: limpeza com solvente; limpeza intermediária; tratamento químico. O primer também pode ser utilizado em alguns casos para garantir ligações duráveis.

Pizzi e Mittal (2018) descreveram que o pré-tratamento de superfície é uma parte essencial e muito importante da tecnologia de colagem adesiva, cujo objetivo é preparar a



superfície para que a junta colada atinja as propriedades exigidas e seja capaz de desempenhar a sua função. Segundo os autores, a resistência de uma junta adesiva é afetada por: pré-tratamento do substrato; escolha de um adesivo apropriado; conformidade com as especificações do processo de colagem adesiva. Os contaminantes existentes em uma superfície podem ser intrínsecos ou extrínsecos. O primeiro faz menção a contaminantes quimicamente ligados à superfície, já o segundo refere-se a contaminantes ligados à superfície por forças de adesão e adsorção (PIZZI e MITTAL, 2018).

Os métodos de pré-tratamento de superfície antes da colagem descritos por Pizzi e Mittal (2018) são:

**1. Tratamento Físico-químico:**

- a. Remover contaminantes intrínsecos e extrínsecos por ruptura química ou físico-química de sua ligação ao substrato usando agentes apropriados;
- b. Aumentar a área de superfície efetiva;
- c. Ativar a superfície;

Esse método abrange desengorduramento e decapagem ácida.

**2. Pré-tratamento Mecânico:**

- a. Remover contaminantes intrínsecos e extrínsecos por ruptura mecânica de sua ligação ao substrato;
- b. Remover quaisquer defeitos superficiais e estruturais;
- c. Aumentar a área de superfície efetiva;
- d. Ativar a superfície;

Inclui métodos como limpeza por jateamento abrasivo, esmerilhamento e escovação.

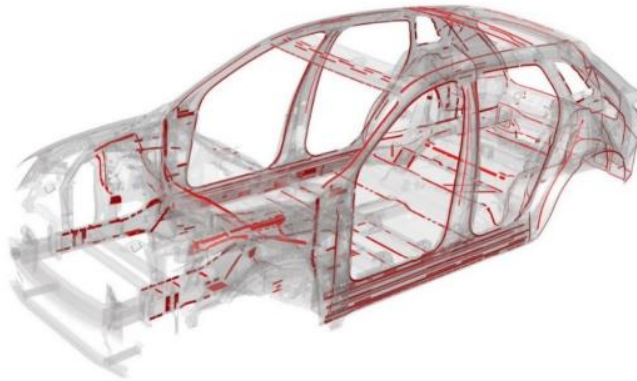
### 3.18 Aplicação dos adesivos estruturais

É possível encontrar adesivos estruturais em grande parte das carrocerias de automóveis, correspondendo a um peso de 0,2 kg e 1,5 kg. Dentre as principais vantagens das ligações adesivas em BIW (*body in white*) estão a melhoria do desempenho estrutural, economia de peso, melhoria da proteção contra corrosão e



isolamento contra corrosão galvânica em juntas de material misto (SIKA®, 2023). A Figura 24 demonstra um exemplo de aplicação dos adesivos estruturais neste setor.

Figura 24: Aplicações de adesivos estruturais no Audi e-tron com chapéu alto de alumínio representado nos destaques em vermelho.



Fonte: (SIKA®, 2023).

Na indústria aeronáutica a extensão da durabilidade da estrutura do avião e diminuição dos custos de manutenção mostrou a vantagem do uso de juntas coladas. Um estudo desenvolvido na Unicamp em parceria com a Embraer compondo o mestrado de Fanton (2012) mostrou a vantagem em substituir *doublers* rebitados ou soldados por coladas. Dentre as vantagens listada pelo pesquisador estão a redução do peso da aeronave, aumento da resistência e diminuição de custos, com a economia de materiais e combustível (ANUNCIACÃO, 2012; FANTON, 2012).

Já na construção naval as aplicações dos adesivos estão nos forros internos do casco, ligação do convés ao casco, junção de painéis do casco, ligação das janelas aos painéis e colagem de *decks* decorativos (Figura 25) (SILVA, 2018).

Figura 25: Exemplo de aplicação de adesivos estruturais na área náutica.



Fonte: (Adaptado de SIKA®, 2022).



### 3.19 Análise de Componentes Principais (PCA)

A PCA tende a extrair informações relevantes ao reduzir a dimensionalidade de um conjunto de dados e, assim, determinar as variáveis mais relevantes, denominadas componente principal (PC, sigla derivada do termo em inglês: *Principal Component*), que respondem pela maior parte da variância dos dados (JOLLIFFE, 2002).

Dadas  $t$  observações em  $n$  variáveis, o objetivo da PCA é reduzir a dimensionalidade da matriz de dados  $X$  encontrando  $p$  novas variáveis com  $p < n$ . Assim, a primeira PC consiste na direção ao longo dos dados que explica a maior variância. Já a segunda PC e as subsequentes devem ser ortogonais a PC anterior e descrever a quantidade máxima da variância restante (HAIR *et al.*, 2019; JOLLIFFE, 2002).

A PCA é um caso singular de transformação dos dados originais em um novo sistema de coordenadas com menos variáveis e em ordem de importância em termos de variância dos dados. Se na matriz  $X$  os dados originais envolvem  $n$  colunas que correspondem a diversos parâmetros e cada linha corresponde a uma observação, então cada dado pode ser considerado como um ponto em um espaço vetorial multidimensional. Historicamente, os fundamentos da PCA são creditados a Pearson (1901) e Hotelling (1933).

Resumidamente, a variância  $Var(X_i, X_i)$  é uma “medida de dispersão de dados” considerando uma única variável  $X_i$ ,  $1 < i < n$ :

$$Var(X_i, X_i) = \sum_{i=1}^t \frac{(X_i - \bar{X}_i)^2}{t-1}. \quad (2)$$

onde  $\bar{X}_i$  corresponde à média da variável considerada.

A covariância é semelhante à variância, mas considera dados de variáveis diferentes, ou seja,  $X_i$  e  $X_j$ , com  $i \neq j$ :

$$Cov(X_i, X_j) = \sum_{i=1}^t \frac{(X_i - \bar{X}_i)(X_j - \bar{X}_j)}{t-1}, \text{ para cada } i \neq j. \quad (3)$$

A covariância indica a direção da relação linear entre as variáveis. O procedimento da PCA pode ser expresso de forma concisa em termos de álgebra matricial (JOLLIFFE, 2002) dada abaixo.

A equação de autovalor pode ser descrita como:

$$\begin{array}{ccccccc} Cov(Z_1, Z_1) - \lambda & Cov(Z_1, Z_2) & \dots & Cov(Z_1, Z_7) & & & \\ Cov(Z_2, Z_1) & Cov(Z_2, Z_2) - \lambda & \dots & Cov(Z_2, Z_7) & & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & & & \end{array} = 0 \quad (4)$$



$$Cov(Z_7, Z_1) \quad Cov(Z_7, Z_2) \quad \dots \quad Cov(Z_7, Z_7) - \lambda$$

A solução está relacionada a uma equação polinomial em  $\lambda$ , com sete raízes:  $\lambda_1, \lambda_2 \dots$  e  $\lambda_7$  (para  $n = 7$ ). O percentual de relevância de cada PC é obtido por (JOLLIFFE, 2002):

$$\frac{\lambda_i}{\sum_i^n \lambda_i} = \frac{Var(Z_i, Z_i)}{\sum_i^n Var(Z_i, Z_i)} \quad (5)$$

A partir deste procedimento, os autovetores ligados a cada  $\lambda_i = Var(Z_i, Z_i)$  representam os cossenos diretores (ou a contribuição que cada um dos eixos originais dá à composição dos novos eixos), denominados  $PC_k$ . Os autovalores, por sua vez, correspondem à quantidade de variância original para os respectivos autovetores, seguindo a ordem de relevância relacionada a cada  $PC_k$ :  $\lambda_i > \lambda_j > \dots > \lambda_n$  e com  $\lambda_i + \lambda_j + \dots + \lambda_n = n$ .

Cada  $PC_k$  é uma combinação linear de variáveis  $Z_i$ , definidas como (HAIR *et al.*, 2019):

$$PC_k = \sum_{j=1}^n \alpha_{j,k} Z_j \quad (6)$$

onde  $Z_j$  é o componente  $j$  padrão e o peso  $\alpha_{j,k}$  é o  $j$ -ésimo coeficiente para o  $k$ -ésimo PC.

Finalmente, no sentido estatístico, duas variáveis,  $Z_i$  e  $Z_j$ , cada uma correspondendo a  $n$  variáveis e  $t$  rótulos, e suas respectivas médias,  $\bar{Z}_i$  e  $\bar{Z}_j$ , podem dar resultados em termos de um coeficiente de correlação como segue (HAIR *et al.*, 2019; JOLLIFFE, 2002):

$$Corr(Z_i, Z_j) = \frac{Cov(Z_i, Z_j)}{\sqrt{Var(Z_i, Z_i)} \sqrt{Var(Z_j, Z_j)}}, \text{ para cada } i \neq j. \quad (7)$$

A partir da Equação (7) é possível observar que o coeficiente de correlação é a covariância de duas variáveis  $Z_i$  e  $Z_j$  dividida pelo produto de suas variâncias de raiz quadrada. A correlação, que depende da covariância, indica tanto a força quanto a direção da relação linear entre duas variáveis. No entanto, ao contrário da covariância, é adimensional.

O coeficiente de correlação é creditado a Galton (1890) e Pearson (1896) e seu valor deve se situar entre  $-1$  e  $+1$ . O coeficiente de  $+1$  especifica que duas variáveis são perfeitamente correlacionadas positivamente: à medida que uma variável aumenta, a outra também aumenta em quantidade comparável. No entanto, isso não significa que a variação de uma variável faça com que a outra mude, apenas que suas mudanças coincidem. Por outro lado, o coeficiente de  $-1$  mostra a relação negativa perfeita: se uma variável aumenta, a outra diminui em quantidade comparável. Um coeficiente de zero implica que não há relação linear entre as variáveis.



A PCA consiste numa técnica exploratória multivariada que pode ser utilizada em qualquer estudo em que o pesquisador tenha como objetivo compreender a relação entre variáveis sem a necessidade de estimar previsões de comportamento dos dados. Os principais objetivos dos modelos exploratórios referem-se à redução ou simplificação estrutural dos dados, à classificação ou agrupamento de observações e variáveis e à existência de correlação entre variáveis métricas. Essas são técnicas relevantes para desenvolver diagnósticos sobre o comportamento de dados e observações (FÁVERO e BELFIORE, 2019; SILVA et al., 2020).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse tópico se destina a detalhar o procedimento experimental adotado neste estudo, materiais selecionados, teste estatístico de comparação de médias - Teste de Tukey e Análise de Componentes Principais (PCA).

### 4.1 Adesivos estruturais bicomponentes

Os adesivos estruturais bicomponentes escolhidos foram o de base química acrílica LORD® 852/25GB e o de base química epóxi Fusor® 380NS/383NS, ambos fabricados pela Parker LORD. As propriedades dos adesivos estão listadas no Anexo 1. Esses adesivos foram escolhidos por serem de fabricação nacional e facilmente adquiridos no Brasil.

Os componentes A e B (adesivo e catalizador, respectivamente) do adesivo acrílico LORD® 852/25GB foram misturados através de bico misturador estático com o auxílio de uma pistola de aplicação. Para o adesivo Fusor® 380NS/383NS utilizou-se mistura manual por 1 minuto em placa de Petri com o auxílio de uma espátula de inox, sendo cada componente igualmente pesado em balança semi-analítica da marca GEHAKA, modelo BK6000, com leitura de duas casas decimais calibrada.

### 4.2 Substrato metálico

O substrato utilizado no estudo foi um aço carbono laminado à frio escolhido por causa do seu estado de encruamento, que promove maior resistência e dureza. O uso de adesivos sintéticos de alta resistência para colagem de metal iniciou-se na década de 1940, com a



viabilidade comercial destes (SANTOS, 2005) e sua aplicação caminha da indústria automobilística até aeroespacial. Para classificação do aço foi realizada uma análise química em um espectrômetro óptico de marca LABCONTROL, modelo FOUNDRY-MASTER PPO, com circulação de gás Argônio na pureza 99,99% calibrado para análise de materiais com base ferrosa. Essa análise foi realizada no Laboratório de Microscopia Óptica e MEV do SENAI CIMATEC, em Salvador, Bahia. O resultado obtido encontra-se no Apêndice 1, sendo classificado como 1006. Os principais elementos estão demonstrados na Tabela 6.

Tabela 6: Principais elementos identificados na análise química do aço em estudo.

Fe	C	Si	Mn	Cr	Al
99,3	0,085	0,024	0,326	0,026	0,075

Fonte: (Autoria própria).

O substrato foi cortado nas dimensões 100x25 mm, em atendimento a norma ASTM D1002-99 e apresentava 1,2 mm de espessura. Dado a espessura do substrato, o aço laminado à frio trouxe menor ductilidade ao substrato, característica importante para reduzir o momento fletor na amostra durante o ensaio de cisalhamento.

### 4.3 Preparação dos corpos de prova

#### 4.3.1 Preparação mecânica e química

Foram adotados dois tipos de preparação mecânica física nos corpos de prova, por lixamento e com a ferramenta elétrica denominada de Bristle Blaster®. Para cada tipo de preparação mecânica adotou-se um perfil de preparação química.

Nos subtópicos a seguir serão detalhados os procedimentos para cada tipo de preparação mecânica. Todo o procedimento de preparação dos corpos de prova foi executado no Laboratório de Metalografia do SENAI CIMATEC, em Salvador, Bahia.

#### 4.3.2 Preparação química e mecânica com lixa

Os substratos foram imersos em solução de HCl por 48 horas (decapagem ácida) para retirada da camada de oxidação existente. Após esse período, estes foram lavados em água



corrente com o auxílio de uma bucha e, em seguida, lixados a fim de remover a camada de oxidação residual, no qual foram utilizadas lixas com granulometria de 360 e 600 (Martins *et al.*, 2023<sup>a</sup> e Martins *et al.*, 2023<sup>b</sup>).

Finalizada a preparação mecânica com lixa, as amostras foram higienizadas com acetona, heptano e álcool isopropílico com o objetivo de remover sujidades e gordura.

#### 4.3.3 Preparação química e mecânica com Blister Blaster<sup>®</sup>

A ferramenta Bristle Blaster<sup>®</sup>, fabricada pela empresa MontiPower<sup>®</sup>, possui a tecnologia de remover corrosão ao mesmo tempo que gera um perfil de rugosidade. As pontas das cerdas desse equipamento simulam o jateamento de areia.

As amostras foram fixadas em uma superfície metálica e a região de adesivagem foi preparada com Bristle Blaster<sup>®</sup>. Finalizada a preparação mecânica com a ferramenta, a rugosidade das amostras foi avaliada através de um rugosímetro de marca Mitutoyo, modelo SL210. A faixa de aceitação adotada para a rugosidade do substrato foi de 1,5 a 5  $\mu\text{m Ra}$ . Realizou-se três medições em cada chapa utilizada. No Apêndice 2 encontram-se a média e desvio padrão das rugosidades obtidas. O objetivo desta análise foi promover um padrão de rugosidade e uniformizar as amostras.

Após a preparação mecânica com o Bristle Blaster<sup>®</sup>, as amostras foram higienizadas com acetona, heptano e álcool isopropílico para retirada de sujidades e gordura. Devido a abertura de rugosidade nos substratos realizou-se a limpeza química com o auxílio de papel toalha, e quaisquer resquício de papel após limpeza foi removido com um pincel separado unicamente para essa função.

#### 4.3.4 Aplicação da camada adesiva nos corpos de prova

A região de adesivagem foi demarcada utilizando tiras de PTFE fixadas nos corpos de prova, conforme mostrado na Figura 26. As tiras de PTFE possuíam três espessuras, sendo 0,1, 0,25 e 0,5 mm. Através delas foi possível demarcar a área útil de aplicação do adesivo e limitar a espessura da camada adesiva. Essa metodologia foi utilizada nos estudos de Martins *et al.* (2023)<sup>a</sup> e Martins *et al.*, (2023)<sup>b</sup>.



Portanto, nesse estudo foram avaliadas três espessuras da camada adesiva em juntas simples sobrepostas para cada tipo de adesivo selecionado. O adesivo de base química acrílica foi aplicado na área demarcada com o auxílio de um bico misturador estático e pistola de aplicação e o epóxi com espátula de inox, após 1 minuto de mistura manual. As amostras curaram a temperatura ambiente por 24 horas. A média e desvio padrão do *overlap* das formulações estudadas estão dispostos no Apêndice 3. Foram feitas três medidas em cada corpo de prova com paquímetro digital da marca DIGIMESS, resolução 0,01 mm, calibrado.

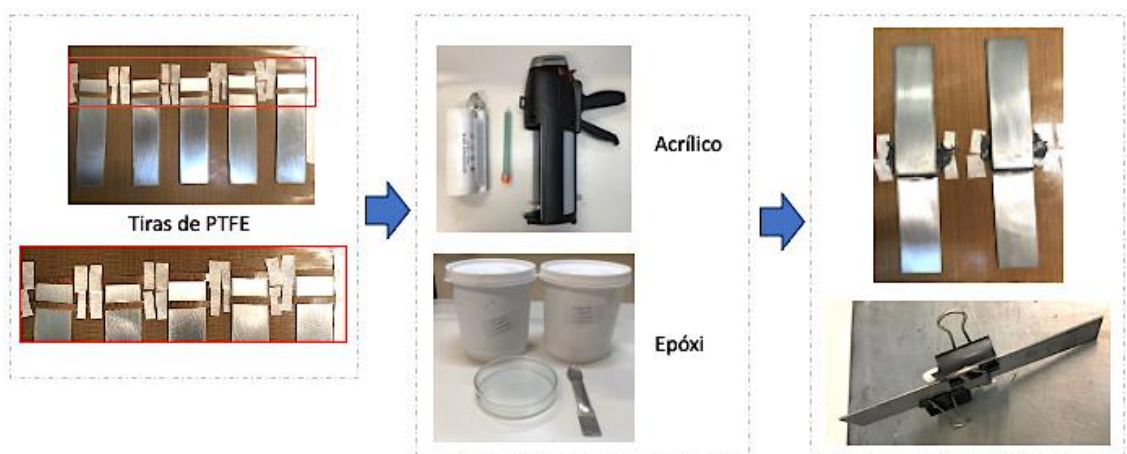
Na Figura 27 visualiza-se as etapas para fabricação das amostras.

Figura 26: Tiras de PTFE fixadas nos corpos de prova.



Fonte: (Autoria própria).

Figura 27: Preparação dos corpos de prova, indicando a fixação de tiras PTFE, seguido da aplicação por injeção de adesivo entre as amostras e o uso de um fixador.



Fonte: (Autoria própria).



Para garantir a espessura da camada adesiva juntamente com as tiras de PTFE, grampos tipo fichário foram fixados na região de adesivagem da junta simples sobreposta. Removeu-se o excesso de adesivo nas bordas com o auxílio de uma espátula de inox. O resíduo de adesivo que permaneceu nas bordas dos corpos de prova após cura foi retirado com uso de alicate de corte e estilete. Todos os utensílios utilizados para mistura e remoção de excesso de adesivo foram higienizados previamente com lavagem em água corrente e sabão e acetona P.A concentração 99,5%. As tiras de PTFE foram higienizadas somente com acetona P.A concentração 99,5%.

#### 4.4 Formulações desenvolvidas

As formulações desenvolvidas foram definidas por experimento fatorial completo  $2^2$  com triplicata no ponto central para os adesivos epóxi e acrílico. Os pontos máximos, mínimos e médio foram definidos, respectivamente, como:  $+1=0,5\text{mm}$ ;  $-1=0,1\text{ mm}$ ;  $0=0,25\text{ mm}$ , que equivalem a espessura da camada adesiva nos corpos de prova. O objetivo do experimental fatorial foi combinar as diferentes espessuras da camada adesiva com o substrato de aço carbono laminado à frio após preparação com lixa ou com o Bristle Blaster<sup>®</sup>. Além disso, por se tratar de uma aplicação manual dos gabaritos de PTFE, buscou-se realizar repetições das formulações com o experimento fatorial. Em suma, para cada formulação efetuou-se o ensaio de cisalhamento em cinco corpos de prova e suas médias foram avaliadas pelo teste de Tukey.

O experimento fatorial em estudo foi realizado utilizando o software Minitab<sup>®</sup> e pode ser visualizado na Tabela 7.



Tabela 7: Experimento fatorial completo 22 com triplicata no ponto central desenvolvido para esse estudo envolvendo diferentes espessuras (três ao todo), tipo de preparação mecânica (A: Bristle Blaster; ou B: lixas) e tipo de adesivo (epóxi ou acrílico), compondo um bloco (blc) de experimento.

**Tabela do Experimento (aleatorizado)**

Fatores: 2 Experimento Base: 2; 4  
 Ensaios: 7 Réplicas: 1  
 Blocos: 1 Pts centrais (total): 3

**Base Epóxi**

A – Com preparação Bristle Blaster®  
 B – Com preparação Lixa  
 -1= 0,1 mm  
 0= 0,25 mm  
 +1= 0,5 mm

{ Espessura do adesivo na junta simples }

**Base Acrílico**

A – Com preparação Bristle Blaster®  
 B – Com preparação Lixa  
 -1= 0,1 mm  
 0= 0,25 mm  
 +1= 0,5 mm

Ensaio	Blc	A	B
1	1	0	0
2	1	+	-
3	1	-	+
4	1	+	+
5	1	-	-
6	1	0	0
7	1	0	0

Ensaio	Blc	A	B
1	1	0	0
2	1	+	-
3	1	-	+
4	1	+	+
5	1	-	-
6	1	0	0
7	1	0	0

Fonte: (Autoria própria).

No total foram desenvolvidas 28 formulações e estão dispostas na Tabela 8 .

Tabela 8: Formulações desenvolvidas neste trabalho e discutidas no próximo capítulo, envolvendo diferentes espessuras (três ao todo), tipo de preparação mecânica (Bristle Blaster® ou lixas) e tipo de adesivo (epóxi ou acrílico).

Formulação	Espessura (mm)	Tipo de preparação mecânica	Tipo de adesivo bicomponente estrutural
<b>F1</b>	0,25	Bristle Blaster®	Acrílico
<b>F2</b>	0,50	Bristle Blaster®	Acrílico
<b>F3</b>	0,10	Bristle Blaster®	Acrílico
<b>F4</b>	0,50	Bristle Blaster®	Acrílico
<b>F5</b>	0,10	Bristle Blaster®	Acrílico
<b>F6</b>	0,25	Bristle Blaster®	Acrílico
<b>F7</b>	0,25	Bristle Blaster®	Acrílico
<b>F8</b>	0,25	Lixa 360 e 600	Acrílico
<b>F9</b>	0,10	Lixa 360 e 600	Acrílico
<b>F10</b>	0,50	Lixa 360 e 600	Acrílico
<b>F11</b>	0,50	Lixa 360 e 600	Acrílico
<b>F12</b>	0,10	Lixa 360 e 600	Acrílico
<b>F13</b>	0,25	Lixa 360 e 600	Acrílico
<b>F14</b>	0,25	Lixa 360 e 600	Acrílico
<b>F15</b>	0,25	Bristle Blaster®	Epóxi
<b>F16</b>	0,50	Bristle Blaster®	Epóxi
<b>F17</b>	0,10	Bristle Blaster®	Epóxi



<b>F18</b>	0,50	Bristle Blaster®	Epóxi
<b>F19</b>	0,10	Bristle Blaster®	Epóxi
<b>F20</b>	0,25	Bristle Blaster®	Epóxi
<b>F21</b>	0,25	Bristle Blaster®	Epóxi
<b>F22</b>	0,25	Lixa 360 e 600	Epóxi
<b>F23</b>	0,10	Lixa 360 e 600	Epóxi
<b>F24</b>	0,50	Lixa 360 e 600	Epóxi
<b>F25</b>	0,50	Lixa 360 e 600	Epóxi
<b>F26</b>	0,10	Lixa 360 e 600	Epóxi
<b>F27</b>	0,25	Lixa 360 e 600	Epóxi
<b>F28</b>	0,25	Lixa 360 e 600	Epóxi

Fonte: (Autoria própria).

## 4.5 Caracterização das amostras

As formulações foram caracterizadas por cisalhamento (*Lap shear*) e as médias avaliadas pelo teste de Tukey, modo de falha conforme norma ISO/DIS 10365:2020(E), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Análise de Componentes Principais. Utilizou-se a infraestrutura dos Laboratórios de Microscopia Óptica e MEV e Ensaios Mecânicos do SENAI CIMATEC, em Salvador, Bahia.

### 4.5.1 Resistência ao cisalhamento (*Lap shear*)

Pizzi e Mittal (2018) relataram que o cisalhamento caracteriza a coesão interna do adesivo testado usando tensões de cisalhamento paralelas à direção da junta. Portanto, avaliar o cisalhamento é uma possibilidade de testar a coesão interna do adesivo (PIZZI e MITTAL, 2018).

Para determinação da resistência ao cisalhamento das juntas simples sobrepostas foi utilizado uma máquina de ensaio universal EMIC, modelo DL 2000 com software para processamento de dados Tesc 2000, célula de carga de 20 kN e velocidade de ensaio 1,3 mm/min, conforme ASTM D1002-99. Para cada formulação desenvolvida testou-se cinco corpos de prova. As dimensões do substrato foram 100x25 mm, em atendimento a norma supracitada, e 1,2 mm de espessura (Martins *et al.*, 2023<sup>a</sup> e Martins *et al.*, 2023<sup>b</sup>), conforme informado no Tópico 4.2.



#### 4.5.2 Teste de Tukey

O teste proposto pelo estatístico americano John Wilder Tukey (1915-2000) compara toda discordância entre duas médias de tratamentos (RODRIGUES, 2015).

Os dados do ensaio de *Lap shear* foram submetidos ao teste de Tukey a fim de identificar diferenças significativas entre as médias. Utilizou-se o programa STATISCA 7.0. A letra “a” refere-se a maior média de resistência ao cisalhamento; letra “b” faz menção a segunda maior média; letra “c” terceira maior média; e letra “d” quarta maior média. Médias da resistência ao cisalhamento seguidas de letras iguais não diferem entre si ao nível de significância de 5% (Tukey,  $p < 0,05$ ). A análise de tal teste será efetuada no próximo capítulo.

#### 4.5.3 Modo de falha

Essa análise foi efetuada para avaliar o perfil de ancoragem dos adesivos nos diferentes preparos mecânicos na superfície do substrato. Buscou-se identificar o preparo mecânico que promoveu melhor adesão do adesivo no aderente.

O modo de falha dos corpos de prova após serem submetidos ao teste de cisalhamento (*Lap shear*) foi avaliado através da norma ISO/DIS 10365:2020(E), metodologia similar utilizada no artigo de Martins *et al.* (2023<sup>b</sup>). Visualmente as amostras foram identificadas conforme o perfil de falha exposto na Tabela 1.

#### 4.5.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura permitiu avaliar se houve a ocorrência de vazios, regiões com quantidade insuficiente de adesivo ou presença de bolhas. Tais fatores são pontos concentradores de tensão que implicam na redução da resistência da junta colada.

A superfície de fratura dos corpos de prova foi analisada em microscópio eletrônico de varredura da marca Joel e o modelo JSM-6510LV, aumento de 100 e 200× e metalização com fio de carbono através de um metalizador da marca DENTON VACUUM, modelo DESK V.



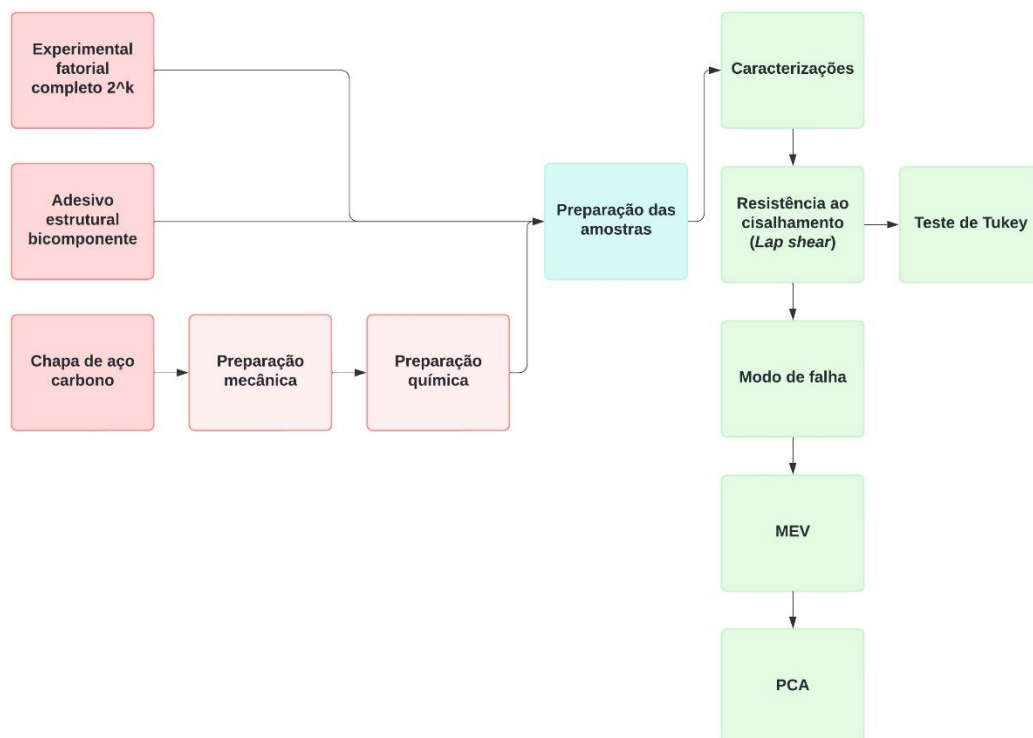
#### 4.5.5 Análise de Componentes Principais (PCA)

O PCA, sigla em inglês para Principal Component Analysis, refere-se a uma ferramenta estatística que relata a estrutura de variância e covariância de um conjunto de variáveis ou dimensões, através de combinações lineares (ROSSI, 2017). Os dados resultantes têm seus componentes mais relevantes no eixo principal. Tal técnica serve para agrupar e classificar dados, sendo considerada uma das primeiras ferramentas de aprendizado de máquina. Grosso modo, consiste num método não supervisionado de reconhecimento de padrões usado quando se tem uma razoável quantidade de dados (ou ainda de variáveis). É uma técnica de enorme utilidade pois permite uma melhor visualização de características fornecidas pelos dados.

Para esta análise quantitativa, foram utilizados 28 dados de sete variáveis, a saber: formulação, espessura, preparação, tipo de adesivo, média, característica (sigla) e modo de falha. Utilizou-se o software, software OriginPro®, desenvolvido pela OriginLab®.

O fluxograma abaixo (Figura 28) demonstra, em resumo, a metodologia utilizada neste estudo, conforme descrito nos itens anteriores

Figura 28: Resumo da metodologia desenvolvida neste estudo.



Fonte: (Autoria própria).



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo descreve o desempenho das formulações apresentadas na Tabela 8 por resistência ao cisalhamento (*Lap shear*) e avaliação das médias por teste de Tukey, modo de falha conforme norma ISO/DIS 10365:2020(E), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise de componentes principais (PCA).

### 5.1 Resistência ao cisalhamento (*Lap shear*)

Silva *et al.* (2009) relataram que a espessura do adesivo tem um efeito importante na resistência da junta. Grant *et al.* (2008) *apud* Silva *et al.* (2009) explicaram a influência da espessura do adesivo com o momento fletor. Os autores informaram que para uma junta sobreposta sob tensão, a tensão longitudinal da carga direta e o momento fletor na região de *overlap* criam deformações plásticas quando o aço se torna plástico e causam falha no adesivo (SILVA *et al.*, 2009). A junta sobreposta sob tensão é muito sensível à espessura do adesivo (SILVA *et al.*, 2009). Há uma tensão longitudinal da carga direta junto com uma tensão de flexão adicional devido ao deslocamento da carga que é sobreposta à tensão de tração (SILVA *et al.*, 2009). Para atingir o mesmo nível de tensão, à medida que o momento fletor aumenta, menor deve ser a tensão devido à carga direta (SILVA *et al.*, 2009). À medida que a espessura da linha de ligação aumenta, há um aumento na tensão de flexão, pois o momento de flexão aumenta (SILVA *et al.*, 2009). Portanto, a resistência da junta é reduzida.

Além disso, os autores reportam que para aderentes de baixa resistência, um aumento na espessura é positivo, pois o aderente se torna mais forte e menos propenso a se deformar plasticamente. Em contrapartida, para aderentes de alta resistência, uma espessura maior pode diminuir a resistência da junta devido ao aumento do momento fletor (SILVA *et al.*, 2009).

Para investigar os efeitos da tensão em diferentes adesivos com diversas espessuras foram necessárias análises estatísticas. Os resultados obtidos por teste de Tukey estão dispostos a seguir.

A Tabela 9 mostra os valores de média em MPa da resistência ao cisalhamento após análise por teste de Tukey. No adesivo acrílico, observou-se que as formulações com substrato metálico preparado mecanicamente com Bristle Blaster®, F1 a F3 e F5, independente da



espessura da camada adesiva, não apresentaram resistência média significativamente diferente, ou seja, a espessura não foi um parâmetro influenciador nas amostras preparadas mecanicamente com Bristle Blaster®. As amostras F4, F6 e F7 não diferiram entre si.

Avaliando a resistência média ao cisalhamento por Tukey das formulações preparadas com lixa, nenhuma das amostras apresentaram média de resistência estatisticamente significativa.

A letra “a” refere-se a maior média de resistência ao cisalhamento; a letra “b” a segunda maior média. As médias seguidas de letras iguais (a,b) na mesma coluna não diferem entre si ao nível de significância de 5% (Tukey,  $p < 0,05$ ).

Do bloco de amostras representado na Tabela 9 a formulação F13 (lixa) foi a que obteve o melhor desempenho frente as amostras F4, F6 e F7 (Bristle Blaster®), pois a F13 obteve a maior média (a) frente as amostras supracitadas (b). As demais amostras não divergem entre si ao nível de significância de 5% (Tukey,  $p < 0,05$ ).

Tabela 9: Valores de média (MPa) da resistência ao cisalhamento das juntas simples com adesivo acrílico nas preparações mecânicas Bristle Blaster® e lixa após análise por teste de Tukey.

Formulação	Espessura (mm)	Tipo de preparação	Tipo de adesivo	Média (MPa)
F1	0,25	Bristle Blaster®	Acrílico	11,08 <b>ba</b>
F2	0,50	Bristle Blaster®	Acrílico	11,56 <b>ba</b>
F3	0,10	Bristle Blaster®	Acrílico	11,94 <b>ba</b>
F4	0,50	Bristle Blaster®	Acrílico	10,88 <b>b</b>
F5	0,10	Bristle Blaster®	Acrílico	11,20 <b>ba</b>
F6	0,25	Bristle Blaster®	Acrílico	10,71 <b>b</b>
F7	0,25	Bristle Blaster®	Acrílico	10,50 <b>b</b>
F8	0,25	<b>Lixa 360 e 600</b>	Acrílico	12,97 <b>ba</b>
F9	0,10	<b>Lixa 360 e 600</b>	Acrílico	13,20 <b>ba</b>
F10	0,50	<b>Lixa 360 e 600</b>	Acrílico	11,65 <b>ba</b>
F11	0,50	<b>Lixa 360 e 600</b>	Acrílico	13,05 <b>ba</b>
F12	0,10	<b>Lixa 360 e 600</b>	Acrílico	12,85 <b>ba</b>
F13	0,25	<b>Lixa 360 e 600</b>	Acrílico	13,95 <b>a</b>
F14	0,25	<b>Lixa 360 e 600</b>	Acrílico	12,56 <b>ba</b>

Fonte: (Autoria própria).

No estudo desenvolvido por Almeida *et al.* (2019) os autores avaliaram três espessuras de um adesivo bicomponente acrílico nos valores de 0,8 mm, 1,50 mm e 3,00 mm em dois tipos de aço e em um tipo de alumínio. A pesquisa mostrou uma relação linear decrescente dos valores de tensão na ruptura das juntas com o aumento da espessura dos adesivos, mesmo



em diferentes substratos. Gleich *et al.* (2001) descreveram que as tensões adesivas médias diminuem com o aumento da espessura da linha de união e o pico de cisalhamento e as tensões de descascamento elevam-se com o aumento da espessura da linha de adesão. Porém, no presente estudo, essa característica não foi observada ao avaliar o adesivo acrílico.

Esperava-se uma resistência maior após preparação das amostras com Bristle Blaster<sup>®</sup>, já que tal ferramenta tem a função de contribuir com um perfil de rugosidade, permitindo a melhor ancoragem do adesivo no aderente. Uma hipótese para essa ocorrência foi a degradação do adesivo acrílico devido a entrada de vapor de água (Figura 29). Relatado por Ebnesajjad (2009) *apud* Mandolfino *et al.* (2018), a força adesiva reduz com maior intensidade em um ambiente onde há a presença de vapor aquoso do que em imersão em água, pois o vapor tem uma infiltração muito mais rápida. Sabe-se que a interface adesivo – aderente representa o ponto mais delicado da junta colada e geralmente os tratamentos de superfície tendem a retardar a degradação da resistência adesiva em ambientes úmidos.

O substrato utilizado apresentava espessura de 1,2 mm, e ao ser aplicado o Bristle Blaster<sup>®</sup>, observou-se certo empenamento na chapa em alguns corpos de prova, que pode ter permitido a entrada de vapor de água do ambiente (Figura 29). As formulações com algum índice de degradação perceptível foram refeitas. Nas amostras adesivadas com epóxi não foi observado tal perfil de degradação a olho nu.

Figura 29: Degradação do adesivo, indicado pelas setas vermelhas, devido ao perfil de empenamento após preparação com Bristle Blaster<sup>®</sup> nas juntas com adesivo acrílico.



Fonte: (Autoria própria).



Os resultados com as duas preparações mecânicas estudadas em juntas coladas com adesivo epóxi estão apresentados na Tabela 10.

Para a preparação mecânica com Bristle Blaster® notou-se que a F17 (a), com 0,1 mm de espessura da camada adesiva diferiu estatisticamente das amostras F15 (0,25 mm de espessura), F16 (0,5 mm de espessura) e F18 (0,5 mm de espessura), apresentando resistência ao cisalhamento mais elevada. Para as formulações preparadas com lixa, a F17, de preparação mecânica com Bristle Blaster®, obteve média de resistência estatisticamente superior a praticamente todas as amostras, com exceção apenas da F23 (0,1 mm de espessura da camada adesiva e preparação com lixa).

Avaliando as amostras preparadas por lixa, a média de resistência das amostras não se distingue entre si.

Tabela 10: Valores de média (MPa) da resistência ao cisalhamento das juntas simples com adesivo epóxi nas preparações mecânicas Bristle Blaster® e lixa após análise por teste de Tukey.

<b>Formulação</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Tipo de preparação</b>	<b>Tipo de adesivo</b>	<b>Média (MPa)</b>
F15	0,25	Bristle Blaster®	Epóxi	11,90 <b>b</b>
F16	0,50	Bristle Blaster®	Epóxi	13,02 <b>b</b>
F17	0,10	Bristle Blaster®	Epóxi	18,63 <b>a</b>
F18	0,50	Bristle Blaster®	Epóxi	11,91 <b>b</b>
F19	0,10	Bristle Blaster®	Epóxi	17,00 <b>ba</b>
F20	0,25	Bristle Blaster®	Epóxi	14,10 <b>ba</b>
F21	0,25	Bristle Blaster®	Epóxi	16,56 <b>ba</b>
F22	0,25	<b>Lixa 360 e 600</b>	Epóxi	12,97 <b>b</b>
F23	0,10	<b>Lixa 360 e 600</b>	Epóxi	14,18 <b>ba</b>
F24	0,50	<b>Lixa 360 e 600</b>	Epóxi	12,23 <b>b</b>
F25	0,50	<b>Lixa 360 e 600</b>	Epóxi	12,02 <b>b</b>
F26	0,10	<b>Lixa 360 e 600</b>	Epóxi	11,74 <b>b</b>
F27	0,25	<b>Lixa 360 e 600</b>	Epóxi	12,32 <b>b</b>
F28	0,25	<b>Lixa 360 e 600</b>	Epóxi	12,86 <b>b</b>

Fonte: (Autoria própria).

Os dados de média de cisalhamento das juntas coladas com mesma preparação mecânica, Bristle Blaster®, estão demonstrados na Tabela 11.

É válido lembrar que a letra “a” menciona a maior média de resistência ao cisalhamento; letra “b” segunda maior média; letra “c” terceira maior média; e letra “d” quarta maior média. Médias da resistência ao cisalhamento seguidas de letras iguais não são diferentes entre si ao nível de significância de 5% (Tukey,  $p < 0,05$ ).



Buscou-se avaliar qual adesivo estrutural bicomponente apresentou resistência média ao cisalhamento estatisticamente significativa. Dentre as amostras, a formulação F17, com 0,1 mm de espessura, apresentou a maior média ao nível de significância de 95%, com exceção apenas das formulações F19 (0,1 mm de espessura), F20 (0,25 mm de espessura) e F21 (0,25 mm de espessura), que apresentaram média similar à F17. As quatro amostras foram adesivadas com epóxi.

Tabela 11: Valores de média (MPa) da resistência ao cisalhamento das juntas simples com adesivo acrílico e epóxi na preparação mecânica Bristle Blaster® após análise por teste de Tukey.

<b>Formulação</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Tipo de preparação</b>	<b>Tipo de adesivo</b>	<b>Média (MPa)</b>
F1	0,25	Bristle Blaster®	<b>Acrílico</b>	11,08 d
F2	0,50	Bristle Blaster®	<b>Acrílico</b>	11,55 d
F3	0,10	Bristle Blaster®	<b>Acrílico</b>	11,94 d
F4	0,50	Bristle Blaster®	<b>Acrílico</b>	10,88 d
F5	0,10	Bristle Blaster®	<b>Acrílico</b>	11,20 d
F6	0,25	Bristle Blaster®	<b>Acrílico</b>	10,71 d
F7	0,25	Bristle Blaster®	<b>Acrílico</b>	10,50 d
F15	0,25	Bristle Blaster®	<b>Epóxi</b>	11,90 d
F16	0,50	Bristle Blaster®	<b>Epóxi</b>	13,02 dcb
F17	0,10	Bristle Blaster®	<b>Epóxi</b>	18,63 a
F18	0,50	Bristle Blaster®	<b>Epóxi</b>	11,91 dc
F19	0,10	Bristle Blaster®	<b>Epóxi</b>	17,00 ba
F20	0,25	Bristle Blaster®	<b>Epóxi</b>	14,10 dcba
F21	0,25	Bristle Blaster®	<b>Epóxi</b>	16,56 cba

Fonte: (Autoria própria).

A Tabela 12 demonstra os valores médios de resistência ao cisalhamento das amostras com adesivo acrílico e epóxi após preparação por lixa. Conforme já citado, médias seguidas de mesma letra na coluna resulta que estas não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de significância de 0,05. Portanto, para a preparação mecânica com lixa, independente do adesivo, a média de valores foram similares.

Tabela 12: Valores de média (MPa) da resistência ao cisalhamento das juntas simples com adesivo acrílico e epóxi na preparação mecânica lixa após análise por teste de Tukey.

<b>Formulação</b>	<b>Espessura (mm)</b>	<b>Tipo de preparação</b>	<b>Tipo de adesivo</b>	<b>Média (MPa)</b>
F8	0,25	Lixa 360 e 600	<b>Acrílico</b>	12,97 a
F9	0,10	Lixa 360 e 600	<b>Acrílico</b>	13,20 a
F10	0,50	Lixa 360 e 600	<b>Acrílico</b>	11,65 a



F11	0,50	Lixa 360 e 600	<b>Acrílico</b>	13,05 a
F12	0,10	Lixa 360 e 600	<b>Acrílico</b>	12,85 a
F13	0,25	Lixa 360 e 600	<b>Acrílico</b>	13,95 a
F14	0,25	Lixa 360 e 600	<b>Acrílico</b>	12,56 a
F22	0,25	Lixa 360 e 600	<b>Epóxi</b>	12,97 a
F23	0,10	Lixa 360 e 600	<b>Epóxi</b>	14,18 a
F24	0,50	Lixa 360 e 600	<b>Epóxi</b>	12,23 a
F25	0,50	Lixa 360 e 600	<b>Epóxi</b>	12,02 a
F26	0,10	Lixa 360 e 600	<b>Epóxi</b>	11,74 a
F27	0,25	Lixa 360 e 600	<b>Epóxi</b>	12,32 a
F28	0,25	Lixa 360 e 600	<b>Epóxi</b>	12,86 a

Fonte: (Autoria própria).

Portanto, por meio do teste de Tukey ao nível de significância de 0,05 foi possível analisar as 28 formulações desenvolvidas e verificar se suas médias são estatisticamente iguais ou diferentes, mostrando o desempenho das amostras quando as diferentes espessuras e tipos de preparação mecânica estudados.

## 5.2 Modo de falha

Uma ligação adesiva eficiente busca transmitir carga entre os dois componentes ligados, permitindo que sua integridade estrutural sob esforços e condições ambientes adversas (SILVA *et al.*, 2007).

Existem dois métodos predominantes de falhas em juntas adesivadas, sendo elas: falha adesiva e falha coesiva. A falha adesiva refere-se a falha na interface entre o aderente e o adesivo. Já a coesiva concerne a falha dentro do adesivo ou em um dos aderentes (PETRIE, 2000). A falha coesiva do adesivo ocorre quando a fratura por estresse dentro do material adesivo permite que uma camada de adesivo permaneça em ambos os substratos, revelando que a fixação do adesivo ao substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo (PETRIE, 2000). Quando o aderente falha antes do adesivo e a área da junta permanece intacta, chama-se de falha coesiva do aderente (PETRIE, 2000).

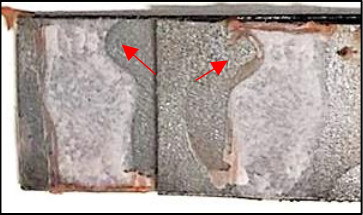




Geralmente, a falha coesiva do adesivo ou do aderente é considerada o melhor perfil de falha, visto que a resistência máxima do material na junta foi alcançada (PETRIE, 2000; EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015). Todavia, o modo de falha não deve ser o único critério utilizado para avaliar uma junta. A resistência de uma junta é um critério mais importante do



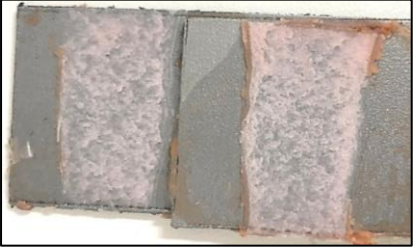
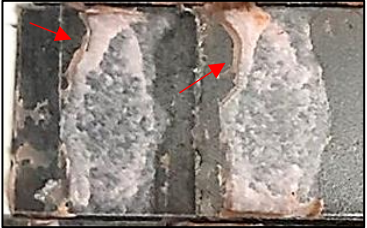



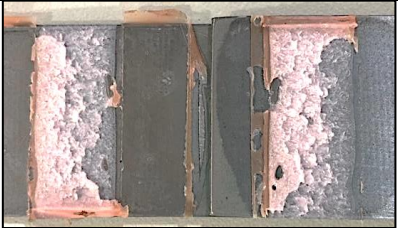
que o modo de falha, mas, uma análise do modo de falha, no entanto, pode ser uma análise significativamente útil para determinar se a falha foi devido a uma camada limite fraca ou devido à preparação inadequada da superfície (PETRIE, 2000; EBNESAJJAD e LANDROCK, 2015).

O modo de falha observado nas formulações estudadas está demonstrado na Tabela 13 e teve como base a norma ISO/DIS 10365:2020(E).

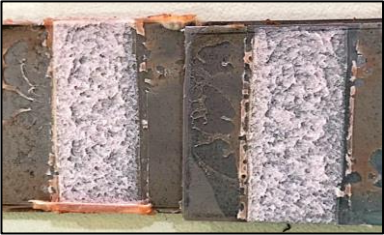

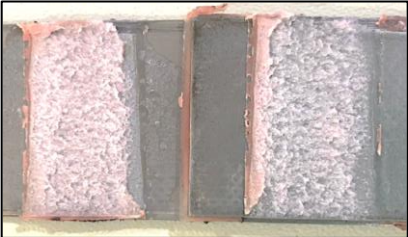


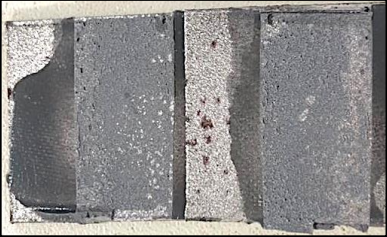
Tabela 13: Modo de falha observado nas formulações desenvolvidas.

Formulação	Modo de falha
F1 (0,25 mm, acrílico e Bristle Blaster®)	 <p>Falha Coesiva; observou-se degradação do adesivo da região direita (seta vermelha).</p>
F2 (0,5 mm, acrílico e Bristle Blaster®)	 <p>Falha coesiva especial</p>
F3 (0,1 mm, acrílico e Bristle Blaster®)	 <p>Falha coesiva especial</p>
F4 (0,5 mm, acrílico e Bristle Blaster®)	 <p>Falha coesiva especial</p>
F5 (0,1 mm, acrílico e Bristle Blaster®)	 <p>Falha coesiva</p>

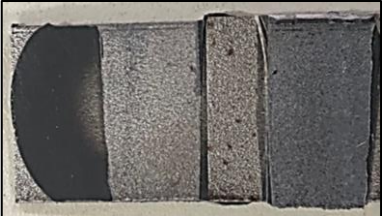

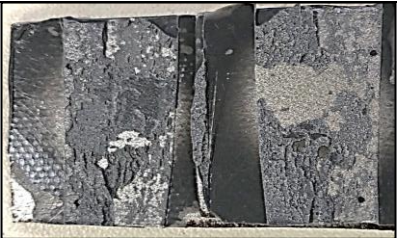

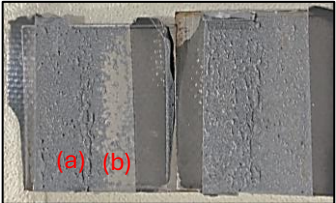
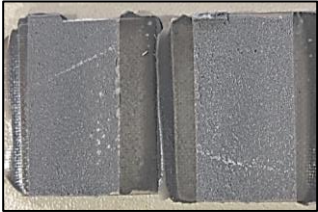


F6 (0,25 mm, acrílico e Bristle Blaster®)	 <p>Falha coesiva</p>
F7 (0,25 mm, acrílico e Bristle Blaster®)	 <p>Falha coesiva especial; observou-se degradação do adesivo da região direita (seta vermelha).</p>
F8 (0,25 mm, acrílico e lixa)	 <p>Falha coesiva</p>
F9 (0,1 mm, acrílico e lixa)	 <p>Falha coesiva</p>
F10 (0,5 mm, acrílico e lixa)	 <p>Falha coesiva especial</p>
F11 (0,5 mm, acrílico e lixa)	 <p>Falha coesiva especial</p>



F12 (0,1 mm, acrílico e lixa)	 <p>Falha coesiva</p>
F13 (0,25 mm, acrílico e lixa)	 <p>Falha coesiva especial</p>
F14 (0,25 mm, acrílico e lixa)	 <p>Falha coesiva especial</p>
F15 (0,25 mm, epóxi e Bristle Blaster®)	 <p>Falha adesiva</p>
F16 (0,5 mm, epóxi e Bristle Blaster®)	 <p>Falha adesiva</p>
F17 (0,1 mm, epóxi e Bristle Blaster®)	 <p>Falha coesiva</p>



F18 (0,5 mm, epóxi e Bristle Blaster®)	 <p>Falha adesiva</p>
F19 (0,1 mm, epóxi e Bristle Blaster®)	 <p>Falha coesiva</p>
F20 (0,25 mm, epóxi e Bristle Blaster®)	 <p>Falha adesiva</p>
F21 (0,25 mm, epóxi e Bristle Blaster®)	 <p>Falha adesiva</p>
F22 (0,25 mm, epóxi e lixa)	 <p>Falha coesiva especial (a) / Falha adesiva (b)</p>
F23 (0,1 mm, epóxi e lixa)	 <p>Falha coesiva</p>



F24 (0,5 mm, epóxi e lixa)	
F25 (0,5 mm, epóxi e lixa)	
F26 (0,1 mm, epóxi e lixa)	
F27 (0,25 mm, epóxi e lixa)	
F28 (0,25 mm, epóxi e lixa)	

Fonte: (Autoria própria).

Notou-se que as amostras adesivadas com acrílico não apresentaram falha adesiva, independente da espessura do adesivo. Já para os corpos de prova unidos com epóxi sete amostras obtiveram falha adesiva e três falhas mista (parte coesiva e parte adesiva), portanto, grande parte dos corpos de prova não alcançaram falha coesiva. Como já citado acima, a falha coesiva é o perfil de falha que se deseja alcançar, pois demonstra que se obteve a resistência máxima do adesivo na junta. Neste estudo, o adesivo acrílico atingiu o melhor resultado quando avaliado o seu perfil de falha.

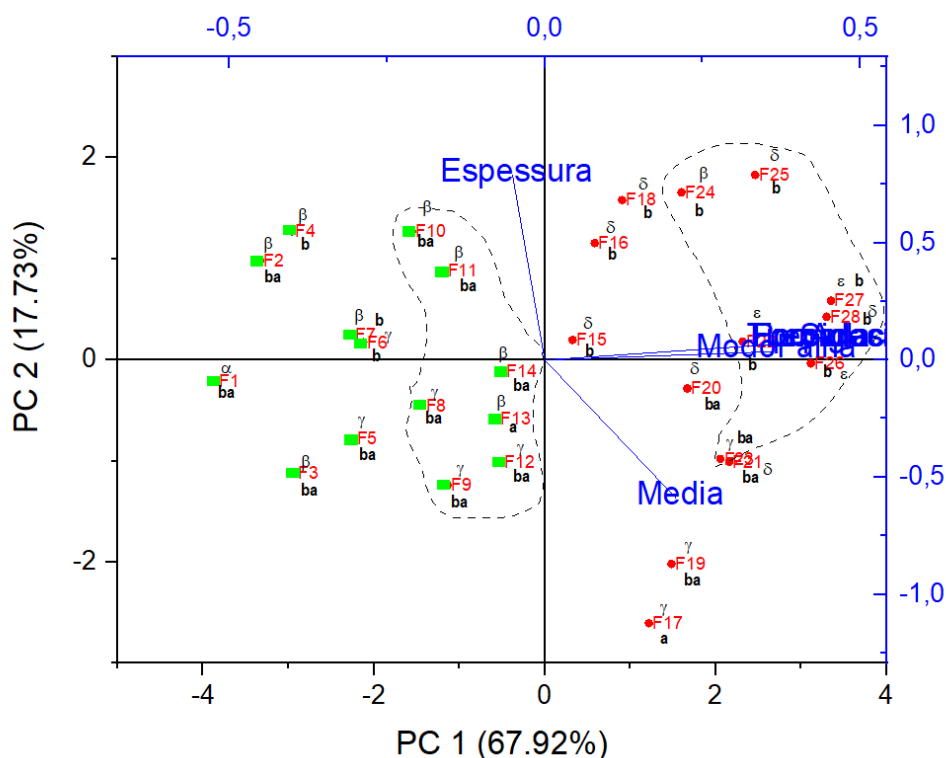


### 5.3 Análise de Componentes Principais (PCA)

A aplicação da PCA permitiu identificar as principais variáveis em um conjunto de dados multidimensional e visualizar interrelações tendo como base as Tabelas Tabela 9 e Tabela 10. Seguindo o procedimento apresentado na metodologia, e de acordo com Hair *et al.* (2019), apenas os fatores com autovalores superiores a um (1) foram considerados significativos, vinculados as duas primeiras componentes (4,75441 e 1,24107, respectivamente), estes baseados numa matriz de correlação. Vale lembrar que a soma dos autovalores resultou em 7.

A Figura 30 mostra claramente que os dados de 28 amostras são separados pelos dois tipos de adesivos: acrílico (quadrados verdes, ■) e epóxi (círculos vermelhos, ●) usando da técnica de PCA. Tal procedimento reduziu sete variáveis: formulação ( $Z_1$ ), espessura ( $Z_2$ ), preparação de amostra ( $Z_3$ ), tipo de adesivo ( $Z_4$ ), média ( $Z_5$ ), classificação ( $Z_6$ ), e modo de falha ( $Z_7$ ), para apenas duas componentes, representando 85,65% dos dados, sendo que a primeira componente ( $PC_1$ ) representa 67,92% dos dados e a segunda ( $PC_2$ ), representa 17,73% dos dados.

Figura 30: Biplot da aplicação da técnica de componentes principais (PCA) aos dois tipos de adesivos: acrílico (quadrados verdes, ■, no segundo e terceiro quadrantes) e epóxi (círculos vermelhos, ●, no primeiro e quarto quadrantes).







As linhas tracejadas englobam, entre as amostras numeradas F1 a F28, aquelas com tipo de preparação usando lixas 360 e 600. Todos os pontos externos as linhas tracejadas correspondem a materiais tratados superficialmente com Bristle Blaster®. Os índices **a**, **b** e **ba**, estão vinculados as médias dos dados, assim como as siglas gregas a tipos de falha, a saber:  $\alpha$  (falha coesiva com degradação),  $\beta$  (falha coesiva especial),  $\gamma$  (falha coesiva),  $\delta$  (falha adesiva),  $\varepsilon$  (falhas coesiva e adesiva), conforme indicados nas Tabelas Tabela 9 e Tabela 10.

A aplicação da técnica PCA pôde capturar, portanto, correlações entre diferentes variáveis. A PC<sub>1</sub> pode ser representada majoritariamente pelas variáveis formulação (Z<sub>1</sub>), preparação de amostra (Z<sub>3</sub>), tipo de adesivo (Z<sub>4</sub>) e classificação (Z<sub>6</sub>) que apresentam, em modulo, os maiores coeficientes. Dito de outra forma, PC<sub>1</sub> será tanto maior quanto assim forem Z<sub>1</sub>, Z<sub>3</sub>, Z<sub>4</sub> e Z<sub>6</sub>, que podem ser consideradas predominantes em termos das demais variáveis, representando assim 67,92% dos dados, e visualmente mostrada na Figura 30. A variável Z<sub>2</sub>, negativa, significa que contribui diminuindo PC<sub>1</sub>, mas sem ser muito decisiva.

$$PC_1 = 0,45376Z_1 - 0,05107Z_2 + 0,45376Z_3 + 0,45376Z_4 + 0,20845Z_5 + 0,45376Z_6 + 0,36103Z_7 \quad (8)$$

Já a PC<sub>2</sub> pode ser representada majoritariamente pelas variáveis espessura (Z<sub>2</sub>) por representar o maior coeficiente. Dito de outra forma, PC<sub>2</sub> será tanto maior quanto assim for Z<sub>2</sub>, que pode ser considerada predominante em termos das demais variáveis, representando assim 17,73% dos dados, e visualmente mostrada na Figura 30. A variável Z<sub>5</sub>, vinculada a média, também influencia, mas diminuindo PC<sub>2</sub>.

$$PC_2 = 0,083Z_1 + 0,78884Z_2 + 0,083Z_3 + 0,083Z_4 - 0,59069Z_5 + 0,0893Z_6 + 0,03537Z_7 \quad (9)$$

Notou-se ainda um padrão característico entre as amostras com adesivo acrílico e epóxi. Como já citado as amostras identificadas na Figura 30 com quadrados verdes, , mencionam juntas adesivadas com acrílico, já com círculos vermelhos, , epóxi. Todas as formulações com epóxi localizaram-se à direita do gráfico e com acrílico à esquerda. Portanto, dentre as sete variáveis analisadas, têm-se um padrão característico para as juntas adesivadas com acrílico bem como as adesivadas com epóxi claramente distinguidas na Figura 30.



## 5.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

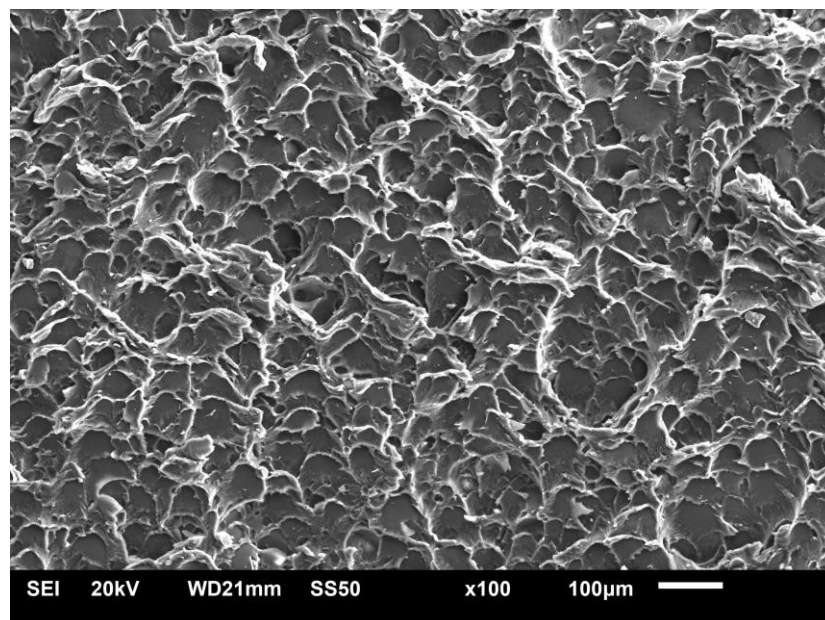
A análise da superfície da fratura consiste em uma metodologia que avalia a qualidade das juntas adesivas após fratura. A presença de vazios, fraca adesão, contaminantes e regiões com quantidade insuficiente de adesivo, podem ser detectados através de MEV.

No estudo desenvolvido por Iamanaka *et al.* (2017), onde foi avaliado o comportamento de fratura entre adesivos de base química acrílicos e epóxi, foi relatado, em termos de resistência ao cisalhamento que, no adesivo acrílico, o efeito da triaxialidade de tensão na resistência é pequeno em comparação ao adesivo epóxi. Em suma, as imagens MEV dos autores indicaram que a deformação da superfície de fratura com adesivo acrílico é maior, portanto, mais dúctil, do que com adesivo epóxi, independentemente do padrão de carga. Esta característica foi notada na análise de MEV realizada neste trabalho.

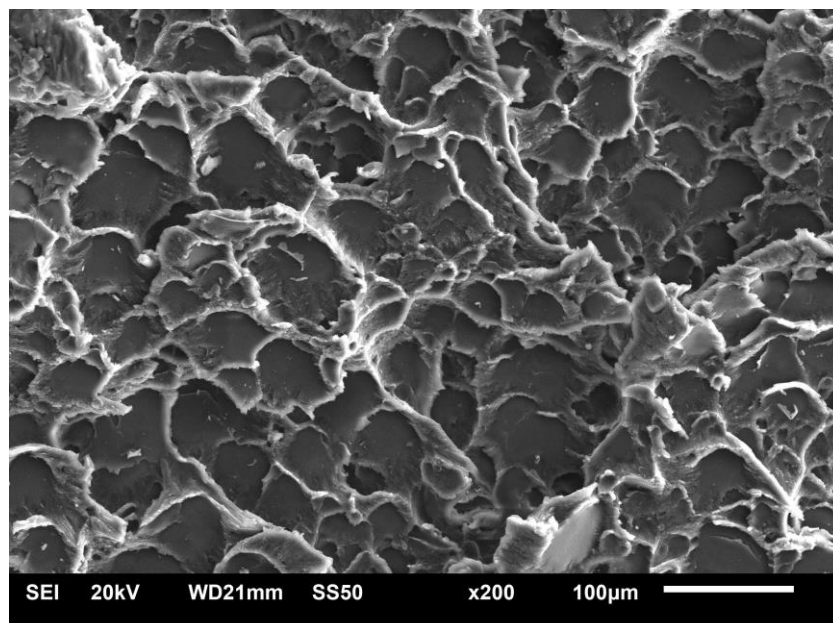
As formulações que obtiveram melhor desempenho foram analisadas por MEV, foram: F13 (0,25 mm, acrílico e lixa) e F17 (0,1 mm, epóxi e Bristle Blaster®).

A Figura 31 mostra as micrografias da amostra F13.

Figura 31: Microscopia eletrônica de varredura da F13 em 100 e 200 vezes.





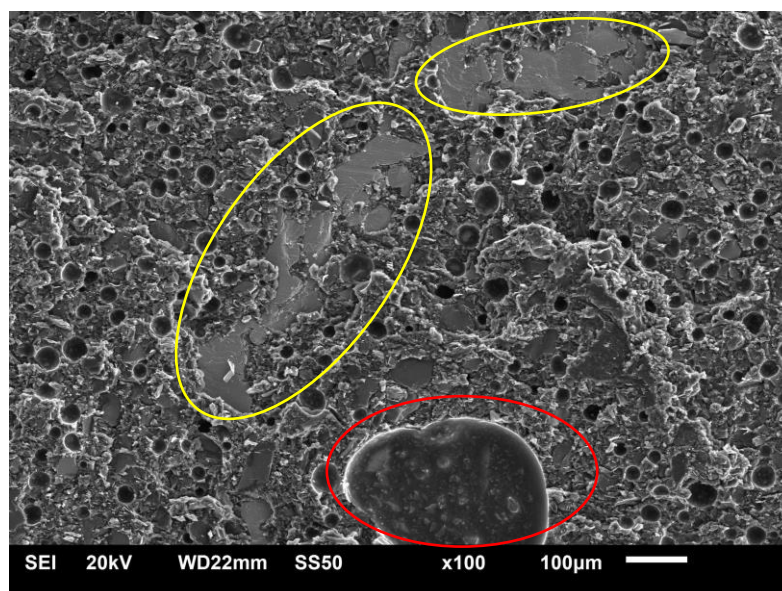


Fonte: (Autoria própria).

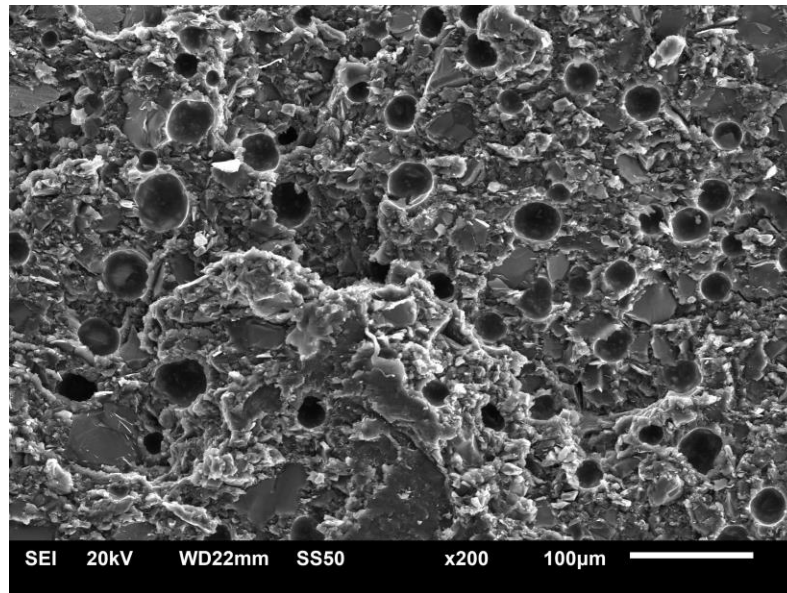
Notou-se a presença de deformação da superfície característico de fratura dúctil. Além disso, não sendo observado regiões com quantidade insuficiente de adesivo, e a predominância notada foi de falha coesiva, conforme descrito na Tabela 13.

Na Figura 32 têm-se as imagens da superfície de fratura da F17.

Figura 32: Microscopia eletrônica de varredura da F17 em 100 e 200 vezes.







Fonte: (Autoria própria).

Diferente da amostra F13, a superfície de fratura demonstra ser mais rígida quando comparada a micrografia anterior. Notou-se ainda presença significativa de vazios em formato esférico. Na ficha técnica do adesivo epóxi é informado a existência de esferas de vidro para controlar a espessura da linha de colagem do adesivo (Technical Data Sheet Parker LORD, 2021) e estas explicam a fonte de poros na imagem, bastante regulares. Além disso, foi visto a presença de a bolha (destaque em vermelho) e uma região onde o adesivo foi arrancado do substrato metálico (destaque em amarelo). Müller *et al.* (2018) relatara que existem distintas razões para as inclusões de ar, comumente elas podem ficar presas no adesivo durante a aplicação ou geradas pelo próprio processo de prensagem. Tahani e Yousefsani (2015) destacaram que a ausência de adesivo na forma de vazio é um defeito físico comum que reduz a resistência, a vida útil e a confiabilidade da junta devido ao aumento das concentrações de tensão.

Em uma análise do modo de fratura desta amostra verificou-se uma falha predominantemente coesiva, conforme pode ser visto na Tabela 13, mas, apesar de ter sido visualizado na micrografia certas regiões com deslocamento do adesivo no substrato, estas, porém, não foram predominantes.



## 6. CONCLUSÕES

Este estudo buscou avaliar a influência de três espessuras de adesivos estruturais bicomponentes acrílico e epóxi em juntas simples sobrepostas. O substrato de aço carbono foi preparado mecanicamente por lixa e Bristle Blaster®. A média de resistência ao cisalhamento (*lap shear*) após avaliada pelo teste de Tukey, ao nível de significância de 5%, mostrou que as formulações F13, com 0,25 mm de espessura do adesivo acrílico, substrato preparado por lixa 360 e 600, e F17, 0,1 mm de espessura do epóxi com preparação por Bristle Blaster® foram as que apresentaram as melhores médias de resistência ao cisalhamento. Para as médias de resistência ao cisalhamento após preparação com lixa 360 e 600 adesivados com acrílico e epóxi notou-se que a espessura e o tipo de adesivo não influenciaram na resistência mecânica ao cisalhamento, pois a média de valores foram similares. Adesivos acrílicos são mais tolerantes a preparação de superfície. Assim, possivelmente o adesivo epóxi, mais sensíveis a preparação superficial, não conseguiu desempenhar uma boa ancoragem na junta.

O modo de falha predominante das amostras adesivadas com acrílico foi coesivo, independente da espessura do adesivo. Os substratos ligados com epóxi, sete corpos de prova apresentaram falha adesiva e três falha mista (parte coesiva e parte adesiva), sendo assim, grande parte destas não alcançaram falha coesiva, modo de falha mais almejado.

Ao analisar a superfície de fratura no microscópio eletrônico de varredura da amostra F13 observou-se superfície com características de fratura dúctil. Para a F17 notou-se a presença significativa de vazios em formato esférico e um perfil de fratura mais frágil, quando comparado com a amostra anterior. Em ambos os casos, não foi observado a presença de regiões com quantidade insuficiente de adesivo.

A análise por componentes principais correspondeu a uma nova proposta de compreensão e visualização de dados relativamente complexos, agrupando e associando variáveis e propriedades que mostraram correlações insuspeitas, sendo possível mapear as 28 amostras facilmente, auxiliando numa melhor compreensão dos dados. Os resultados confirmaram que a PCA pode encontrar um conjunto reduzido de apenas duas PCs úteis para entender os parâmetros mais relevantes. Esses PCs estão mais relacionados às variáveis formulação, preparação de amostra, tipo de adesivo e classificação para PC1; e espessura e média de resistência ao cisalhamento para PC2, na ordem, abrangendo 85,65% da variância total, capturando assim a maior parte das informações dos dados originais.



## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Fabricação de um molde para delimitar o *overlap* e espessura da camada adesiva, visto que nesse trabalho a aplicação foi manual.
- Avaliação em substrato de aço carbono de maior espessura.
- Realização de uma análise de *Digital Image Correlation* (Correlação de Imagens Digitais).
- Avaliação dos adesivos estudados em outras ligas metálicas, além de considerar outros tipos de adesivos.



## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. T. de; SOUZA, J.H.C. de; MAEHLER, P. D.; SIMON, T. R. Efeito da espessura do adesivo no comportamento mecânico de juntas adesivas para aplicação automotiva. **Tecnol. Metal. Mater. Min.**, vol.16, n2, p.228-238, 2019.
- ALMEIDA, S. A. da C. **Análise Computacional de Juntas Adesivas Simples e Duplas em Materiais Compósitos**. 2012. 226 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 2012.
- AMARAL, F. F. S. **Estudo numérico de juntas adesivas com materiais hiperelásticos**. 2018. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Instituto Politécnico de Bragança. 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, “**ASTM D 1002 Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)**.” 1999.
- ANUNCIAÇÃO, S. **Aviões mais leves e seguros**. Jornal da Unicamp. Campinas, 2012.
- BAMBERG, P. de A. M. G. e P. **Study of the Mechanical Characterization of Dissimilar and Similar Single Lap Joints Bonded by Epoxy Structural Adhesive: An experimental approach**. 2016. 105 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial - GETEC) – Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC. Salvador. 2016.
- BRANDÃO, M. R. G. P. **Avaliação do Desempenho de Colas Hot-Melt para Embalagens Alimentares**. 2012. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade de Aveiro. 2012.
- CARBAS, R. J. C. **Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi**. 2008. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Porto. 2008.
- COGNARD, P. **Adhesives and Sealants General Knowledge, Application Techniques, New Curing Techniques Handbook of Adhesives and Sealants**. Volume 2. Elsevier, 2006.



DUNN, D. J. **Adhesives and Sealants: Technology, Applications and Market**. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, SY4 4NR, UK. Rapra Technology, 2003.

DUPRÉ, V. A. **Théorie Mécanique de la Chaleur**. Gauthier-Villars, Paris, 484 p, 1869.

EBNESAJJAD, S., LANDROCK, A. H. **Adhesives Technology Handbook**, Third edition. Oxford: Elsevier, 2015.

FANTON, F. **Análise de estruturas aeronáuticas reforçadas por doublers colados**. 2012. 243 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2012.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P. **Data Science for Business and Decision Making**. Academic Press: Cambridge, 2019.

FÁVERO, L. P.; BELFIORE, P. **Manual de análise de dados**. LTC: Rio de Janeiro, 2020.

GALTON, F. Kinship and Correlation. **North American Review**, v. 150, p. 419-431, 1890.

GLEICH, D.M., VAN TOOREN, M.J.L., BEUKERS, A. Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures. **J. Adhes. Sci. and Technol.**, 15(9), 1091–1101, 2001.

GRACO INC. **Engineering handbook**. Ohio. 2011.

HAIR, J. F., BLACK, W. C., BABIN, B. J., ANDERSON, R. E. **Multivariate Data Analysis**. Cengage: London, 2019.

HOTELLING, H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. **Journal of Educational Psychology**, v. 24, n. 6, p. 417-441, 1933.

IMANAKA, M., LIU, X., KIMOTO, M. Comparison of fracture behavior between acrylic and epoxy adhesives. **Int. J. Adhes. Adhes.**, 75(1), 31–39, 2017.

ISO/DIS 10365:2020(E). **Adhesives – Designation of main failure patterns**. 2020.

JOLLIFFE, I. T. **Principal Component Analysis**. Springer: New York, NY, 2002.



LEWIS, G. N. **Valence and the Structure of Atoms and Molecules**. American chemical society. Monograph series. New York, New York, U.S.A.: Chemical Catalog Company, 1923.

MANDOLFINO, C., LERTORA, E., GAMBARO, C., PIZZORNI, M. **Durability of polyamide bonded joints: influence of surface pre-treatment**. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, 86, 123–130, 2018.

MARQUES, E. A. S.; CARBAS, R. J. C.; TENREIRO, A. F. G.; SILVA, L. F. M. da. **Introdução às Ligações Adesivas Estruturais**. Porto. Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda., 2021.

MARTINS, M. D. M.; NASCIMENTO, M. L. F.; PISANU, L.; BARBOSA, J. D. V. Avaliação da influência de diferentes espessuras de adesivo acrílico em juntas simples submetidas a cisalhamento. In: 24<sup>o</sup>COBEQ/19<sup>o</sup>ENBEQ, 2023, Salvador. **Anais do 24<sup>o</sup>COBEQ/19<sup>o</sup>ENBEQ, 2023<sup>a</sup>**.

MARTINS, M. D. M.; SILVEIRA, M. A.; NASCIMENTO, M. L. F.; BARBOSA, J. D. V.; PISANU, L. Evaluation of epoxy adhesive thickness in simple overlap joints subjected to lap shear. In: IX Simpósio Internacional de Inovação e Tecnologia, Salvador. 2023. **Blucher Engineering Proceedings**, p. 350. DOI: 10.5151/siintec2023-306146. 2023<sup>b</sup>.

MÜLLER, M.; TONG, Y.; FRICKE, H.; and VALLÉE, T. An efficient numerical model for the evaluation of compression flow of high-viscosity adhesives. **Int. J. Adhes. Adhes.**, 85, 251–262. 2018.

PEARSON K. On Lines and Planes of Closest Fit to Systems of Points in Space. **Philosophical Magazine**, v. 2, p. 559 - 572, 1901.

PEARSON, K. VII. Mathematical Contributions to the Theory of Evolution. III. Regression, Heredity, and Panmixia. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v. 187, p. 253 - 318, 1896.

PEIXOTO, F. L. **Aplicação do Processo de Sobreinjeção em Insertos de Termoplástico Utilizando Moldes de Fabricação Rápida**. 2009. 200 f. Tese (doutorado) - Universidade



Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis. 2009.

PETRIE, E. M. **Handbook of Adhesives and Sealants**. McGraw-Hill. 2000.

PISANU, L. **Estudo da força de adesão em polímeros dissimilares obtidos pelo processo de injeção multicomponente: Aplicações em Compósitos com Fibra de Coco**. 2018. 159 f. Tese (Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial – PEI), Universidade Federal da Bahia. 2018.

PIZZI, A., MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**. Third edition. CRC PRESS - TAYLOR & FRANCIS GROUP, 2018.

QUINI, J. G. **Adesivos estruturais uretânicos aplicados a combinações de compósitos, plásticos e metais**. 2011. 141 f. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear – Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia associada à Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011.

RODRIGUES, J. **Um estudo sobre testes de comparação de médias e sua aplicação condicional a um teste F global significativo na análise de variância**. 2015. 165 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo. Piracicaba. 2015.

ROSSI, R. G. **Análise de Componentes Principais em Data Warehouses**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 81. 2017.

SANTOS, A. F. **Avaliação do comportamento mecânico de um adesivo estrutural epóxi utilizado na indústria automobilística**. 2005. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2005.

SILVA, B. C. S., RODRIGUES, A. M., MUELLER, R., LORA, F. A., NASCIMENTO, M. L. F., PINTO, H. C., COELHO, R. S. Tribological Investigations on Tool Surfaces for Temperature-Supported Forming of Magnesium AZ31 Sheets. **Materials** v. 13, 2465, 2020; doi: 10.3390/ma13102465

SILVA, J. O. D. S. **Estudo de Juntas Adesivas em Degrau: Análise Experimental e Numérica por Modelos de Dano Coesivo**. 2018. 175 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Superior de Engenharia do Porto. 2018.



SILVA, L. F. M da, ÖCHSNER, A., ADAMS, R. D. **Handbook of Adhesion Technology**. Second. Switzerland: Springer International Publishing, 2018.

SILVA, L. F. M.; MAGALHÃES, A. G.; MOURA, M. F. S. F. **Juntas Adesivas Estruturais**. Porto, PT: Publindústria. 2007.

SILVA, L.F.M. da; CARBAS, R.J.C.; CRITCHLOW, G.W.; FIGUEIREDO, M.A.V.; BROWN, K. Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints. **Int. J. Adhes. Adhes.**; 29:621–32. 2009.

SILVEIRA, F. da; HISTER, W.; KIECKOW, F.; MACHADO, F.M.; COSTA, M.A.B.; AMARAL, F.G.; SANTOS, A.V. dos. Estudo da Aplicação de Adesivos Estruturais para Junção de Chapas de Aço Carbono: Análise da Preparação Superficial do Aderente. **Engevista**, V. 21, n.1, p.126-140, 2019.

SIKA®. **Catálogo de Produtos**. Versão 01/22.

SIKA®. **GENERAL GUIDELINE / Structural Body-In-White Bonding**. VEHICLE BODY BONDING WITH 1-COMPONENT SikaPower® ADHESIVES. April 2023.

TAHANI, M., e YOUSEFSANI, S.A. On thermomechanical stress analysis of adhesively bonded composite joints in presence of an interfacial void. **Compos. Struct.**, 130, 116 –123, 2015.

Technical Data Sheet Fusor® 380NS/383NS Adhesive. **Parker LORD**. 2021

Technical Data Sheet LORD® 850 and 852 Acrylic Adhesives. **Parker LORD**. 2020.

YOUNG, T. An Essay on the Cohesion of Fluids. **Phil. Trans. R. Soc. Lond.** 95, 65-87, 1805.



# APÊNDICE 1 – ANÁLISE QUÍMICA DO SUBSTRATO METÁLICO ESTUDADO

## WORLDWIDE ANALYTICAL SYSTEMS AG WAS Sample Testing of different Qualities

### Análise Química

Amostra / sample ID :

Material / material :

Cliente / customer :

Dimensão / dimension :

Comissão / commission :

Metais de adição / filler metals :

Labor Nr. / lab-no. : Lab. Metalografia

Tratamento térmico / heat treatment :

Data da análise / sample date :

No tratamento térmico / heat-no. :

Grau / grade :

1006

#### Espectrometro Foundry-MASTER

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Min		0,0000		0,250	0,0000	0,0000		
Max		0,0800		0,400	0,0400	0,0500		
1	99,1	H 0,118	0,0445	0,354	< 0,0009	< 0,0007	0,0342	0,0019
2	99,4	0,0508	0,0219	0,360	< 0,0009	< 0,0007	0,0269	< 0,0010
3	99,4	H 0,0871	0,0193	0,312	0,0018	0,0007	0,0233	0,0013
4	99,4	H 0,134	0,0168	0,314	0,0033	0,0010	0,0233	0,0018
5	99,4	0,0505	0,0162	0,307	0,0061	0,0016	0,0232	0,0016
6	99,4	0,0717	0,0262	0,313	0,0086	0,0023	0,0249	0,0015
Ave	99,3	H 0,0853	0,0242	0,326	0,0033	0,0009	0,0260	0,0015

	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
Min								
Max								
1	0,0064	0,177	< 0,0006	0,0068	0,0018	0,0078	< 0,0010	< 0,0080
2	0,0059	0,0647	< 0,0006	0,0052	0,0011	0,0028	< 0,0010	< 0,0080
3	0,0084	0,0504	< 0,0006	0,0065	0,0015	0,0026	< 0,0010	< 0,0080
4	0,0077	0,0427	< 0,0006	0,0066	0,0019	0,0029	< 0,0010	< 0,0080
5	0,0087	0,0458	< 0,0006	0,0081	0,0039	0,0034	< 0,0010	< 0,0080
6	0,0088	0,0705	< 0,0006	0,0072	0,0043	0,0038	< 0,0010	< 0,0080
Ave	0,0077	0,0752	< 0,0006	0,0067	0,0024	0,0039	< 0,0010	< 0,0080

	Pb	Sn	B	Ca	Zr	Bi	As	N
Min								
Max								
1	< 0,0025	0,0142	0,0020	> 0,0078	< 0,0015	< 0,0050	< 0,0010	< 0,0050
2	< 0,0025	0,0175	0,0017	0,0032	< 0,0015	< 0,0050	< 0,0010	< 0,0050
3	< 0,0025	0,0152	0,0027	0,0036	< 0,0015	< 0,0050	0,0010	< 0,0050
4	< 0,0025	0,0048	0,0009	0,0020	< 0,0015	< 0,0050	< 0,0010	0,0120
5	< 0,0025	0,0009	< 0,0003	0,0017	< 0,0015	< 0,0050	0,0010	0,0107
6	< 0,0025	0,0008	< 0,0003	0,0043	< 0,0015	< 0,0050	< 0,0010	0,0192
Ave			0,0012	> 0,0078	< 0,0015	< 0,0050	< 0,0010	0,0070

Worldwide Analytical Systems AG

Wellesweg 31

47589 Uedem (Germany)

Tel. : +49 2825 9383-0 Fax: +49 2825 9383100



APÊNDICE 2 – MÉDIA E DESVIO PADRÃO DA RUGOSIDADE DOS SUBSTRATOS  
APÓS PREPARAÇÃO MECÂNICA COM BRISTLE BLASTER®

Adesivo estrutural bicomponente epóxi			Adesivo estrutural bicomponente acrílico		
Rugosidade Ra			Rugosidade Ra		
F1	Média (µm)	DP	F15	Média (µm)	DP
Chapa 1	3,098	0,743	Chapa 1	3,638	0,334
Chapa 2	3,504	0,391	Chapa 2	3,520	0,317
Chapa 3	4,184	0,467	Chapa 3	3,878	0,469
Chapa 4	3,798	0,599	Chapa 4	3,462	0,687
Chapa 5	3,138	0,529	Chapa 5	3,868	0,358
Chapa 6	3,120	0,120	Chapa 6	4,462	0,207
Chapa 7	3,141	0,322	Chapa 7	3,880	0,540
Chapa 8	3,748	0,656	Chapa 8	3,281	0,592
Chapa 9	3,430	0,754	Chapa 9	2,887	0,350
Chapa 10	3,653	0,616	Chapa 10	3,479	0,175
F2	Média (µm)	DP	F16	Média (µm)	DP
Chapa 1	4,662	0,442	Chapa 1	3,102	0,570
Chapa 2	4,930	0,357	Chapa 2	2,462	0,492
Chapa 3	4,306	0,568	Chapa 3	3,507	0,516
Chapa 4	4,930	0,442	Chapa 4	4,295	0,349
Chapa 5	4,580	0,338	Chapa 5	3,896	0,069
Chapa 6	4,135	0,176	Chapa 6	3,348	0,317
Chapa 7	4,697	0,249	Chapa 7	3,375	0,071
Chapa 8	4,977	0,606	Chapa 8	2,929	0,326
Chapa 9	5,317	0,309	Chapa 9	2,538	0,283
Chapa 10	4,933	0,079	Chapa 10	2,741	0,432
F3	Média (µm)	DP	F17	Média (µm)	DP
Chapa 1	4,445	0,536	Chapa 1	4,658	0,678
Chapa 2	4,900	0,338	Chapa 2	4,633	0,410
Chapa 3	4,349	0,544	Chapa 3	4,245	0,196
Chapa 4	4,115	0,195	Chapa 4	4,517	0,407
Chapa 5	4,974	0,320	Chapa 5	4,721	0,401
Chapa 6	4,042	0,394	Chapa 6	4,273	0,486
Chapa 7	4,672	0,557	Chapa 7	3,753	0,667
Chapa 8	4,189	0,622	Chapa 8	4,305	0,355
Chapa 9	4,345	0,471	Chapa 9	4,295	0,451
Chapa 10	4,200	0,166	Chapa 10	4,044	0,395
F4	Média (µm)	DP	F18	Média (µm)	DP
Chapa 1	3,875	0,542	Chapa 1	3,019	0,150
Chapa 2	4,534	0,464	Chapa 2	3,157	0,367
Chapa 3	4,626	0,573	Chapa 3	3,531	0,822



Chapa 4	4,554	0,330	Chapa 4	2,586	0,467
Chapa 5	4,875	0,660	Chapa 5	2,638	0,519
Chapa 6	4,211	0,494	Chapa 6	3,209	0,465
Chapa 7	4,282	0,835	Chapa 7	3,975	0,225
Chapa 8	3,492	0,520	Chapa 8	4,009	0,783
Chapa 9	4,706	0,362	Chapa 9	2,885	0,346
Chapa 10	3,786	0,694	Chapa 10	3,555	0,422
<b>F5</b>	<b>Média (µm)</b>	<b>DP</b>	<b>F19</b>	<b>Média (µm)</b>	<b>DP</b>
Chapa 1	5,138	0,306	Chapa 1	4,894	0,675
Chapa 2	4,620	0,291	Chapa 2	4,756	0,330
Chapa 3	4,719	0,203	Chapa 3	4,203	0,593
Chapa 4	4,929	0,509	Chapa 4	4,703	0,360
Chapa 5	4,309	0,477	Chapa 5	4,620	0,366
Chapa 6	4,511	0,523	Chapa 6	4,598	0,058
Chapa 7	4,604	0,660	Chapa 7	4,195	0,663
Chapa 8	5,170	0,359	Chapa 8	4,042	0,287
Chapa 9	4,808	0,674	Chapa 9	4,089	0,272
Chapa 10	4,459	0,400	Chapa 10	4,062	0,249
<b>F6</b>	<b>Média (µm)</b>	<b>DP</b>	<b>F20</b>	<b>Média (µm)</b>	<b>DP</b>
Chapa 1	4,068	0,135	Chapa 1	2,958	0,627
Chapa 2	3,666	0,094	Chapa 2	2,986	0,365
Chapa 3	4,052	0,394	Chapa 3	4,030	0,079
Chapa 4	3,758	0,672	Chapa 4	3,401	0,381
Chapa 5	4,075	0,291	Chapa 5	4,285	0,075
Chapa 6	3,397	0,478	Chapa 6	4,387	0,138
Chapa 7	3,678	0,419	Chapa 7	3,646	0,397
Chapa 8	3,880	0,423	Chapa 8	2,955	0,386
Chapa 9	3,162	0,270	Chapa 9	2,799	0,301
Chapa 10	4,426	0,563	Chapa 10	3,713	0,710
<b>F7</b>	<b>Média (µm)</b>	<b>DP</b>	<b>F21</b>	<b>Média (µm)</b>	<b>DP</b>
Chapa 1	4,941	0,986	Chapa 1	2,789	0,210
Chapa 2	5,271	0,113	Chapa 2	3,249	0,400
Chapa 3	5,155	0,104	Chapa 3	2,667	0,267
Chapa 4	5,449	0,705	Chapa 4	2,818	0,338
Chapa 5	6,099	0,239	Chapa 5	2,937	0,473
Chapa 6	5,610	0,426	Chapa 6	2,581	0,834
Chapa 7	5,277	0,576	Chapa 7	2,307	0,279
Chapa 8	5,400	0,314	Chapa 8	3,172	0,350
Chapa 9	5,681	0,138	Chapa 9	2,911	0,376
Chapa 10	5,569	0,460	Chapa 10	2,287	0,326



### APÊNDICE 3 – OVERLAP DAS FORMULAÇÕES ESTUDADAS

Adesivo estrutural bicomponente acrílico				Adesivo estrutural bicomponente epóxi			
Preparação Brister Blaster®		Preparação Lixa		Preparação Brister Blaster®		Preparação Lixa	
F1		F8		F15		F22	
Média	14,403	Média	12,047	Média	14,034	Média	14,697
DP	1,371	DP	0,927	DP	1,965	DP	1,395
F2		F9		F16		F23	
Média	13,293	Média	11,604	Média	15,999	Média	15,829
DP	1,781	DP	0,824	DP	1,726	DP	2,853
F3		F10		F17		F24	
Média	14,486	Média	11,220	Média	13,181	Média	12,031
DP	0,895	DP	0,827	DP	3,246	DP	1,614
F4		F11		F18		F25	
Média	12,818	Média	10,295	Média	13,775	Média	12,009
DP	0,864	DP	0,728	DP	0,659	DP	0,726
F5		F12		F19		F26	
Média	14,603	Média	11,898	Média	14,205	Média	17,019
DP	0,769	DP	1,024	DP	2,240	DP	3,511
F6		F13		F20		F27	
Média	13,899	Média	12,017	Média	12,938	Média	15,031
DP	2,111	DP	1,973	DP	1,731	DP	1,723
F7		F14		F21		F28	
Média	12,596	Média	11,687	Média	13,591	Média	15,151
DP	1,244	DP	0,805	DP	2,583	DP	3,623





## AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES ESPESSURAS DE ADESIVO ACRÍLICO EM JUNTAS SIMPLES SUBMETIDAS A CISALHAMENTO

MDM MARTINS<sup>1,2</sup>, MLF NASCIMENTO<sup>1</sup>, JDV BARBOSA<sup>2</sup>, L PISANU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Industrial

<sup>2</sup>SENAI CIMATEC — Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia

E-mail para contato: michele.mota@fieb.org.br

**RESUMO** – Os adesivos estruturais vêm ganhando expressiva força na indústria automotiva, naval e aeroespacial e isso se dá pela excelente performance dessas substâncias, competindo com sistemas de fixação mecânica, a exemplo dos rebites, parafusos e soldas. O presente trabalho buscou avaliar a influência de três espessuras de um adesivo estrutural bicomponente de base acrílica em juntas simples cisalhadas (aço carbono 1006). Para isso, foram realizadas as seguintes caracterizações: lap shear, modo de falha e microscopia eletrônica de varredura. Os resultados mostraram que não houve alterações significativas na resistência ao cisalhamento das juntas simples com a camada de adesivo nas espessuras de 0,1 mm e 0,25 mm. Entretanto, com a espessura de 0,5 mm, houve redução dessa resistência. Os modos de falha exibidos foram coesivos (espessuras de 0,1 mm e 0,25 mm) e coesivo de fina camada (espessura de 0,5 mm) de acordo com deformação da superfície de fratura nas três espessuras obtida em imagens de MEV.

### 1 INTRODUÇÃO

Os adesivos podem ser projetados para ter distintas resistências, desde adesivos temporários fracos para manter papéis fixados até sistemas estruturais de alta resistência que unem carros e aviões (Dunn, 2003). Nas indústrias, os adesivos competem com sistemas de fixação mecânica, como porcas e parafusos, rebites ou soldas (Dunn, 2003).

Certos adesivos, que apresentam a função de unir materiais com elevado grau de resistência mecânica, apresentam a capacidade de garantir por longos períodos a sobrevivência das juntas estruturais em condições normais de utilização e expostas a elevados graus de esforços (Silva *et al.*, 2018). Quando aplicados corretamente, as ligações adesivas apresentam a capacidade de proporcionar uma distribuição mais uniforme de tensões, com redução das concentrações de tensão, já que a ligação obtida é praticamente contínua, permitindo às juntas adesivas uma excelente resistência à fadiga (Marques *et al.*, 2021), conforme ilustrado na Figura 1.

Os adesivos podem ser estruturais e não estruturais. As ligações adesivas estruturais precisam transmitir tensões sem perda de integridade dentro dos limites projetados e devem ser duráveis ao longo da vida útil de um material (Ebnesajjad e Landrock, 2015). Assim, a colagem





## EVALUATION OF EPOXY ADHESIVE THICKNESS IN SIMPLE OVERLAP JOINTS SUBJECTED TO LAP SHEAR

Michele Damiana Mota Martins<sup>1ab</sup>, Marco Aurélio Silveira<sup>c</sup>, Marcio Luis Ferreira Nascimento<sup>b</sup>, Josiane Dantas Viana Barbosa<sup>c</sup>, Luciano Pisanu<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Materials, SENAI CIMATEC, Salvador, Bahia, Brazil, [michele.mota@fieb.org.br](mailto:michele.mota@fieb.org.br)

<sup>b</sup> Graduate Program in Industrial Engineering, Federal University of Bahia, Polytechnic School, Salvador, Bahia, Brazil

<sup>c</sup> ISI of Advanced Health Systems, SENAI CIMATEC, Salvador, Bahia, Brazil

**Abstract:** Epoxy adhesives are widely used in the automotive and aerospace markets and have gained notoriety for their versatility and ease of modification to achieve different properties. The purpose of this article was to study simple overlap joints in different thicknesses, 0.1, 0.25 and 0.5 mm, of a two-part epoxy-based structural adhesive under lap shear. In addition, the failure profile of the adhesive on the adherent and the fracture surface of the joints were analyzed by scanning electron microscopy (SEM). The results showed greater resistance to lap shear of simple overlap joints with 0.1 mm of adhesive thickness, failure with stress bleaching and, in the SEM's images, the presence of glass spheres.

**Keywords:** Structural epoxy adhesive; Lap shear; Simple joints; Thickness.

## AVALIAÇÃO DA ESPESSURA DE ADESIVO EPÓXI EM JUNTAS SIMPLES SOBREPOSTAS SUBMETIDAS A CISALHAMENTO

**Resumo:** Os adesivos epóxis apresentam vasta aplicação no mercado automobilístico e aeroespacial e ganharam notoriedade por sua versatilidade e por serem facilmente modificados para conquista de diferentes propriedades. A proposta de objetivo deste artigo foi estudar juntas simples sobrepostas em diferentes espessuras, 0,1, 0,25 e 0,5 mm, de um adesivo estrutural bicomponente de base química epóxi sob cisalhamento. Além disso, foi analisado o perfil de falha do adesivo no aderente e a superfície de fratura das juntas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados mostraram maior resistência ao cisalhamento das juntas simples sobrepostas com 0,1 mm de espessura do adesivo, falha com clareamento por estresse e, nas imagens de MEV, a presença de esferas de vidro.

**Palavras-chave:** Adesivo epóxi estrutural; Cisalhamento; Juntas simples; Espessura.

### 1. INTRODUCTION



ANEXO 1 - PROPRIEDADES DO ADESIVO LORD® 852/25GB E FUSOR® 380NS/383NS.

<b>LORD® 852/25GB</b>	
Proporção de mistura por volume, adesivo para acelerador	10:1
Conteúdo sólido (%)	100
Tempo de trabalho (min) / 75°F (24°C)	20-25
Tempo para resistência ao manuseio (min) / 75°F (24°C) 50 psi Cisalhamento	50-70
Tempo de cura total (h) / 75°F (24°C)	5
Aparência Mista	Pasta vermelha
Dureza Shore D	67
Resistência à tração na ruptura, psi (MPa)	2683 (18,5)
ASTM D638, modificado	
Alongamento (%)	100
ASTM D638, modificado	
Módulo de Young, psi (MPa)	125000 (862)
ASTM D638, modificado	
Temperatura de transição vítrea (Tg), °F (°C)	178 (81)
ASTM E1640-99, por DMA	

Fonte: (Technical Data Sheet Parker LORD, 2020).

<b>Fusor® 380NS/383NS</b>	
Proporção de mistura por volume, adesivo para acelerador	1:1
Tempo de trabalho (min) / 75°F (24°C)	>20
104°F (40°C)	10-15
Tempo para resistência ao manuseio (h) / 65°F (81°C)	2
Aparência Mista	Pasta cinza
Resistência à tração na ruptura, psi (MPa)	3600-4500 (24,8-31)
ASTM D638	
Módulo de Young, psi (MPa)	700000-800000
ASTM D638	(4826,3-5515,8)
Temperatura de transição vítrea (Tg), °F (°C)	194 (90)
ASTM D882-63A, modificado	
Absorção de Água (%)	<1
ASTM D570-81	
Encolhimento (%). Curado 30 minutos a 300°F (149°C)	0.4

Fonte: (Technical Data Sheet Parker LORD, 2021).



**UFBA**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI**

Rua Aristides Novis, 02, 6º andar, Federação, Salvador BA  
CEP: 40.210-630  
Telefone: (71) 3283-9800  
E-mail: [pei@ufba.br](mailto:pei@ufba.br)  
Home page: <http://www.pei.ufba.br>

