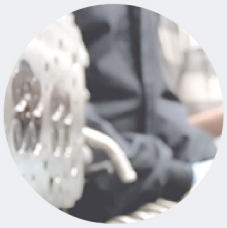
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO
MESTRADO EM ENGENHARIA AUTOMÓVEL



Ligacoes Adesivas na Industria Automovel Caracterizacao Mecanica e Envelhecimento do Adesivo SikaForce-472

VINÍCIUS FERNANDES FERREIRA
Junho de 2026

ISEP INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

Ligações Adesivas na Indústria Automóvel

Vinícius Fernandes Ferreira

Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Automóvel

Orientador: Arnaldo Manuel Guedes Pinto

Porto, Junho 2026

Agradecimentos

Ao Professor Arnaldo Manuel Guedes Pinto, orientador desta dissertação, que proporcionou uma elevada e importante ajuda e tempo no decorrer da dissertação.

Ao Professor Paulo Jorge Roque de Oliveira Nóvoa, coorientador desta dissertação, que contribuiu com uma ajuda indispensável, nomeadamente, no fabrico dos provetes e na realização dos ensaios experimentais.

À minha família que sempre me apoiaram ao longo do meu percurso académico.

Resumo

A indústria automóvel atual procura incessantemente a redução de peso estrutural (*lightweighting*) através da integração de estruturas multimaterial. Neste contexto, as juntas adesivas estruturais assumem um papel de destaque face aos métodos de fixação tradicionais, uma vez que permitem a união eficaz de materiais dissimilares, garantem uma distribuição uniforme de tensões e oferecem uma elevada capacidade de absorção de energia (*crashworthiness*). O presente trabalho de dissertação tem como objetivo validar experimentalmente a viabilidade e a fiabilidade do adesivo estrutural de matriz poliuretano SikaForce®-472 na união de substratos metálicos automóveis.

A extensa campanha experimental envolveu a caracterização do adesivo na sua forma maciça (*bulk*) e a avaliação de juntas coladas sob diferentes modos de carregamento, nomeadamente corte (JSS), tração (JTT) arrancamento (Peel). Para prever o comportamento em serviço e em cenários de colisão, avaliou-se a sensibilidade da ligação à taxa de deformação (escalonada entre 0,5 mm/min e 500 mm/min) e a sua durabilidade face a um ciclo de envelhecimento hidrotérmico severo (exposição prolongada de 300 horas a 80 °C e humidade).

Os resultados demonstram o carácter fortemente viscoelástico do poliuretano: o aumento da velocidade de solicitação traduziu-se num incremento da rigidez e da força máxima suportada, validando a sua aptidão para dissipar energia dinâmica. Contudo, os ensaios de envelhecimento evidenciaram que a temperatura e a absorção de humidade induzem a plastificação da matriz e a degradação da interface, resultando numa transição dos modos de rotura de predominantemente coesivos para mistos. Conclui-se que o sistema adesivo estudado apresenta propriedades mecânicas adequadas para componentes de segurança automóvel, desde que os processos de preparação superficial sejam rigorosos e os limites operacionais ambientais respeitados.

Palavras-chave: Indústria automóvel; Adesivo estrutural de poliuretano; Taxa de deformação; Envelhecimento hidrotérmico; *Crashworthiness*; Modos de rotura.

Abstract

The modern automotive industry continuously seeks structural weight reduction (*lightweighting*) through the integration of multi-material structures. In this context, structural adhesive joints take on a prominent role compared to traditional fastening methods, as they allow for the effective joining of dissimilar materials, ensure uniform stress distribution, and offer high energy absorption capacity (*crashworthiness*). The present dissertation aims to experimentally validate the feasibility and reliability of the SikaForce®-472 polyurethane structural adhesive in joining automotive metallic substrates.

The extensive experimental campaign involved the characterization of the adhesive in its bulk form and the evaluation of bonded joints under different loading modes, namely shear (Single Lap Joints - SLJ), tension (Tensile Butt Joints), and peel. To predict the in-service behavior and performance in collision scenarios, the strain rate sensitivity of the joint was evaluated (scaled between 0.5 mm/min and 500 mm/min), along with its durability against a severe hydrothermal aging cycle (prolonged exposure of 300 hours at 80 °C and moisture).

The results demonstrate the highly viscoelastic nature of the polyurethane: the increase in the loading rate translated into an increase in stiffness and maximum supported force, validating its suitability to dissipate dynamic energy. However, the aging tests showed that temperature and moisture absorption induce matrix plasticization and interfacial degradation, resulting in a transition of failure modes from predominantly cohesive to mixed. It is concluded that the studied adhesive system presents suitable mechanical properties for automotive safety components, provided that surface preparation processes are rigorous and the environmental operational limits are respected.

Keywords: Automotive industry; Polyurethane structural adhesive; Strain rate; Hydrothermal aging; *Crashworthiness*; Failure modes.

Índice

Lista de Figuras xi

Lista de Tabelas xv

Acrónimos e Símbolos xvii

1. Introdução 1
   1.1. Contextualização 1
   1.2. Definição do Problema 1
   1.3. Objetivos 2
   1.4. Organização da Dissertação 3
2. Revisão Bibliográfica 5
   2.1. Adesivos e ligações adesivas 5
      2.1.1. Conceitos de junta adesiva 5
      2.1.2. Vantagens e desvantagens 6
      2.1.3. Classificação dos adesivos 7
      2.1.4. Modos de carregamento 10
      2.1.5. Modos de Rotura 13
      2.1.6. Preparação superficial 14
      2.1.7. Tipos de juntas 17
      2.1.8. Adesivos na indústria automóvel 18
   2.2. Ensaios mecânicos 21
      2.2.1. Ensaios à tração 21
      2.2.2. Ensaios ao corte 23
      2.2.3. Ensaios de arrancamento 25
      2.2.4. Ensaios de impacto 27
      2.2.5. Ensaios de fadiga 29
      2.2.6. Ensaios de fluência 30
   2.3. Ensaios não destrutivos de inspeção 31
      2.3.1. Inspeção visual 32
      2.3.2. Ultrassons 32
      2.3.3. Emissão acústica 33
      2.3.4. Radiografia 34
      2.3.5. Líquidos penetrantes 35
      2.3.6. Correntes de Foucault 35
3. Desenvolvimento 37
   3.1. Materiais utilizados 37
      3.1.1. Adesivo Estrutural 37
      3.1.2. Substrato 39

3.2. Preparação de superfície e Fabrico dos provetes 40
3.2.1. Substrato de alumínio 41
3.2.2. Substrato de aço 48
3.2.3. Provetes de adesivo maciço 48
3.2.4. Condições de Envelhecimento Ambiental 52
3.3. Ensaios Mecânicos 53
3.3.1. Equipamentos e configuração base 53
3.3.2. Acessórios e montagem por modo de carga 55
3.3.3. Parâmetros e velocidades de ensaio 58
4. Resultados e Discussão 59
4.1. Comportamento a tração 60
4.1.1. Provetes de adesivo maciço 60
4.1.2. Juntas de topo a topo 62
4.2. Comportamento sob o efeito de corte (Juntas de Sobreposição Simples) 66
4.3. Comportamento ao Arrancamento (Rolete Flutuante) 73
4.4. Ensaio de dureza 75
5. Efeito da Velocidade de Ensaio em Juntas de sobreposição simples 79
5.1. Resposta a velocidade de 0,5 mm/min 79
5.2. Resposta a velocidade de 5 mm/min 82
5.3. Resposta a velocidade de 500 mm/min 85
5.4. Análise comparativa do efeito da velocidade 88
6. Efeito do Envelhecimento 91
6.1. Juntas de sobreposição simples 91
6.1.1. Efeito isolado da humidade (Condição A) 91
6.1.2. Efeito isolado da temperatura (Condição B) 94
6.1.3. Efeito combinado hidrotérmico (Condição C) 97
6.2. Análise comparativa do efeito do envelhecimento 99
7. Conclusões e Trabalhos Futuros 103
7.1. Conclusões finais 103
7.2. Limitações e trabalhos futuros 104
8. Referências 107
Declaração de Integridade 111

Lista de Figuras

Figura 1 - Junta adesiva (Marques et al., 2021) 6
Figura 2 - Comparação da distribuição das distribuições de tensões entre (a) junta soldada, (b) junta rebitada, (c) junta adesiva (adaptado de Marques et al., 2021) 6
Figura 3 - Diferentes modos de carregamentos: (a) Tração, (b) Corte, (c) Clivagem, (d) Arrancamento (adaptado de Adams, 2021) 10
Figura 4 - Distribuição de tensão: (A) tração, (B) compressão (adaptado de EAA Aluminium Automotive Manual-Joining, 2015) 11
Figura 5 - Distribuição de tensão no corte (adaptado de EAA Aluminium Automotive Manual-Joining, 2015) 11
Figura 6 - Distribuição de tensão na clivagem (adaptado de EAA Aluminium Automotive Manual-Joining, 2015) 12
Figura 7 - Distribuição de tensão no arrancamento (adaptado de EAA Aluminium Automotive Manual-Joining, 2015) 13
Figura 8 - Modos de rotura (L. Silva et al., 2007) 13
Figura 9 - Configurações geométricas de juntas adesivas (L. Silva et al., 2017) 17
Figura 10 - Colagem do para-brisas (EAA Aluminium Automotive Manual-Joining, 2015) 19
Figura 11 - Veículo a entrar na fase de imersão para pré-tratamento com múltiplos metais (EAA Aluminium Automotive Manual-Joining, 2015) 20
Figura 12 - Dimensões do "haltere" para o ensaio de adesivo maciço (Reis et al., 2019) 22
Figura 13 - Gráfico tensão deformação (adaptado de Reis et al., 2019) 23
Figura 14 - Dimensões de junta para o ensaio ao corte com a configuração de sobreposição simples (P. D. A. Da Silva et al., 2025) 23
Figura 15 - Ferramenta e provete para o ensaio Arcan (L. Silva et al., 2007) 24
Figura 16 - Detalhes do ensaio TAST: (a) Geometria e dimensões do provete com aderentes espessos; (b) Montagem experimental com fixação por pinos e extensómetro local (adaptado de Cognard et al., 2008) 25
Figura 17 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de arrancamento (adaptado de Dengiz, 2025) 26
Figura 18 - Cinemática do ensaio de rolete flutuantes (adaptado de Nóbrega et al., 2023) 27
Figura 19 - Ensaio de roletes flutuantes gráfico força/deslocamento (adaptado de Li et al., 2022) 27
Figura 20 - Ensaio crashworthiness (adaptado de Bidadi et al., 2024) 28
Figura 21 - Configuração de ensaio de fadiga de juntas adesivas de alumínio com sobreposição simples (adaptado de Han et al., 2025) 30
Figura 22 - Projeto de um aparelho para ensaio de fluência por corte em juntas de topo (adaptado de S. Wang et al., 2025) 31
Figura 23 - Configuração de junta topo para ensaio de fluência, a) Junta topo, b) Padrão de manchas para DIC (adaptado de S. Wang et al., 2025) 31
Figura 24 - Ensaio ultrassons não lineares, a) Esquema da montagem experimental, b) Sistema de ensaio (adaptado de H. Wang & Shui, 2025) 33

Figura 25 - Montagem ensaio raios-X, a) Vista geral, b) Vista do interior do tomógrafo, c) Vista máquina de tração (adaptado de Badulescu et al., 2024) 34
Figura 26 - Dados tomográficos na secção do plano médio JIK (Badulescu et al., 2024) 35
Figura 27 - (a) Componente A do Adesivo SikaForce®-472; (b) Componente B do adesivo SikaForce®-472 38
Figura 28 - Esmerial Metabo (LABF) 42
Figura 29 - Granalhadora CidBlast (LABF) 43
Figura 30 - (a) Substrato de sobreposição simples após granalhagem; (b) Substrato cilíndrico após granalhagem 43
Figura 31 - Vista geral da mesa de trabalho utilizada para o fabrico das juntas 44
Figura 32 – Processo de fabrico das juntas 45
Figura 33 - Detalhe do fio de cobre para controle da espessura de adesivo 45
Figura 34 - Equipamento para produção de juntas topo a topo 46
Figura 35 - Processo de montagem das juntas topo a topo 46
Figura 36 – Fresa Topo MaqFort Drilling 45 47
Figura 37 – Remoção do excesso de adesivo; (a) utilização da fresa de topo; (b) acabamento manual 48
Figura 38 - Molde para fabrico dos provetes Bulk 49
Figura 39 - Aplicação dos desmoldante frekote 770-NC 50
Figura 40 – Processo de fabrico dos provetes Bulk 51
Figura 41 - Molde para provetes de dureza Shore D 51
Figura 42 – Câmara climática Thermotron 52
Figura 43 – Disposição dos provetes dentro da câmara climática 52
Figura 44 – Máquina de ensaios Shimadzu AD-I 10 kN 54
Figura 45 –Garra em cunha Shimadzu MWG-20 kNA 54
Figura 46 – Máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 kN 54
Figura 47 –Garra em cunha Shimadzu MWG-100 kNA 54
Figura 48 - Durómetro Hildebrand Shore D 55
Figura 49 - Extensómetro axial MF MFA 25 56
Figura 50 - Calço colado nas juntas de sobreposição simples 56
Figura 51 - Ferramenta para ensaio de juntas de topo 57
Figura 52 - Ferramenta para ensaio de arrancamento 57
Figura 53 - Gráfico Força x Deformação Provete Bulk 61
Figura 54 - Gráfico Força x Deformação juntas topo substrato alumínio 63
Figura 55 – Superfície de falha das juntas topo com substrato de alumínio 63
Figura 56 - Gráfico Força x Deformação juntas topo substrato aço 64
Figura 57 – Superfície de falha das juntas topo com substrato de aço 65
Figura 58 - Gráfico Força x Deformação juntas sobreposição substrato alumínio 67
Figura 59 – Superfície de falha das juntas de sobreposição simples com substrato de alumínio 68
Figura 60 – Detalhe da superfície de falha dos provetes de sobreposição simples 69
Figura 61 - Gráfico Força x Deformação juntas sobreposição substrato aço 70
Figura 62 – Superfície de falha das juntas de sobreposição simples com substrato aço 71

Figura 63 – Detalhe da superfície de falha dos provetes de sobreposição simples 72
Figura 64 - Gráfico Força x Deformação ensaio de arrancamento 74
Figura 65 – Detalhe da superfície de falha dos provetes de sobreposição simples 75
Figura 66 - Escala do durómetro Hildebrand..... 76
Figura 67 - Gráfico Força x Deformação juntas sobreposição velocidade 0,5 mm/min 80
Figura 68 - Superfície de falha das juntas de sobreposição simples velocidade 0,5 mm/min .. 81
Figura 69 - Detalhe da superfície de falha da junta 4 de sobreposição simples velocidade 0,5 mm/min..... 82
Figura 70 - Gráfico Força x Deformação juntas sobreposição velocidade 5 mm/min 83
Figura 71 - Superfície de falha das juntas de sobreposição simples velocidade 5 mm/min 84
Figura 72 – Detalhe da superfície de falha dos provetes de sobreposição simples velocidade 5mm/min..... 84
Figura 73 – Detalhe da falha coesiva dos provetes de sobreposição simples velocidade 5mm/min 85
Figura 74 - Gráfico Força x Deformação juntas sobreposição velocidade 500 mm/min 86
Figura 75 - Superfície de falha das juntas de sobreposição simples velocidade 500 mm/min . 87
Figura 76 – Detalhe da falha coesiva dos provetes de sobreposição simples velocidade 500 mm/min..... 88
Figura 77 - Gráfico da evolução da tensão de corte máxima por conta da velocidade de ensaio 88
Figura 78 - Gráfico Força x Deformação juntas sobreposição sob efeito da humidade 92
Figura 79 - Superfície de falha das juntas de sobreposição simples sob efeito da humidade... 93
Figura 80 – Detalhe da superfície de falha dos provetes sob efeito da humidade 94
Figura 81 - Gráfico Força x Deformação juntas sobreposição sob efeito da temperatura..... 95
Figura 82 - Superfície de falha das juntas de sobreposição simples sob efeito da temperatura 96
Figura 83 – Detalhe da superfície de falha dos provetes sob efeito da temperatura 96
Figura 84 - Gráfico Força x Deformação juntas sobreposição sob efeito da humidade e temperatura 97
Figura 85 - Superfície de falha das juntas de sobreposição simples sob efeito da humidade e temperatura 98
Figura 86 – Detalhe da superfície de falha dos provetes sob efeito da humidade e temperatura 99
Figura 87 - Gráfico da evolução da tensão de corte máxima por conta do tipo de envelhecimento 100
Figura 88 – Detalhe da superfície de falha dos provetes sob efeito da humidade e temperatura 101

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades do adesivo SikaForce®-472 FR L60 (Sika Deutschland, 2021) 38
Tabela 2 - Propriedades das ligas de alumínio AW 1050 e AW 6082 39
Tabela 3 - Propriedades do aço estrutural S235 JR 40
Tabela 4 - Resultado dos ensaios do provete Bulk 60
Tabela 5 - Resultados das juntas de topo substrato alumínio 62
Tabela 6 - Resultados das juntas de topo substrato aço 64
Tabela 7 - Resultados das juntas de sobreposição simples substrato alumínio 66
Tabela 8 - Resultados das juntas de sobreposição simples substrato aço 70
Tabela 9 - Resultados do ensaio de arrancamento 73
Tabela 10 - Resultados do ensaio de dureza 76
Tabela 11 - Resultados das juntas de sobreposição simples velocidade 0,5 mm/min 80
Tabela 12 - Resultados das juntas de sobreposição simples velocidade 5 mm/min 82
Tabela 13 - Resultados das juntas de sobreposição simples velocidade 500 mm/min 86
Tabela 14 - Resultados das juntas de sobreposição simples efeito da humidade 92
Tabela 15 - Resultados das juntas de sobreposição simples efeito da temperatura 94
Tabela 16 - Resultados das juntas de sobreposição simples efeito da humidade e temperatura 97

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

ASTM	*American Society for Testing and Materials*
CFRP	*Carbon Fiber Reinforced Polymer*
CR	*Crash Resistant*
DIC	*Digital Image Correlation*
FEA	*Finite Element Analysis*
ISO	*Internacional Organization for Standardization*
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
NDT	*Non-Destructive Testing*
NVH	*Noise Vibration Harshness*
PAA	*Phosphoric Acid Anodizing*
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
PTFE	Politetrafluoretileno
QSC	*Quadratic Stress Criterion*
SHG	*Second Harmonic Generation*
SLS	*Single Lap Shear*
TAST	*Thick Adherend Shear Test*

Lista de Símbolos

L	Comprimento	mm
E	Módulo de *Young*	Pa
σ_y	Tensão de Cedência	Pa
σ_f	Tensão de Rotura	Pa
ϵ_f	Deformação na Rotura	%

1. Introdução

1.1. Contextualização

A indústria moderna de transportes, particularmente os setores automóvel e aeroespacial, atravessa uma fase de transformação impulsionada pela necessidade imediata de redução de peso estrutural *(lightweighting*). A substituição de aços convencionais por materiais avançados, como ligas de alumínio de alta resistência e materiais compósitos, é essencial para reduzir o consumo de combustível e cumprir as rigorosas normas de emissões (Banea et al., 2018; Reis et al., 2019).

Neste cenário, os métodos tradicionais de fixação mecânica (como a utilização de rebites e parafusos) e a soldadura por pontos apresentam limitações técnicas significativas. Estas técnicas introduzem concentrações de tensão locais, exigem furações que fragilizam a secção resistente e são frequentemente inadequadas para a união de materiais dissimilares devido a problemas de corrosão galvânica e diferenças nos coeficientes de expansão térmica (Banea et al., 2018; Barnes & Pashby, 2000).

As juntas adesivas estruturais surgem como uma alternativa tecnologicamente superior. Ao promoverem uma união contínua, os adesivos permitem uma distribuição uniforme das tensões ao longo de toda a área de sobreposição, resultando numa maior rigidez global, elevada resistência à fadiga e superior capacidade de absorção de energia em caso de impacto (*crashworthiness*) (Barnes & Pashby, 2000; Reis et al., 2019).

1.2. Definição do Problema

Na indústria automóvel contemporânea, a procura por veículos mais eficientes e seguros impulsionou a adoção de materiais leves. Neste cenário, a colagem estrutural assume um papel preponderante, pois permite a união eficaz de diferentes substratos e oferece uma elevada relação resistência-peso superior aos métodos de fixação tradicionais. Além da redução de massa, a resistência ao impacto (*crashworthiness*) transversal tornou-se um requisito crítico no design de estruturas veiculares, exigindo que as juntas sejam capazes de absorver energia e manter a integridade estrutural em cenários de colisão.

No entanto, apesar das vantagens, a implementação de juntas adesivas em componentes estruturais críticos acarreta desafios de engenharia complexos. Um dos obstáculos primordiais é a degradação higrotérmica; a exposição a ambientes húmidos e temperaturas variáveis pode comprometer severamente a fiabilidade da união a longo prazo. A literatura técnica evidencia

que, ao contrário dos metais, os adesivos estruturais são materiais viscoelásticos cujas propriedades mecânicas dependem fortemente da temperatura, da taxa de deformação e das condições de fabrico.

A fiabilidade da junta está intrinsecamente ligada à preparação de superfície e à correta seleção do método de ensaio. A distinção entre a resistência aparente da junta e as propriedades intrínsecas do material é frequentemente complexa e encontra-se dispersa em diversas normas e publicações. Neste contexto, torna-se essencial compilar e analisar criticamente o conhecimento existente para fornecer uma base sólida de design.

Neste contexto, o problema central desta dissertação reside na necessidade de caracterizar fisicamente a viabilidade do adesivo estrutural SikaForce®-472 para a união de estruturas multimaterial, preenchendo a lacuna de conhecimento sobre o seu comportamento perante solicitações dinâmicas extremas e ciclos severos de envelhecimento hidrotérmico.

1.3. Objetivos

O objetivo principal desta dissertação é validar experimentalmente o desempenho e a fiabilidade de juntas adesivas estruturais destinadas à integração de estruturas multimaterial no setor automóvel. Para prever o comportamento da ligação sob condições reais de serviço e de colisão, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

1. Caracterização intrínseca e processamento: Caracterizar as propriedades mecânicas fundamentais do adesivo poliuretano na sua forma maciça (*bulk*);
2. Avaliação sob diferentes modos de carregamento: Analisar a resistência e a tenacidade à fratura da ligação colada através de ensaios destrutivos padronizados sob esforços de corte (Juntas de Sobreposição Simples - JSS), tração pura (juntas de topo em provetes cilíndricos) e rasgamento (ensaio de arrancamento com rolo flutuante);
3. Análise da sensibilidade à taxa de deformação: Avaliar o comportamento da junta sob carregamento dinâmico, submetendo os provetes a velocidades de cruzeta escalonadas (desde o regime quase-estático de 0,5 mm/min até à simulação de impacto a 500 mm/min);
4. Caracterização da degradação ambiental: Determinar a durabilidade estrutural da união através da sujeição de substratos de alumínio e aço a envelhecimento acelerado (300 horas), isolando os efeitos da humidade, da temperatura a 80 °C e do ciclo combinado hidrotérmico;
5. Correlação estrutural externa: Mapear e correlacionar os dados mecânicos obtidos com a análise visual das superfícies de fratura, identificando as transições entre falhas coesivas e adesivas em função da velocidade imposta e do ataque ambiental.

1.4. Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada de forma sequencial para conduzir a validação experimental do projeto:

- Capítulo 1 (Introdução): Apresenta a contextualização industrial do trabalho, define o problema em estudo e estabelece os objetivos traçados.
- Capítulo 2 (Revisão Bibliográfica): Consolida o estado da arte referente à tecnologia de adesão, focando-se na mecânica da fratura de adesivos de poliuretano, efeitos da taxa de deformação e mecanismos de envelhecimento ambiental.
- Capítulo 3 (Procedimento Experimental): Detalha os materiais selecionados, os tratamentos de superfície aplicados, as metodologias de fabrico dos provetes normativos e os protocolos definidos para os ensaios de tração, rasgamento e envelhecimento ambiental.
- Capítulo 4 (Resultados - Caracterização Base): Apresenta a discussão sobre a resistência mecânica inicial das diferentes configurações de juntas adesivadas e as propriedades do material maciço.
- Capítulo 5 (Resultados - Taxa de Deformação): Analisa o efeito do aumento da velocidade de solicitação no desempenho estrutural da ligação e na morfologia do colapso.
- Capítulo 6 (Resultados - Envelhecimento Ambiental): Discute a influência dos ciclos de exposição prolongada (temperatura e humidade) na integridade da interface e nos mecanismos químicos da matriz polimérica.
- Capítulo 7 (Conclusões): Sintetiza as principais descobertas do trabalho empírico, validando a viabilidade da junta para aplicação global no setor automóvel, e propõe recomendações para trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo de revisão bibliográfica são abordados vários assuntos pertinentes sobre ligações adesivas como, por exemplo, conceito fundamental de uma junta adesiva, suas vantagens e desvantagens, classificações dos adesivos, modos de carregamento, modos de rotura, preparação superficial e tipos de juntas. Também é referida a utilização de ligações adesivas na indústria automóvel que, face ao tema deste trabalho, assume particular relevância. Ainda neste capítulo é realizada uma breve abordagem a alguns ensaios que permitem determinar diversas propriedades de adesivos e juntas adesivas. Esta revisão é necessária para determinar quais são as vantagens e desvantagens do uso de adesivos na indústria automóvel, além de se identificar quais são os principais adesivos utilizados, suas características e aplicações no automóvel.

2.1. Adesivos e ligações adesivas

Nos próximos subcapítulos, estabelece-se a base teórica fundamental para a compreensão da tecnologia de união adesiva. A exposição inicia-se com a definição de conceitos, classificação e análise das vantagens e desvantagens destes materiais, evoluindo para o estudo do comportamento mecânico da junta (modos de carregamento e mecanismos de falha). Por fim, aborda-se a importância crítica da preparação de superfície e contextualiza-se a aplicação específica destes adesivos na indústria automóvel.

2.1.1. Conceitos de junta adesiva

Um adesivo pode ser definido como uma substância capaz de promover a união entre materiais através de mecanismos de fixação superficial. O desempenho de uma junta adesiva é governado por dois fenómenos fundamentais: a adesão, que compreende as forças de atração intermoleculares estabelecidas na interface entre o adesivo e os substratos, e a coesão, que representa a resistência interna do próprio adesivo solidificado (Petrie, 2000; L. Silva et al., 2007).

Uma junta adesiva é composta pelo adesivo, um primário (substância utilizada na superfície dos substratos de forma a melhorar a adesão do adesivo, se necessário), interfase e o aderente. Segundo (Petrie, 2000) aonde dois substratos são unidos com um adesivo ou vedante, o substrato é o material a ser colado. Após a união, o substrato é frequentemente chamado de aderente (embora às vezes esses dois termos sejam usados de forma sinónima). A área entre o adesivo e o aderente é chamada de região de interfase. Esta região de interfase é uma região

fina perto do ponto de contacto adesivo–aderente. A região de interfase possui características químicas e físicas diferentes do adesivo ou do aderente em massa. A natureza da região de interfase é um fator crítico na determinação das propriedades e da qualidade de uma ligação adesiva. Existe também a região interface, que se refere à fronteira física ou superfície de contacto entre o adesivo e o substrato. A Figura 1 mostra a localização de algumas das diferentes camadas de uma junta adesiva.

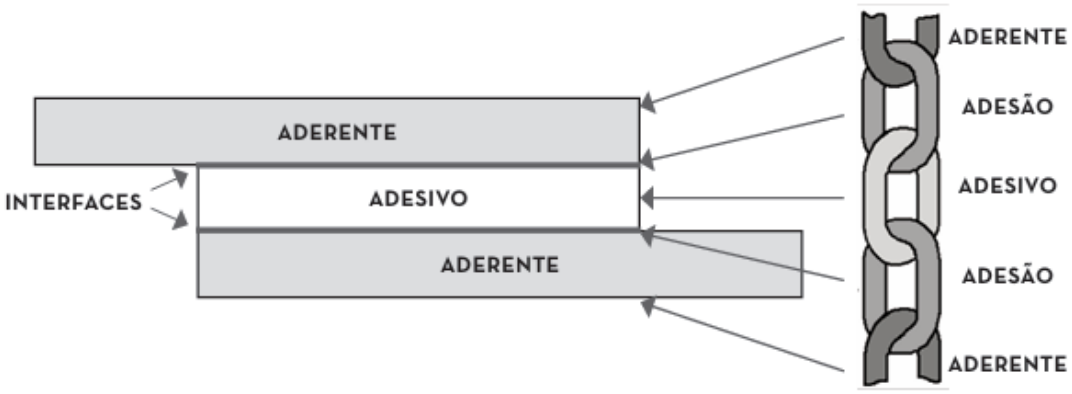


Figura 1 - Junta adesiva (Marques et al., 2021)

2.1.2. Vantagens e desvantagens

A principal vantagem mecânica das juntas adesivas ocorre na sua capacidade de distribuir tensões de forma uniforme, algo que não ocorre em juntas rebitadas ou soldadas, conforme é possível observar na Figura 2. Uma vez que formam uma união praticamente contínua, as ligações adesivas, quando bem implementadas, possuem a capacidade singular de distribuir as tensões de forma mais uniforme, reduzindo as concentrações de tensão que são comuns em ligações pontuais (Marques et al., 2021).

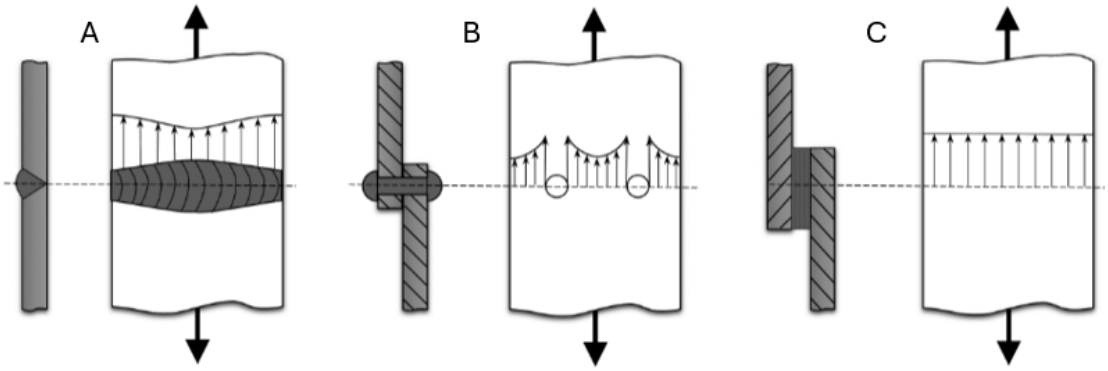


Figura 2 - Comparação da distribuição das distribuições de tensões entre (a) junta soldada, (b) junta rebitada, (c) junta adesiva (adaptado de Marques et al., 2021)

Em termos de projeto, os adesivos oferecem uma flexibilidade exclusiva. Permitem a união de materiais diferentes, como metais a compósitos, plásticos ou cerâmicas, o que seria impraticável ou muito complexo por métodos tradicionais. A tecnologia de colagem é também ideal para a união de chapas muito finas e materiais frágeis (L. Silva et al., 2007).

No âmbito da produção, a colagem pode levar a uma redução de peso substancial e à simplificação dos processos de montagem, eliminando operações de maquinação como a furação. O processo pode ser facilmente automatizado e certos adesivos possuem a capacidade de preenchimento de folgas. Além da função primária de união, a linha de adesivo atua frequentemente como um vedante, protegendo a junta contra a penetração de humidade ou fluidos (Petrie, 2000).

Apesar dos benefícios discutidos, a utilização de juntas adesivas oferece desafios significativos.

A limitação mecânica mais notória é a sua baixa resistência a solicitações de arrancamento e clivagem (L. Silva et al., 2007).

O desempenho dos adesivos é também fortemente dependente de fatores ambientais, nomeadamente da temperatura e da humidade. A presença de humidade é um dos fatores de degradação mais predominantes, podendo comprometer a interface adesivo-substrato e degradar as propriedades coesivas do adesivo, o que afeta a durabilidade a longo prazo (L. Silva et al., 2007).

Para o sucesso de uma junta adesiva é indispensável a correta preparação das superfícies a unir. Este passo, que pode incluir limpeza, abrasão mecânica ou tratamentos químicos, é frequentemente o mais crítico, dispendioso e complexo de todo o processo (Barnes & Pashby, 2000; L. Silva et al., 2007).

Ao contrário das ligações mecânicas instantâneas, os adesivos requerem um tempo de cura que pode ser longo. Durante este período, é necessário o uso de gabaritos ou fixadores para garantir o alinhamento das peças (Petrie, 2000; L. Silva et al., 2007).

Finalmente, o controlo de qualidade de uma junta adesiva completa representa um desafio. A inspeção não destrutiva é desafiadora; embora possa detetar defeitos macroscópicos como vazios ou descolamentos, é difícil quantificar a resistência real da adesão (Barnes & Pashby, 2000).

2.1.3. Classificação dos adesivos

A vasta diversidade de adesivos disponíveis para aplicações de engenharia exige uma sistematização para facilitar a sua seleção e compreensão. Não existe um sistema de classificação único; em vez disso, os adesivos são categorizados com base em múltiplos critérios, que frequentemente se sobrepõem. As formas de classificação mais relevantes no contexto da engenharia incluem a natureza química do polímero de base, a função mecânica, o método de endurecimento e a forma física. A classificação mais fundamental baseia-se na estrutura química e no comportamento térmico do polímero de base («Polymers for aerospace structures», 2012):

- Termoendurecíveis**:** São polímeros que curam através de uma reação química irreversível, formando uma estrutura de rede tridimensional (reticulação). Uma vez curados, não podem ser fundidos novamente pelo calor. Esta categoria inclui os adesivos estruturais de mais alto desempenho, como os epóxidos, fenólicos e poliuretanos (Ebnesajjad & Landrock, 2015);
- Termoplásticos**:** Consistem em longas cadeias moleculares sem reticulação. Amaciam ou fundem quando aquecidos e solidificam quando arrefecidos, num processo reversível. Os adesivos termofusíveis são um exemplo proeminente desta categoria (Ebnesajjad & Landrock, 2015);
- Elastómeros**:** São polímeros com baixa rigidez e elevada elasticidade (borrachas). Podem ser termoplásticos ou termoendurecíveis (reticulados). São frequentemente usados como base para adesivos que exigem alta flexibilidade ou em formulações híbridas para aumentar a tenacidade de adesivos termoendurecíveis («Polymers for aerospace structures», 2012);
- Híbridos**:** São formulações que combinam diferentes classes de polímeros para otimizar propriedades. Um exemplo clássico são os epóxis modificados, que incorporam partículas de elastómero numa matriz termoendurecível para aumentar a resistência ao impacto e à propagação de fendas (L. Silva et al., 2007).

A classificação por função ou desempenho mecânico divide os adesivos com base na sua capacidade de suportar carga:

- Adesivos Estruturais**:** São materiais concebidos para serem parte integrante da estrutura de suporte de carga. O seu objetivo primário é transmitir tensões (corte, tração, compressão) entre os substratos colados, mantendo a integridade da montagem sob condições severas. Considera-se estrutural se a resistência ao corte for superior a 6,9 MPa (aproximadamente 1000 psi) (*EAA Aluminium Automotive Manual-Joining*, 2015; S. Wang et al., 2025). O adesivo Araldite® 2015 (epóxi) testado em (Han et al., 2025) apresentou falha coesiva e suportou cargas elevadas, sendo classificado inequivocamente como estrutural. O adesivo Sikadur 330 testado em (S. Wang et al., 2025) suportou tensões de corte constantes de até 8,8 MPa durante ensaios de fluência, mantendo a integridade. No setor automóvel, para aplicações de absorção de impacto em painéis de polímero reforçado com fibra de carbono (*Carbon Fiber Reinforced polymer*- CFRP), destaca-se o uso do Hysol 9432, formulado para garantir integridade estrutural em cenários de colisão (Wu et al., 2013).
- Adesivos não estruturais: São utilizados para funções aonde a resistência mecânica é secundária. Servem para vedar, isolar, amortecer vibrações ou segurar componentes leves temporariamente. Suas características são um baixo módulo de elasticidade (são flexíveis/elastómeros), baixa resistência ao corte e elevada capacidade de deformação. Geralmente, falham se sujeitos a cargas sustentadas (fluência/*creep*) elevadas (*EAA Aluminium Automotive Manual-Joining*, 2015). São alguns exemplos, Silicones de vedação doméstica ou adesivos sensíveis à pressão (fitas-cola).

- Adesivos Funcionais (Automóvel): A indústria automóvel utiliza uma classificação funcional detalhada, que inclui vedantes, adesivos *anti-flutter* (para painéis), adesivos para bainhas e adesivos para interiores (*EAA Aluminium Automotive Manual-Joining*, 2015).

A classificação por método de endurecimento (cura) é a forma como o adesivo passa do estado líquido ou pastoso para o estado sólido, é um critério de classificação prático e crucial para o processo de fabrico.

- Por Reação Química: O endurecimento é resultado de uma polimerização.
    - Bi-componentes (2K): A resina e o endurecedor são misturados imediatamente antes da aplicação (Jurgen Klingen, 2022);
    - Mono-componentes (1K): A reação é iniciada por um gatilho externo, como o calor (e.g., epóxis 1K) ou a humidade do ar (Ebnesajjad & Landrock, 2015);
    - Anaeróbicos: Curam na ausência de oxigénio e na presença de iões metálicos (usados em fixação de roscas) (*EAA Aluminium Automotive Manual-Joining*, 2015);
    - Cianoacrilatos: Curam rapidamente pela reação com a humidade superficial (*EAA Aluminium Automotive Manual-Joining*, 2015).
- Por Arrefecimento (Termofusíveis): São adesivos termoplásticos aplicados no estado fundido que solidificam e criam a ligação ao arrefecer (Ebnesajjad & Landrock, 2015).
- Por Perda de Veículo: A solidificação ocorre pela evaporação de um solvente ou água.
    - Base Solvente: O polímero está dissolvido num solvente orgânico (Ebnesajjad & Landrock, 2015);
    - Base Aquosa: O polímero está em emulsão ou dispersão aquosa (Jurgen Klingen, 2022).

A classificação por forma física, aonde os adesivos são classificados pela forma como são fornecidos:

- Líquidos: De baixa a alta viscosidade (Petrie, 2000);
- Pastas: Alta viscosidade, frequentemente tixotrópicos (não escorrem), com capacidade de preenchimento de folgas (Simmons et al., 2020);
- Filmes e Fitas: O adesivo é fornecido como uma película sólida ou suportada, permitindo um controlo rigoroso da espessura da linha de adesivo (Ebnesajjad & Landrock, 2015).

2.1.4. Modos de carregamento

O comportamento mecânico e a resistência final de uma junta adesiva dependem diretamente da forma como a carga é aplicada em relação ao plano de colagem. As juntas adesivas são muito resistentes a alguns tipos de esforço, mas podem ser bastante frágeis diante de outros tipos (L. Silva et al., 2007).

Os modos de carregamento são classificados em quatro categorias principais, conforme a Figura 3. A compreensão destes modos é vital, pois a resistência da ligação depende drasticamente da direção da força aplicada em relação ao plano de colagem (Adams, 2021).

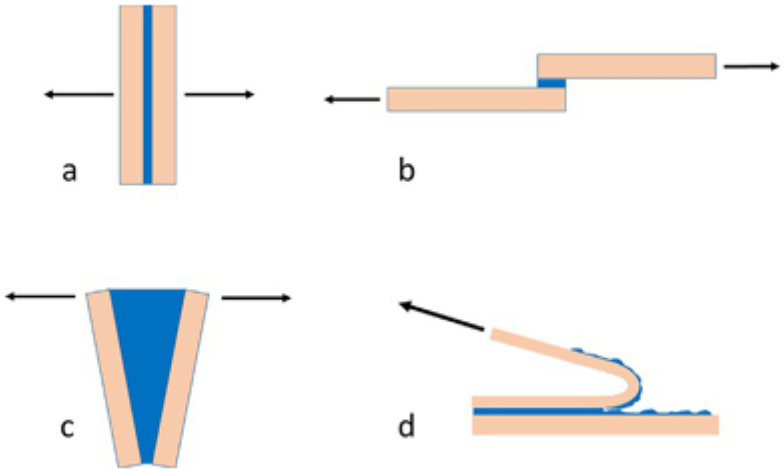


Figura 3 - Diferentes *modos de carregamentos: (a) Tração, (b) Corte, (c) Clivagem, (d) Arrancamento (adaptado de Adams, 2021)*

1. Tração e Compressão:

   A força é aplicada perpendicularmente ao plano da junta, afastando ou unindo os substratos, teoricamente, na tração a tensão distribui-se uniformemente por toda a área, conforme a Figura 4. No entanto, na prática, é extremamente difícil garantir uma carga de tração pura sem introduzir excentricidades (L. Silva et al., 2007).

   As juntas adesivas têm excelente resistência à compressão e este modo não é geralmente crítico para a falha, servindo até para manter a integridade da junta (L. Silva et al., 2007).

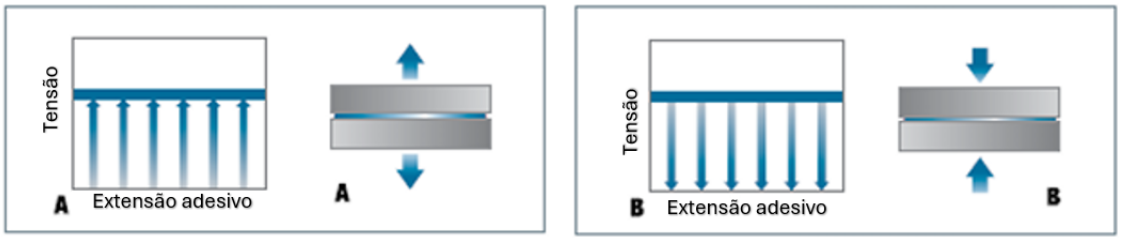


Figura 4 - Distribuição de tensão: (A) tração, (B) compressão (adaptado de EAA Aluminium Automotive Manual-Joining, 2015)

2. Corte:

   A força é aplicada paralelamente ao plano da linha de adesivo, fazendo com que os substratos deslizem um sobre o outro, toda a área de sobreposição contribui para a resistência da junta. Embora a distribuição de tensões não seja perfeitamente uniforme (existindo picos de tensão nas extremidades da sobreposição devido à deformação diferencial dos substratos) como mostra a Figura 5, o corte permite tirar o máximo partido da resistência coesiva do adesivo (L. Silva et al., 2007).

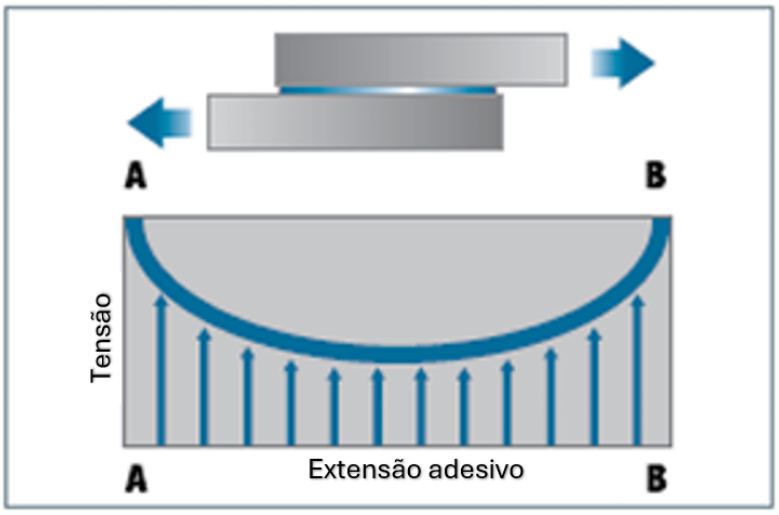


Figura 5 - Distribuição de tensão no corte (adaptado de EAA Aluminium Automotive Manual-Joining, 2015)

   É o modo mais eficiente para transmissão de carga e o que apresenta melhor resistência à fadiga (EAA Aluminium Automotive Manual-Joining, 2015).

3. Clivagem:

   A clivagem ocorre quando forças de tração são aplicadas de forma assimétrica numa extremidade de uma junta composta por substratos rígidos, a rigidez dos substratos impede a sua deformação (flexão), criando um efeito de alavanca. A carga não se distribui pela área; concentra-se intensamente numa das extremidades da junta, conforme a Figura 6, o adesivo tem de suportar quase toda a carga numa área muito

reduzida, enquanto o restante da área de colagem permanece praticamente sem carga. Isto leva a uma iniciação de fenda prematura (L. Silva et al., 2007).

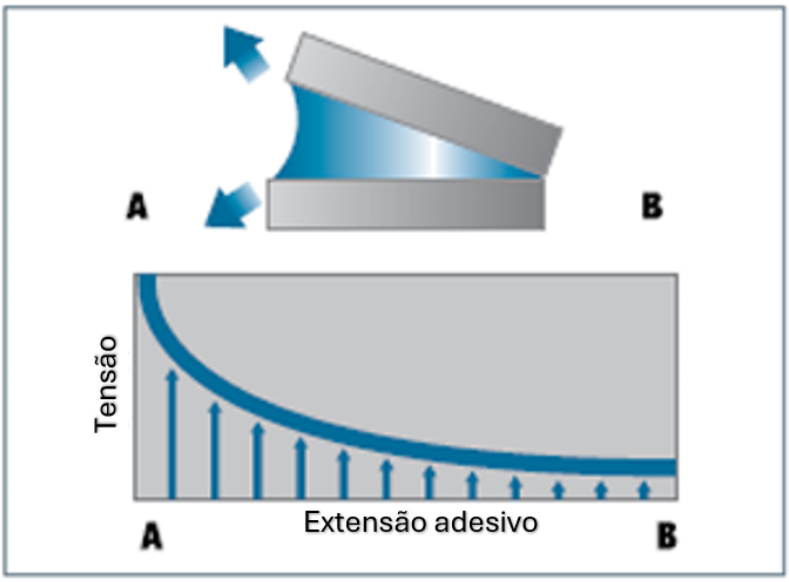


Figura 6 - Distribuição de tensão na clivagem (adaptado de EAA Aluminium Automotive Manual-Joining, 2015)

Este modo deve ser evitado através do aumento da rigidez da junta ou alteração da geometria (Simmons et al., 2020).

4. Arrancamento:

O arrancamento (*peel*) é amplamente considerado o modo de carregamento mais crítico e penalizador para as juntas adesivas, devendo ser mitigado ou eliminado na fase de design estrutural. Este modo de falha ocorre tipicamente quando pelo menos um dos aderentes é flexível e, sob ação de forças externas, sofre deformação por flexão, afastando-se do plano da união (Adams, 2021; *EAA Aluminium Automotive Manual-Joining*, 2015).

A principal razão para a severidade deste carregamento reside na distribuição de tensões. Ao contrário do corte (*shear*), aonde a carga é distribuída pela área da sobreposição, no arrancamento a tensão concentra-se numa linha extremamente estreita na fronteira do adesivo (frente da fissura). Conforme observado na Figura 7, esta geometria gera singularidades de tensão onde os valores locais de tração excedem rapidamente a resistência coesiva do material (Dengiz, 2025).

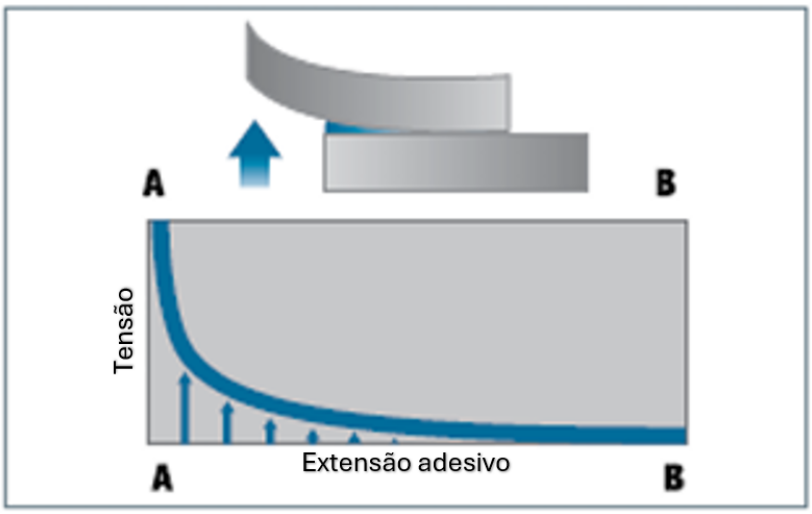


Figura 7 - Distribuição de tensão no arrancamento (adaptado de EAA Aluminium Automotive Manual-Joining, 2015)

2.1.5. Modos de Rotura

A avaliação do desempenho de uma junta adesiva não se esgota na determinação da sua carga máxima de rutura. A análise da superfície de fratura é um elemento de diagnóstico fundamental que permite validar o processo de fabrico e compreender os mecanismos de degradação da ligação (Jurgen Klingen, 2022; Petrie, 2000).

Os modos de rotura são classificados em três categorias principais, baseadas na localização física da separação em relação à linha de adesivo, na Figura 8 é possível observar os 2 principais modos.

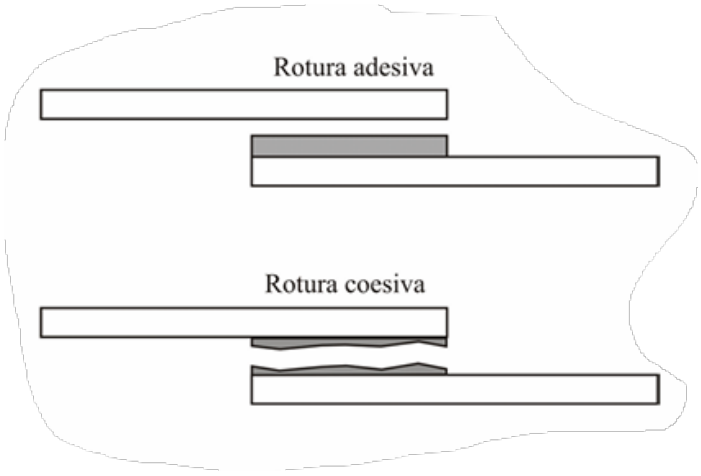


Figura 8 - Modos de rotura (L. Silva et al., 2007)

1. Rotura Coesiva:

   Rotura coesiva no adesivo**,** a fratura ocorre dentro da camada de adesivo. Este é o modo de falha preferencial para o design estrutural. A sua ocorrência demonstra que as forças de adesão interfacial (entre o adesivo e o substrato) são superiores à

resistência interna (coesão) do próprio adesivo. Indica que a preparação de superfície foi eficaz e que o potencial mecânico máximo do adesivo foi explorado (Jurgen Klingen, 2022).

A rotura coesiva no substrato representa o cenário ideal em termos de eficiência da união. Ocorre frequentemente na colagem de materiais compósitos (delaminação inter-laminar ou arrancamento de fibras) ou materiais de baixa resistência (madeira, betão). Demonstra que a junta adesiva é mecanicamente mais resistente que os componentes que une (L. Silva et al., 2007).

2. Rotura Adesiva ou Interfacial:

   A rotura adesiva ocorre na fronteira (interface) entre o adesivo e o substrato. Visualmente, uma das superfícies do substrato aparece "limpa" ou nua após a falha, enquanto o adesivo permanece aderido ao substrato oposto, este é considerado um modo de falha inaceitável para aplicações de engenharia de alta responsabilidade. Sinaliza uma adesão fraca, geralmente imputável a erros no processo de fabrico, nomeadamente na preparação das superfícies dos substratos (L. Silva et al., 2007).

3. Rotura Mista:

   Na prática industrial e experimental, é comum observar modos de falha mistos, onde a fratura transita entre zonas de rotura coesiva e zonas de rotura adesiva (L. Silva et al., 2007).

2.1.6. Preparação superficial

A preparação das superfícies dos substratos (aderentes) é unanimemente reconhecida na literatura como a etapa isolada mais crítica no processo de fabrico de uma junta adesiva. A experiência e a investigação demonstram que um adesivo de alto desempenho aplicado sobre uma superfície mal preparada resultará numa junta medíocre e imprevisível, ao passo que um adesivo convencional aplicado sobre uma superfície devidamente tratada pode oferecer um comportamento estrutural robusto (Jurgen Klingen, 2022; Petrie, 2000).

A seleção do método de preparação adequado não é arbitrária e depende de vários fatores interligados: a natureza química do substrato (metal, polímero, compósito), o nível de resistência e durabilidade exigido (aplicação estrutural ou provisória), os custos operacionais, a cadência de produção e as restrições ambientais relativas ao uso de químicos perigosos (Adams & Drinkwater, 1997).

O objetivo do tratamento superficial é triplo: remover contaminantes e camadas limite fracas (*Weak Boundary Layers*), aumentar a energia de superfície para promover a molhabilidade e criar mecanismos de adesão mecânica ou química. Estes tratamentos podem ser classificados em duas categorias funcionais: processos passivos e processos ativos (Jurgen Klingen, 2022; L. Silva et al., 2007).

1. Processos Passivos: Os tratamentos passivos atuam essencialmente através da remoção de material. O seu objetivo é eliminar barreiras físicas à adesão sem necessariamente alterar a química intrínseca da superfície do substrato de forma estável ou duradoura (L. Silva et al., 2007).

   Dentro dos métodos passivos o primeiro passo preliminar é o desengorduramento (limpeza com solvente). Superfícies metálicas e poliméricas contêm frequentemente óleos de maquinagem, gorduras de manuseamento ou agentes desmoldantes. Estes contaminantes possuem baixa tensão superficial, impedindo que o adesivo molhe o substrato. Para se realizar a limpeza são utilizados solventes voláteis (acetona e isopropanol) ou o processo de desengorduramento a vapor. A maior limitação do desengorduramento é o facto do desengorduramento apenas limpar a superfície, não promove rugosidade nem ativação química (Barnes & Pashby, 2000; Jurgen Klingen, 2022; Petrie, 2000).

   Outro método passivo é a abrasão mecânica que visa remover a camada de óxido nativo (que é frequentemente frágil e higroscópica) e aumentar a área superficial efetiva. A abrasão pode ser realizada de forma manual, através do uso de lixas e escovas de aço ou preferencialmente utilizando jato de areia/granalha (*grit blasting*). O processo de abrasão cria uma macrorrugosidade que promove o travamento mecânico (*mechanical interlocking*). O adesivo flui para as irregularidades da superfície, ancorando-se fisicamente após a solidificação (Barnes & Pashby, 2000; L. Silva et al., 2007). Para aplicações estruturais críticas (aeroespacial, automóvel), onde se exige durabilidade superior a 15 anos, a abrasão mecânica é insuficiente, sendo necessário recorrer a tratamentos ativos (Barnes & Pashby, 2000).

2. Processos Ativos: Os tratamentos ativos visam alterar a físico-química da superfície. O seu objetivo não é apenas limpar, mas adicionar grupos funcionais, modificar a estrutura do óxido ou aumentar drasticamente a energia de superfície (Ebnesajjad & Landrock, 2015).

   Um dos métodos ativos é o tratamento químico e o eletroquímico, utlizados para modificar a camada de óxido em metais como o alumínio, o processo consiste na imersão em soluções ácidas (ataque químico ou decapagem ácida). Remove o óxido nativo irregular e substitui-o por uma camada de óxido fina e quimicamente uniforme. Os processos eletrolíticos, como a anodização com ácido fosfórico (*Phosphoric Acid Anodizing* - PAA), criam uma camada de óxido espessa com uma morfologia porosa e hexagonal altamente organizada. O adesivo penetra nestes poros nanométricos, criando uma microestrutura compósita na interfase que é excecionalmente resistente à hidratação e corrosão (Barnes & Pashby, 2000; Petrie, 2000).

   Para substratos poliméricos, que possuem naturalmente baixa energia de superfície e inércia química, utilizam-se ataques químicos específicos para quebrar as cadeias moleculares superficiais e criar pontos de ancoragem. Um exemplo clássico é o tratamento de fluoropolímeros (como o PTFE/Teflon), que removem átomos de flúor

da superfície, criando uma camada carbonácea reativa que permite a adesão. Em poliolefinas (Polipropileno - PP, Polietileno - PE), utilizam-se frequentemente soluções oxidantes fortes para introduzir grupos polares (carbonilos e hidroxilos) na superfície (Ebnesajjad & Landrock, 2015; Petrie, 2000).

Outro método ativo são os promotores de adesão, que são moléculas híbridas bifuncionais aplicadas como "primários". Uma extremidade da molécula (grupo inorgânico) reage quimicamente com o óxido metálico ou vidro, enquanto a outra extremidade (grupo orgânico) copolimeriza com a matriz do adesivo durante a cura. Criam uma "ponte química" contínua entre o substrato inorgânico e o adesivo orgânico, convertendo ligações secundárias (suscetíveis à água) em ligações primárias fortes e duráveis (Barnes & Pashby, 2000; L. Silva et al., 2007).

3. Processos Ativos Físicos: Para além da via húmida (química), a indústria utiliza largamente métodos físicos "secos" para ativar polímeros (Ebnesajjad & Landrock, 2015).

   Um dos métodos ativos físicos é a descarga corona, que utiliza uma descarga elétrica de alta voltagem para ionizar o ar e bombardear a superfície do substrato com ozônio e radicais livres. É o método padrão para filmes plásticos finos em processos contínuos (Petrie, 2000).

   Outro processo é o tratamento por chama, que envolve a exposição breve da superfície a uma chama oxidante (rica em oxigénio). O calor e as espécies reativas da chama oxidam a superfície do polímero, aumentando a sua tensão superficial. É comum em componentes tridimensionais como para-choques de automóveis (Petrie, 2000).

   O método mais sofisticado e limpo é o plasma, que utiliza um gás ionizado (plasma) a baixa pressão (vácuo) ou à pressão atmosférica, capaz de limpar a superfície a nível atómico e introduzir grupos funcionais específicos dependendo do gás utilizado (Árgon, Oxigénio, Azoto), garantindo a máxima molhabilidade e adesão sem resíduos químicos (Ebnesajjad & Landrock, 2015).

Impulsionada por exigências de alta cadência produtiva e redução de custos, a indústria automóvel privilegia processos de preparação de superfície automatizados e "secos", em contraste com os morosos banhos químicos de imersão típicos da aeronáutica. O setor adota predominantemente tratamentos físicos robotizados, como a chama para grandes componentes de polipropileno e o plasma atmosférico para compósitos e áreas complexas, garantindo a ativação superficial rápida necessária para assegurar a resistência ao impacto (*crashworthiness*). Esta estratégia de eficiência é complementada pelo uso de adesivos estruturais tolerantes a óleo, que eliminam etapas de desengorduramento em metais, e pela aplicação robotizada de primários em vidros, assegurando a integridade estrutural e a repetibilidade essenciais à produção em massa (Ebnesajjad & Landrock, 2015; Petrie, 2000).

2.1.7. Tipos de juntas

A seleção da geometria da junta é uma etapa determinante no projeto de estruturas coladas. Ao contrário da soldadura ou fixação mecânica, onde a concentração de tensão é frequentemente inevitável, o design de uma junta adesiva tem como objetivo primário manipular a distribuição de tensões para maximizar a área de carga e garantir que o adesivo trabalhe sob modos de solicitação favoráveis (corte ou compressão), minimizando o arrancamento e a clivagem (Simmons et al., 2020).

As configurações geométricas podem ser agrupadas em famílias principais, cada uma com características distintas de eficiência. A Figura 9 mostra algumas das possíveis configurações de juntas adesivas.

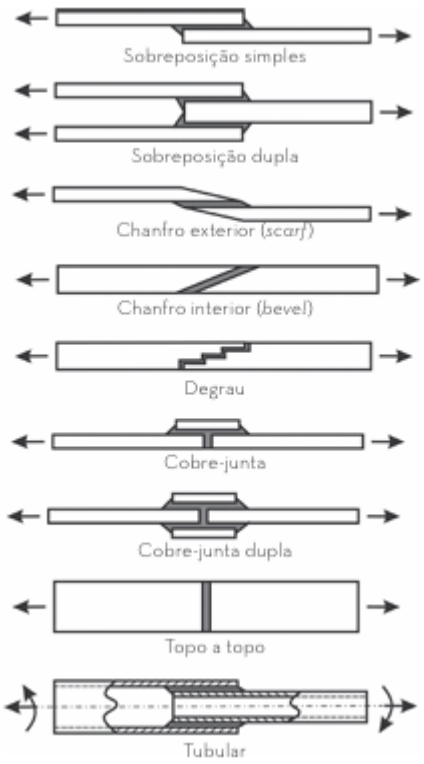


Figura 9 - Configurações geométricas de juntas adesivas (L. Silva et al., 2017)

- Juntas de Sobreposição: Esta é a família mais comum de juntas adesivas, favorecida pela simplicidade de fabrico e pela facilidade de montagem de chapas finas. A configuração mais elementar, onde dois ou mais substratos são sobrepostos numa determinada extensão (L. Silva et al., 2007).
- Juntas Biseladas: As extremidades dos substratos são maquinadas num ângulo (bisel) para se encontrarem numa linha inclinada, mantendo a espessura total constante. Teoricamente, esta é a única junta que permite uma distribuição de tensão uniforme (constante) ao longo de todo o comprimento de colagem, eliminando as concentrações de tensão nas extremidades (Adams & Wake, 1984).

- Juntas de Topo: As juntas de topo simples são intrinsecamente fracas e instáveis devido à pequena área de colagem e à sensibilidade à clivagem (Adams & Wake, 1984).
- Juntas Cilíndricas ou Coaxiais: Amplamente utilizadas na montagem de veios, tubagens e inserções metálicas. O parâmetro crítico é a folga radial. Se for demasiado pequena, o adesivo é "varrido" durante a inserção, se for demasiado grande, a resistência coesiva diminui e o alinhamento concêntrico torna-se difícil (Adams & Wake, 1984; L. Silva et al., 2007).
- Juntas de Canto e em T: Essenciais para a criação de estruturas tridimensionais (como *spaceframes* automóveis) e reforço de painéis. Em juntas de canto, a presença de um filete de adesivo (excesso de adesivo espremido na aresta) é benéfica. O filete aumenta a área de transferência de carga e suaviza as concentrações de tensão geométrica na esquina da junta (*EAA Aluminium Automotive Manual-Joining*, 2015).

2.1.8. Adesivos na indústria automóvel

A indústria automóvel tem sido o principal motor de inovação na tecnologia de união de materiais nas últimas décadas. Pressionados por regulamentações ambientais cada vez mais estritas sobre emissões de CO_2 e pela necessidade de eficiência energética, os fabricantes enfrentam o desafio de reduzir drasticamente o peso dos veículos (*lightweighting*) sem comprometer a segurança ou o conforto (Barnes & Pashby, 2000).

Esta procura levou à substituição das carroçarias tradicionais de aço maciço por estruturas multimateriais, integrando ligas de alumínio, aços de ultra-alta resistência (UHSS) e compósitos de fibra de carbono. Neste contexto, a soldadura por pontos (*spot welding*), que dominou a montagem automóvel durante um século, revela-se insuficiente ou inaplicável, abrindo caminho para a consolidação da colagem estrutural (Bidadi et al., 2024).

A adoção de adesivos na construção de carroçarias (*Body-in-White*) oferece vantagens competitivas decisivas sobre os métodos mecânicos (como a rebitagem autoperfurante) e térmicos (Barnes & Pashby, 2000):

- Redução de peso e aumento da rigidez: A colagem contínua permite uma transferência de carga mais eficiente do que os pontos de soldadura discretos, resultando numa estrutura significativamente mais rígida (aumento da rigidez torcional) e leve. O chassi do *Lotus Elise* é frequentemente citado como um exemplo paradigmático de uma estrutura de alumínio inteiramente colada;
- União de materiais dissimilares: Os adesivos formam uma barreira dielétrica entre os substratos, prevenindo a corrosão galvânica que ocorreria, por exemplo, no contacto direto entre alumínio e aço ou fibra de carbono;
- Melhoria do NVH e fadiga: A natureza polimérica da camada adesiva confere-lhe capacidade de amortecimento, reduzindo a transmissão de ruído e vibrações (NVH - *Noise, Vibration, Harshness*). Adicionalmente, a eliminação de furos e concentrações de tensão locais aumenta drasticamente a vida à fadiga da estrutura.

Segundo o (*EAA Aluminium Automotive Manual-Joining*, 2015), as aplicações no veículo podem ser categorizadas pela função:

1. Colagem Estrutural (*Structural Bonding*): Utilização de adesivos epóxi modificados (1K ou 2K) nas longarinas, pilares e reforços da carroçaria para garantir a integridade em caso de colisão.
2. Colagem de Bainhas (*Hem Flange Bonding*): União das chapas exteriores e interiores de portas, capôs e malas. O adesivo confere rigidez, veda a junta contra a corrosão e melhora a estética exterior (sem marcas de soldadura).
3. Colagem de Vidros (*Direct Glazing*): O para-brisas é colado à carroçaria (geralmente com poliuretano) como mostra a Figura 10, tornando-se um componente estrutural que contribui para a rigidez do tejadilho e segurança em capotamento.



*Figura 10 - Colagem do para-brisas (*EAA Aluminium Automotive Manual-Joining*, 2015)*

4. Anti-Vibração (*Anti-Flutter*): Adesivos de borracha aplicados entre a chapa exterior (por exemplo no tejadilho, porta) e as travessas de reforço para evitar a vibração do painel sem criar marcas visíveis.

Para que a tecnologia de colagem substitua eficazmente os métodos de fixação tradicionais (como a soldadura por pontos e a rebitagem) na estrutura primária do veículo (*Body-in-White*), os adesivos devem satisfazer um conjunto rigoroso de requisitos. A validação destes materiais não se baseia apenas na resistência estática, mas sim na sua capacidade de manter a integridade estrutural sob condições extremas de fabrico e durante toda a vida útil do veículo (Bidadi et al., 2024).

A integração na linha de montagem exige adesivos robustos e tolerantes. Os adesivos devem ser capazes de deslocar ou absorver os óleos de estampagem presentes nas chapas metálicas, garantindo a adesão sem necessidade de desengorduramento prévio extensivo. O adesivo não curado deve possuir viscosidade e tixotropia suficientes para resistir à "lavagem" durante os banhos de pré-tratamento e eletroforese, como mostra a Figura 11. A formulação deve permitir a cura completa durante a passagem nos fornos de secagem da pintura, tipicamente a 160–180°C (Petrie, 2000).

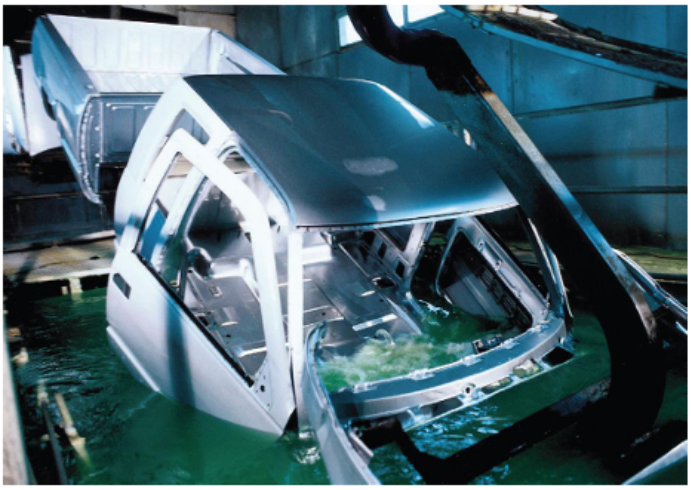


*Figura 11 - Veículo a entrar na fase de imersão para pré-tratamento com múltiplos metais (*EAA Aluminium Automotive Manual-Joining*, 2015)*

No caso de uma colisão do veículo, a estrutura colada deve deformar-se plasticamente para absorver a energia cinética, sem sofrer falha frágil ou catastrófica. Isto exige o uso de adesivos "*Crash Resistant*" (CR), tipicamente epóxidos modificados, que mantêm a ductilidade mesmo a altas taxas de deformação e baixas temperaturas (Bidadi et al., 2024).

A junta deve suportar milhões de ciclos de carga ao longo da vida do veículo. A capacidade de prever a vida à fadiga é fundamental para otimizar o design e evitar falhas em serviço, com isso existem alguns ensaios para certificar a junta, são eles (Bagni et al., 2023):

- Ensaio de arrancamento por impacto (ISO 11343): Considerado o padrão para a segurança passiva. Uma cunha é impulsionada a alta velocidade (2 a 3 m/s) contra a junta, medindo-se a energia absorvida. Adesivos aptos para uso estrutural devem exibir um modo de falha coesivo e elevada absorção de energia neste teste;
- Ensaios de corrosão cíclica: Submetem as juntas a ciclos alternados de nevoeiro salino, humidade e secagem, simulando o envelhecimento acelerado. São cruciais para validar a resistência à degradação interfacial e à corrosão filiforme;
- Ensaios e modelação de fadiga: A caracterização à fadiga é vital, dada a natureza dinâmica das cargas num automóvel;
    - Ensaios S-N: Utilizam-se provetes de sobreposição simples para determinar as curvas de Tensão vs. Número de Ciclos (*N*);
    - Metodologias de estimativa de vida: Recentemente, a indústria tem focado no desenvolvimento de metodologias robustas para prever a vida à fadiga. Em (Bagni et al., 2023) são propostas abordagens práticas que combinam a análise de elementos finitos *(Finite Element Analysis - FEA*) com dados experimentais de fadiga do material adesivo. Estas abordagens permitem aos engenheiros simular o dano acumulado em geometrias complexas e otimizar a estrutura virtualmente, reduzindo a dependência de testes físicos dispendiosos e o risco de falhas em serviço.

Uma vez que a integridade estrutural do veículo depende diretamente do desempenho destas uniões, a sua implementação em componentes de segurança exige uma validação rigorosa. O capítulo seguinte descreve as metodologias de ensaio padronizadas utilizadas para quantificar a resistência e prever o comportamento da junta sob as diversas cargas de serviço.

2.2. Ensaios mecânicos

A caracterização mecânica é uma etapa fundamental no projeto de juntas adesivas, servindo tanto para o controlo de qualidade na produção como para a obtenção de propriedades intrínsecas necessárias à modelação numérica. Ao contrário dos metais, cujas propriedades são frequentemente isotrópicas e bem definidas, o comportamento mecânico de um adesivo depende intrinsecamente do modo de carregamento, da geometria da junta, da preparação da superfície e das condições ambientais (temperatura e humidade) (Petrie, 2000; L. Silva et al., 2007).

Neste contexto, o presente capítulo descreve as metodologias de ensaio essenciais para capturar essa complexidade. A exposição organiza-se segundo a natureza do carregamento: inicia-se com os ensaios quase-estáticos (tração, corte e arrancamento), fundamentais para a determinação da resistência imediata, e evolui para a análise do comportamento sob condições dinâmicas e de longa duração (impacto, fadiga e fluência), essenciais para prever o desempenho em serviço real.

2.2.1. Ensaios à tração

Os ensaios de tração em juntas adesivas têm como objetivo avaliar a resistência do adesivo quando solicitado perpendicularmente ao plano da colagem. Embora a determinação da resistência à tração pareça intuitiva, a caracterização experimental deste modo é complexa devido a fenómenos de concentração de tensão (Adams & Wake, 1984; L. Silva et al., 2007).

Existem duas metodologias distintas para avaliar o comportamento à tração: o ensaio de Junta de Topo (*Butt Joint*) e o ensaio de Adesivo Maciço (*Bulk Adhesive*).

O método mais comum é a junta de topo neste ensaio, dois cilindros ou barras retangulares são colados topo a topo e tracionados. Embora conceptualmente simples, este ensaio apresenta dificuldades práticas significativas (L. Silva et al., 2007):

1. Ensaio de Junta de Topo: Este é o método utilizado para avaliar a resistência de uma união estrutural real sob carga de tração. O ensaio é tipicamente regido pelas normas ASTM D2095 ou ISO 6922. A geometria consiste em dois substratos cilíndricos ou barras de secção retangular colado topo a topo (L. Silva et al., 2007).

   A principal limitação deste ensaio é que a tensão não é uniforme ao longo da interface. Como os substratos metálicos são muito mais rígidos que o adesivo, eles impedem a contração lateral do polímero (efeito de *Poisson*) quando este é esticado. Esta restrição gera concentrações de tensão severas (singularidades) na periferia da junta. O ensaio é extremamente sensível ao alinhamento axial da máquina de ensaios. Qualquer

excentricidade mínima introduz um momento fletor, transformando a tração pura em clivagem (L. Silva et al., 2007).

2. Ensaio de Adesivo Maciço: Para fins de design estrutural e simulação numérica (elementos finitos), não basta saber a carga de rotura da junta; é necessário conhecer as propriedades intrínsecas do material adesivo (Boutar et al., 2017).

   Para tal, elimina-se o substrato e testa-se apenas o polímero. Segue as normas ASTM D638 ou ISO 527 (vulgarmente usadas para plásticos). O adesivo é curado sob a forma de uma placa ou filme e posteriormente maquinado na forma de "haltere" (*dog-bone*) (Reis et al., 2019).

   Ao remover os substratos rígidos, elimina-se o efeito de restrição lateral e as singularidades de borda. O provete deforma-se livremente, permitindo um estado uniaxial de tensão quase puro na zona útil. Com o uso de um extensómetro, este ensaio permite obter a curva completa Tensão-Deformação ($\sigma - \epsilon$), da qual se extraem (Reis et al., 2019):

   Módulo de Young (E): A rigidez do adesivo.

   Tensão de Cedência (σ_y): O limite elástico.

   Tensão de Rotura (σ_f) e deformação na rotura (σ_f): A ductilidade do adesivo.

O ensaio de adesivo maciço foi executado por (Reis et al., 2019) que realizou o teste em busca de determinar as propriedades mecânicas intrínsecas do adesivo epóxi (Betamate 2096) sem a influência dos substratos, na Figura 12 é possível observar as dimensões do corpo de prova fabricado.

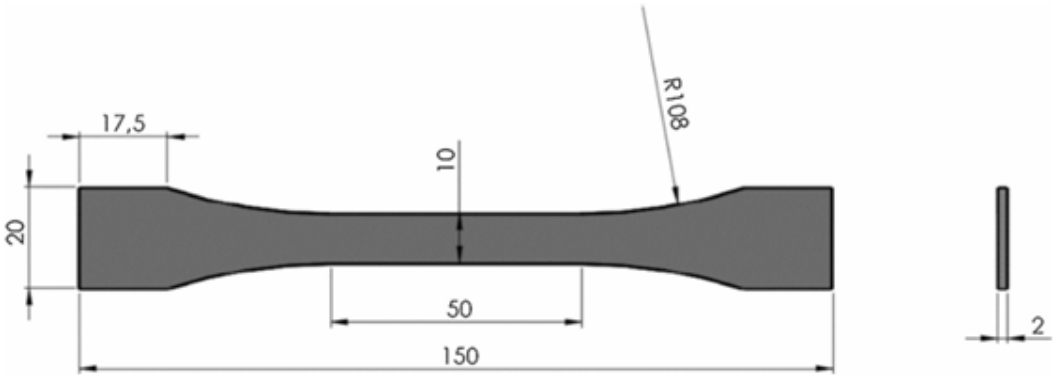


Figura 12 - Dimensões do "haltere" para o ensaio de adesivo maciço (Reis et al., 2019)

Os resultados do ensaio à temperatura ambiente ficaram muito próximos aos fornecidos pelo fabricante, validando o método de ensaio, conforme é possível observar no gráfico de tensão por deformação na Figura 13.

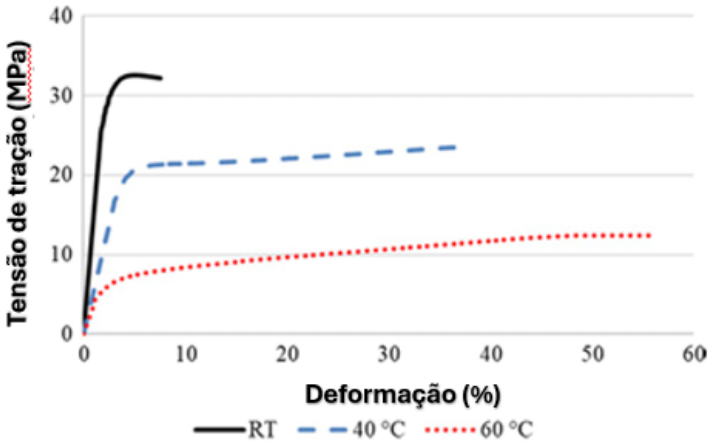


Figura 13 - Gráfico tensão deformação (adaptado de Reis et al., 2019)

2.2.2. Ensaios ao corte

O corte (*Shear*) é o modo de carregamento preferencial para o qual a maioria das juntas adesivas estruturais é desenhada. Neste modo, a força é aplicada paralelamente ao plano da junta, promovendo o deslizamento relativo dos substratos. Consequentemente, a caracterização da resistência ao corte é a prática mais comum na indústria para a qualificação de adesivos (Adams & Wake, 1984).

Contudo, é fundamental distinguir entre a "resistência da junta" (valor aparente) e a "resistência do material" (propriedade intrínseca). Para tal, utilizam-se diferentes configurações de ensaio, sendo as mais relevantes a sobreposição simples (*Single Lap Shear - SLS*) e o corte em aderentes espessos (*Thick Adherend Shear Test - TAST*) (Boutar et al., 2017).

- Sobreposição Simples (SLS): É o ensaio universal de referência devido à sua simplicidade e baixo custo. Consiste em duas chapas sobrepostas e coladas. No entanto, os resultados devem ser interpretados com cautela: devido à excentricidade das linhas de carga, ocorre a rotação da junta, introduzindo tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição. Portanto, o valor de "resistência ao corte" obtido é um valor aparente e não uma propriedade intrínseca pura do material (Simmons et al., 2020). A Figura 14 demonstra um exemplo de um ensaio de ao corte por sobreposição simples.

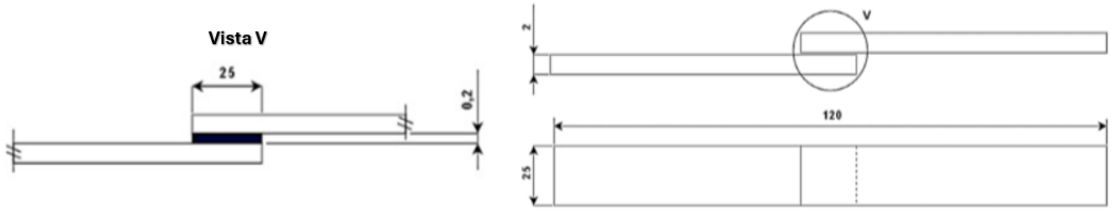


Figura 14 - Dimensões de junta para o ensaio ao corte com a configuração de sobreposição simples (P. D. A. Da Silva et al., 2025)

- *Thick Adherend Shear Test* (TAST): é considerado o método de referência para a caracterização das propriedades de corte intrínsecas de adesivos estruturais. Ao contrário do ensaio de (SLS), que serve para controlo de qualidade, o TAST é desenhado especificamente para isolar o comportamento do adesivo ao corte puro, eliminando os efeitos parasitas de flexão e arrancamento (peel). Este ensaio é normalizado pela ISO 11003-2 (Boutar et al., 2017).
- Ensaio de borboleta (Arcan): baseia-se na utilização de um provete com geometria específica em forma de borboleta, sendo aplicável tanto à caracterização do adesivo em massa (*bulk*) como a juntas coladas. A fixação da amostra é realizada através de quatro pontos de ancoragem, como mostra a Figura 15, sendo que a concentração de tensões induzida no material é diretamente influenciada pelo raio dos entalhes laterais. É na secção central, compreendida entre estes entalhes, que se desenvolve o esforço de corte predominante. Para a monitorização das deformações de corte, é necessária a instrumentação do provete com extensómetros ou o recurso a sistemas de medição ótica (L. Silva et al., 2007).



Figura 15 - Ferramenta e provete para o ensaio Arcan (L. Silva et al., 2007)

Embora este método se destaque pela sua versatilidade, sendo aplicável a diversos tipos de adesivos e condições ambientais para a determinação da tensão e do módulo de corte em amostras de dimensões reduzidas, a sua execução apresenta limitações técnicas relevantes. A implementação do ensaio exige o recurso a acessórios de fixação complexos e enfrenta desafios na medição precisa de deformações, acrescidos do facto de a distribuição de tensões na secção de teste não ser perfeitamente uniforme, afastando-se, portanto, de um estado de corte puro ideal (L. Silva et al., 2007).

O principal defeito dos ensaios de corte convencionais (como o SLS) é a rotação da junta devido à excentricidade da carga, o que introduz tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição. O TAST resolve este problema através de duas modificações geométricas fundamentais, utiliza substratos de aço com espessura elevada (tipicamente entre 6 a 12 mm),

a zona da junta é frequentemente maquinada ou os adereços são colados com lamelas de compensação, de modo a garantir que a linha de ação da força aplicada passa exatamente pelo centro da espessura da camada de adesivo (Adams & Wake, 1984; Boutar et al., 2017; L. Silva et al., 2007).

Para mitigar os efeitos de flexão e as tensões de arrancamento (*peel*) típicos das juntas de sobreposição simples, (Cognard et al., 2008) recorrem ao ensaio (TAST), conforme ilustrado na Figura 16. A geometria específica deste provete, detalhada em (a), utiliza substratos de elevada rigidez (espessura aproximada de 9,5 mm) e uma sobreposição curta para garantir um estado de tensão predominantemente de corte na linha de adesivo. A configuração experimental apresentada em (b) demonstra a fixação robusta do conjunto e o posicionamento da instrumentação, essencial para medir a deformação de corte com precisão e minimizar a influência da deformabilidade da máquina nos resultados.

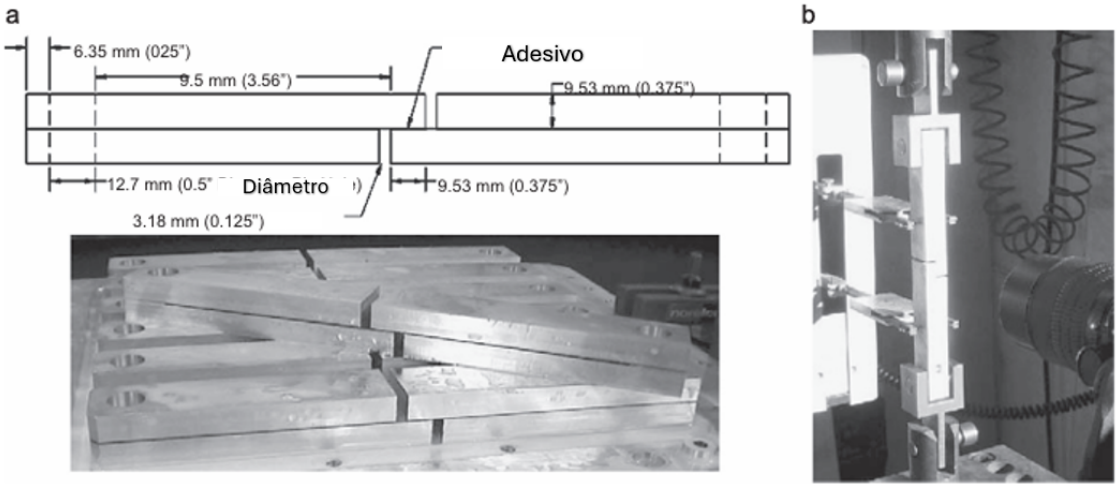


Figura 16 - Detalhes do ensaio TAST: (a) Geometria e dimensões do provete com aderentes espessos; (b) Montagem experimental com fixação por pinos e extensómetro local (adaptado de Cognard et al., 2008)

2.2.3. Ensaios de arrancamento

Os adesivos são intrinsecamente sensíveis a concentrações de tensão. Os ensaios de arrancamento (*Peel tests*) são desenhados para avaliar a tenacidade do adesivo e a sua resistência à propagação de fendas quando a carga é concentrada numa linha estreita.

- Ensaio T-Peel**:** Utilizado para substratos flexíveis. As duas pontas descoladas são puxadas em direções opostas, formando um "T". É amplamente usado na indústria aeronáutica e de embalagens. Este ensaio é normalizado pela norma ASTM D1876 (Dengiz, 2025).

  Em (Dengiz, 2025) foi realizado um ensaio com uma junta do tipo bimetálica, composta por aderentes de aço (AISI 430) e alumínio (EN AW 1050 H14), ambos com 1 mm de espessura. Foi utilizado um adesivo estrutural de base epóxi (Akfix® E350) com uma espessura de linha de adesivo controlada de 0,2 mm, conforme a Figura 17. Ao analisar a falha do adesivo, imediatamente antes da propagação da fenda, regista-se uma localização de deformação intensa na ponta do adesivo, atingindo valores de

deformação de cerca de 500%, o que demonstra a capacidade de deformação do adesivo sob cargas de arrancamento.

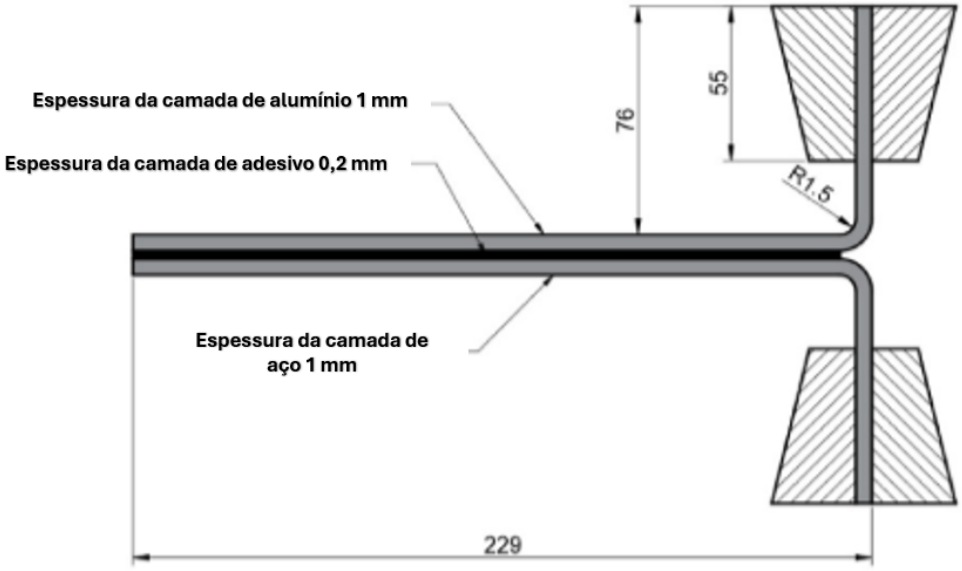


Figura 17 - Dimensões do corpo de prova para o ensaio de arrancamento (adaptado de Dengiz, 2025)

- Ensaio de Rolete Flutuante (*Floating Roller Peel*): Específico para quando um aderente é flexível e o outro é rígido. O teste consiste em puxar a extremidade do aderente flexível, separando-o da superfície do aderente rígido, com um ângulo controlado pela geometria do dispositivo de roletes (Nóbrega et al., 2023).

  Em (Nóbrega et al., 2023) realizou o ensaio de rolete flutuante utilizando o adesivo estrutural epóxi Araldite® 2015. Utilizando alumínio (AW 6082 – T651) com espessuras distintas de 3 mm para o aderente rígido e 0,6 mm para o aderente flexível, a espessura de adesivo foi de 0,2 mm. O estudo conclui que a variação na velocidade de teste tem influência significativa nos resultados (viscoelasticidade), o que explicou a diferença entre os valores experimentais obtidos (1,38 N/mm) e os valores tabelados pelo fabricante (4 N/mm), uma vez que as normas nem sempre especificam a mesma velocidade ou espessura de adesivo. A Figura 18 mostra como funciona a cinemática do ensaio de roletes flutuantes, e na Figura 19 um gráfico padrão de força/deslocamento.

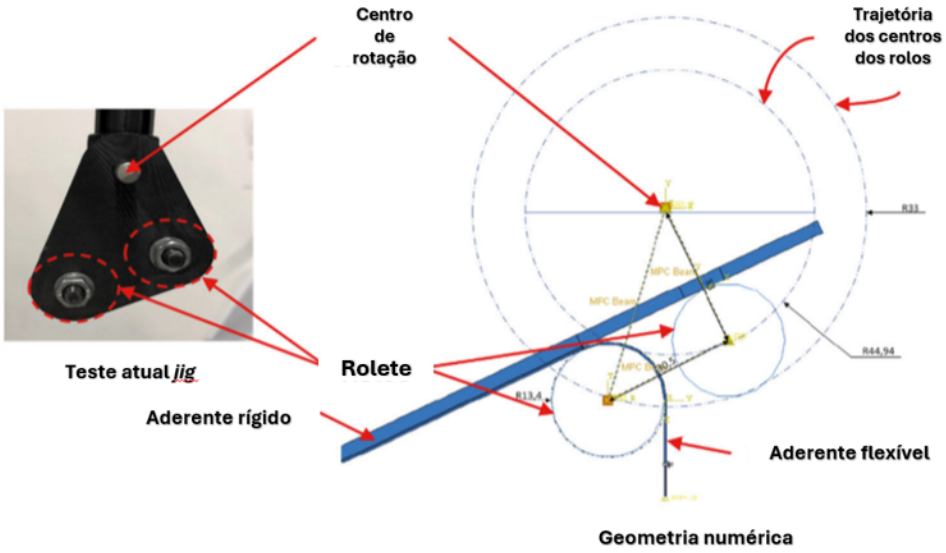


Figura 18 - Cinemática do ensaio de rolete flutuantes (adaptado de Nóbrega et al., 2023)

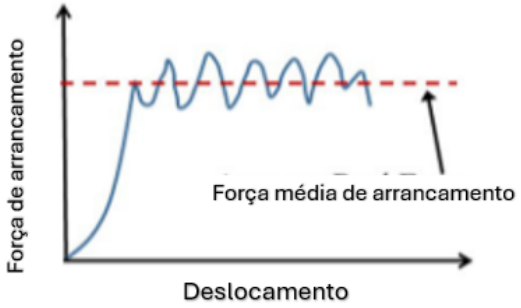


Figura 19 - Ensaio de roletes flutuantes gráfico força/deslocamento (adaptado de Li et al., 2022)

- Ensaio da Cunha (*Wedge Test*): Crucial para a avaliação da durabilidade. Uma cunha é inserida na linha de adesivo induzindo uma tensão de clivagem/arrancamento, e a junta é exposta a ambientes agressivos (calor/humidade). A propagação da fenda ao longo do tempo é medida (*EAA Aluminium Automotive Manual-Joining*, 2015).

2.2.4. Ensaios de impacto

Na indústria automóvel, a resistência ao impacto (*Crashworthiness*) é um requisito crítico. Os adesivos estruturais modernos, especialmente os epóxidos modificados, são formulados para absorver energia sob altas taxas de deformação (Boutar et al., 2017; Wu et al., 2013).

O ensaio de referência é o Arrancamento por cunha sob impacto (*Impact Wedge Peel*). Este ensaio padrão é aceite globalmente pela indústria para avaliar a resistência ao impacto de juntas adesivas, normalizado pela ISO 11343. Neste teste, uma cunha é impulsionada a alta velocidade (tipicamente 2 a 3 m/s) contra uma junta colada, forçando a separação dos substratos. O parâmetro crítico avaliado não é apenas a força máxima, mas a energia absorvida (a área sob a curva força-deslocamento) e a estabilidade do modo de falha (garantindo que a rotura permanece coesiva mesmo a altas velocidades) (*EAA Aluminium Automotive Manual-Joining*, 2015; Jurgen Klingen, 2022).

Ao contrário dos ensaios estáticos, onde a carga máxima é o parâmetro dominante, no ensaio de impacto a avaliação foca-se na energia. A partir da curva Força Dinâmica vs. Deslocamento, extraem-se (Jurgen Klingen, 2022):

- Força Média de Clivagem Dinâmica (N/mm): A resistência média oferecida pela junta durante a propagação da fratura.
- Energia Absorvida (Joules): Calculada através da integração da área sob a curva força-deslocamento. Este é o parâmetro mais crítico para o design de *crash* (Wu et al., 2013).

O objetivo no desenvolvimento de adesivos "anti-crash" (geralmente epóxidos modificados com nanopartículas ou borracha) é garantir que o modo de falha permanece coesivo mesmo a altas velocidades. Se o adesivo sofrer uma transição para comportamento frágil ou falha adesiva (interfacial), a energia absorvida cai drasticamente, comprometendo a segurança dos ocupantes do veículo (Dengiz, 2025; Wu et al., 2013).

Enquanto as normas clássicas, como a ISO 11343, se focam na caracterização intrínseca da resistência ao impacto do material adesivo, a validação final em aplicações automóveis exige ensaios à escala do componente que simulem a geometria real de uma colisão, tal como demonstrado no estudo de esmagamento axial de tubos híbridos multicelulares (Bidadi et al., 2024). Diferindo dos testes convencionais, esta configuração experimental avalia a (*crashworthiness*) da estrutura global, verificando se a união adesiva possui a tenacidade necessária para manter a integridade entre substratos dissimilares (aço e alumínio) durante a deformação plástica severa e a dobragem progressiva dos metais. Conforme a Figura 20, este ensaio comprova a eficácia do adesivo não apenas na resistência à fratura, mas na sua capacidade de garantir a coesão estrutural crítica para a segurança passiva do veículo, mesmo sob solicitações mecânicas extremas que excedem o regime elástico.

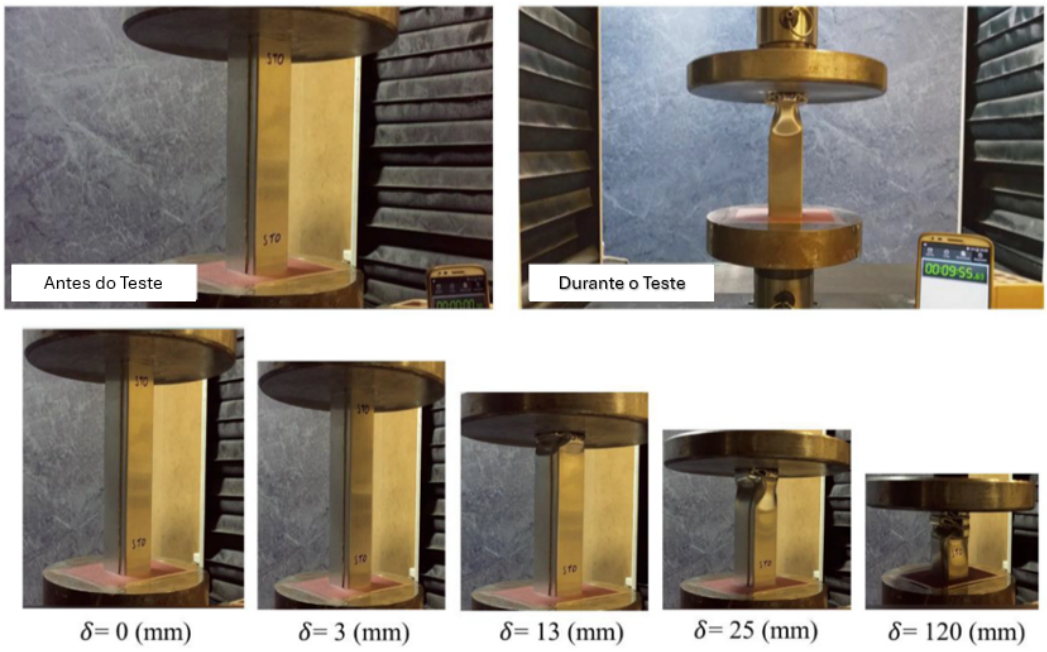


Figura 20 - Ensaio crashworthiness (adaptado de Bidadi et al., 2024)

2.2.5. Ensaios de fadiga

A fadiga é definida como a degradação progressiva das propriedades de um material sujeita a cargas cíclicas, cuja tensão máxima é inferior à resistência estática do material. Em estruturas aeronáuticas e automóveis, a fadiga é frequentemente o modo de falha determinante (Adams & Wake, 1984; L. Silva et al., 2007).

Uma das principais motivações para a adoção de adesivos estruturais em detrimento da soldadura por pontos ou rebitagem é o seu comportamento superior à fadiga. Enquanto os métodos tradicionais introduzem pontos de concentração de tensão (furos, alterações metalúrgicas na zona termicamente afetada), a colagem distribui as tensões uniformemente por uma área extensa, reduzindo os picos de tensão que iniciam fissuras (L. Silva et al., 2007). Em (Barnes & Pashby, 2000) evidenciou que a vida à fadiga de uma estrutura de alumínio colada pode ser até 20 vezes superior à de uma estrutura soldada por pontos.

O ensaio de fadiga em juntas adesivas é tipicamente realizado utilizando a geometria de Sobreposição Simples, conforme a norma ASTM D3166 (L. Silva et al., 2007).

Um aspeto crítico que distingue o ensaio de fadiga em polímeros do ensaio em metais é a sensibilidade à frequência de carga. Os adesivos são materiais viscoelásticos. Durante cada ciclo de carga e descarga, a curva tensão-deformação não segue o mesmo caminho, criando um ciclo de histerese. A área dentro deste ciclo representa a energia dissipada sob a forma de calor (L. Silva et al., 2007).

De acordo com (Han et al., 2025) foram analisadas juntas de sobreposição simples de alumínio 6061-T6 unidas com o adesivo epóxi estrutural Araldite® 2015. Os ensaios foram realizados numa máquina de testes de fadiga dinâmica, concebida para aplicar cargas cíclicas controladas, os níveis de carga de fadiga foram definidos como 50%, 60% e 70% da resistência à tração máxima. Uma inovação metodológica deste trabalho foi a utilização da técnica de medição de deformação na face oposta (*Back-Face Strain Technique*) para monitorização em tempo real da evolução do dano. O estudo demonstra que a avaliação da fadiga não deve basear-se apenas na contagem de ciclos até à rutura, mas sim integrar a monitorização da evolução da rigidez (via *back-face strain*) e considerar os efeitos severos da degradação ambiental nas propriedades coesivas do adesivo. A Figura 21 mostra a configuração do ensaio proposto na máquina de testes de fadiga dinâmica.

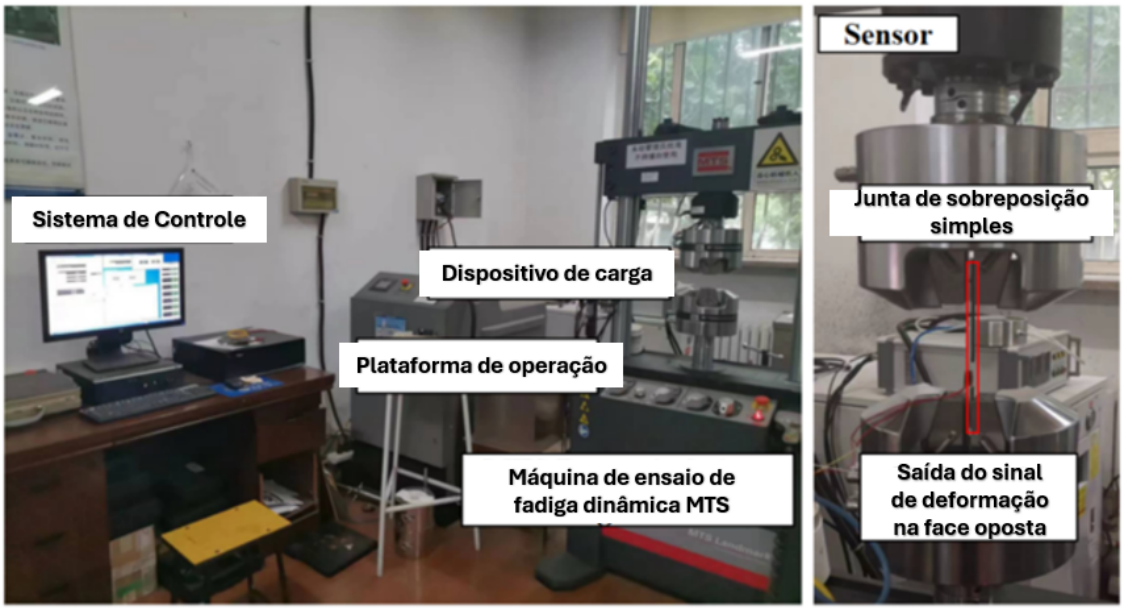


Figura 21 - Configuração de ensaio de fadiga de juntas adesivas de alumínio com sobreposição simples (adaptado de Han et al., 2025)

2.2.6. Ensaios de fluência

A fluência (*Creep*), define-se como o aumento progressivo da deformação de um material quando submetido a uma carga constante ao longo do tempo. Enquanto nos metais a fluência só se torna relevante a temperaturas muito elevadas, nos adesivos estruturais (polímeros) é um fenómeno crítico à temperatura ambiente ou ligeiramente elevada (20°C a 50°C), devido à sua natureza viscoelástica (Wang et al., 2025).

Os ensaios de fluência em corte são tipicamente regidos pela norma ASTM D2294. Utiliza-se geralmente a geometria de sobreposição simples ou, preferencialmente, o ensaio TAST para evitar efeitos de flexão. Os ensaios de fluência usam pórticos de carga morta (pesos calibrados) ou sistemas de alavanca com molas (dispositivos de fluência carregados por mola), que garantem que a força se mantém constante independentemente da deformação da junta (L. Silva et al., 2007).

Em (Wang et al., 2025) propõem uma abordagem diferente, dizendo que o TAST e as juntas de sobreposição têm limitações de tensão complexa. Por isso, eles propõem uma junta tubular de topo sujeita a torção (*butt joint in torsion*) para garantir um corte verdadeiramente puro, algo que as normas antigas (ASTM D2294) não cobrem totalmente. Ainda mantém o princípio clássico de carregamento por carga morta/alavanca, mas atualizando a medição para correlação digital de imagem (*Digital Image Correlation* - DIC). A Figura 22 mostra o aparelho utilizado para realizar o ensaio de fluência, e na Figura 23 mostra a configuração de junta topo com o resultado da correlação digital de imagem.

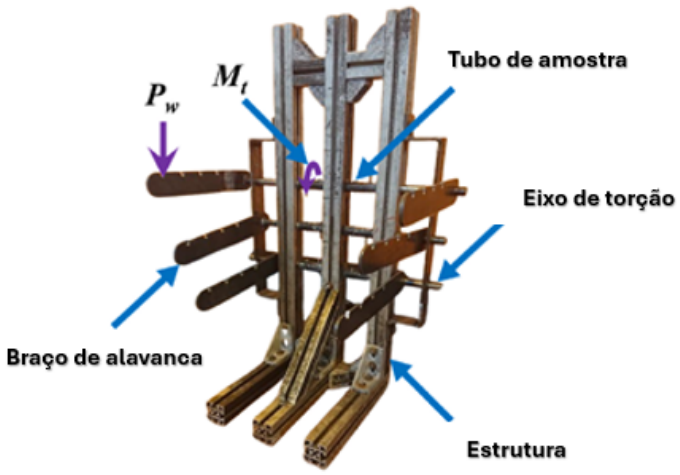


Figura 22 - Projeto de um aparelho para ensaio de fluência por corte em juntas de topo (adaptado de S. Wang et al., 2025)

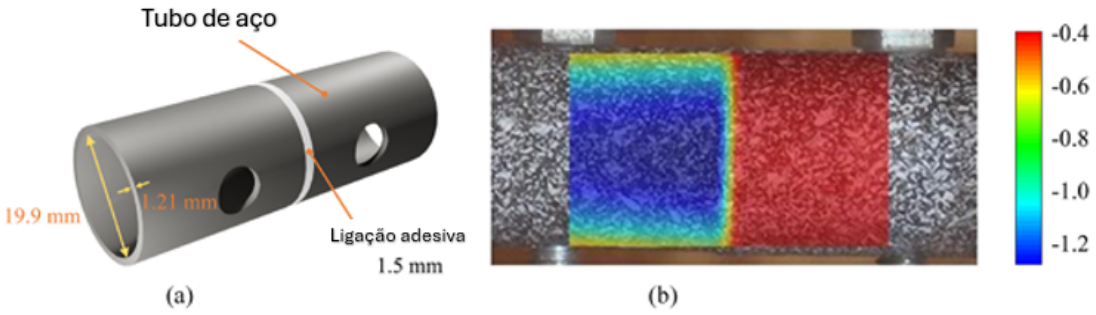


Figura 23 - Configuração de junta topo para ensaio de fluência, a) Junta topo, b) Padrão de manchas para DIC (adaptado de S. Wang et al., 2025)

2.3. Ensaios não destrutivos de inspeção

O objetivo fundamental de qualquer ensaio não destrutivo (*Non-Destruction Testing* - NDT) em juntas adesivas é correlacionar a resistência da junta com um parâmetro físico ou químico mensurável sem causar danos. Como destacam (Adams & Drinkwater, 1997), a deteção de defeitos não é sinónimo de prever a falha; é necessário distinguir entre defeitos de fabrico (como porosidade ou *disbonds*) e a qualidade da adesão interfacial, sendo esta última notoriamente difícil de medir não destrutivamente.

A garantia da integridade estrutural de uma junta adesiva é um dos maiores desafios para a implementação generalizada desta tecnologia em aplicações críticas. Ao contrário das estruturas metálicas ou soldadas, onde a deteção de fissuras é o objetivo primordial, a inspeção de juntas adesivas foca-se na identificação de três tipos principais de defeitos: descontinuidades na linha de adesivo (vazios e porosidade), descolamentos interfaciais e a qualidade da adesão (Petrie, 2000).

2.3.1. Inspeção visual

A inspeção visual é o método de controlo de qualidade mais básico e universal, embora esteja limitado à deteção de macro-defeitos superficiais. De acordo com (L. Silva et al., 2007), a observação do "filete" de adesivo que extravasa nas bordas da junta é um indicador crítico. Um filete contínuo e uniforme sugere que houve adesivo suficiente para preencher a junta e que a pressão de cura provocou o fluxo adequado do material.

A inspeção visual permite detetar desalinhamentos grosseiros dos substratos, fissuras superficiais no filete de adesivo e alterações na coloração do adesivo, que podem indicar erros na proporção de mistura, no caso de adesivos bi-componentes ou até mesmo degradação térmica dos adesivos (L. Silva et al., 2007).

Na investigação moderna, a inspeção visual evoluiu para a (DIC). Em vez de uma observação subjetiva, (Wang et al., 2025) demonstram o uso de câmaras de alta resolução para rastrear um padrão de manchas (*speckle pattern*) pintadas na superfície. Isto permite quantificar o campo de deformações em tempo real, detetando concentrações de tensão e microfissuras superficiais invisíveis a olho nu durante ensaios de carga.

2.3.2. Ultrassons

A inspeção por ultrassons é a técnica dominante na indústria aeroespacial para o controlo de juntas adesivas e materiais compósitos. O princípio baseia-se na propagação de ondas acústicas de alta frequência (tipicamente 1 a 10 MHz) através do material e na sua reflexão ou transmissão nas interfaces (Petrie, 2000).

Como a impedância acústica do ar é drasticamente diferente da do adesivo ou do metal, qualquer vazio ou descolamento (*gap*) atua como uma barreira total à passagem do som, refletindo a onda de volta para o transdutor (Petrie, 2000).

Segundo (Adams & Drinkwater, 1997) os ultrassons convencionais de incidência normal têm dificuldade em detetar "*kissing bonds*" (contacto físico sem adesão química), pois a interface fechada permite a transmissão do som.

Para mitigar este problema e garantir a integridade estrutural, a investigação atual tem-se focado no desenvolvimento de técnicas de ultrassons não-lineares. Estas abordagens, como a Geração de Segundo Harmónico (SHG) e a Componente Quase-Estática (QSC), exploram o fenómeno de 'respiração' da interface defeituosa (abertura e fecho microscópico sob carga ondulatória), que gera componentes espectrais não-lineares impossíveis de encontrar numa junta sã (H. Wang & Shui, 2025).

Recentemente, (H. Wang & Shui, 2025) demonstraram que a utilização da Componente Quase-Estática (*Quadratic Stress Criterion* - QSC) de ondas de Lamb oferece uma alternativa robusta à Geração de Segundo Harmónico (*Second Harmonic Generation* - SHG) para detetar descolagens interfaciais. A principal vantagem desta técnica reside na sua flexibilidade operacional: enquanto SHG exige uma correspondência estrita de velocidade de fase (difícil de garantir em campo), o método QSC requer apenas uma correspondência aproximada de velocidade de

grupo. Os autores validaram experimentalmente que o parâmetro de não-linearidade baseado na QSC exibe uma sensibilidade superior na deteção de micro-fissuras interfaciais em fase inicial, correlacionando-se linearmente com a área de descolagem. A Figura 24 mostra o sistema utilizado para realizar o ensaio QSC.

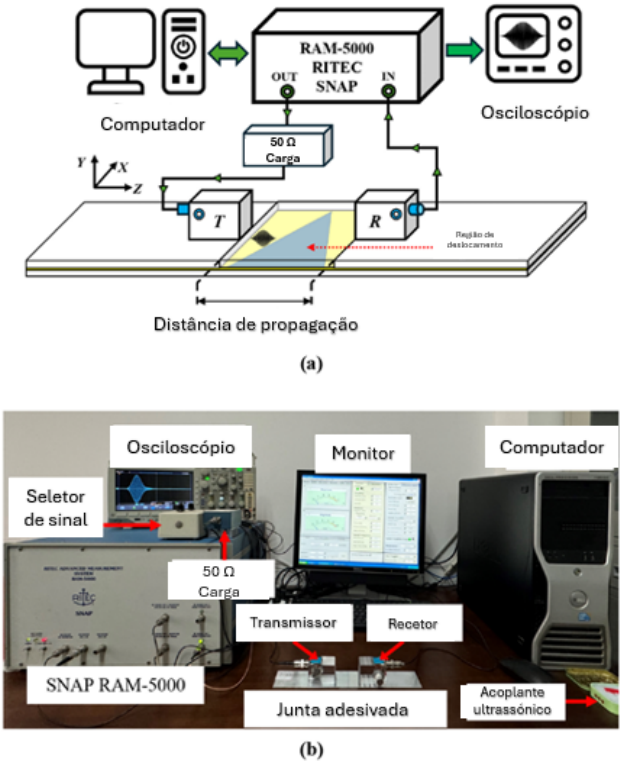


Figura 24 - Ensaio ultrassons não lineares, a) Esquema da montagem experimental, b) Sistema de ensaio (adaptado de H. Wang & Shui, 2025)

2.3.3. Emissão acústica

A emissão acústica difere dos ultrassons por ser um método passivo. Em vez de enviar energia para a peça, a emissão acústica utiliza sensores piezoelétricos para "ouvir" as ondas de tensão transientes libertadas pelo material quando este é submetido a carga (Petrie, 2000).

Eventos microscópicos como a iniciação de fissuras na matriz, a fratura de fibras ou o descolamento localizado geram ondas elásticas de alta frequência. É capaz de detetar a falha interfacial antes da fratura final, mas requer que a junta seja carregada (frequentemente até 50% da carga de rutura), o que a torna uma técnica semi-destrutiva ou de monitorização em serviço (Adams & Drinkwater, 1997).

No estudo de (Lima et al., 2024) é demonstrada a eficácia da emissão acústica assistida por algoritmos de *Machine Learning* não supervisionados para a monitorização da integridade de juntas coladas em tempo real. O estudo destaca-se pela análise detalhada da influência do substrato, utilizando laminados de (CFRP) onde a sequência de empilhamento na interface de colagem foi variada sistematicamente (testando orientações de 0°, 90°, ± 45° e ± 60°). Esta manipulação da orientação das fibras do substrato revelou-se crítica, pois altera drasticamente

os mecanismos de fratura predominantes (como a ocorrência de ponte de fibras *"fiber bridging"* intenso em lâminas de 0° versus falha intralaminar em ângulos elevados) e a consequente assinatura acústica da junta, comprovando que a calibração de sistemas de monitorização de saúde estrutural deve considerar intrinsecamente a anisotropia e o design do laminado compósito.

2.3.4. Radiografia

A radiografia (Raios-X) baseia-se na absorção diferencial da radiação pelos materiais. É eficaz na deteção de diferenças de densidade dentro da junta. No entanto, como os polímeros adesivos têm uma densidade muito inferior a dos substratos metálicos (baixa absorção), o contraste radiográfico é frequentemente pobre (Petrie, 2000).

Para contornar esta limitação, podem ser adicionadas cargas "radiopacas" (como sais de bário ou óxido de chumbo) ao adesivo, tornando-o claramente visível na radiografia. Isto permite inspecionar (Petrie, 2000):

- A presença de vazios e porosidade;
- O preenchimento incompleto da junta;
- A distribuição de fillers ou telas de suporte (*carriers*).

Em (Badulescu et al., 2024) demonstraram a eficácia da micro-tomografia computorizada de raios-X (µCT) combinada com a Correlação Digital de Volume para mapear campos de deslocamento tridimensionais no interior de juntas adesivas. Ao incorporar partículas de óxido de ferro na matriz epóxi para gerar contraste radiográfico, os autores conseguiram medir deformações internas em juntas de sobreposição simples com elevada precisão. Na Figura 25 é possível observar como foi realizado o ensaio, na Figura 26 o resultado do ensaio com os raios-X, onde o adesivo está na cor preta, e as eventuais porosidades aparecem como pontos na cor branca.

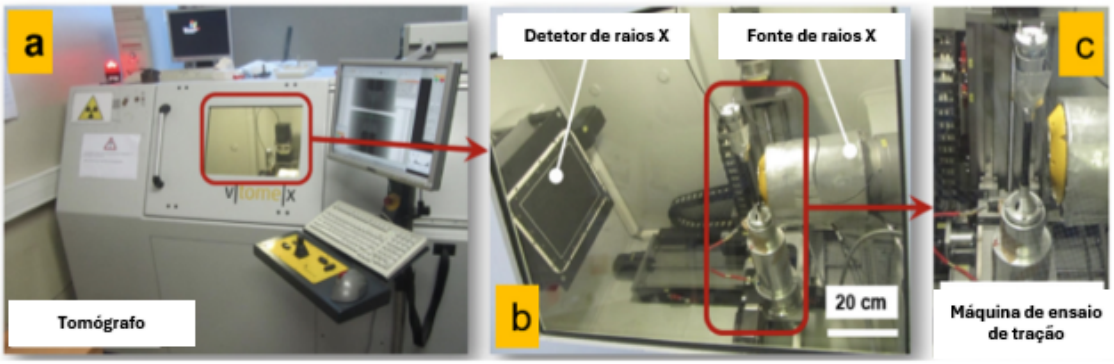


Figura 25 - Montagem ensaio raios-X, a) Vista geral, b) Vista do interior do tomógrafo, c) Vista máquina de tração (adaptado de Badulescu et al., 2024)

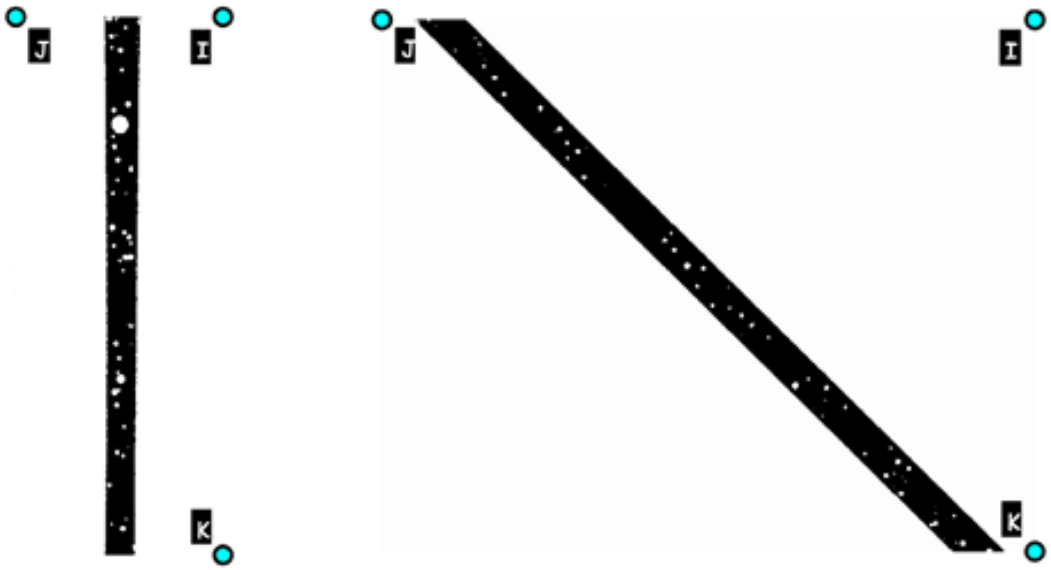


Figura 26 - Dados tomográficos na secção do plano médio JIK (Badulescu et al., 2024)

2.3.5. Líquidos penetrantes

O ensaio por líquidos penetrantes destina-se à deteção de descontinuidades abertas à superfície. Um líquido de baixa tensão superficial e corante contrastante é aplicado na peça, penetrando em fissuras por capilaridade (Petrie, 2000).

No contexto de juntas adesivas, a sua aplicação é limitada e arriscada. Embora possa ser usado para verificar fissuras marginais na interface adesivo/substrato, existe o risco de os solventes do penetrante atacarem quimicamente o adesivo ou contaminarem a superfície, degradando a junta a longo prazo. Nunca deve ser usado antes da colagem, pois os resíduos gordurosos impediriam a adesão (Petrie, 2000).

2.3.6. Correntes de Foucault

As Correntes de Foucault (*Eddy Currents*) são aplicáveis quando pelo menos um dos substratos é condutor elétrico (geralmente metais). Uma bobina percorrida por corrente alternada induz correntes parasitas no substrato (Petrie, 2000).

Como o adesivo é um material dielétrico (isolante), ele atua como uma distância de afastamento (*lift-off*) entre a sonda e o metal. Assim, este método é extremamente preciso para medir a espessura da linha de adesivo de forma não destrutiva. No entanto, não fornece informações sobre a qualidade da adesão ou a presença de vazios no interior do adesivo, servindo essencialmente para controlo dimensional (Petrie, 2000).

Para a inspeção de juntas em materiais compósitos condutores, como o CFRP, (Yi et al., 2019) propõem a utilização da Termografia de Correntes de Foucault com Compressão de Pulso. Tirando partido da condutividade elétrica das fibras de carbono, esta técnica induz correntes de Foucault que geram aquecimento interno resistivo. A presença de descolagens interfaciais perturba o fluxo térmico, criando contrastes detetáveis por uma câmara infravermelha. A

aplicação de algoritmos de compressão de pulso (codificação de Barker) permite melhorar significativamente a relação sinal-ruído em comparação com a termografia pulsada convencional, permitindo a deteção de defeitos na linha de adesivo com baixa potência de excitação, evitando danos térmicos no polímero.

3. Desenvolvimento

Neste capítulo são descritos detalhadamente todos os procedimentos experimentais, materiais e equipamentos utilizados para a caracterização mecânica do sistema adesivo em estudo. O objetivo central desta campanha experimental é avaliar o comportamento estrutural do adesivo sob diferentes solicitações mecânicas, velocidades de deformação, tipos de substrato e efeito de envelhecimento ambiental.

Para garantir uma análise sistemática, o plano de ensaios foi dividido em três grupos principais de estudo, focados numa matriz de testes que reflete as exigências operacionais da indústria automóvel:

- Comportamento mecânico do adesivo;
- Efeito da velocidade de ensaio;
- Efeito do envelhecimento.

Nos subcapítulos seguintes, detalham-se as propriedades dos materiais selecionados, os métodos de fabrico dos provetes e os protocolos estabelecidos para os ensaios mecânicos.

3.1. Materiais utilizados

A seleção dos materiais procurou utilizar materiais frequentemente encontrados na construção de veículos modernos, como o aço e o alumínio.

3.1.1. Adesivo Estrutural

Em todos os grupos de ensaio foi utilizado o adesivo SikaForce®-472 FR L60, um adesivo estrutural de poliuretano bicomponente, componente A conforme a Figura 27 (SikaForce®-472 FR L60, mistura de polióis) e componente B conforme a Figura 27 (SikaForce®-040, mistura de derivados de Isocianatos). O mecanismo de cura ocorre por poliadição à temperatura ambiente, resultante da reação química entre o componente base (polióis) e o endurecedor (derivados de isocianato). Este sistema caracteriza-se por ser isento de solventes, o que facilita a sua aplicação com espessuras controladas sem ocorrência de escorrimento.



(a) (b)

Figura 27 - (a) Componente A do Adesivo SikaForce®-472; (b) Componente B do adesivo SikaForce®-472

As propriedades mecânicas e de processamento fornecidas pelo fabricante estão sumariadas na Tabela 1. A seleção deste adesivo específico para a presente campanha experimental justifica-se pela sua notável capacidade de deformação (alongamento na rotura de 10%). Este comportamento dúctil, aliado a uma elevada resistência ao impacto, permite acomodar picos de tensão e garantir uma elevada capacidade de absorção de energia, características cruciais para simular os requisitos dinâmicos exigidos pela indústria automóvel.

Tabela 1 - Propriedades do adesivo SikaForce®-472 FR L60 (Sika Deutschland, 2021)

Propriedades	Componente A	Componente B
Cor	Branco	Marrom
	Bege	
Resistência ao corte (ISSO 4587)	11 MPa	
Mecanismo de cura	Poliadição	
Temperatura de aplicação	15 – 30 °C	
Módulo de elasticidade (E) (ASTM D638)		
Resistência à tração (ISO 527)	20 MPa	
Alongamento de rotura (ISSO 527)	10%	
Densidade	1,52 g/cm3	
Viscosidade (não tixotrópico)	200000 mPa.s	200 mPa.s
	70000 mPa.s	
Dureza Shore	D75	
Pot-life	70 minutos	
Open-time	85 minutos	

3.1.2. Substrato

Para garantir uma avaliação abrangente do comportamento da junta adesiva face a diferentes níveis de rigidez e interações químicas de interface, a campanha experimental recorreu a três aderentes distintos. A seleção destes materiais reflete a tendência atual da indústria automóvel para a integração de estruturas multimaterial.

O principal substrato utilizado foi uma liga de alumínio AW 6082-T6. A liga AW 6082-T6 foi selecionada como aderente estrutural principal para os ensaios de tração e corte. O seu tratamento térmico (T6) confere-lhe uma elevada tensão de cedência, garantindo que o substrato se mantém no regime elástico durante o ensaio e forçando a concentração de tensões e a falha na camada de adesivo. Em contrapartida, para o ensaio de arrancamento, utilizou-se a liga AW 1050, um alumínio comercialmente puro. A sua elevada ductilidade e baixa tensão de escoamento são fundamentais neste modo de carregamento, pois permitem que o material sofra deformação plástica contínua à medida que a fenda se propaga, isolando assim as forças de arrancamento na interface do adesivo. A Tabela 2 mostra as principais características das ligas de alumínio utilizadas.

Tabela 2 - Propriedades das ligas de alumínio AW 1050 e AW 6082

Propriedades da liga EM AW 1050	
Massa volúmica (g/cm^3)	2,71
Módulo de elasticidade (E (GPa))	69
Tensão limite de elasticidade ($R_{p0,2}$ (MPa))	75
Tensão máxima de resistência à tração (R_m(MPa))	105-145
Coeficiente de expansão térmica (20 – 100 °C) (K^{-1})	23,6 x 10^{-6}
Condutividade térmica (W/mK)	229
Dureza Brinell (HB)	33
Propriedades da liga EM AW 6082-T6	
Massa volúmica (g/cm^3)	2,7
Módulo de elasticidade (E (GPa))	70
Tensão limite de elasticidade ($R_{p0,2}$ (MPa))	200-260
Tensão máxima de resistência à tração (R_m(MPa))	270-310
Condutividade térmica (W/mK)	170
Alongamento (%)	6-8
Dureza Brinell (HB)	95

Outro substrato utilizado foi o aço S235 JR, este aço de construção geral foi utilizado no intuito de estabelecer uma base de comparação ferrosa. A sua utilização permite avaliar a afinidade química e a molhabilidade do adesivo de poliuretano face a uma superfície metálica com energia superficial e rugosidade nativa distintas das do alumínio, validando o adesivo para aplicações multimaterial (aço-alumínio). A Tabela 3 mostra as principais características do aço utilizado.

Tabela 3 - Propriedades do aço estrutural S235 JR

Propriedades da liga de aço S235 JR	
Massa volúmica (g/cm^3)	7,85
Módulo de elasticidade (E (GPa))	210
Tensão de cedência (ReH (MPa))	≥235
Tensão máxima de resistência à tração (R_m(MPa))	360-510
Coeficiente de expansão térmica (20 – 100 °C) (K^{-1})	12,0 x 10^{-6}
Condutividade térmica (W/mK)	50
Alongamento (%)	≥ 18
Dureza Brinell (HB)	33

3.2. Preparação de superfície e Fabrico dos provetes

Para assegurar a repetibilidade dos resultados e isolar as variáveis em estudo, o fabrico dos provetes foi rigorosamente padronizado. O alinhamento dos substratos e o controlo da espessura da linha de adesivo (fixada em 0,2 mm) foram garantidos através da utilização de um gabarito de montagem metálico dedicado. Após a aplicação do adesivo SikaForce, todos os provetes foram submetidos a um período de cura à temperatura ambiente de 7 dias, sob pressão constante.

Para garantir a validade científica e a reprodutibilidade dos dados experimentais, a definição geométrica dos aderentes metálicos e da respetiva área de união para o ensaio de juntas de sobreposição simples (JSS), seguiu-se estritamente as diretrizes preconizadas pela norma internacional ISO 4587(ISO 4587, 2003). Esta norma estabelece o protocolo de referência para a determinação da resistência ao corte de uniões rígidas, definindo proporções específicas que visam minimizar a ocorrência de tensões de clivagem e de momentos fletores parasitas nas extremidades da sobreposição durante a aplicação da carga trativa.

Em conformidade com o documento normativo, a área de colagem foi padronizada com dimensões de 12,5 ± 0,25 mm de comprimento por 25 ± 0,25 mm de largura. Adicionalmente,

a espessura da camada de adesivo estrutural foi rigorosamente controlada a 0,2 mm. A adoção desta geometria estandardizada é fundamental, pois permite assumir um estado de tensão de corte predominantemente uniforme ao longo da interface de colagem, viabilizando o cálculo fiável da tensão máxima aparente suportada pelo sistema antes da rotura.

No ensaio de juntas de topo (*butt joints*), utilizando provetes cilíndricos, a definição da geometria dos aderentes e os requisitos de paralelismo e perpendicularidade das faces de colagem foram estabelecidos em rigorosa conformidade com a norma internacional ISO 6922 (ISO 6922, 1987).

De acordo com o protocolo normativo, fabricaram-se provetes cilíndricos com um diâmetro nominal de 25 ± 0,1 mm, garantindo faces perfeitamente maquinadas e perpendiculares ao eixo longitudinal. A espessura da camada de adesivo foi metodologicamente controlada para 0,2 mm.

Para a avaliação da resistência ao arrancamento da ligação estrutural, procedeu-se à realização de ensaios de arrancamento com recurso ao método do rolo flutuante (*floating roller peel test*). O procedimento experimental, o equipamento de fixação e a configuração geométrica dos aderentes, foram rigorosamente definidos em conformidade com a norma internacional ASTM D3167 (ASTM D3167, 2004). A junta de sobreposição é constituída por um aderente rígido, com 203,2 mm de comprimento de área colada e no mínimo 1,63 mm de espessura, e um aderente flexível, com 254,0 mm de comprimento total e 0,63 mm de espessura.

A caracterização das propriedades mecânicas intrínsecas do adesivo maciço (*bulk*) foi realizada em conformidade com a norma ISO 527-2 (ISO 527-2, 2012). Os provetes foram vazados em moldes para obter a geometria estandardizada em forma de haltere (*dogbone*), garantindo uma secção útil calibrada que força a rutura a ocorrer na zona central, longe das zonas de aperto das garras.

3.2.1. Substrato de alumínio

Este subcapítulo descreve os procedimentos de preparação e fabrico adotados para os provetes com aderentes em liga de alumínio, abrangendo os ensaios de juntas de sobreposição simples, topo e arrancamento (Peel). Nestes grupos, produziu-se juntas de sobreposição simples (JSS) e juntas de topo (JTT) utilizando a liga rígida AW 6082-T6, bem como provetes para ensaios de arrancamento, onde se introduziu a liga flexível AW 1050 como o substrato flexível.

A subsequente preparação dos substratos foi realizada executando as seguintes etapas.

1ª Etapa: Corte e remoção de rebarbas com auxílio de limas, lixas ou esmeril

Após o corte das chapas em guilhotina, procedeu-se à remoção das rebarba resultantes do processo de corte de forma manual com o auxílio de limas e de um esmeril no laboratório de fundição (LABF) do ISEP (Figura 28)



Figura 28 - Esmerial Metabo (LABF)

Após a remoção das rebarbas foi feita uma limpeza dos provetes com acetona comercial (pureza > 99%).

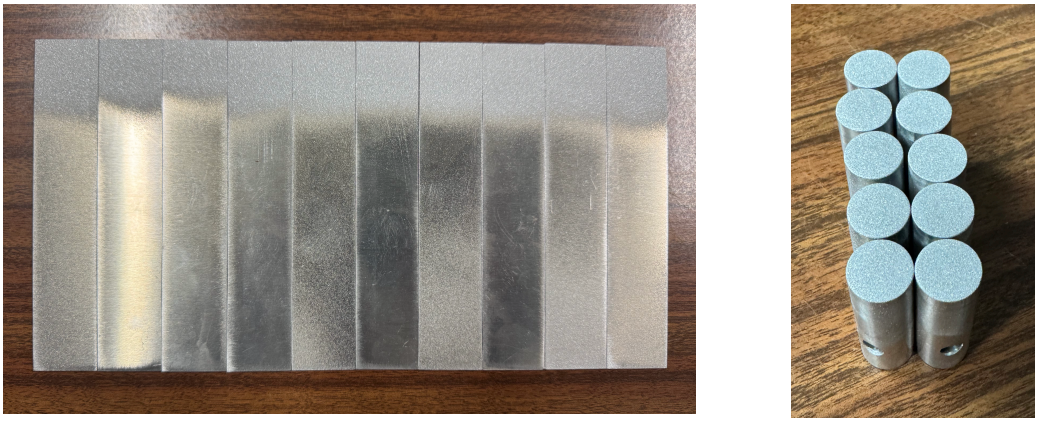
2ª Etapa: Granalhagem

A região específica de colagem foi submetida a um processo de granalhagem, de forma a criar uma rugosidade na área de colagem, otimizando o resultado do adesivo, a máquina utilizada foi uma CidBlast RT6S (Figura 29).

Foi utilizado um abrasivo de óxido de alumínio fundido castanho com granulometria de 425 – 600 μm (Cerablast BFA-NK F036). Esse processo foi realizado com uma pressão de 3 bar, tendo como resultado a Figura 30.



Figura 29 - Granalhadora CidBlast (LABF)



(a) *(b)*

Figura 30 - (a) Substrato de sobreposição simples após granalhagem; (b) Substrato cilíndrico após granalhagem

Após todo o processo de granalhagem foi realizado novamente o processo de limpeza dos provetes com acetona, e utilizado jato de ar comprimido.

3ª Etapa: Colagem

O processo de colagem dos substratos foi precedido da preparação do adesivo SikaForce®-472 FR L60. Que foi realizado conforme a especificações do fabricante, que se iniciava por misturar os 2 componentes do adesivo, nas suas respetivas quantidades, sendo (100 partes da base de polióis, designada por SikaForce-472 FR L6, com 20 partes de um endurecedor derivado de isocianato, designado por SikaForce-040).

Após a mistura dos componentes e a certeza de uma boa homogeneização, foi realizada a aplicação do adesivo nos provetes. Para as juntas de sobreposição simples e arrancamento,

utilizou-se uma bancada de trabalho utilizada para o fabrico das juntas, disponível no laboratório, conforme a Figura 31. Nessa bancada é possível garantir o alinhamento dos substratos, através dos *gabarits* disponíveis.

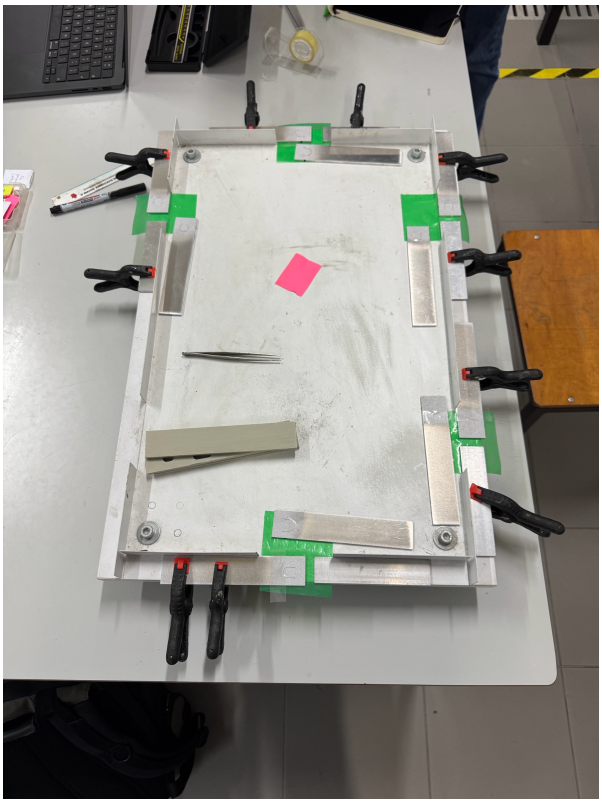


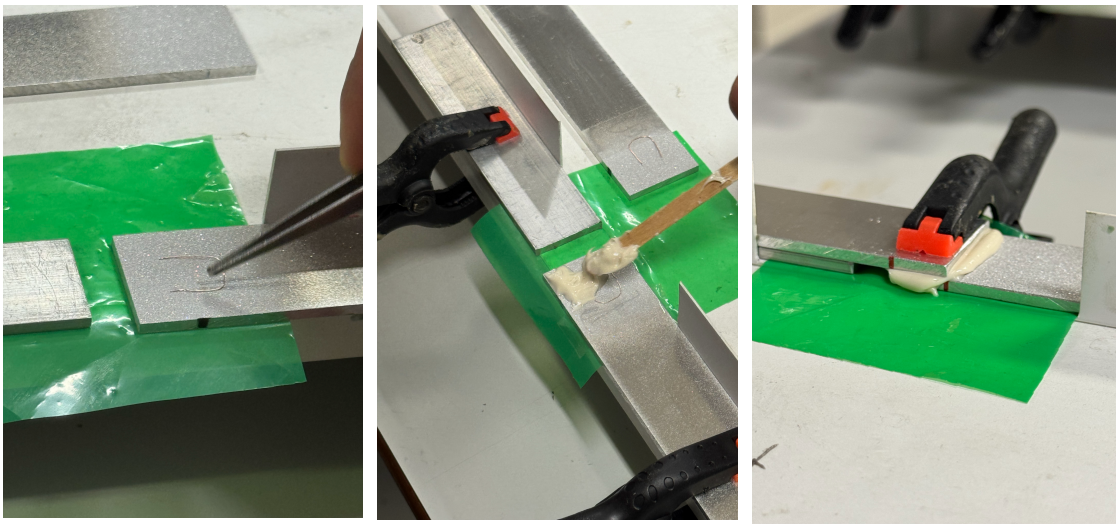
Figura 31 - Vista geral da mesa de trabalho utilizada para o fabrico das juntas

Cada provete foi anteriormente feito marcações laterais de forma a tentar garantir a área a ser colada, respeitando a norma ASTM D3167 no caso dos provetes para o ensaio de arrancamento, e a norma ISSO 4587 para as juntas de sobreposição simples.

Para a colagem dos substratos foram realizados os seguintes passos:

1. Posicionamento de um substrato no *gabarit*;
2. Colocação de um fio de cobre, com diâmetro de 0,2mm (para controle da espessura do adesivo);
3. Aplicação do adesivo na superfície do substrato;
4. Posicionamento do outro substrato, cobrindo a área com adesivo;
5. Pressionar a junta para o excesso de adesivo sair, e aplicar uma mola de pressão.

A Figura 32 mostra alguns dos passos realizados.



(a) (b) (c)

(a) posicionamento do fio de cobre; (b) aplicação do adesivo; (c) colocação da mola de pressão

Figura 32 – Processo de fabrico das juntas

O fio de cobre utilizado no 2º passo tem como objetivo controlar a espessura de adesivo especificada na norma. O fio foi posicionado de forma a interferir o mínimo possível na área adesivada, conforme mostra a Figura 33.

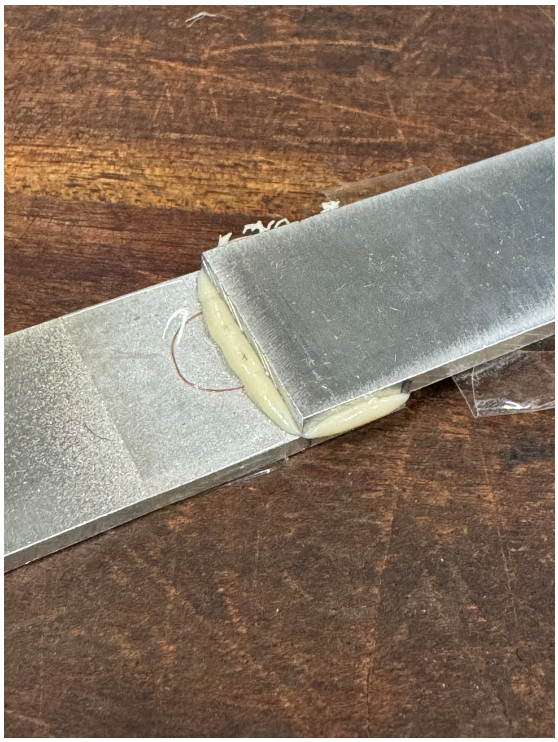


Figura 33 - Detalhe do fio de cobre para controle da espessura de adesivo

Nos provetes de junta topo, o processo de colagem foi realizado em um equipamento específico, presente no laboratório, conforme a Figura 34.

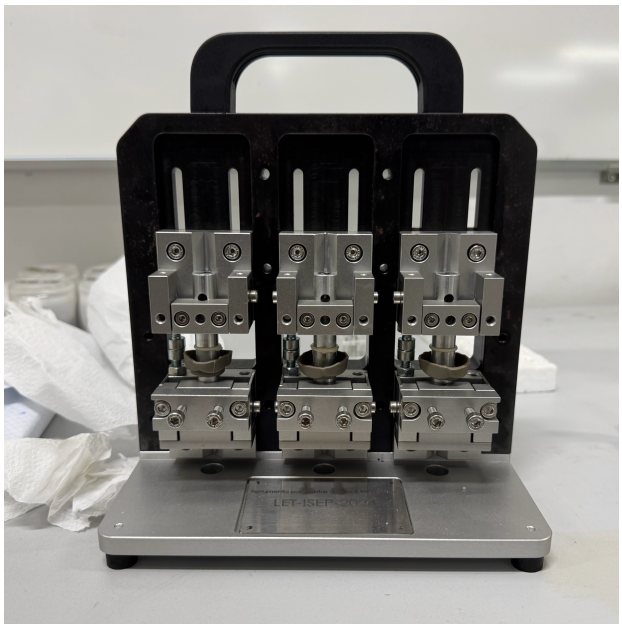


Figura 34 - Equipamento para produção de juntas topo a topo

Nesse equipamento a espessura de adesivo foi determinada através de uma chapa de aço com 0,2mm de espessura que, através batentes de posição e um parafuso, é possível limitar o movimento do substrato superior.

Sendo assim, foi colocado o substrato inferior com um reservatório cónico de silicone (caso ocorre-se o escorrimento do excesso de adesivo).

Na Figura 35 é possível observar o processo de montagem das juntas topo.

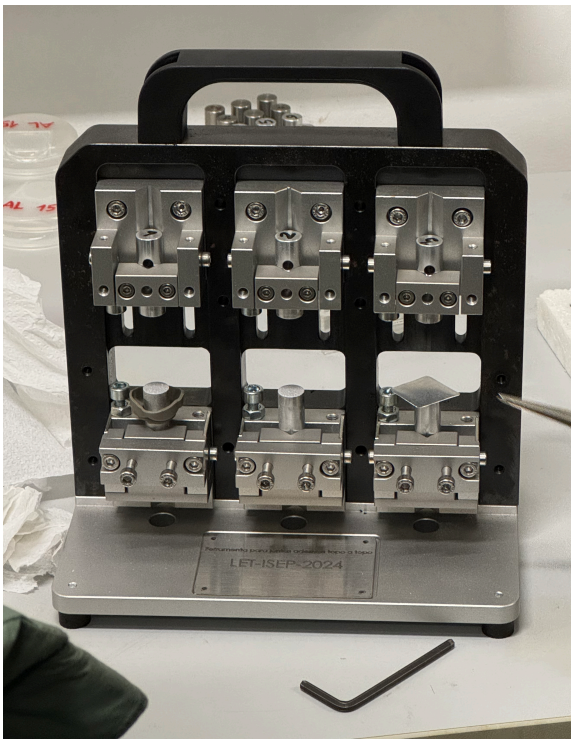


Figura 35 - Processo de montagem das juntas topo a topo

4ª Etapa: Remoção do excesso de adesivo

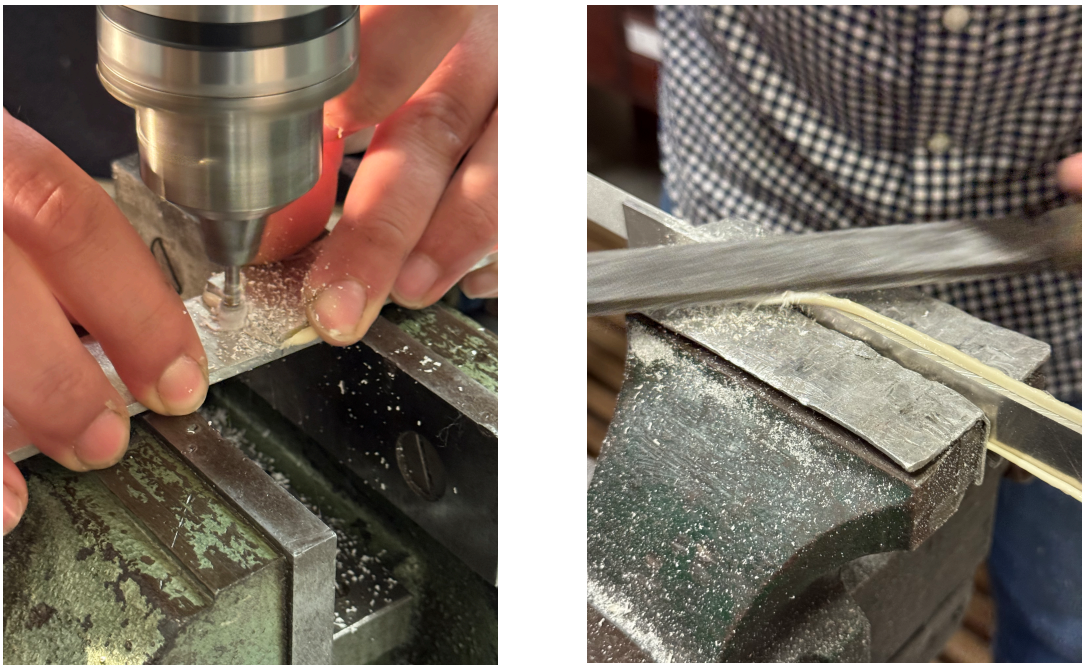
Após um período de 1 semana, momento em que o adesivo de poliuretano já se encontrava totalmente reticulado e com as suas propriedades mecânicas estabilizadas no estado sólido, procedeu-se à remoção mecânica do filete de excesso (*spew fillet*).

Esta etapa permitiu garantir que as extremidades da junta ficassem perfeitamente rasas e alinhadas com as faces dos substratos. Do ponto de vista da mecânica da fratura, a presença de um filete de adesivo com geometria variável atua como um reforço local não quantificável, alterando a distribuição de tensões e retardando o início da rotura. Ao remover sistematicamente este excesso após a cura completa, assegurou-se a máxima integridade no interior da união e garantiu-se uma área de sobreposição estritamente retangular, o que é fundamental para minimizar a dispersão dos resultados e validar o cálculo das tensões de corte.

Para remover o excesso de adesivo, foi utilizada uma fresa de topo (MAQFORT Drilling 45) existente na oficina do laboratório, com uma velocidade regulada de 725 rpm, e para acabamento final foram utilizadas ferramentas manuais como limas, as Figura 36 eFigura *37* mostram o processo.



Figura 36 – Fresa Topo MaqFort Drilling 45



(a) (b)

Figura 37 – Remoção do excesso de adesivo; (a) utilização da fresa de topo; (b) acabamento manual

3.2.2. Substrato de aço

Este subcapítulo descreve os procedimentos de preparação e fabrico adotados para os provetes com aderentes em liga de aço. Neste grupo, produziu-se Juntas de Sobreposição Simples (JSS) e juntas de topo (JTT) utilizando a liga S355JR.

O processo de fabricação das juntas seguiu o mesmo procedimento do subcapítulo 3.2.1, a única diferença é que, antes do procedimento de granalhagem, foi realizado um tratamento químico nos provetes de (JSS).

Este tratamento químico consiste na limpeza por imersão numa solução de ácido acético. Como o aço laminado a quente possui frequentemente uma camada de óxido negro (carepa), este ataque químico controlado promove a desoxidação sem agredir o metal base. Esse procedimento é essencial para garantir uma região de adesão sem contaminantes.

3.2.3. Provetes de adesivo maciço

Para a caracterização das propriedades mecânicas intrínsecas do adesivo de poliuretano (sem a influência de substratos), procedeu-se ao fabrico de provetes maciços, frequentemente designados na literatura por provetes *bulk*. Para o efeito, utilizou-se um molde metálico

dedicado, desenhado para garantir a obtenção de corpos-de-prova com geometria padronizada e isentos de defeitos volumétricos (como vazios ou bolhas de ar aprisionadas).

O dispositivo de moldagem é constituído por três placas sobrepostas e interligadas, conforme a Figura 38:

- Uma placa inferior maciça, que serve de base e contém quatro furos roscados nas extremidades.
- Uma placa intermediária, com exatos 2 mm de espessura, onde estão maquinadas as cavidades com o formato final dos provetes (geometria "osso de cão").
- Uma placa superior de fecho, equipada com orifícios circulares de alívio estrategicamente posicionados sobre cada cavidade.



Figura 38 - Molde para fabrico dos provetes Bulk

Antes do início do processo de moldagem, todas as faces metálicas do conjunto foram rigorosamente limpas com acetona para eliminar quaisquer óxidos, poeiras ou contaminantes orgânicos. De modo a evitar a forte adesão do poliuretano ao metal e garantir a extração segura dos provetes após a cura, procedeu-se à aplicação do agente desmoldante de alta performance Loctite Frekote 770-NC. Foram aplicadas três camadas sucessivas deste agente em todas as superfícies interiores do molde, respeitando o tempo de evaporação entre cada passagem para criar um filme separador eficaz, conforme a Figura 39.



Figura 39 - Aplicação dos desmoldante frekote 770-NC

O procedimento de fabrico decorreu mediante as seguintes etapas operacionais, conforme a Figura 40:

- Montagem da Matriz: A placa intermediária foi acoplada sobre a placa base, delimitando o volume exato das cavidades dos provetes.
- Preenchimento: O adesivo de poliuretano recém-misturado foi aplicado no interior de cada cavidade com o auxílio de uma espátula manual. O preenchimento foi executado garantindo um ligeiro excesso de material, de forma a compensar eventuais retrações e mitigar o aprisionamento de ar nas extremidades das amostras.
- Prensagem e Purga: A placa superior foi posicionada e o conjunto foi encerrado através do aperto cruzado de quatro parafusos. Esta ação mecânica exerceu pressão hidrostática sobre o adesivo não curado no interior do molde. Consequentemente, o ar residual e o excesso de poliuretano foram forçados a sair através dos orifícios de alívio da placa superior, garantindo que as cavidades ficassem 100% preenchidas.
- Cura: O molde foi deixado em repouso à temperatura ambiente durante o período estipulado pelo fabricante para a cura completa do adesivo. O conjunto foi desmontado e os provetes de 2 mm de espessura foram extraídos e preparados para os ensaios mecânicos.



(a) (b) (c)

(a) aplicação do adesivo no molde; (b) fecho do molde; (c) molde fechado

Figura 40 – Processo de fabrico dos provetes Bulk

Em complemento aos provetes padronizados destinados à caracterização mecânica à tração, procedeu-se simultaneamente ao fabrico de amostras maciças específicas para a medição da dureza superficial (escala Shore D), conforme a Figura 41. Para o efeito, o adesivo recém-misturado foi cuidadosamente vazado num molde dedicado, garantindo a obtenção de superfícies perfeitamente planas e a espessura mínima exigida pelas diretrizes da norma ISO 868. Após o nivelamento e a mitigação de eventuais bolhas de ar aprisionadas, estes provetes repousaram no interior do molde ao longo de todo o período de cura à temperatura ambiente.

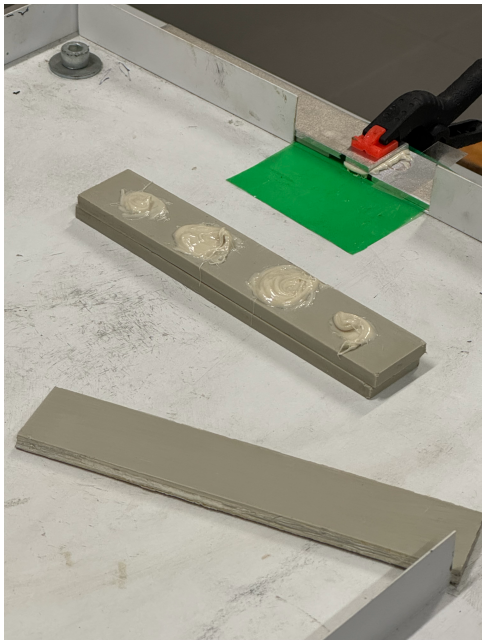


Figura 41 - Molde para provetes de dureza Shore D

3.2.4. Condições de Envelhecimento Ambiental

Na indústria automóvel, a durabilidade a longo prazo das ligações coladas é fortemente condicionada pela exposição a agentes climáticos. A absorção de humidade e as elevadas temperaturas podem plastificar a matriz polimérica, reduzir a sua resistência coesiva e degradar a integridade interfacial.

Com o intuito de avaliar a durabilidade e a resistência da matriz de poliuretano face a condições climáticas adversas, um lote específico de Juntas de Sobreposição Simples (JSS) com substratos de alumínio AW 6085 foi sujeito a protocolos de envelhecimento acelerado.

Após a fase de cura inicial à temperatura ambiente (conforme detalhado no subcapítulo 3.2.1), os provetes foram divididos em três grupos de estudo distintos e submetidos a um período de condicionamento contínuo de 300 horas. Para isolar os efeitos individuais e combinados da temperatura e da difusão de humidade, definiram-se as seguintes condições de exposição:

- Condição A (Sob efeito da humidade): Imersão total dos provetes em recipientes com água destilada à temperatura ambiente (aproximadamente 23 °C);
- Condição B (Sob efeito da temperatura): Exposição dos provetes a um ambiente seco com temperatura controlada a 80 °C, recorrendo a uma câmara climática Thermotron, modelo SM-4S-8200, conforme ilustrado na Figura 42;
- Condição C (Sob efeito da humidade e temperatura): Imersão total dos provetes em água no interior de recipientes fechados, mantidos a uma temperatura constante de 80 °C dentro da mesma câmara climática Thermotron (Figura 43).



Figura 42 – Câmara climática Thermotron



Figura 43 – Disposição dos provetes dentro da câmara climática

Terminadas as 300 horas de exposição, os provetes de cada grupo foram retirados dos respetivos ambientes de condicionamento e, no caso das condições com imersão, secos superficialmente. Antes de serem submetidos à caracterização mecânica, as juntas passaram por um período de estabilização, repousando no laboratório até atingirem o equilíbrio térmico à temperatura ambiente (aproximadamente 23 °C). Este intervalo de estabilização foi fundamental para garantir que os provetes não fossem ensaiados sob um estado de amolecimento termoplástico temporário induzido pelo calor. Desta forma, assegurou-se que as variações registadas no comportamento mecânico refletiam efetivamente as alterações estruturais permanentes da matriz de poliuretano (como o aumento da reticulação por pós-cura ou a degradação hidrolítica), regressando à linha de base térmica dos ensaios quase-estáticos.

3.3. Ensaios Mecânicos

Após o fabrico dos provetes, procedeu-se à sua caracterização experimental. O objetivo desta fase consistiu em avaliar a resistência das diferentes juntas adesivas quando sujeitas a cargas contínuas até à rotura. De salientar que todos os ensaios decorreram à temperatura ambiente, por forma a não introduzir a variável térmica no comportamento do poliuretano no momento do ensaio.

3.3.1. Equipamentos e configuração base

Os ensaios destrutivos foram conduzidos em uma máquina universal de ensaios da marca Shimadzu modelo AG-I 10kN e em outra máquina da Shimadzu modelo AG-X 100kN. A aquisição de dados (força e deslocamento) foi registada continuamente de forma computorizada, permitindo a posterior extração dos resultados e o cálculo das respetivas tensões de rotura. Na máquina AG-I 10kN (Figura 44) para nos ensaios de tração que foram necessárias garras em cunha para fixar os provetes, utilizou-se uma garra Shimadzu MWG-20 kNA (Figura 45), e na máquina Shimadzu modelo AG-X 100kN (Figura 46), utilizou-se a garra em cunha da Shimadzu MWG-100 kNA (Figura 47).



Figura 44 – Máquina de ensaios Shimadzu AD-I 10 kN

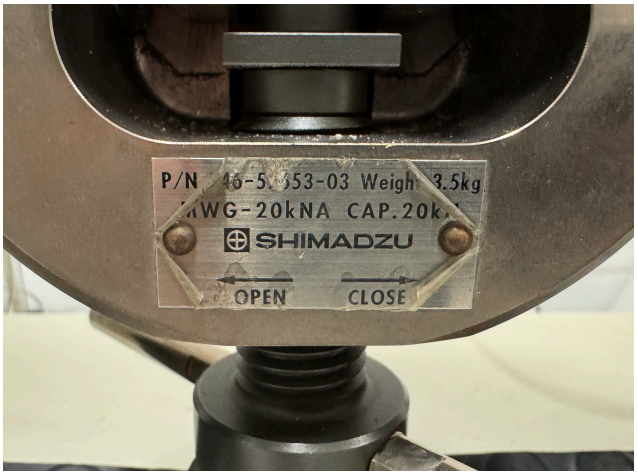


Figura 45 –Garra em cunha Shimadzu MWG-20 kNA



Figura 46 – Máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 kN

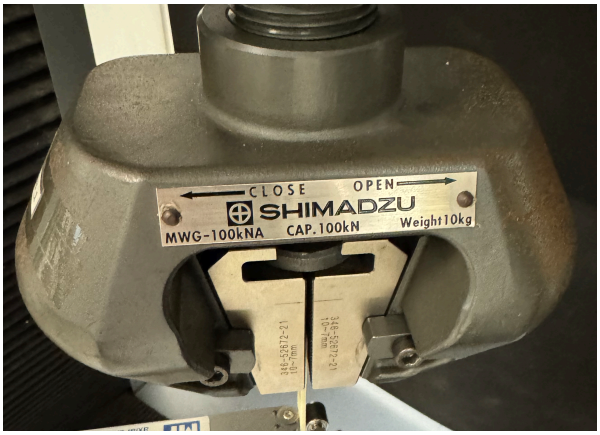


Figura 47 –Garra em cunha Shimadzu MWG-100 kNA

Para complementar a caracterização mecânica preliminar da matriz polimérica pura, procedeu-se à avaliação da sua dureza superficial. As medições foram realizadas com recurso a um durómetro analógico da marca Hildebrand, calibrado para a escala Shore D (Figura 48), a qual é a mais indicada para polímeros estruturais e plásticos de elevada rigidez. De modo a garantir a máxima precisão e repetibilidade dos resultados, eliminando as variações decorrentes da aplicação manual de força por parte do operador, o instrumento operou acoplado a um suporte de bancada dedicado. Este suporte, equipado com um manípulo de descida controlada e uma massa de contacto normalizada no topo.

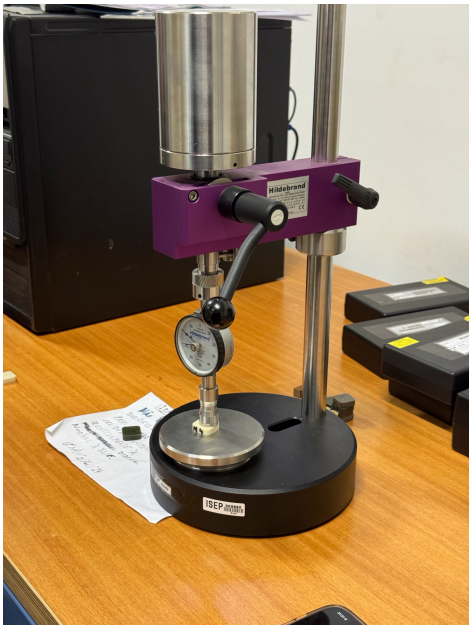


Figura 48 - Durómetro Hildebrand Shore D

3.3.2. Acessórios e montagem por modo de carga

Para assegurar que a solicitação mecânica imposta correspondia fielmente à formulação teórica de cada ensaio, evitando o surgimento de esforços secundários indesejados, a máquina foi equipada com diferentes dispositivos de fixação e medição adaptados à geometria de cada configuração:

- Tração de Provetes Maciços (*Bulk*): Para os provetes de matriz polimérica, utilizaram-se garras de aperto mecânico (Shimadzu MWG-100kNA). Para garantir a determinação rigorosa das características do adesivo puro, a deformação não foi avaliada pelo deslocamento da travessa, mas sim medida localmente com recurso a um extensómetro axial MF, modelo MFA 25 (Figura 49) acoplado diretamente à zona útil do provete.



Figura 49 - Extensómetro axial MF MFA 25

- Corte em Juntas de Sobreposição Simples (JSS): A montagem das JSS foi executada de forma a garantir o alinhamento perfeito do eixo longitudinal dos provetes com o eixo de tração da máquina, minimizando assim a excentricidade da carga e a introdução de momentos fletores prematuros na zona de colagem, sendo previamente antes dos ensaios colados calços nas extremidades dos provetes, da mesma espessura dos substratos, de forma a contribuir para a minimização de momentos fletores, conforme a Figura 50.

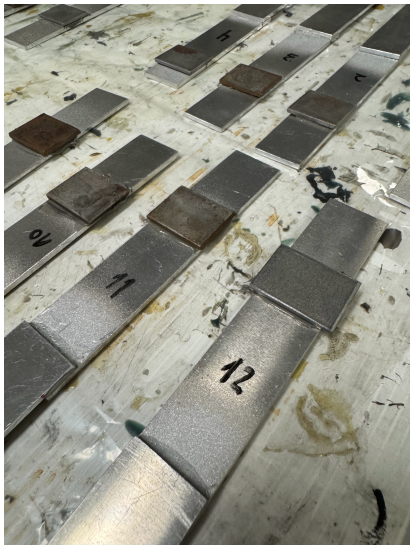


Figura 50 - Calço colado nas juntas de sobreposição simples

- Tração pura em Juntas de Topo (JT): Dada a extrema sensibilidade deste modo de solicitação a qualquer desalinhamento geométrico, os provetes cilíndricos não puderam ser fixos através de garras convencionais. Para o efeito, recorreu-se a uma ferramenta de fixação dedicada desenvolvida no ISEP, projetada para assegurar o perfeito alinhamento axial da carga. O dispositivo ancora-se à máquina de ensaios e

fixa os substratos de alumínio através da inserção de pinos transversais passantes. O princípio mecânico fundamental desta ferramenta é a incorporação de juntas de articulação universal (juntas de *cardan*) nas suas extremidades. A libertação destes graus de liberdade cinemáticos assegura a autoacomodação do conjunto sob carga, anulando a introdução de quaisquer excentricidades, tensões de clivagem ou momentos fletores na linha de adesivo, essa ferramenta pode ser observada na Figura 51.

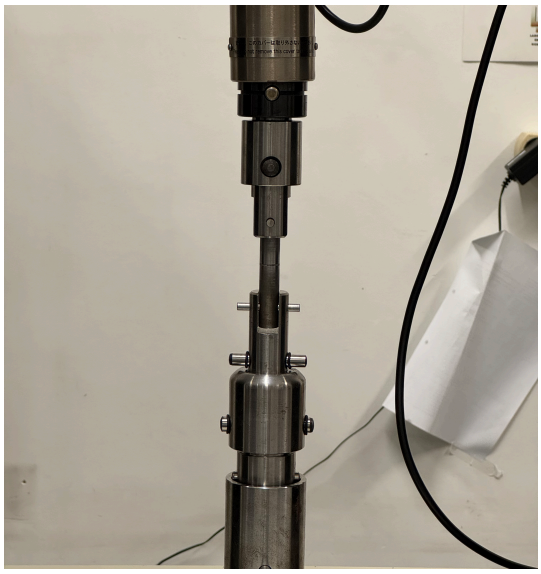


Figura 51 - Ferramenta para ensaio de juntas de topo

- Arrancamento (*Floating Roller Peel Test*): Para simular o esforço de arrancamento contínuo, a máquina foi equipada com um dispositivo de roletes flutuantes, desenvolvido dentro do ISEP. O substrato rígido do provete foi guiado através dos rolos de apoio, enquanto o substrato flexível foi tracionado verticalmente pela garra superior, conforme a Figura 52. Esta cinemática assegurou a manutenção de um ângulo de arrancamento estrito e constante durante todo o processo de propagação da fenda.



Figura 52 - Ferramenta para ensaio de arrancamento

3.3.3. Parâmetros e velocidades de ensaio

A resposta mecânica dos adesivos estruturais de poliuretano é intrinsecamente dependente da taxa de deformação devido à sua natureza viscoelástica. Por conseguinte, o controlo da velocidade de deslocamento da travessa da máquina de ensaios constitui um parâmetro metodológico crítico, quer para o estabelecimento do comportamento de referência, quer para a avaliação do desempenho dinâmico da ligação.

Para a caracterização fundamental do material puro e das uniões coladas sob condições standard, adotaram-se as seguintes velocidades de ensaio, alinhadas com as respetivas normas técnicas para garantir a distribuição homogénea das tensões:

- Provetes de Adesivo Maciço (*Bulk*): O ensaio de tração pura foi executado a uma velocidade constante de 1 mm/min.
- Juntas de Topo (JT): A solicitação de tração normal nos cilindros colados (alumínio e aço) foi realizada a uma velocidade de 0,5 mm/min, permitindo o desenvolvimento progressivo do estado de restrição triaxial.
- Juntas de Sobreposição Simples (JSS): Os ensaios de corte por tração horizontal foram conduzidos à velocidade de 1,3 mm/min.
- Arrancamento (*Floating Roller Peel Test*): A mecânica de rasgamento contínuo deste ensaio exigiu a aplicação de uma taxa de deslocamento vertical de 152 mm/min (equivalente a 6 in/min), garantindo a estabilização fiável do patamar de força média analisado.

Para o estudo da sensibilidade à taxa de deformação para avaliar o enrijecimento da matriz polimérica e a dependência estrutural face a solicitações de diferentes intensidades, implementou-se um protocolo dinâmico abrangendo quatro ordens de grandeza distintas. Este estudo ramificou-se em duas vertentes:

- Juntas de Sobreposição Simples (JSS): Testadas às velocidades de 0,5 mm/min, 1,3 mm/min, 5 mm/min e 500 mm/min.

Para o estudo do envelhecimento ambiental, com o intuito de avaliar a plastificação da matriz polimérica e a durabilidade da interface face a condições climáticas extremas, implementou-se um protocolo hidrotérmico acelerado com a duração de 300 horas.

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios realizados com o adesivo de poliuretano puro e com as juntas coladas de alumínio e aço. Todos estes testes foram feitos em condições quase-estáticas e à temperatura ambiente, servindo como linha de base (*baseline*) para o restante estudo.

A análise dos resultados está organizada em duas partes:

- Caracterização do adesivo puro: Através dos ensaios em provetes maciços (*Bulk*), avalia-se o comportamento do polímero isolado para determinar propriedades fundamentais como a sua rigidez (Módulo de Young) e a sua ductilidade.
- Comportamento em junta colada: Através dos ensaios com provetes estruturais, avalia-se o desempenho do adesivo quando aplicado entre substratos de alumínio. Isto permite analisar o impacto prático da geometria da junta e a eficácia da preparação da superfície.

Com este conjunto de ensaios, determinou-se a capacidade de carga da união sob três modos de solicitação diferentes: tração (juntas de topo), corte (juntas de sobreposição simples) e arrancamento (ensaio de rolete flutuante).

Os valores obtidos e discutidos nesta secção são fundamentais, pois vão servir de referência para quantificar, nos capítulos seguintes, o efeito da velocidade de ensaio e o efeito do envelhecimento ambiental.

Durante a execução dos ensaios de tração, a máquina universal de ensaios acoplada ao sistema de aquisição de dados regista, de forma contínua e sincronizada, dois parâmetros fundamentais até ao momento do colapso estrutural: a força aplicada (F, medida em Newtons, N) e o respetivo deslocamento da cruzeta (δ, medido em milímetros, mm). A compilação destes dados brutos permite a construção das curvas Força-Deslocamento, que ilustram a resposta visual e a capacidade de absorção de energia de cada provete.

Para viabilizar uma comparação rigorosa e independente de ligeiras variações geométricas, a força máxima registada (F_{max}, em Newtons, N) é normalizada em Tensão de Corte Máxima (τ_{max}, expressa em Megapascais, MPa). Este parâmetro é calculado dividindo o pico de força trativa pela área nominal de sobreposição do adesivo (A, expressa em milímetros quadrado, mm^2), assumindo uma distribuição uniforme de tensões, através da equação (1)):

$$\tau_{max} = \frac{F_{max}}{A} \quad (1)$$

4.1. Comportamento a tração

O estudo do comportamento sob solicitação normal inicia-se pela análise do polímero isolado, prosseguindo para a sua resposta quando confinado numa geometria de ligação estrutural sujeita a tensões perpendiculares ao plano de colagem.

4.1.1. Provetes de adesivo maciço

A caracterização isolada do adesivo é um passo fundamental no estudo de uniões estruturais. Este subcapítulo apresenta os resultados dos ensaios de tração realizados nos provetes maciços do adesivo SikaForce®-472 FR L60. O objetivo primário destes ensaios foi extrair as propriedades mecânicas puras do material, nomeadamente a rigidez e a capacidade máxima de carga, isolando o comportamento do polímero dos efeitos de interface e da rigidez transversal dos substratos metálicos.

A síntese dos resultados obtidos com o substrato de alumínio está presente na Tabela 4, acompanhada pelo respetivo perfil de Força-Deslocamento na Figura 53.

Na análise das curvas de Tensão-Deformação, o provete B5 apresentou um comportamento mecânico anómalo, exibindo uma rigidez aparente superior na fase inicial e uma fratura prematura (a cerca de 1,5% de deformação). Para assegurar o rigor e a fiabilidade estatística da caracterização do adesivo, esta amostra foi classificada como *outlier* experimental, sendo os seus resultados excluídos do cálculo das propriedades mecânicas médias.

Tabela 4 - Resultado dos ensaios do provete Bulk

Provete	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Deformação (%)
B1	18,35	2,29	8%
B2	18,76	2,15	6%
B3	18,63	2,05	7%
B4	18,09	1,81	4%
B6	15,91	1,91	5%
Média	17,95	2,05	6%
Desvio Padrão	1,17	0,19	2%
Desvio Padrão (%)	6%	9%	-

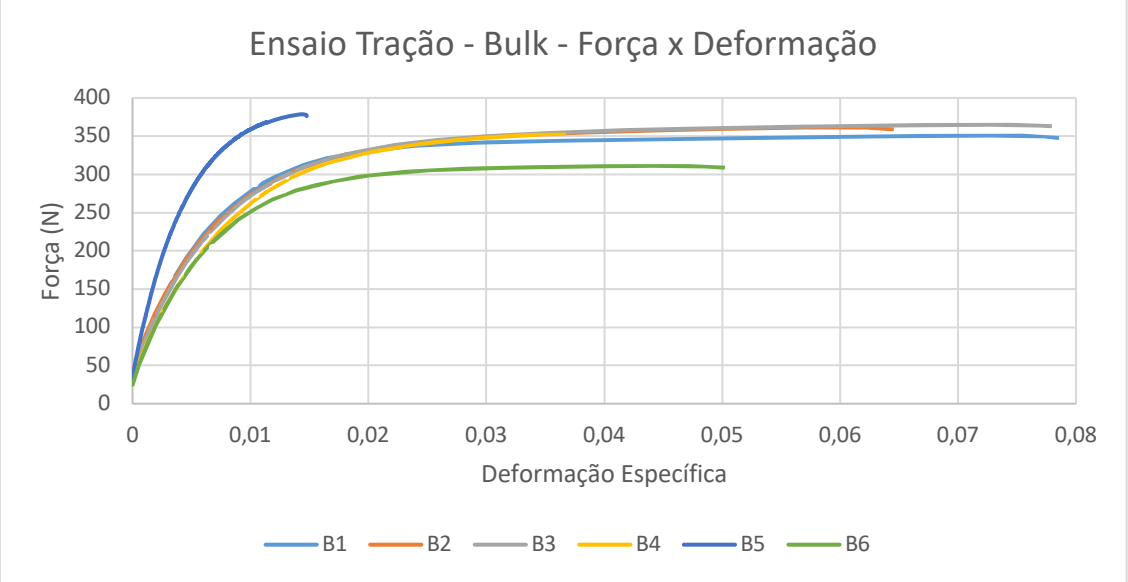


Figura 53 - Gráfico Força x Deformação Provete Bulk

A análise dos dados quantitativos revela que o adesivo suportou uma tensão máxima à tração média de 17,95 MPa, apresentando um coeficiente de variação muito baixo (apenas 6%). Este valor evidencia a excelente repetibilidade do processo de fabrico. Comparando este resultado com os dados teóricos fornecidos pelo fabricante, nota-se que a tensão experimental se encontra ligeiramente abaixo do valor nominal de 20 MPa. Esta discrepância pode ser justificada pela introdução de micro-porosidades ou até mesmo bolhas de ar durante a mistura manual e injeção do adesivo bicomponente no molde. Estes defeitos atuam como concentradores de tensão, precipitando a rotura antes de se atingir o limite teórico absoluto.

Avaliando a rigidez do material através do declive da sua fase elástica, apurou-se um Módulo de Young médio de 2,04 GPa. Esta elevada rigidez espelha de forma muito coerente a dureza de 75 Shore D indicada pelo fabricante, revelando uma estrutura molecular fortemente reticulada e perfeitamente apta para a transferência direta de cargas num chassis. Contudo, o grande trunfo deste adesivo revela-se no seu comportamento pós-cedência, em vez de sofrer uma fratura frágil e repentina, o poliuretano escoa e atinge uma deformação média de 6% antes de romper.

Estes resultados alinham-se rigorosamente com a caracterização independente realizada por (Faneco et al., 2017), que investigaram esta mesma formulação de poliuretano para aplicações na indústria automóvel. Segundo os autores, ao contrário dos tradicionais adesivos epoxídicos, que apresentam maior resistência à tração, mas comportamento frágil, este poliuretano destaca-se precisamente pela sua considerável capacidade de alongamento antes da rotura, uma propriedade fundamental para a dissipação de energia.

A união destes dois fatores, a elevada força necessária para o começar a esticar e a sua considerável capacidade de alongar, traduz-se numa grande área sob a curva tensão-deformação, o que define um material altamente tenaz. Na prática da engenharia automóvel,

este é exatamente o perfil procurado, garante a integridade estrutural e a estabilidade do veículo no dia a dia, mas assegura uma excelente capacidade de absorção de energia em cenários de impacto (*crashworthiness*). Este comportamento intrínseco será a chave teórica para interpretar a resistência e os fenómenos de falha das juntas coladas que se analisam nas secções seguintes.

Durante a análise experimental, constatou-se que o provete designado por B5 apresentou um comportamento anómalo, exibindo uma rigidez aparente inicial excessiva e uma fratura prematura (a cerca de 1,5% de deformação). A literatura especializada em fratura de polímeros, como demonstrado nos estudos de (Seewald et al., 2022) e (Ribeiro et al., 2016), evidencia que a presença de defeitos microscópicos atua como severos concentradores de tensão. Estes defeitos promovem a nucleação prematura de fendas, alterando o modo de falha de dúctil para frágil.

4.1.2. Juntas de topo a topo

Compreendido o comportamento do material puro, avaliou-se o impacto da sua aplicação numa camada fina confinada entre dois substratos rígidos de alumínio e aço. Para isso, recorremos aos ensaios de Juntas de Topo, uma configuração onde a força atua perpendicularmente à linha de adesivo, tentando afastar os dois cilindros de forma frontal.

A síntese dos resultados obtidos com o substrato de alumínio está presente na Tabela 5, acompanhada pelo respetivo perfil de Força-Deslocamento na Figura 54.

Tabela 5 - Resultados das juntas de topo substrato alumínio

Provete de Alumínio AW 6085	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Deslocamento (mm)
JT1	2213,44	17,63	0,51
JT2	1761,88	14,03	0,42
JT3	1821,88	14,51	0,43
JT5	2220,31	17,68	0,51
Média	2004,38	15,96	0,47
Desvio Padrão	246,61	1,96	0,05
Desvio Padrão (%)	12%	12%	11%

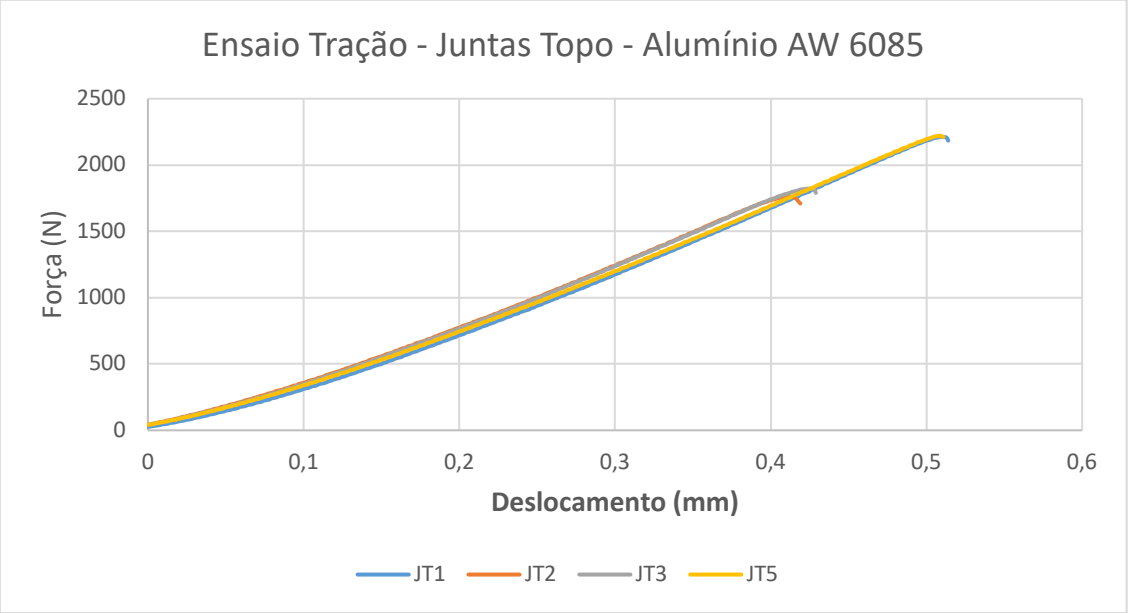


Figura 54 - Gráfico Força x Deformação juntas topo substrato alumínio

Os resultados indicam uma tensão máxima média de 15,96 MPa (com um coeficiente de variação de 12%). Ao comparar este valor com os resultados do adesivo testado isoladamente (que atingiu cerca de 18 MPa, conforme o subcapítulo 4.1.1), nota-se que a junta de topo suportou uma tensão menor e apresentou um deslocamento muito reduzido (apenas 0,47 mm).

Esta diferença não se deve a um defeito na colagem, mas sim à própria geometria da junta. Quando é tracionada, a camada de adesivo tem tendência a contrair-se lateralmente devido ao Efeito de Poisson. No entanto, como está firmemente colada a dois blocos rígidos de alumínio, o adesivo não consegue encolher. A análise visual confirmou este fenómeno, exibindo um modo de rotura coesivo, conforme a Figura 55 atestando que a ligação interfacial superou a resistência interna da matriz sob restrição.

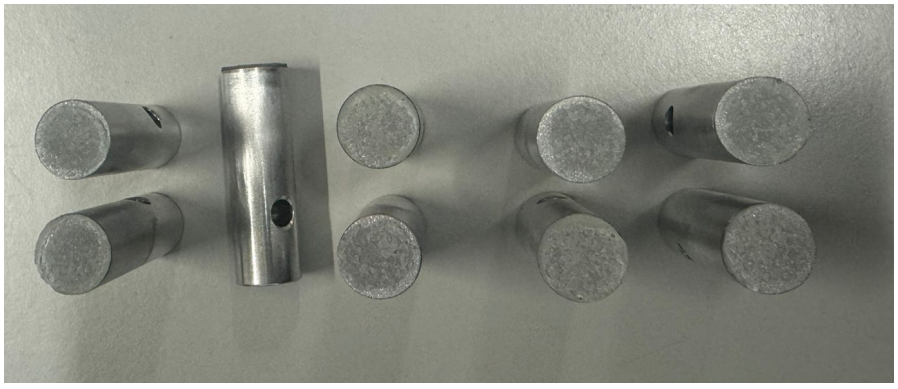


Figura 55 – Superfície de falha das juntas topo com substrato de alumínio

A síntese dos resultados obtidos com o substrato de aço está presente na Tabela 6, acompanhada pelo respetivo perfil de Força-Deslocamento na Figura 56.

Tabela 6 - Resultados das juntas de topo substrato aço

Provete de Aço S355 JR	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Deslocamento (mm)
JT2	2003,75	15,88	0,51
JT3	1948,13	15,48	0,48
JT4	2143,44	17,14	0,49
JT5	2409,38	18,69	0,52
Média	2126,17	16,79	0,50
Desvio Padrão	205,9	1,45	0,02
Desvio Padrão (%)	10%	9%	3%

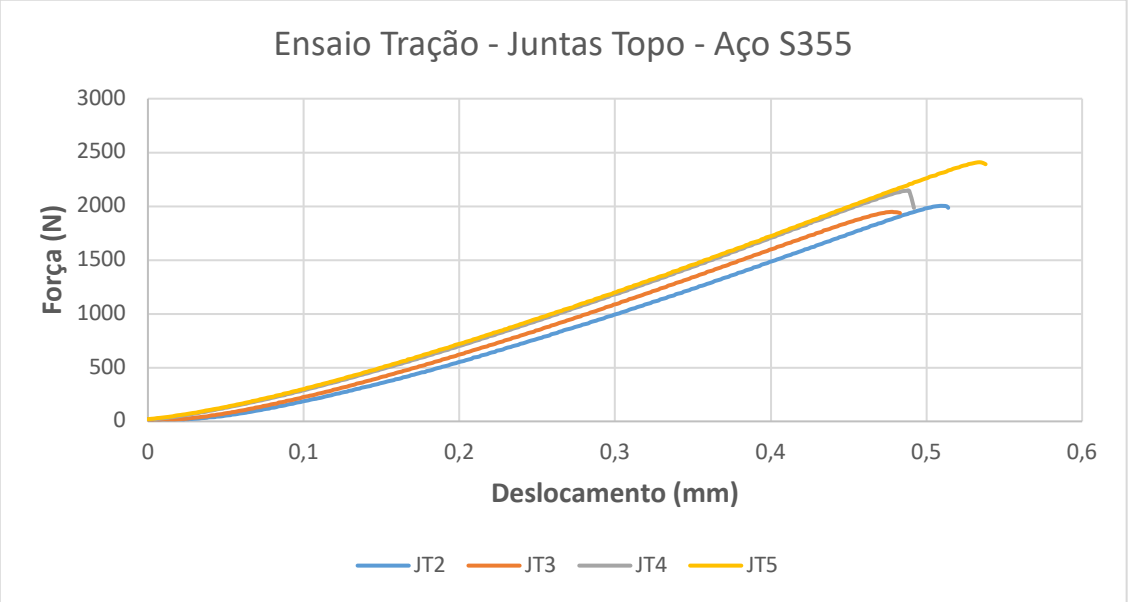


Figura 56 - Gráfico Força x Deformação juntas topo substrato aço

Por sua vez, as juntas fabricadas com substratos de aço registaram uma tensão máxima média de 16,79 MPa e um deslocamento de 0,50 mm. Quando comparado com o alumínio, este resultado demonstra uma capacidade de carga muito semelhante, mas ligeiramente superior (um incremento de cerca de 5%), apresentando também uma maior estabilidade nos resultados (desvio padrão de apenas 9%).

Esta proximidade de valores comprova que o fator crítico de falha nesta geometria é a própria resistência da matriz polimérica sob restrição, e não a interface de colagem. A ligeira superioridade na tensão suportada pelas juntas de aço justifica-se pela diferença de rigidez entre os dois metais. O aço possui um Módulo de Young significativamente superior ao do alumínio (aproximadamente 210 GPa face a 70 GPa), o que confere uma restrição lateral ainda mais severa e indeformável à camada de adesivo durante o ensaio de tração, consolidando o

estado triaxial de tensões e permitindo que a união atinja um pico de carga superior antes do colapso da matriz.

Este bloqueio cria um estado de tensão triaxial. Com o movimento restringido em todas as direções, o poliuretano fica impedido de escoar plasticamente. Isto gera pequenas fissuras internas que levam a uma fratura prematura, antes de se atingir a tensão limite teórica do material. É precisamente neste cenário mecânico que o mecanismo de fratura se altera. Conforme demonstrado por (Seewald et al., 2022), sob fortes restrições triaxiais, o alívio de tensão em matrizes poliméricas ocorre através do fenómeno de cavitação. A impossibilidade de deformação lateral força a nucleação e o crescimento de cavidades microscópicas no seio do adesivo, as quais coalescem rapidamente e precipitam o colapso da união.

Adicionalmente, a observação macroscópica detalhada das faces de aço após a rotura (Figura 57) revelou um modo de falha maioritariamente coesivo de camada fina (*thin-layer cohesive failure*). Embora o padrão de fratura possa sugerir, numa análise superficial, um descolamento interfacial, a inspeção presencial e minuciosa confirma que a rotura ocorreu no interior do adesivo, propagando-se numa região extremamente próxima do substrato e deixando uma película residual de adesivo ancorada ao metal.



Figura 57 – Superfície de falha das juntas topo com substrato de aço

4.2. Comportamento sob o efeito de corte (Juntas de Sobreposição Simples)

Na engenharia automóvel, as ligações adesivas raramente são solicitadas em tração pura. Dependendo da arquitetura do chassis e da cinemática de um eventual impacto, a união pode estar sujeita a tensões de corte (deslizamento). Para compreender a resposta mecânica do SikaForce®-472 FR L60 perante estas diferentes solicitações, realizaram-se ensaios em juntas de diferentes substratos, utilizando como substrato base o alumínio, um material de referência na construção de estruturas leves (*lightweight design*), e o outro substrato de aço S355 JR. As Juntas de Sobreposição Simples (JSS) representam a configuração de ensaio mais comum e o modo de carregamento preferencial no dimensionamento de ligações coladas. Neste modo, a carga aplicada paralelamente aos substratos distribui-se sob a forma de tensão de corte ao longo da área colada.

A síntese dos resultados obtidos com o substrato de alumínio está presente na Tabela 7, acompanhada pelo respetivo perfil de Força-Deslocamento na Figura 58.

Tabela 7 - Resultados das juntas de sobreposição simples substrato alumínio

Provete de Alumínio AW 6085	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Deslocamento (mm)
JSS6	3806,25	10,69	1,16
JSS7	4154,69	11,14	1,25
JSS8	3977,5	10,84	1,12
JSS9	3953,75	10,03	1,2
JSS10	3887,19	10,78	1,01
Média	3955,88	10,70	1,15
Desvio Padrão	129,52	0,41	0,09
Desvio Padrão (%)	3%	4%	8%

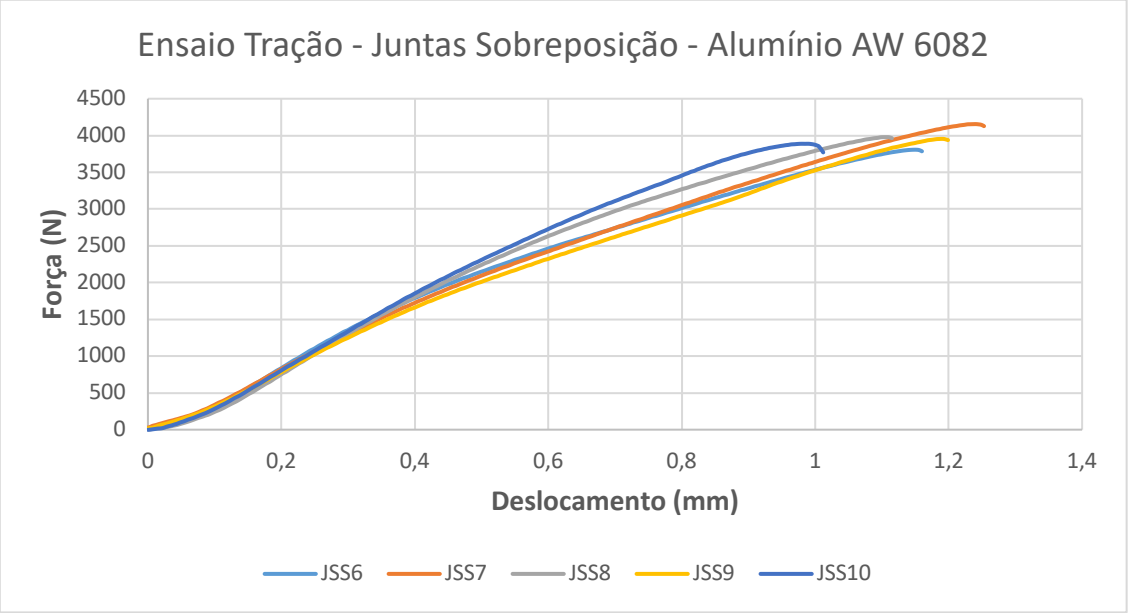


Figura 58 - Gráfico Força x Deformação juntas sobreposição substrato alumínio

A análise quantitativa revela uma tensão máxima de corte média de 10,70 MPa, acompanhada de um desvio padrão relativo extremamente baixo (4%). Este nível de dispersão atesta a elevada qualidade e repetibilidade do processo de montagem dos provetes, indicando um rigoroso controlo da espessura da camada de adesivo e uma preparação de superfície eficaz dos substratos de alumínio.

Comparativamente aos dados de referência, o valor experimental de 10,70 MPa encontra-se em excelente concordância com a tensão de corte nominal de 11 MPa estipulada pelo fabricante. A ligeira diferença registada (inferior a 3%) é residual e perfeitamente enquadrável nas tolerâncias dos ensaios laboratoriais. Importa notar que, em configurações JSS, a distribuição de tensões ao longo da sobreposição não é perfeitamente uniforme. Devido à excentricidade da carga, geram-se momentos fletores que induzem tensões de tração nas extremidades da junta. O facto de o adesivo ter suportado uma tensão média tão próxima do seu limite teórico de corte demonstra que a sua elevada tenacidade permitiu acomodar estas concentrações de tensão locais antes do colapso final.

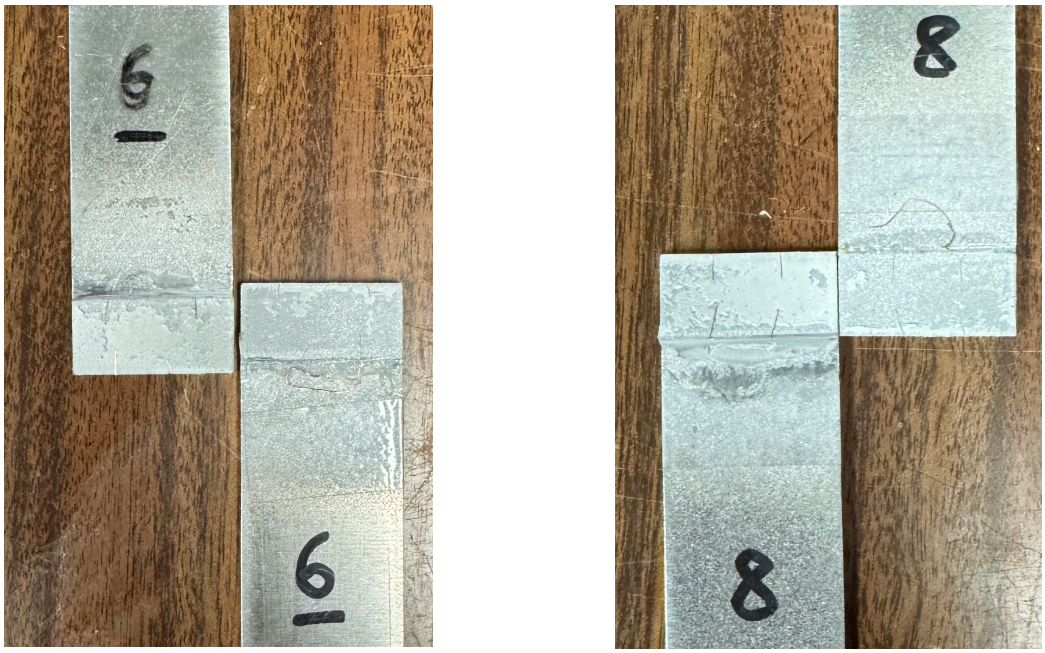
O deslocamento médio na rotura, limitar-se em 1,15 mm, certifica esta capacidade de acomodação plástica, permitindo que as juntas absorvam uma quantidade considerável de energia antes da falha estrutural.

A avaliação superficial das superfícies fraturadas (Figura 59) revela, à primeira vista, um comportamento predominantemente interfacial, onde a camada de poliuretano parece ter-se destacado integralmente de um dos substratos de alumínio. Contudo, a interpretação cruzada desta observação visual com os dados quantitativos exige uma análise mais profunda.



Figura 59 – Superfície de falha das juntas de sobreposição simples com substrato de alumínio

Uma vez que a tensão de corte alcançada (10,70 MPa) espelha quase na perfeição a tensão de limite coesivo do adesivo puro (11 MPa), a falha não pode ser classificada como puramente adesiva. Por conta da proximidade com o limite teórico insinua a ocorrência de um modo de rotura misto ou de uma rotura coesiva de camada fina. Neste cenário, a fratura propagou-se no interior do próprio adesivo, mas isso ocorreu numa região extremamente próxima da interface metal-polímero, deixando uma película microscópica de adesivo no substrato aparentemente "limpo" (Figura 60). Isso é de extrema importância estrutural, pois prova que a preparação de superfície do alumínio foi altamente eficaz, a ancoragem ao metal foi forte o suficiente para obrigar o adesivo a trabalhar até ao seu limite mecânico absoluto antes de a junta colapsar.



a) (b)

(a) provete 6; (b) provete 8

Figura 60 – Detalhe da superfície de falha dos provetes de sobreposição simples

A capacidade da junta para suportar esta tensão antes de falhar pode ser compreendida pelos modelos de zona coesiva avaliados por (Azevedo et al., 2015). De acordo com estes princípios, a ductilidade inerente ao poliuretano permite uma melhor redistribuição das tensões de corte (que tendem a ser críticas nas extremidades da sobreposição), atrasando a iniciação do dano térmico/mecânico na interface metal-adesivo quando comparado com polímeros estruturais mais rígidos. O valor apurado encontra-se, assim, em total concordância com o referencial de resistência esperado para este material (Faneco et al., 2017).

A síntese dos resultados obtidos com o substrato de aço está presente na Tabela 8, acompanhada pelo respetivo perfil de Força-Deslocamento na Figura 61.

Tabela 8 - Resultados das juntas de sobreposição simples substrato aço

Provete de Aço S355 JR	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Deslocamento (mm)
JSS1	4243,44	13,84	1,24
JSS2	4298,44	14,69	1,22
JSS3	5150,63	15,55	1,28
JSS4	5145,31	16,57	1,19
JSS5	5736,25	18,31	1,29
Média	4914,81	15,79	1,25
Desvio Padrão	635,25	1,73	0,04
Desvio Padrão (%)	13%	11%	3%

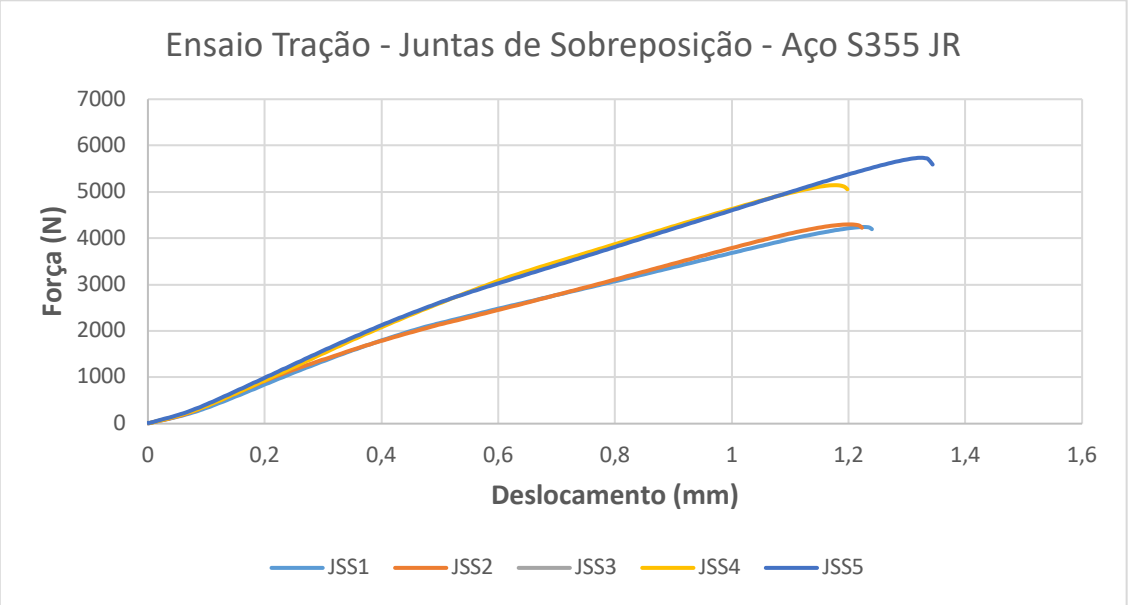


Figura 61 - Gráfico Força x Deformação juntas sobreposição substrato aço

A drástica variação na capacidade de carga aparente entre as uniões de alumínio e de aço, traduzida por um incremento na ordem dos 50% (de 10,70 MPa para 15,79 MPa), não reflete uma alteração intrínseca na resistência nominal do adesivo de poliuretano, mas sim uma profunda modificação na resposta estrutural do conjunto face à solicitação mecânica. Nas juntas de sobreposição simples (JSS), a transferência de carga é complexa devido à excentricidade geométrica inerente à arquitetura da ligação, que gera um momento fletor responsável por induzir a rotação da junta durante o ensaio. Esta flexão provoca concentrações severas de tensão de corte e de tensões normais de arrancamento nas extremidades da sobreposição, precipitando a falha nessas zonas periféricas. A superioridade do desempenho

do aço é diretamente governada pelo seu elevado Módulo de Young (aproximadamente 210 GPa), que o torna cerca de três vezes mais rígido do que a liga de alumínio AW 6085 (70 GPa).

Consequentemente, a deformação elástica do substrato ferroso durante o ensaio é significativamente inferior, o que minimiza a rotação global da junta e reduz drasticamente as forças de clivagem nas extremidades. Este fenómeno de mitigação geométrica, amplamente sustentado por modelos de mecânica da fratura discutidos por (Azevedo et al., 2015), promove uma distribuição de tensões de corte substancialmente mais homogénea. Ao atrasar a iniciação do dano nas bordas da linha de adesivo, o substrato mais rígido permite que a união trabalhe num estado mecânico mais próximo do corte puro, suportando cargas consideravelmente maiores antes do colapso do que aquelas toleradas pelo alumínio.

Esta otimização mecânica reflete-se e é integralmente na análise das superfícies de fratura, documentada nas Figura 62 eFigura 63.



Figura 62 – Superfície de falha das juntas de sobreposição simples com substrato aço



a) (b)

(a) provete 2; (b) provete 4

Figura 63 – Detalhe da superfície de falha dos provetes de sobreposição simples

A inspeção visual detalhada dos provetes de aço após a rotura revela a ocorrência de um modo de falha com forte predominância coesiva. Este comportamento prático, bem visível na camada residual de adesivo que permanece ancorada em ambas as faces dos substratos, atesta que a preparação da superfície do aço S355 JR foi extremamente eficaz, garantindo uma excelente molhabilidade do adesivo de poliuretano durante a cura. As ligações estabelecidas na interface metal-adesivo revelaram-se robustas o suficiente para impedir a propagação de descolamento interfacial prematuro, um mecanismo de degradação estrutural frequentemente crítico que compromete o desempenho de uniões de alta responsabilidade, conforme modelado por (Ribeiro et al., 2016). Em contraste com o alumínio, onde a maior flexão do substrato exige uma resposta interfacial mais severa e propícia a instabilidade nas extremidades, no aço a integridade da ligação manteve-se inabalável até a falência plástica da matriz.

Ao garantir que a adesão interfacial superava as forças do momento fletor, o aço permitiu extrair o verdadeiro potencial viscoelástico do poliuretano estrutural. Impedido de rasgar nas bordas, o adesivo SikaForce®-472 FR L60 pôde escoar plasticamente ao longo de toda a área de sobreposição, alcançando um deslocamento médio na rotura de 1,03 mm. A combinação desta elevada tensão limite com um expressivo patamar de alongamento resulta numa maximização da área contida debaixo da curva de Força-Deslocamento, evidenciando uma capacidade massiva de dissipação de energia elástica. Este comportamento mecânico valida, em contexto de junta rígida, as conclusões independentes de (Faneco et al., 2017), comprovando que, quando acoplado a aderentes que restrinjam a rotação cinemática, este poliuretano atinge um nível de resistência e tenacidade ótimo para satisfazer os mais exigentes requisitos de segurança passiva e absorção de impacto estrutural.

4.3. Comportamento ao Arrancamento (Rolete Flutuante)

Para concluir a caracterização mecânica das juntas de alumínio, avaliou-se a resposta da ligação sob esforço de arrancamento. Este modo de solicitação é amplamente reconhecido na literatura como o mais severo e crítico para uniões estruturais. Ao contrário dos ensaios de corte e tração, onde a carga tende a distribuir-se, no ensaio de arrancamento a tensão concentra-se linearmente na extremidade da junta. Este efeito de alavanca promove a iniciação localizada de uma fenda, que se propaga progressivamente ao longo da linha de adesivo.

Ao contrário do ensaio de corte, onde a falha ocorre num pico máximo, o perfil típico de força no arrancamento atinge um patamar de propagação constante. Assim, a resistência normalizada da junta não é baseada na força máxima, mas sim calculada dividindo a força média suportada durante a fase de propagação contínua da fenda ($\bar{F}$, medido em Newtons N) pela largura transversal da linha de adesivo (b, medido em milímetros mm), resultando na resistência ao arrancamento (R_{peel}, expresso em N/mm) de acordo com a equação (2)):

$$R_{peel} = \frac{\bar{F}}{b} \qquad (2)$$

A Tabela 9 apresenta os resultados quantitativos extraídos dos perfis de carga-deslocamento. De forma a caracterizar adequadamente este fenómeno contínuo, regista-se não só o pico de força inicial, mas sobretudo a força média de patamar (esforço necessário para manter a fenda em propagação) e a respetiva resistência. E a Figura 64 mostra o gráfico de Força-Deslocamento do ensaio.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de arrancamento

Provete	Força Máxima (N)	Força Média Patamar (N)	Resistência ao Arrancamento (N/mm)
Peel 11	141,69	122,28	6,67
Peel 12	140,05	118,55	6,63
Peel 13	144,89	115,05	6,24
Peel 14	146,28	113,96	6,22
Peel 15	165,80	129,94	7,17
Média	147,74	119,96	6,59
Desvio Padrão	10,39	6,46	0,39
Desvio Padrão (%)	7%	5%	6%

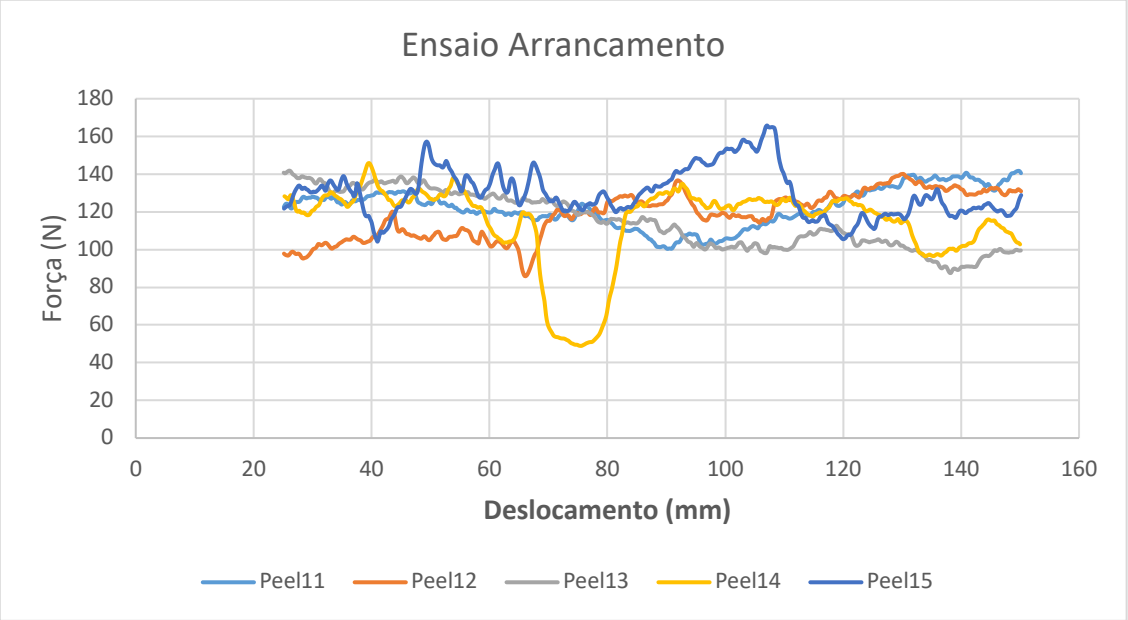


Figura 64 - Gráfico Força x Deformação ensaio de arrancamento

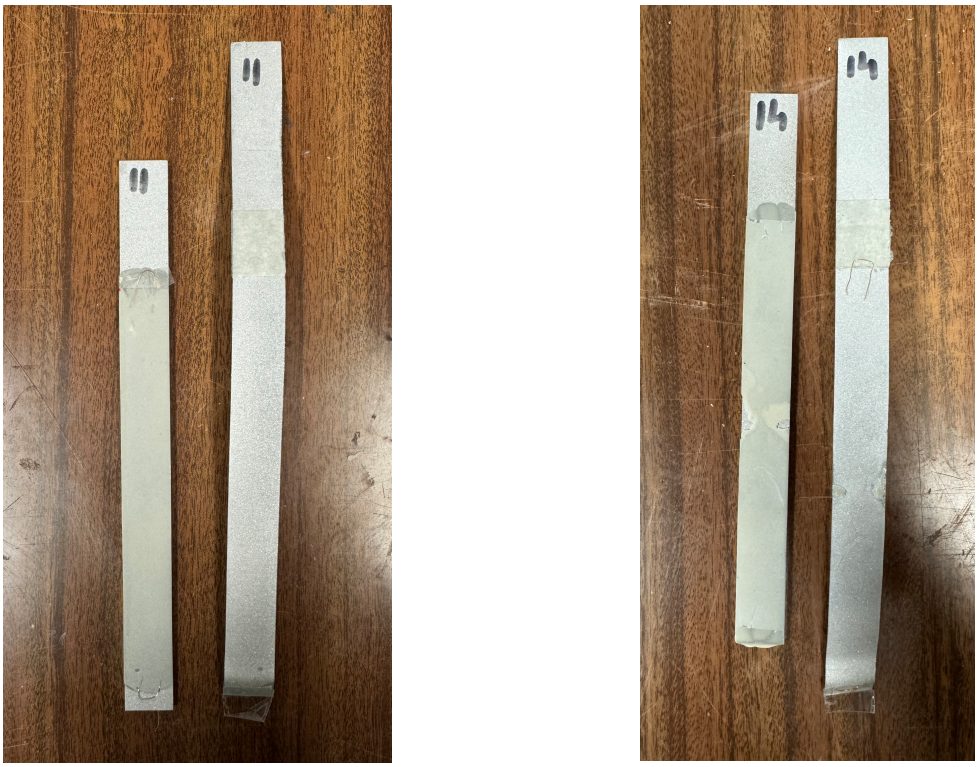
Os dados experimentais revelam que a iniciação da fratura exigiu uma Força Máxima média de 147,74 N. Após a nucleação da fenda, o esforço necessário para manter o rasgamento estabilizou num patamar inferior, registando uma Força Média de 119,96 N. A elevada consistência deste patamar reflete-se no coeficiente de variação muito reduzido (apenas 5%), indicando um processo de fratura contínuo, estável e isento de defeitos macroscópicos ao longo da interface de colagem.

A normalização desta força face à largura da linha de adesivo permitiu apurar uma Resistência ao Arrancamento média de 6,59 N/mm. No contexto da conceção estrutural automóvel, a capacidade de sustentar esta força durante um deslocamento prolongado é um indicador mecânico vital. Demonstra que, mesmo sob a configuração de carga mais desfavorável (concentração linear de tensões), a elevada tenacidade do poliuretano atua de forma eficaz, opondo resistência à propagação catastrófica da fenda. Este comportamento traduz-se numa considerável dissipação de energia, uma propriedade essencial para garantir a segurança passiva e a integridade do chassis em cenários de impacto (*crashworthiness*).

A observação detalhada das curvas individuais (Figura 64) permite ainda identificar eventos locais que ocorreram durante o ensaio. Destaca-se o comportamento do provete Peel 14, onde se regista uma queda abrupta da força (para cerca de 50 N) no intervalo entre os 65 mm e os 80 mm de deslocamento. Esta quebra acentuada não representa o comportamento nominal do adesivo, mas sim a presença de um defeito localizado na junta, como uma bolha de ar aprisionada durante a colagem ou uma contaminação pontual na superfície do alumínio. Ultrapassada esta zona crítica, nota-se que a força recuperou imediatamente para os valores do patamar.

A avaliação visual das superfícies fraturadas revela que os provetes exibiram uma rotura predominantemente adesiva (interfacial), conforme o provete Peel 11 da Figura 65. Observa-se que, na maioria das amostras, o poliuretano descolou de forma limpa de um dos substratos

metálicos, deixando o alumínio exposto. A Figura 65 mostra o provete Peel 14, que teve uma queda abrupta, é possível observar que o adesivo em alguns pontos se soltou de ambos os substratos (bolha de ar).



a) (b)

(a) provete 11; (b) provete 14 com presença de uma bolha de ar

Figura 65 – Detalhe da superfície de falha dos provetes de sobreposição simples

4.4. Ensaio de dureza

Para complementar a caracterização mecânica intrínseca do adesivo de poliuretano e estabelecer uma linha de base sólida para os ensaios estruturais e de durabilidade, procedeu-se à medição da sua dureza superficial no estado de referência (não envelhecido). Este ensaio assume particular relevância na física dos polímeros, visto que a dureza fornece uma indicação direta do módulo de elasticidade local e do progresso do processo de reticulação (*cross-linking*) da matriz após o período de cura padrão à temperatura ambiente. As medições foram efetuadas de acordo com as diretrizes da norma ISO 868, utilizando um durómetro equipado com um indentador específico para a escala Shore D, conforme a Figura 66.

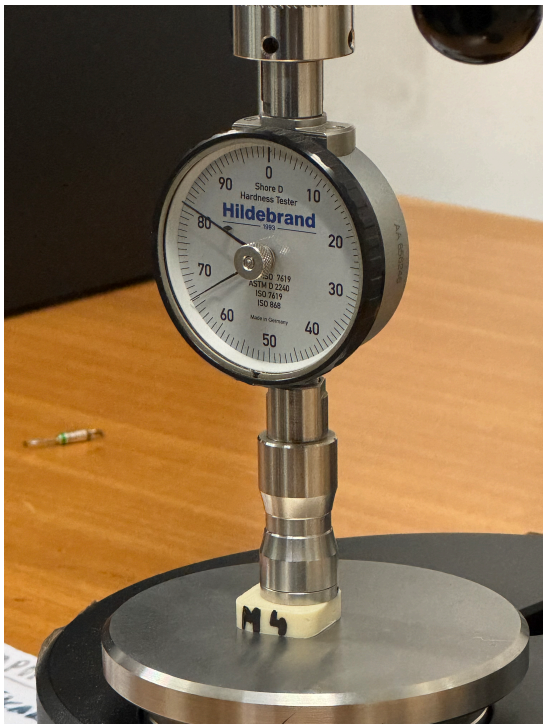


Figura 66 - Escala do durómetro Hildebrand

Para garantir a representatividade da amostra e validar a repetibilidade do processo de fabrico manual, os testes foram conduzidos em amostras retiradas dos diferentes lotes de produção (destinados aos ensaios com substratos de alumínio, aço e efeito da velocidade). Adicionalmente, para capturar o comportamento viscoelástico inerente aos poliuretanos, registou-se a resistência à penetração em três instantes distintos: o pico inicial (Máximo), aos 3 segundos e aos 15 segundos de aplicação da carga, cujos resultados se encontram sumarizados na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados do ensaio de dureza

Grupo de medições	Dureza máxima (Shore D)	Dureza após 3 segundos (Shore D)	Dureza após 15 segundos (Shore D)
Amostra 1	77,9	72,9	71,6
Amostra 2	87,2	75,4	73,4
Amostra 3	83,6	71,4	67,6
Média	82,9	73,3	70,9
Desvio Padrão	4,7	2,0	2,9

Os resultados experimentais confirmaram uma excelente consistência de fabrico entre os vários lotes e evidenciaram o claro relaxamento viscoelástico da matriz. Globalmente, o adesivo registou uma dureza máxima instantânea média de 82,9 Shore D. Como reflexo do escoamento

e da acomodação das cadeias poliméricas sob tensão constante, este valor decaiu progressivamente, estabilizando numa média de 73,3 Shore D após 3 segundos e 70,9 Shore D após 15 segundos.

Esta reduzida dispersão dos resultados (com um desvio padrão máximo de 4,7 no pico inicial) valida a eficácia do procedimento de dosagem, mistura e vazamento do adesivo, assegurando a ausência de heterogeneidades severas. Os valores estabilizados situam-se em conformidade com as características nominais esperadas para este adesivo estrutural curado, estabelecendo assim o referencial exato de rigidez a partir do qual serão avaliados os potenciais fenómenos termomecânicos subsequentes.

5. Efeito da Velocidade de Ensaio em Juntas de sobreposição simples

A resposta estrutural de uniões coladas com matrizes de poliuretano, como o SikaForce®-472, depende intrinsecamente da taxa de deformação aplicada. Esta sensibilidade cinemática decorre da natureza viscoelástica do polímero. Para mapear este fenómeno e compreender o impacto cinemático na capacidade de carga, as Juntas de Sobreposição Simples (JSS) com substratos de alumínio AW 6085 foram solicitadas a três novas taxas de deslocamento (0,5, 5 e 500 mm/min), confrontando-se o seu desempenho com o regime quase-estático de referência (1,3 mm/min). O comportamento da união será analisado detalhadamente nas secções seguintes, descrevendo a evolução da capacidade de carga e os mecanismos de fratura para cada patamar de velocidade imposto.

5.1. Resposta a velocidade de 0,5 mm/min

No patamar inferior de velocidade de ensaio, correspondente a uns lentos 0,5 mm/min, a união estrutural exibiu o seu comportamento mais complacente, afastando-se do perfil registado nas velocidades superiores. Os resultados experimentais detalhados para este regime encontram-se sumarizados na Tabela 11 e a respetiva resposta estrutural ilustrada nas curvas de Força-Deslocamento da Figura 67.

Tabela 11 - Resultados das juntas de sobreposição simples velocidade 0,5 mm/min

Provete de Alumínio AW 6085	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Deslocamento (mm)
JSS1_V0,5	4489,82	11,42	1,09
JSS2_V0,5	3848,03	9,24	0,99
JSS3_V0,5	4427,21	11,71	1,05
JSS4_V0,5	2290,14	3,05	0,78
Média V0,5	4255,02	10,79	1,05
Desvio Padrão V0,5	353,85	1,35	0,05
Desvio Padrão Percentual V0,5	8%	12%	4%

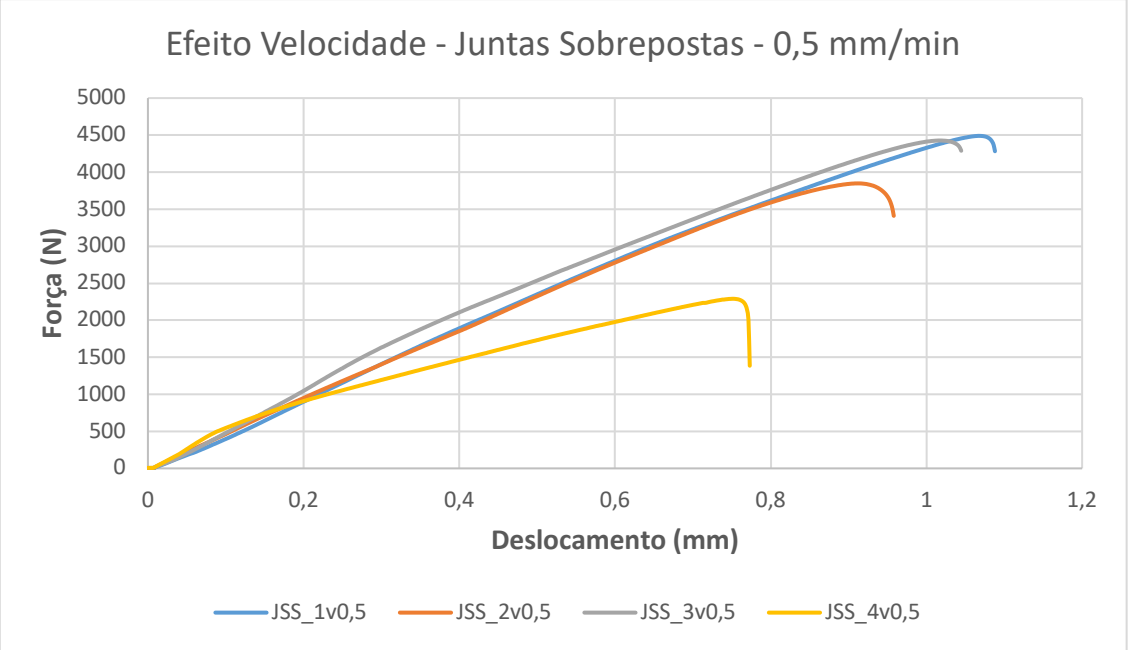


Figura 67 - Gráfico Força x Deformação juntas sobreposição velocidade 0,5 mm/min

Sob esta velocidade de aplicação de carga extremamente reduzida, a estrutura molecular do poliuretano dispõem de um tempo necessário para se reorganizar e acompanhar o esforço aplicado. Esta mobilidade das cadeias poliméricas atua como um mecanismo constante de dissipação de energia no interior da junta. Ao permitir que a matriz polimérica flua lentamente, as severas concentrações de tensões de corte e clivagem nas extremidades da junta são mitigadas. Consequentemente, o adesivo trabalha num estado de rigidez aparente mínima, o que justifica a obtenção de um deslocamento médio na rotura de 1,05 mm, e a tensão máxima ao corte de 10,79 MPa.

A caracterização deste regime sub-estático complementa-se com a análise visual das superfícies de fratura. A inspeção visual dos provetes após o colapso (documentada na Figura 68) revelou que a ligação operou de forma tendencialmente coesiva. A presença de matriz polimérica em ambas as faces metálicas, exibindo uma textura rugosa, atesta a dissipação de energia por deformação plástica local, típica da acomodação macromolecular imposta por este escoamento lento. Contudo, devido à impossibilidade de quantificar a nível microscópico a espessura residual nas zonas mais desguarnecidas, não se exclui a ocorrência de pequenos descolamentos interfaciais localizados.

Onde o padrão se altera de forma evidente é no provete 4, que exibiu uma vasta área de metal totalmente exposto (Figura 69), caracterizando uma falha marcadamente adesiva. Esta evidência física justifica de forma inequívoca o acentuado desvio padrão registado neste patamar de velocidade, o descolamento prematuro da interface, possivelmente por um defeito pontual na preparação da superfície, impediu que a resina atingisse a sua capacidade resistente nominal, atirando a tensão máxima de corte desta junta específica para um valor sub-ótimo. Por este motivo, os resultados desse provete foram apresentados na Tabela 11, mas não foram utilizados para o cálculo da tensão máxima de corte média e para o desvio padrão.



Figura 68 - Superfície de falha das juntas de sobreposição simples velocidade 0,5 mm/min

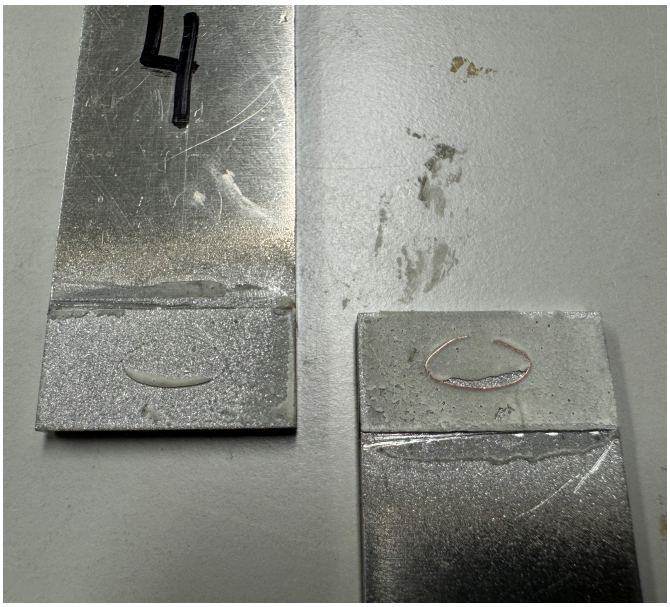


Figura 69 - Detalhe da superfície de falha da junta 4 de sobreposição simples velocidade 0,5 mm/min

5.2. Resposta a velocidade de 5 mm/min

Com o incremento da velocidade de deslocamento da travessa para 5 mm/min, o sistema entra numa zona de transição cinemática onde os efeitos do endurecimento por taxa de deformação (*strain-rate hardening*) começam a manifestar-se de forma muito clara. Os dados quantitativos e o perfil mecânico referentes a este patamar de velocidade estão apresentados na Tabela 12 e na Figura 70.

Tabela 12 - Resultados das juntas de sobreposição simples velocidade 5 mm/min

Provete de Alumínio AW 6085	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Deslocamento (mm)
JSS5_V5	4349,46	11,76	1,05
JSS6_V5	4322,67	11,50	1,64
JSS7_V5	5147,16	14,19	1,28
JSS8_V5	5337,87	13,11	1,70
Média V5	4789,29	12,64	1,42
Desvio Padrão V5	529,21	1,25	0,31
Desvio Padrão Percentual V5	11%	10%	22%

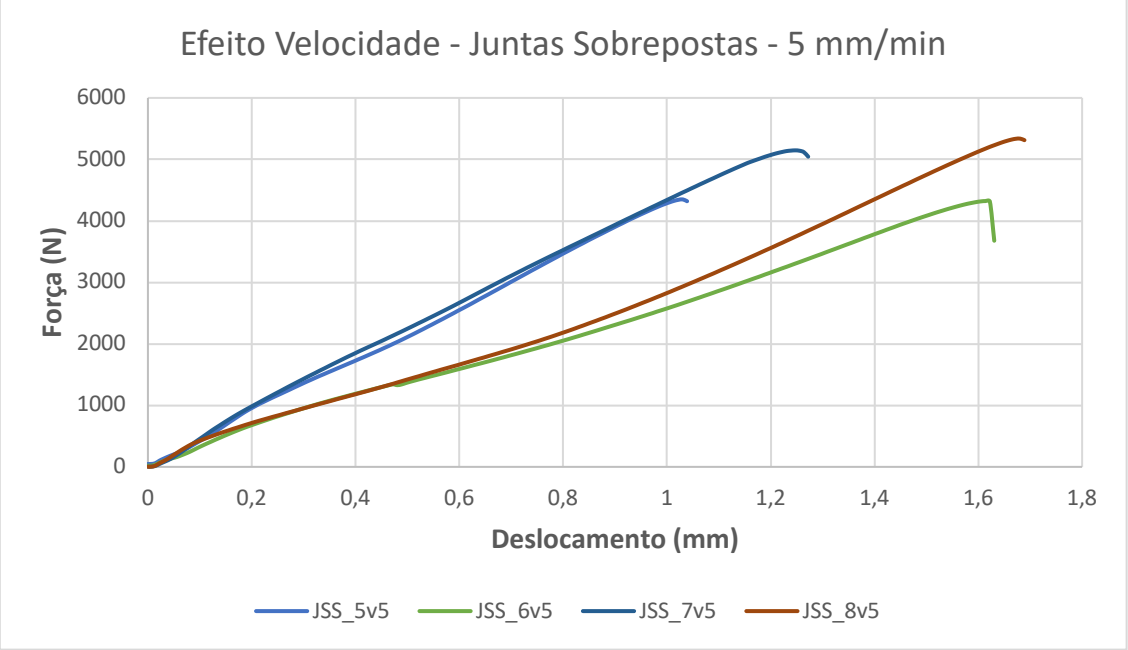


Figura 70 - Gráfico Força x Deformação juntas sobreposição velocidade 5 mm/min

Ao impor uma solicitação mecânica substancialmente mais rápida, restringe-se a janela de tempo disponível para a mobilidade conformacional das cadeias do polímero. Impedidas de relaxar e escoar com a mesma facilidade observada nos ensaios mais lentos, as macromoléculas oferecem uma maior resistência à deformação. Macroscopicamente, esta restrição reflete-se num aumento tangível do módulo de elasticidade aparente do adesivo na junta JSS. Como consequência direta, a união colada demonstra uma capacidade de suporte de carga expressivamente superior, atingindo uma tensão máxima média de 12,64 MPa. Simultaneamente, a maior magnitude da força imposta ao sistema traduz-se numa rotação mais pronunciada da junta, o que contribui para um incremento no deslocamento aparente registado, que atinge os 1,42 mm no momento da rotura.

No que respeita à morfologia de fratura sob a taxa intermédia de 5 mm/min, a observação das faces de rutura (Figura 71) evidenciou um comportamento que justifica integralmente as variações de tensão registadas na secção anterior.

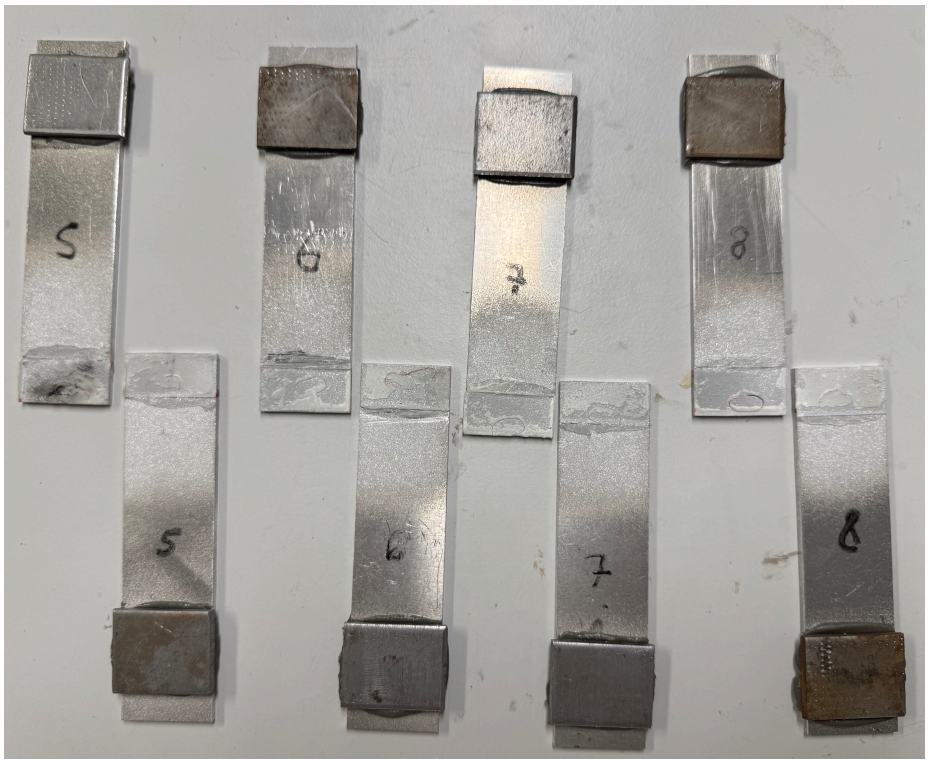
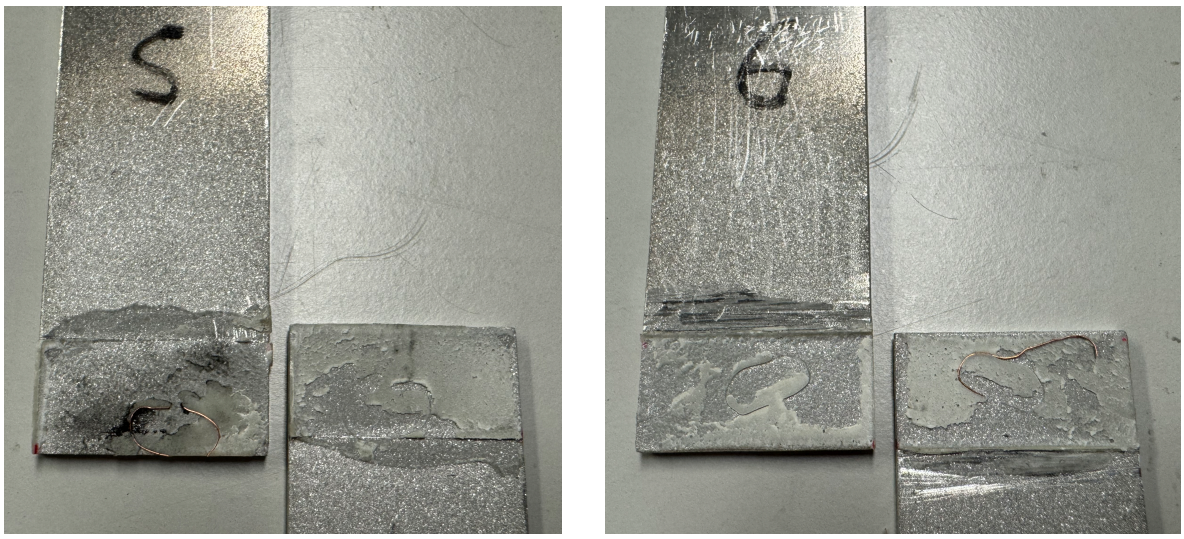


Figura 71 - Superfície de falha das juntas de sobreposição simples velocidade 5 mm/min

A análise visual revelou uma distinção clara no modo de falha entre os provetes do mesmo lote. Os provetes 5 e 6 (Figura 72) exibiram um padrão de falha marcadamente mista, com zonas consideráveis de descolamento interfacial (falha adesiva) onde o substrato de alumínio ficou exposto.



a) (b)

(a) provete 5; (b) provete 6

Figura 72 – Detalhe da superfície de falha dos provetes de sobreposição simples velocidade 5mm/min

Em contrapartida, os provetes 7 e 8 (Figura 73) apresentaram um modo de falha predominantemente coesivo, caracterizado pela presença de matriz polimérica rasgada, com topografia rugosa, em ambas as faces metálicas. Esta distinção morfológica reflete-se de forma exata na capacidade de carga aparente: as juntas que garantiram a integridade da interface (provetes 7 e 8) forçaram a rutura interna do material, permitindo que o adesivo atingisse o seu pleno potencial de endurecimento viscoelástico e registando os maiores valores de tensão deste patamar (14,19 MPa e 13,11 MPa, respetivamente). Por oposição, os descolamentos localizados nos provetes 5 e 6 precipitaram o colapso estrutural, limitando a resistência aparente a valores ligeiramente inferiores (11,5 MPa).



a) (b)

(a) provete 7; (b) provete 8

Figura 73 – Detalhe da falha coesiva dos provetes de sobreposição simples velocidade 5mm/min

5.3. Resposta a velocidade de 500 mm/min

A transição para o regime de 500 mm/min simula um cenário dinâmico que se aproxima das condições de um impacto a baixa velocidade, impondo o teste mais severo à integridade estrutural do adesivo poliuretano. O impacto extremo desta velocidade na capacidade da junta colada está documentado na Tabela 13 e a alteração da resposta do conjunto pode ser observada através do gráfico da Figura 74.

Tabela 13 - Resultados das juntas de sobreposição simples velocidade 500 mm/min

Provete de Alumínio AW 6085	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Deslocamento (mm)
JSS9_V500	7153,05	18,44	2,27
JSS10_V500	6865,88	17,14	1,85
JSS11_V500	6271,97	17,40	1,69
JSS12_V500	7583,70	18,50	1,82
Média V500	6968,65	17,87	1,91
Desvio Padrão V500	550,22	0,70	0,25
Desvio Padrão Percentual V500	8%	4%	13%

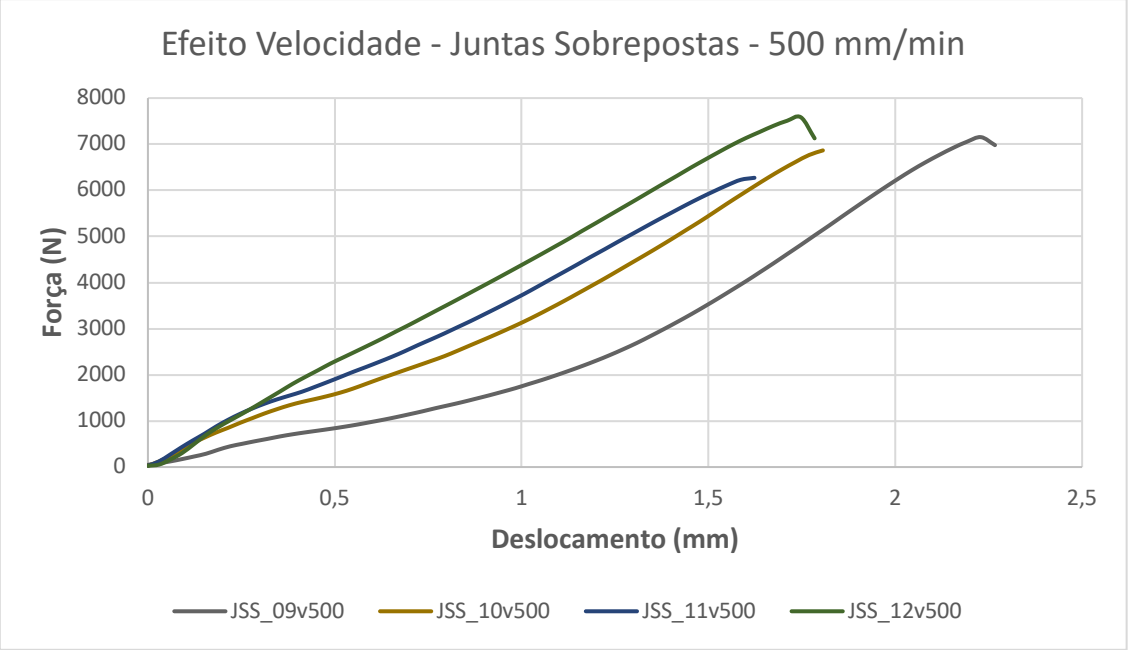


Figura 74 - Gráfico Força x Deformação juntas sobreposição velocidade 500 mm/min

Sob esta taxa de deformação extrema, o bloqueio cinemático é total: as cadeias poliméricas perdem completamente a capacidade de se reorganizarem de forma atempada para dissipar as tensões através do escoamento viscoelástico. O endurecimento mecânico da matriz atinge o seu pico absoluto, evidenciando uma tendência ascendente drástica que registra a maior tensão de rotura registada ao longo de todo o estudo (17,87 MPa).

De forma notável, e ao contrário do que seria expectável num material puramente frágil, este acentuado ganho na resistência aparente é acompanhado por um aumento expressivo no deslocamento final da máquina, que atinge a marca dos 1,91 mm. Este fenómeno macroscópico justifica-se pela elevada magnitude das cargas suportadas antes da falha, ao tolerar forças médias na ordem dos 6968 N, a junta induz um momento fletor severo, provocando uma rotação acentuada e a consequente uma possível deformação plástica nos substratos de alumínio AW 6085. Desta forma, fica comprovado que a elevada taxa de deformação otimiza a tenacidade aparente do conjunto estrutural, uma vez que a extrema rigidez do poliuretano força a dissipação de energia através do dobramento cinemático do próprio aderente metálico antes do colapso total da ligação.

Por fim, a severidade do ensaio dinâmico a 500 mm/min refletiu-se não apenas nos valores máximos de tensão suportada, mas também na notável uniformidade da morfologia de colapso (Figura 75). A inspeção visual comprovou que a totalidade dos provetes (9 a 12) exibiu um padrão de falha marcadamente coesivo. O adesivo rasgou de forma transversal, deixando resíduos bem distribuídos em ambas as faces metálicas (Figura 76). Esta consistência morfológica é a prova física do porquê de, paradoxalmente, a condição de ensaio mais extrema ter registado a menor dispersão estatística de toda a campanha (desvio padrão inferior a 5%), a excelência da preparação de superfície garantiu que a interface alumínio/adesivo nunca se assumisse como o elo mais fraco. Consequentemente, as juntas falharam apenas quando a força de coesão interna do próprio poliuretano foi ultrapassada, permitindo que a matriz operasse no seu limite de endurecimento cinemático. Adicionalmente, a superfície de fratura do polímero apresentou uma topografia mais granulada e menos dúctil, refletindo a propagação de fenda abrupta induzida pelo impacto.

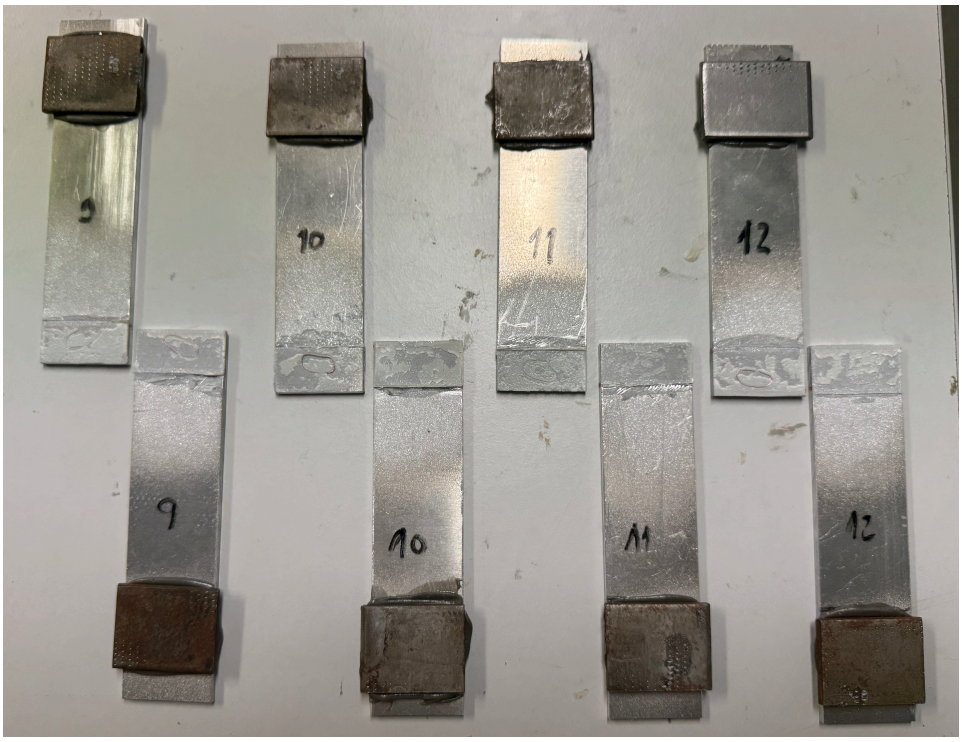


Figura 75 - Superfície de falha das juntas de sobreposição simples velocidade 500 mm/min



a) (b)

(a) provete 9; (b) provete 12

Figura 76 – Detalhe da falha coesiva dos provetes de sobreposição simples velocidade 500 mm/min

5.4. Análise comparativa do efeito da velocidade

Para consolidar a compreensão do impacto da taxa de deformação na integridade estrutural das uniões coladas, procede-se a uma avaliação comparativa abrangente de todos os regimes de velocidade investigados (0,5, 5 e 500 mm/min). A evolução global da tensão máxima aparente suportada pelas juntas JSS, confrontada com as respetivas margens de dispersão estatística, encontra-se representada no gráfico de barras da Figura 77.

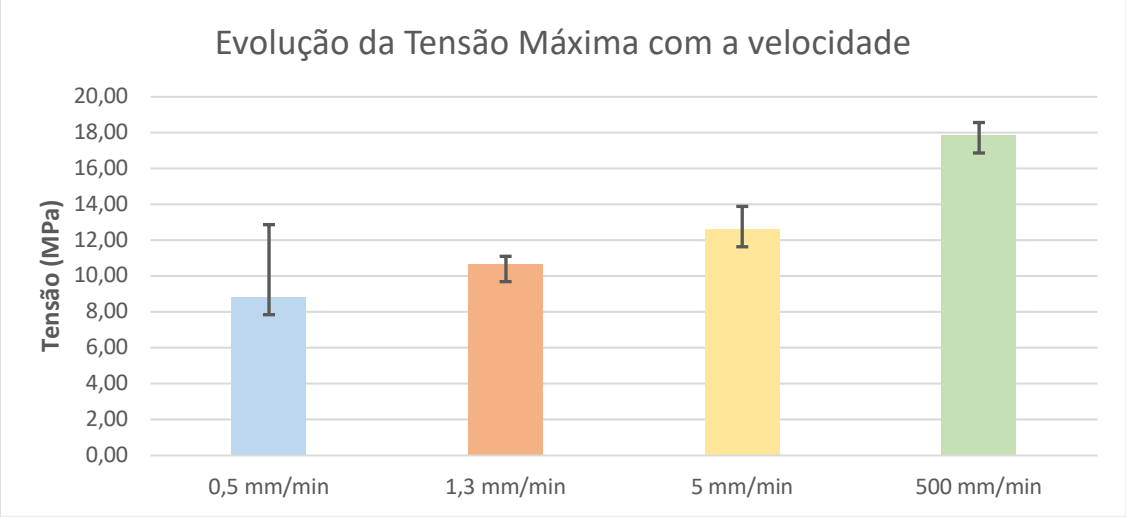


Figura 77 - Gráfico da evolução da tensão de corte máxima por conta da velocidade de ensaio

A análise cruzada dos dados consolidados revela uma tendência puramente ascendente e altamente expressiva da capacidade de carga da junta à medida que a velocidade de ensaio é incrementada. Ao contrário do que frequentemente se observa em adesivos estruturais rígidos (como os epóxis tradicionais), que tendem a tornar-se frágeis e a perder capacidade de alongamento a altas velocidades, este poliuretano demonstrou uma sinergia mecânica excecional. O aumento da taxa de solicitação impediu a relaxação atempada das cadeias moleculares, resultando no expectável enrijecimento da matriz. Contudo, este fenómeno não sacrificou a ductilidade da ligação; pelo contrário, a capacidade de deformação global da união aumentou expressivamente face ao regime de 0,5 mm/min.

Ao contrário do que frequentemente se observa em adesivos estruturais rígidos (como os epóxis tradicionais) que tendem a tornar-se frágeis e a perder capacidade de alongamento a altas velocidades, este poliuretano demonstrou uma sinergia mecânica excecional. O aumento da taxa de solicitação impediu a relaxação atempada das cadeias moleculares, resultando no expectável enrijecimento da matriz. Contudo, este fenómeno não sacrificou a ductilidade da junta; pelo contrário, a capacidade de alongamento global da linha de adesivo quase duplicou face ao regime estático.

Este comportamento encontra forte respaldo na literatura científica recente. Ensaios dinâmicos conduzidos por (Faneco et al., 2017) com a formulação SikaForce 472 comprovaram que a elevada flexibilidade das cadeias deste poliuretano lhe confere a capacidade rara de aumentar simultaneamente o limite de tensão e a deformação plástica sob taxas de carregamento elevadas.

Adicionalmente, os resultados obtidos alinham-se com as conclusões de (Gomes et al., 2024), que demonstraram que, em uniões sobrepostas sob cargas de impacto, os adesivos dúcteis conseguem manter a distribuição homogénea das tensões de corte ao longo da área de colagem. Em termos práticos, este comportamento viscoelástico traduz-se num aumento exponencial da área debaixo da curva Tensão-Deslocamento. Na perspetiva do projeto automóvel e dos exigentes critérios de *crashworthiness*, os dados provam de forma inequívoca que a ligação estrutural se fortalece ativamente durante o choque elástico, maximizando a dissipação da energia cinética.

6. Efeito do Envelhecimento

A viabilidade da implementação de adesivos estruturais na indústria exige que o desempenho da união colada se mantenha fiável ao longo da vida útil do componente. Durante este período, as juntas estão sujeitas a condições ambientais severas, nomeadamente ciclos térmicos e exposição à humidade.

Neste capítulo, analisa-se o impacto do envelhecimento nas propriedades mecânicas da união, comparando a resposta de Juntas de Sobreposição Simples (JSS) de alumínio sujeitas a um período contínuo de 300 horas sob três condições de degradação distintas face à linha de base (10,70 MPa) estabelecida no regime quase-estático.

6.1. Juntas de sobreposição simples

Para isolar os mecanismos de degradação térmica e hidrolítica durante as referidas 300 horas, os provetes foram divididos em três grupos de condicionamento antes de serem ensaiados ao corte por tração:

- Condição A: Imersão em água à temperatura ambiente;
- Condição B: Exposição térmica a 80 °C (ambiente seco);
- Condição C: Envelhecimento hidrotérmico (imersão em água a 80 °C).

Os resultados revelaram uma resposta mecânica altamente dependente do agente agressor, confirmando que a temperatura e a humidade atuam através de mecanismos físico-químicos distintos na matriz de poliuretano.

6.1.1. Efeito isolado da humidade (Condição A)

A imersão em água à temperatura ambiente durante 300 horas revelou um comportamento atípico face aos fenómenos clássicos de degradação hidrolítica severa. A síntese dos resultados obtidos está presente na Tabela 14, acompanhada pelo respetivo perfil de Força-Deslocamento na Figura 78.

Tabela 14 - Resultados das juntas de sobreposição simples efeito da humidade

Provete de Alumínio AW 6085	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Deslocamento (mm)
A1	4390,63	12,36	1,23
A2	3726,25	8,03	1,12
A3	4951,25	13,91	1,58
A4	5068,75	13,87	1,64
Média	4534,22	12,04	1,39
Desvio Padrão	614,57	2,77	0,26
Desvio Padrão (%)	14%	23%	18%

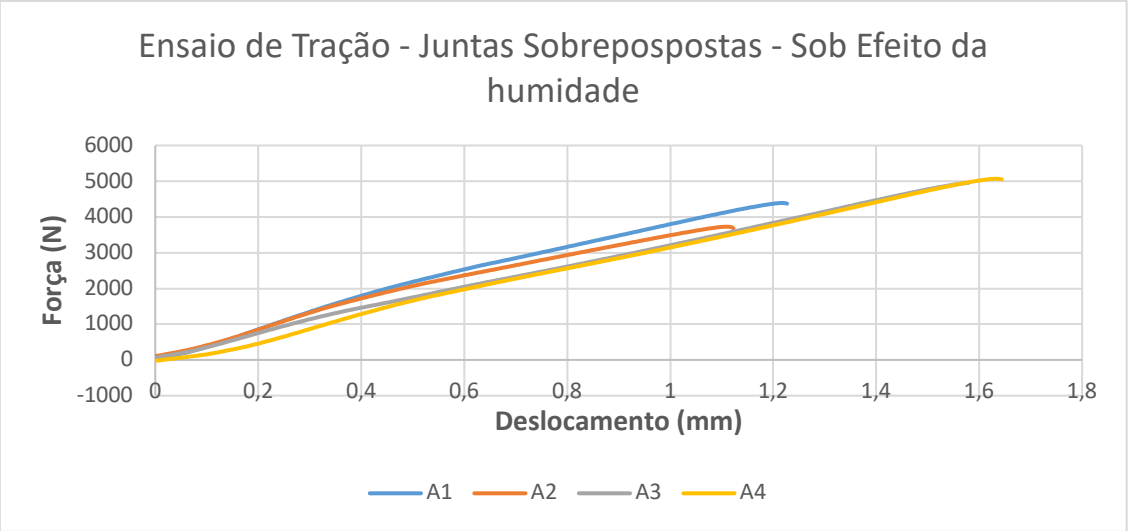


Figura 78 - Gráfico Força x Deformação juntas sobreposição sob efeito da humidade

A observação das curvas demonstra que a integridade elástica da união foi mantida. A tensão máxima registou um valor médio de 12,04 MPa, com o deslocamento a situar-se no 1,39 mm. Longe de fragilizar a junta, a presença da água resultou numa ligeira melhoria da capacidade de carga.

Em adesivos de poliuretano, a água interage num mecanismo competitivo, atua como plastificante, mas pode também reagir com grupos isocianato residuais que não curaram inicialmente, promovendo uma leve cura secundária induzida pela humidade (*moisture-curing*). O aumento da resistência sugere que o efeito de degradação da interface e o crescimento de dano por defeitos induzidos pela água, mecanismos de falha habitualmente modelados em

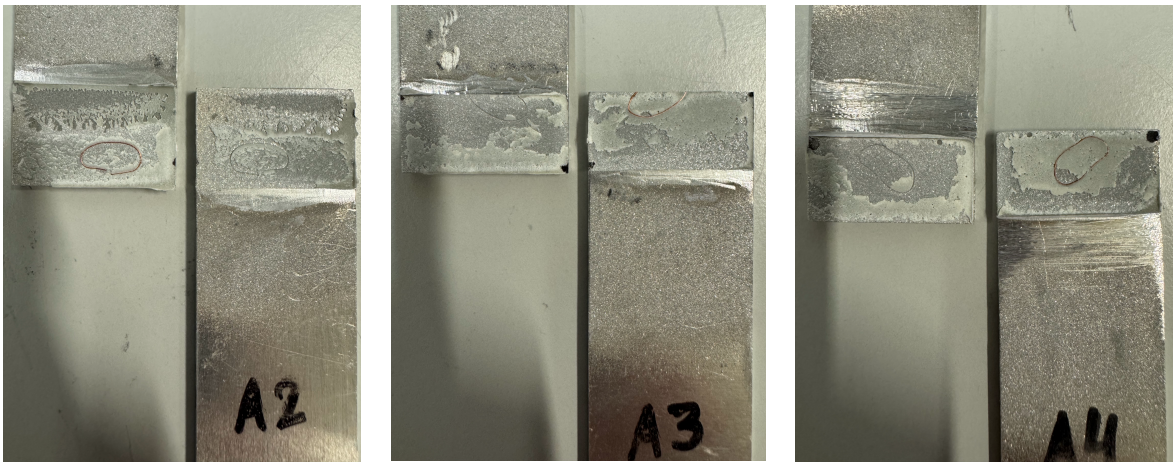
juntas estruturais (Ribeiro et al., 2016), ainda não assumiram uma severidade crítica ao fim de 300 horas, prevalecendo a estabilidade da matriz.

A análise visual das superfícies de fratura (Figura 79) espelha de forma clara este mecanismo competitivo. Enquanto nos ensaios de referência (não envelhecidos) a rutura ocorreu no interior do adesivo, as juntas submetidas às 300 horas de humidade exibiram uma transição evidente para um modo de falha misto, com uma expressiva componente adesiva.



Figura 79 - Superfície de falha das juntas de sobreposição simples sob efeito da humidade

A observação detalhada dos provetes (particularmente os provetes A3 e A4) revela vastas áreas de substrato de alumínio nu, atestando o descolamento da interface. Adicionalmente, no provete A2, é possível identificar visualmente a frente de avanço da humidade, caracterizada por um padrão de degradação que se inicia nas bordas da sobreposição e migra para o interior (Figura 80). Esta alteração morfológica complementa perfeitamente a resposta mecânica, o endurecimento promovido pela cura secundária tornou a matriz polimérica mais resistente do que as próprias pontes de adesão interfacial.



a) (b) (c)

(a) provete A2; (b) provete A3; (c) provete A4

Figura 80 – Detalhe da superfície de falha dos provetes sob efeito da humidade

Assim, embora o ataque hidrolítico induzido pela água não tenha sido severo ao ponto de comprometer a capacidade de carga global da ligação, foi o fator responsável por enfraquecer localmente a afinidade com o alumínio AW 6085, tornando a interface no novo elo mais fraco e precipitando o descolamento visível no momento do colapso.

6.1.2. Efeito isolado da temperatura (Condição B)

Ao contrário de um cenário de degradação térmica expectável, a exposição isolada à temperatura de 80 °C durante 300 horas resultou num incremento dramático das propriedades mecânicas da junta. Os resultados detalhados desta condição encontram-se sumarizados na Tabela 15 e o comportamento mecânico das juntas pode ser observado através das curvas representativas de Força-Deslocamento na Figura 81.

Tabela 15 - Resultados das juntas de sobreposição simples efeito da temperatura

Provete de Alumínio AW 6085	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Deslocamento (mm)
B1	6935,63	17,56	1,92
B2	7360,00	19,24	2,06
B3	5958,44	16,52	1,61
B4	7540,00	19,36	2,12
Média	6948,52	18,17	1,93
Desvio Padrão	707,01	1,38	0,23
Desvio Padrão (%)	10%	8%	12%

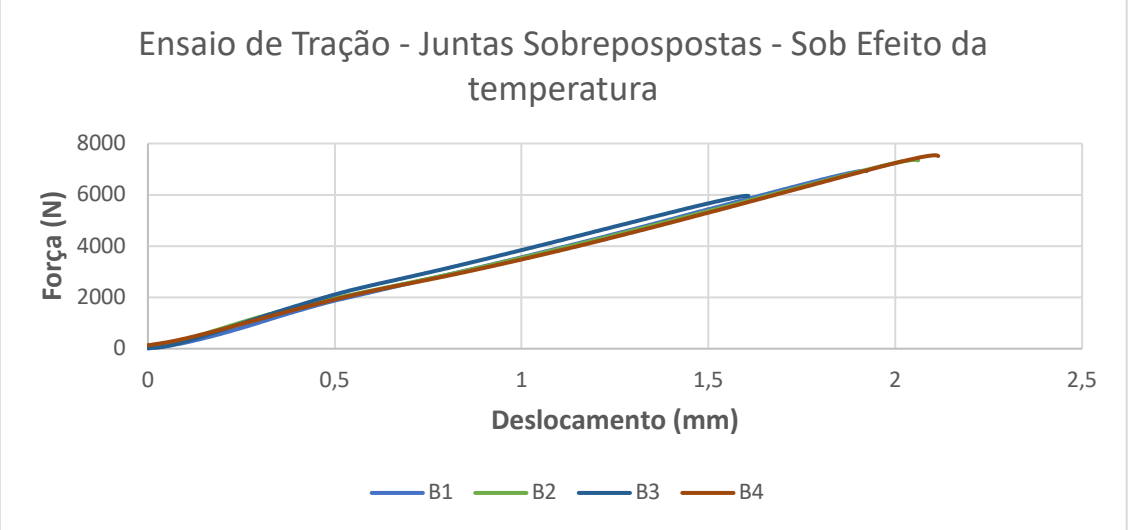


Figura 81 - Gráfico Força x Deformação juntas sobreposição sob efeito da temperatura

Através da análise gráfica, é evidente a capacidade superior de absorção de energia antes da rotura. A tensão máxima média subiu para 18,17 MPa (um aumento de quase 70% face à referência de 10,70 MPa), acompanhada por um deslocamento médio na rotura de 1,93 mm.

Este comportamento justifica-se pelo fenómeno de pós-cura térmica (*post-curing*). Conforme documentado por (Faneco et al., 2017), a cura inicial deste adesivo é tipicamente realizada à temperatura ambiente. Ao ser exposto a um ambiente de 80 °C, a energia térmica continuada promoveu a mobilidade das cadeias poliméricas que não tinham reagido totalmente durante essa cura inicial "a frio". Este processo induz um aumento significativo do grau de reticulação (*cross-linking*) da matriz, otimizando a coesão do adesivo e resultando numa união substancialmente mais resistente.

A inspeção visual das superfícies de fratura (Figura 82) constitui a prova física deste fenómeno de reticulação secundária. Em perfeita consonância com o expressivo aumento da capacidade de carga registado, a observação visual confirma que a junta manteve um modo de falha predominantemente coesivo. Ao contrário do ataque interfacial provocado pela humidade, a exposição isolada a 80 °C não comprometeu a adesão ao alumínio AW 6085. A totalidade da área de sobreposição apresenta matriz polimérica rasgada em ambas as faces metálicas, não se registando áreas críticas de metal exposto.

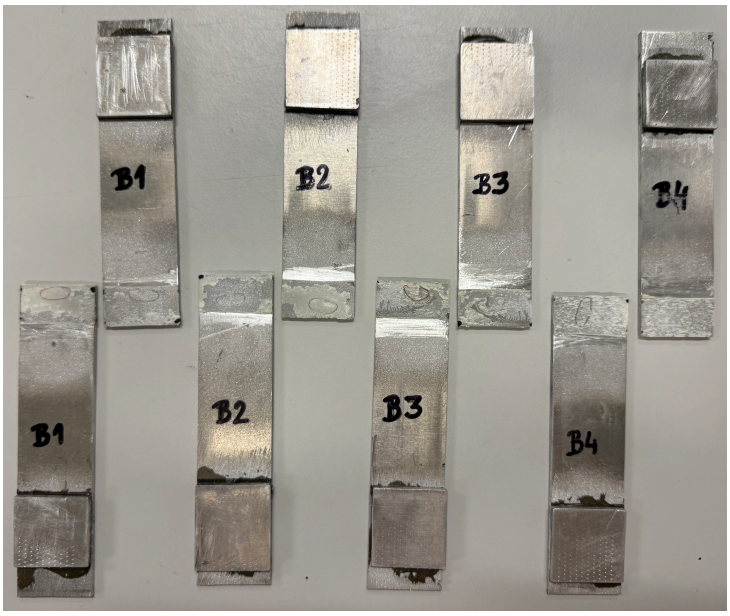
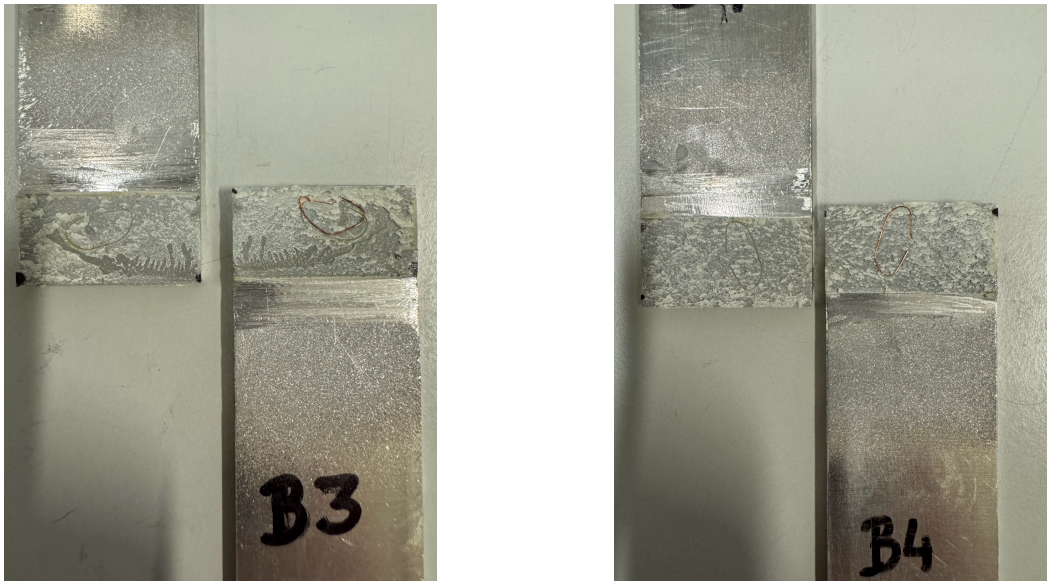


Figura 82 - Superfície de falha das juntas de sobreposição simples sob efeito da temperatura

Contudo, a superfície do adesivo exibe uma topografia marcadamente mais granular, rugosa e texturizada face aos provetes de referência, como é possível observar na Figura 83. Esta alteração visual reflete o novo estado microestrutural da matriz, altamente densificada e reticulada pela energia térmica. O facto de a interface de colagem ter resistido a tensões extremas na ordem dos 18 MPa atesta a excelente estabilidade térmica da preparação superficial dos aderentes. Consequentemente, a ligação obrigou a junta a falhar de forma puramente estrutural, cedendo apenas quando a força imposta pela máquina superou o novo (e substancialmente superior) limite de coesão interna do poliuretano pós-curado.



a) (b)

(a) provete B3; (b) provete B4

Figura 83 – Detalhe da superfície de falha dos provetes sob efeito da temperatura

6.1.3. Efeito combinado hidrotérmico (Condição C)

Quando as juntas foram submetidas em simultâneo à imersão em água e à temperatura de 80 °C durante as mesmas 300 horas, o cenário de falha alterou-se significativamente. Os dados estatísticos são apresentados na Tabela 16, e a degradação da resposta mecânica é visível nas curvas de Força-Deslocamento ilustradas na Figura 84.

Tabela 16 - Resultados das juntas de sobreposição simples efeito da humidade e temperatura

Provete de Alumínio AW 6085	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	Deslocamento (mm)
C1	4943,44	12,74	1,47
C2	4487,19	13,59	1,33
C3	4510,31	12,32	1,19
C4	4372,19	11,94	1,15
Média	4578,28	12,65	1,29
Desvio Padrão	250,82	0,71	0,14
Desvio Padrão (%)	5%	6%	11%

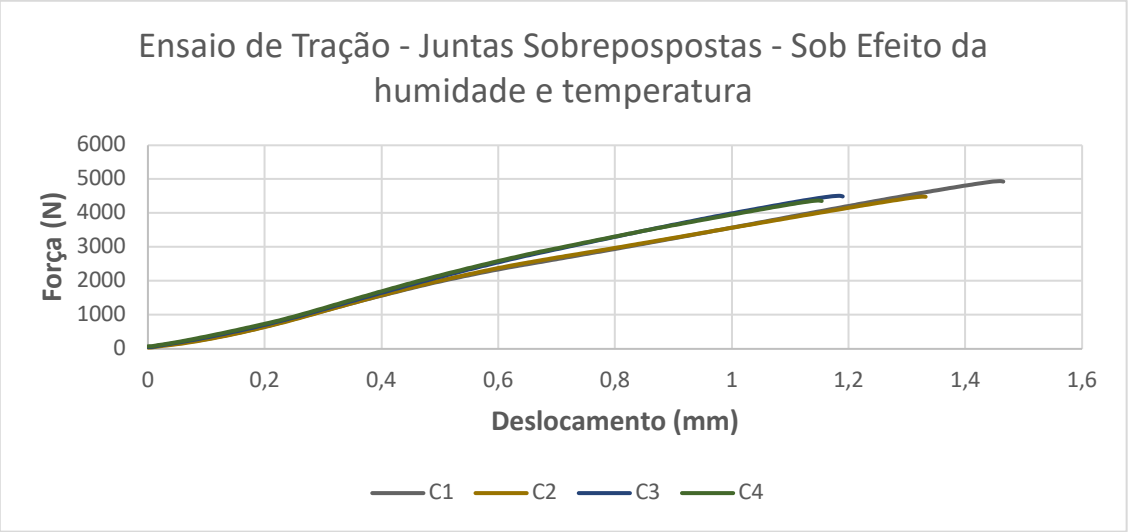


Figura 84 - Gráfico Força x Deformação juntas sobreposição sob efeito da humidade e temperatura

A análise deste cenário ganha relevância quando cruzada com a Condição B. Embora a resistência de 12,65 MPa seja superior à linha de base original, indicando que o fenómeno de

pós-cura a 80 °C ainda ocorreu em grande medida, este valor representa uma queda drástica face aos 18,17 MPa obtidos no ambiente a 80 °C seco.

Isto prova que a sinergia entre a água e a temperatura eleva a severidade da degradação estrutural, uma vulnerabilidade que compromete a previsão de resistência das juntas (Almeida et al., 2018). A temperatura de 80 °C agiu como um catalisador, acelerando o coeficiente de difusão da água para o interior da junta. Como consequência, a matriz sofreu plastificação e possível iniciação de hidrólise, limitando a capacidade de alongamento e atenuando de forma severa os ganhos mecânicos que a alta temperatura, por si só, teria proporcionado.

A inspeção visual das superfícies de fratura (Figura 85) corrobora de forma evidente esta limitação mecânica e a referida aceleração do ataque hidrolítico. O colapso destas juntas evidenciou uma transição drástica para um modo de falha misto com uma predominância marcadamente adesiva.

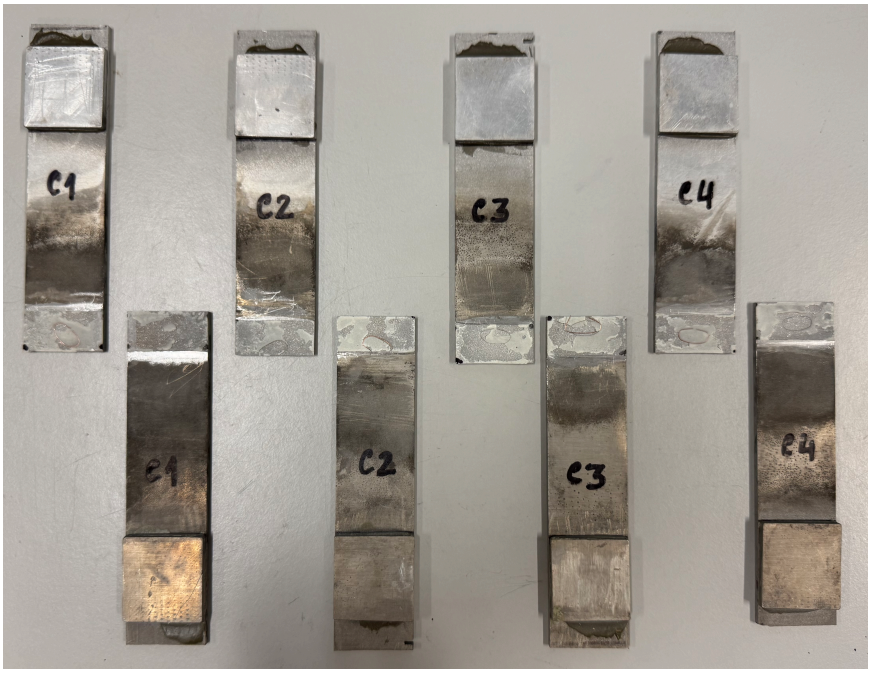
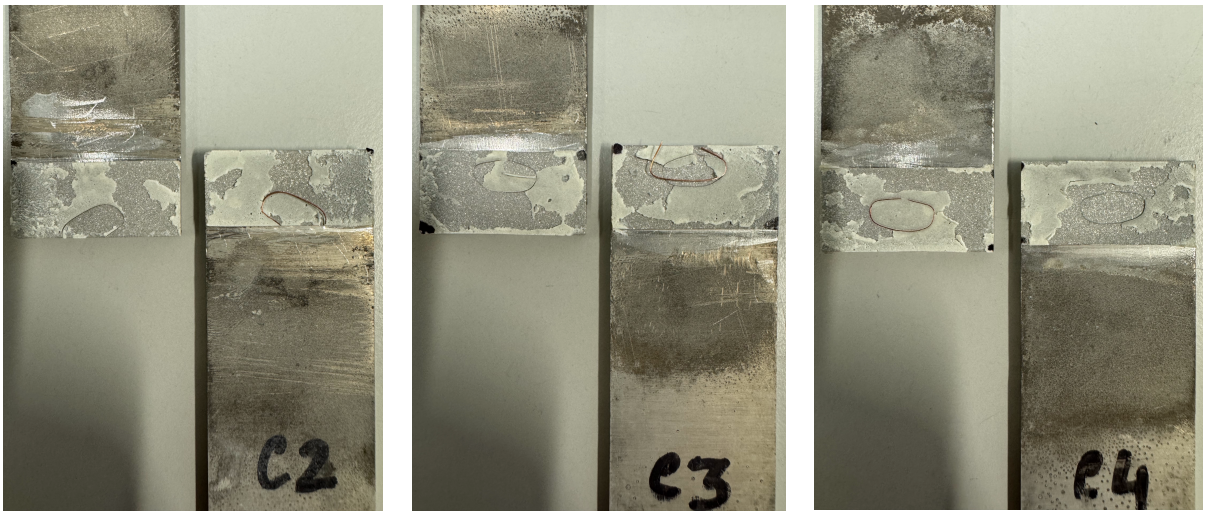


Figura 85 - Superfície de falha das juntas de sobreposição simples sob efeito da humidade e temperatura

Em provetes como o C2, C3 e C4, regista-se o descolamento severo da matriz polimérica (Figura 86), restando vastas áreas de substrato metálico expostas. Esta evidência física demonstra que a difusão, impulsionada pela energia térmica, não se limitou a plastificar o interior do adesivo, mas focou-se de forma fulminante na quebra das pontes químicas interfaciais.



a) (b) (c)

(a) provete C2; (b) provete C3; (c) provete C4

Figura 86 – Detalhe da superfície de falha dos provetes sob efeito da humidade e temperatura

Adicionalmente, a oxidação e descoloração visíveis nas áreas não coladas dos aderentes atestam a extrema agressividade corrosiva deste ambiente combinado. Em suma, o padrão morfológico revela o exato motivo da quebra de tensão face ao ambiente seco, a sinergia hidrotérmica degradou a interface ao ponto de esta assumir o papel de elo mais fraco da união, provocando o descolamento prematuro do alumínio AW 6085 muito antes de a matriz pós-curada poder atingir o seu limite estrutural intrínseco.

6.2. Análise comparativa do efeito do envelhecimento

A comparação direta entre os diferentes ciclos de envelhecimento ambiental evidencia que o comportamento mecânico da junta colada é altamente sensível às condições de exposição. A Figura 87 ilustra a influência isolada e sinérgica da humidade e da temperatura na tensão máxima de corte suportada pela ligação em relação à condição de referência (Normal).

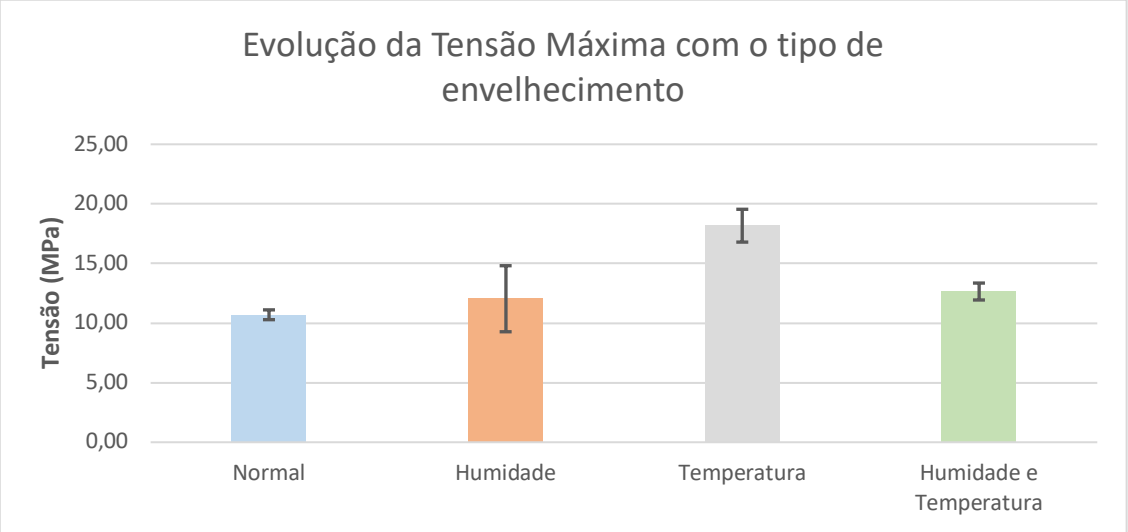
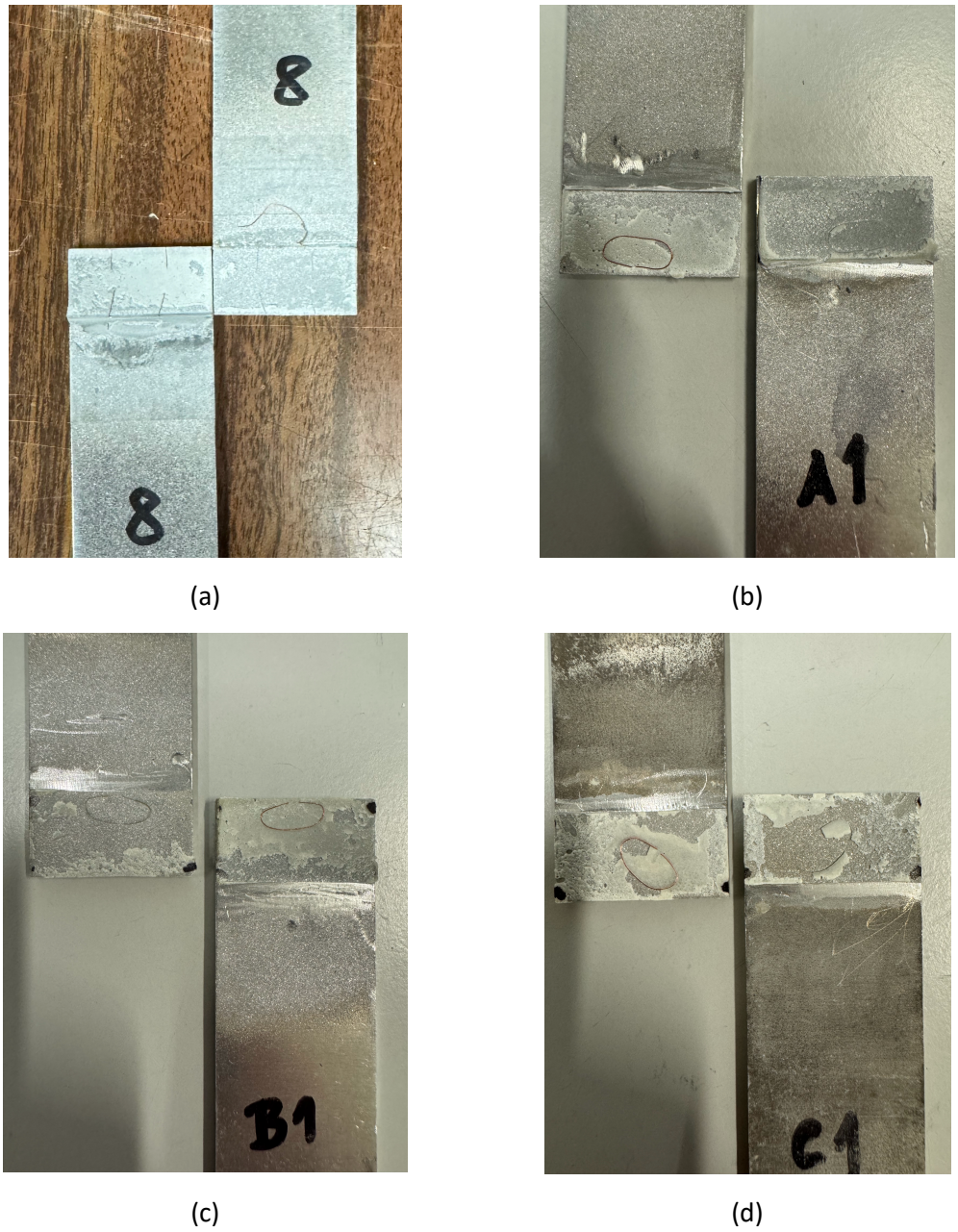


Figura 87 - Gráfico da evolução da tensão de corte máxima por conta do tipo de envelhecimento

Da análise do gráfico, extraem-se três conclusões fundamentais sobre a degradação e alteração estrutural da matriz polimérica:

- Efeito Isolado da Humidade: A exposição exclusiva à humidade induziu uma ligeira subida na tensão média, mas foi acompanhada por um desvio padrão extremamente elevado (alta dispersão de resultados). Este comportamento errático sugere que a infiltração de água atua de forma heterogénea. A absorção de humidade provoca a plastificação local do poliuretano, alterando a sua rigidez de forma imprevisível e criando zonas de fragilização interfacial que justificam a instabilidade dos valores obtidos.
- Efeito Isolado da Temperatura: A exposição apenas à temperatura resultou num aumento drástico da resistência mecânica, atingindo o pico máximo de tensão da campanha (aproximadamente 18 MPa). Em adesivos de matriz poliuretano, este fenómeno é característico de um processo de pós-cura (reticulação secundária). A energia térmica fornecida ativou a reação de cadeias poliméricas residuais, aumentando a densidade de ligação cruzada da matriz e, consequentemente, tornando o adesivo significativamente mais resistente.
- Efeito Combinado (Humidade e Temperatura): No ensaio hidrotérmico combinado, regista-se um efeito de concorrência mecanoquímica. O aumento de resistência promovido pela pós-cura térmica é severamente mitigado pelos efeitos destrutivos da humidade (plastificação e ataque à interface). O resultado é um compromisso intermédio (cerca de 12,5 MPa), demonstrando que, num cenário real e extremo, a degradação gerada pela água impede o adesivo de atingir o seu potencial máximo de resistência térmica.

Em suma, comprova-se que a temperatura atua como um catalisador de resistência no material, enquanto a humidade é o principal vetor de instabilidade e degradação da ligação estrutural, como podemos observar na Figura 88, a evolução das falhas do adesivo.



(a) (b)

(c) (d)

(a) provete sem envelhecimento; (b) provete A1 Humidade; (c) provete B1 Temperatura; (d) provete C1 Humidade e Temperatura

Figura 88 – Detalhe da superfície de falha dos provetes sob efeito da humidade e temperatura

A análise visual das superfícies de fratura corrobora os dados mecânicos, evidenciando como cada ambiente degradou a ligação:

- Série Normal (Controlo): Apresentou uma falha predominantemente coesiva, com a presença de adesivo rugoso em ambos os substratos. Isto confirma uma união ideal, onde a energia é dissipada pela deformação plástica do próprio adesivo antes da rotura.
- Efeito da Humidade: Exibiu uma falha mista. A infiltração de água, mais pronunciada nas extremidades, causou descolamento interfacial (alumínio exposto). A irregularidade deste ataque justifica a elevada dispersão estatística (desvio padrão) registada nos ensaios.
- Efeito da Temperatura: Atingiu a resistência e o deslocamento máximos devido ao calor, que causou uma pós-cura no material. O adesivo tornou-se mais forte e tenaz, conseguindo esticar consideravelmente mais antes de ceder. Como a união ao metal se manteve muito forte, a falha continuou a ser coesiva, evidenciada pela presença de adesivo bastante rasgado e deformado em ambas as metades dos provetes
- Efeito da Humidade e Temperatura: Revelou a degradação mais severa, dominada por uma falha adesiva. O calor acelerou drasticamente a infiltração da água, plastificando o adesivo e destruindo a ligação química metal-polímero, o que resultou numa quebra acentuada da resistência face ao ciclo térmico isolado.

7. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este capítulo constitui a finalização do trabalho de investigação desenvolvido no âmbito desta dissertação de mestrado. Nas secções seguintes, apresenta-se uma síntese rigorosa das principais conclusões extraídas da extensa campanha experimental, cujo propósito foi validar o desempenho e a fiabilidade do adesivo estrutural SikaForce®-472 na união de substratos metálicos submetidos a diferentes velocidades de ensaio e a condições de envelhecimento hidrotérmico severo. Adicionalmente, reconhecendo a natureza contínua da investigação científica e a exigência constante da engenharia automóvel, a fase final deste capítulo identifica as limitações metodológicas do presente estudo e perspetiva linhas de investigação futuras para consolidar e expandir o conhecimento na área da colagem estrutural.

7.1. Conclusões finais

A indústria automóvel atual procura constantemente fabricar veículos mais leves e eficientes, o que exige a mistura de diferentes materiais, como ligas de alumínio e aços de alta resistência. Como os métodos antigos de fixação (como parafusos ou soldadura) têm limitações ao unir metais diferentes, os adesivos estruturais, como os de poliuretano, tornaram-se a solução ideal. Eles permitem colar materiais distintos sem causar corrosão, distribuem o esforço por toda a peça e, o mais importante, atuam como um amortecedor, absorvendo muita energia em caso de acidente para proteger os passageiros. Para comprovar a eficácia desta tecnologia, este trabalho testou o adesivo SikaForce®-472.

Começando pela análise do próprio material puro, o adesivo demonstrou ser forte e flexível, suportando uma tensão média de 17,95 MPa e alongando cerca de 6% antes de partir. A sua dureza também confirmou a sua natureza adaptável: ao manter a carga aplicada durante 15 segundos, a dureza inicial caiu de 82,9 para 70,9 Shore D, o que prova que as suas moléculas conseguem reorganizar-se e acomodar as tensões sem quebrar imediatamente.

Quando aplicado na colagem dos metais, o adesivo mostrou ser sensível ao tipo de material. Nos ensaios de juntas de sobreposição simples (corte), a ligação no aço suportou consideravelmente mais força (15,79 MPa) do que no alumínio (10,70 MPa). No entanto, nos provetes de topo (tração pura), essa diferença desapareceu, com ambos os metais a aguentarem cerca de 16 MPa. No ensaio de arrancamento (rolete flutuante), que tenta

"descascar" a ligação, o sistema demonstrou uma boa tenacidade, oferecendo uma resistência contínua de 6,59 N/mm.

Para simular o que acontece num acidente, testou-se a capacidade do adesivo responder a diferentes velocidades de impacto usando os provetes de alumínio. Os resultados foram excelentes, ao passar de uma velocidade de (0,5 mm/min) para uma velocidade de (500 mm/min), a tensão de corte máxima do adesivo subiu de 10,79 MPa para 17,87 MPa. Além disso, o adesivo conseguiu esticar ainda mais (de 1,05 mm para 1,91 mm). Isto significa que o adesivo endurece e fica mais dúctil quando é mais preciso, absorvendo o choque de forma eficaz.

Por fim, simulou-se o envelhecimento que o automóvel vai sofrer na estrada, sujeitando as juntas a condições extremas durante 300 horas. O calor puro (80 °C) fez com que o adesivo passasse por uma "pós-cura" extra, atingindo a sua resistência máxima de 18,17 MPa. Por outro lado, a humidade isolada gerou muita instabilidade, com os resultados a variarem bastante (desvio de 23%) e a resistência média a ficar pelos 12,04 MPa, pois a água começou a atacar as pontas da colagem. O pior cenário ocorreu quando se misturou calor e humidade, a temperatura quente fez com que a água penetrasse mais depressa, destruindo a ligação química entre o adesivo e o alumínio. Neste caso, a resistência desceu para 12,65 MPa (muito abaixo do que o calor sozinho conseguiu) e o adesivo acabou por descolar do metal.

Em suma, comprova-se que o SikaForce®-472 tem propriedades excelentes para garantir a segurança e a absorção de energia em carros modernos. Contudo, os resultados do envelhecimento deixam um aviso claro para a indústria, para que estas ligações durem muitos anos, é absolutamente crítico garantir uma preparação e limpeza perfeitas das superfícies na fábrica e proteger as colagens contra a infiltração de humidade.

7.2. Limitações e trabalhos futuros

Embora a presente dissertação tenha estabelecido correlações sólidas entre o comportamento mecânico, velocidade de ensaio e o envelhecimento hidrotérmico, o estudo apresenta limitações inerentes à escala laboratorial. A caracterização da taxa de deformação até 500 mm/min, embora indicativa de cargas dinâmicas, não replica integralmente as velocidades características de um *crash test* real. Adicionalmente, o envelhecimento foi conduzido sob condições imersivas/climáticas estacionárias que, apesar de severas, não simulam os ciclos de fadiga térmica diários acoplados a vibrações de estrada.

Neste sentido, para dar continuidade à validação desta tecnologia e aproximá-la da implementação na linha de montagem automóvel, propõem-se os seguintes trabalhos futuros:

- Ensaios Dinâmicos de Impacto e Fadiga: Realização de ensaios de impacto por queda de dardo e ensaios cíclicos de fadiga, para validar a vida útil da junta sob solicitações dinâmicas prolongadas.
- Otimização da Interface através de Tratamentos Avançados: Avaliação do impacto de tratamentos de superfície não convencionais e automatizáveis (plasma atmosférico,

ablação a laser ou promotores de adesão/primários específicos) na mitigação da degradação induzida pelo envelhecimento nos substratos de aço e alumínio.

- Análise Microestrutural Avançada: Recurso a Microscopia Eletrónica de Varrimento para uma análise à escala micrométrica da interface adesivo/metal após o envelhecimento hidrotérmico, mapeando as rotas de infiltração de humidade.
- Implementação de Ensaios Não-Destrutivos (NDT): Aplicação prática de técnicas de inspeção volumétrica, como ultrassons ou termografia ativa, para monitorizar a evolução da área não colada ou a iniciação de defeitos ao longo dos ciclos de envelhecimento, antes da rotura final.

8. Referências

Adams, R. D. (2021). *Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications*. Matthew Deans. https://www.sciencedirect.com/book/edited-volume/9780128199541/adhesive-bonding

Adams, R. D., & Drinkwater, B. W. (1997). Nondestructive testing of adhesively-bonded joints. Em *NDT&E International* (Vol. 30, Número 2).

Adams, R. D., & Wake, W. C. (1984). Structural Adhesive Joints in Engineering. Em *Structural Adhesive Joints in Engineering*. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5616-2

Almeida, F. J. S. D., Campilho, R. D. S. G., Silva, F. J. G., & Marques, G. P. (2018). Development of a numerical methodology for strength prediction of weld-bonded joints. *Procedia Manufacturing*, *17*, 713–720. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.121

ASTM D3167. (2004). *Standard Test Method for Floating Roller Peel Resistance of Adhesives 1*. www.astm.org,

Azevedo, J. C. S., Campilho, R. D. S. G., da Silva, F. J. G., Faneco, T. M. S., & Lopes, R. M. (2015). Cohesive law estimation of adhesive joints in mode II condition. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, *80*, 143–154. https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2015.09.007

Badulescu, C., Dumont, V., Diakhaté, M., Bunea, M., Stamoulis, G., Adrien, J., Maire, E., & Thévenet, D. (2024). Measurement of three-dimensional volumetric displacement fields in structural porous adhesive joints, under tensile and tensile-shear load, by means of in-situ X-ray microtomography. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *130*. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103635

Bagni, C., Halfpenny, A., Hill, M., & Tarasek, A. (2023). A practical methodology for the fatigue life estimation of adhesive joints. *Procedia Structural Integrity*, *57*, 598–610. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.03.066

Banea, M. D., Rosioara, M., Carbas, R. J. C., & da Silva, L. F. M. (2018). Multi-material adhesive joints for automotive industry. *Composites Part B: Engineering*, *151*, 71–77. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.009

Barnes, T. A., & Pashby, I. R. (2000). Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles. *Journal of Materials Processing Technology*, *99*(1–3), 72–79. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00361-1

Bidadi, J., Arabha, M., & Saeidi Googarchin, H. (2024). Adhesive bonding in automotive hybrid multi-cell square tubes: Experimental and numerical investigation on quasi-static axial crashworthiness performance. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *135*. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103832

Boutar, Y., Naïmi, S., Mezlini, S., da Silva, L. F. M., & Ben Sik Ali, M. (2017). Characterization of aluminium one-component polyurethane adhesive joints as a function of bond thickness for the automotive industry: Fracture analysis and behavior. *Engineering Fracture Mechanics*, *177*, 45–60. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.03.044

Cognard, J. Y., Créac'hcadec, R., Sohier, L., & Davies, P. (2008). Analysis of the nonlinear behavior of adhesives in bonded assemblies-Comparison of TAST and Arcan tests. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *28*(8), 393–404. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2008.04.006

Da Silva, P. D. A., Campilho, R. D. S. G., Faria, A. L., Queirós, M. J. R., Madani, K., & Houari, A. (2025). Cohesive zone analysis of tubular adhesive joints subjected to

impact stresses. *Procedia Structural Integrity*, *72*, 52–60. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.08.073

Dengiz, C. G. (2025). Effect of adhesive material properties on phase-field analysis of T-peel adhesive joints using the Taguchi method. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *139*. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2025.103977

EAA Aluminium Automotive Manual-Joining. (2015). https://european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2022/11/9-adhesive-bonding_2015.pdf

Ebnesajjad, S., & Landrock, A. H. (2015). Characteristics of Adhesive Materials. Em *Adhesives Technology Handbook* (pp. 84–159). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-323-35595-7.00005-x

Faneco, T. M. S., Campilho, R. D. S. G., Silva, F. J. G., & Lopes, R. M. (2017). Strength and fracture characterization of a novel polyurethane adhesive for the automotive industry. *Journal of Testing and Evaluation*, *45*(2), 398–407. https://doi.org/10.1520/JTE20150335

Gomes, L. A. R., Campilho, R. D. S. G., Valente, J. P. A., Queirós, M. J. R., & Madani, K. (2024). Impact loading analysis of double-lap composite bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *128*. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103547

Han, X., Zhang, C., Zhang, D., & Zhou, P. (2025). Modeling of fatigue damage evolution and life prediction of aluminum adhesive joints subjected to hygrothermal aging. *International Journal of Fatigue*, 109403. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2025.109403

ISO 527-2. (2012). *Plastics-Determination of tensile properties-COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT*. https://www.iso.org/standard/527-2

ISO 4587. (2003). *ISO 4587*. https://www.iso.org/standard/34852.html

ISO 6922. (1987). *ISO6922-1987_Adhesives-Determination_of_tensile_strength_of_butt_joints_-_withdrawn_stndrd*. https://www.iso.org/standard/13439.html

Jurgen Klingen. (2022). *Adhesive Bonding in Five Steps*. Wiley-VCH. https://doi.org/10.1002/9783527832262

Li, S., Wang, K., Zhu, W., Peng, Y., Ahzi, S., & Chinesta, F. (2022). Investigation on the mechanical properties of 3D printed hybrid continuous fiber-filled composite considering influence of interfaces. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *123*(9–10), 3147–3158. https://doi.org/10.1007/s00170-022-10398-7

Lima, R. A. A., Tao, R., Bernasconi, A., Carboni, M., & Teixeira de Freitas, S. (2024). Acoustic emission approach for identifying fracture mechanisms in composite bonded Joints: A study on varying Substrate's stacking sequence. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, *132*. https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2024.104490

Marques, E., Carbas, R., & Silva, L. (2021). *INTRODUÇÃO ÀS LIGAÇÕES ADESIVAS ESTRUTURAIS*. www.quanticaeditora.pt

Nóbrega, J. B. S., Campilho, R. D. S. G., Sánchez-Arce, I. J., & Nóvoa, P. J. R. O. (2023). Numerical estimation of the peel strength of adhesive joints via the floating roller peel test. *Procedia Structural Integrity*, *47*, 408–416. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.07.084

Petrie, E. M. . (2000). *Handbook of adhesives and sealants*. McGraw-Hill.

Polymers for aerospace structures. (2012). Em *Introduction to Aerospace Materials* (pp. 268–302). Woodhead. https://doi.org/10.1533/9780857095152.268

Reis, M. Q., Banea, M. D., Silva, L. F. M., & Carbas, R. J. C. (2019). Mechanical characterization of a modern epoxy adhesive for automotive industry. *Journal of*

the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, *41*(8). https://doi.org/10.1007/s40430-019-1844-2

Ribeiro, F. M. F., Campilho, R. D. S. G., Carbas, R. J. C., & da Silva, L. F. M. (2016). Strength and damage growth in composite bonded joints with defects. *Composites Part B: Engineering*, *100*, 91–100. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.060

Seewald, R., Schnittcher, M. A., Pauly, F., Rath, S., Schaaf, B., Lamm, L., Schiebahn, A., Brepols, T., Reese, S., Feldmann, M., & Reisgen, U. (2022). A mesoscopic analysis of cavities in two components silicone adhesive with cylindrical butt joint specimens. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *117*. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.103016

Sika Deutschland. (2021). *SikaForce®-472 FR L60 (formerly SikaForce®-7752 FRW L60) Non sagging structural adhesive*. https://deu.sika.com/dam/dms/deaddconst01/b/sikaforce-472-frl60.pdf

Silva, L., Carbas, R., & Marques, E. (2017). *Juntas Adesivas Estruturais Problemas e Trabalhos Práticos*. Publindústria. https://www.wook.pt/livro/problemas-e-trabalhos-praticos-de-juntas-adesivas-estruturais-lucas-filipe-martins-da-silva/20914132?srsltid=AfmBOopXYxSvYU8t2NylfY37pBQck8nuJQtqcGotWgl8OUlDN60lI2GR

Silva, L., Magalhães, A., & Moura, M. (2007). *Juntas Adesivas Estruturais - Lucas F. M. da Silva, António G. de Magalhães, Marcelo F. S. F. de Moura*. Publindústria. https://www.wook.pt/livro/juntas-adsivas-estruturais-lucas-filipe-martins-da-silva/202449?srsltid=AfmBOoonxsefJSB7s2X4fENmtbZDVFnI91UOd6dI4VXM-H_RbMlHk8gL

Simmons, C. H., Maguire, D. E., & Phelps, N. (2020). Engineering adhesives. Em *Manual of Engineering Drawing* (pp. 547–560). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818482-0.00036-0

Wang, H., & Shui, G. (2025). Ultrasonic evaluation of interfacial damage in adhesively bonded structure using quasi-static component of Lamb waves. *NDT and E International*, *158*. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2025.103548

Wang, S., Ban, S., Duan, Z., Yang, S., & Li, Y. (2025). Augmenting nonlinear shear creep evaluation of adhesive joints with conditional tabular GAN. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *141*. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2025.104066

Wu, W., Liu, Q., Zong, Z., Sun, G., & Li, Q. (2013). Experimental investigation into transverse crashworthiness of CFRP adhesively bonded joints in vehicle structure. *Composite Structures*, *106*, 581–589. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.07.009

Yi, Q., Tian, G. Y., Yilmaz, B., Malekmohammadi, H., Laureti, S., Ricci, M., & Jasiuniene, E. (2019). Evaluation of debonding in CFRP-epoxy adhesive single-lap joints using eddy current pulse-compression thermography. *Composites Part B: Engineering*, *178*. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107461

Declaração de Integridade

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração. Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim. Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO. ISEP,

NOME: Vinícius Fernandes Ferreira



Porto, 30 de junho de 2026