



EFEITO DA REALIZAÇÃO DE CICLOS DE GELO/DEGELÓ NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES REALIZADAS COM ADESIVOS ESTRUTURAIS

ANDREIA GOMES AFONSO

julho de 2023

EFEITO DA REALIZAÇÃO DE CICLOS DE GELO/DEGELO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES REALIZADAS COM ADESIVOS ESTRUTURAIS

Andreia Gomes Afonso

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

EFEITO DA REALIZAÇÃO DE CICLOS DE GELO/DEGELO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES REALIZADAS COM ADESIVOS ESTRUTURAIS

Andreia Gomes Afonso

1210436

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor António Gonçalves Magalhães.

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

AGRADECIMENTOS

O primeiro agradecimento é direcionado ao Professor Doutor António Gonçalves Magalhães pelo orientação e apoio no decorrer da dissertação.

Obrigada aos meus colegas da bolsa, Rita Carreiras, Manuel Soares e Diogo Vieira, pela disponibilidade em ajudar e pela amizade que criamos nos últimos meses.

Obrigada aos meus amigos, com os quais cresci e me continuaram a acompanhar nestes 5 anos, pelo apoio incondicional e sobretudo pela amizade.

Obrigada à minha família, avós maternos, avô paterno e a ti avó que olhas por mim aí em cima, pelo orgulho que sempre demonstraram ter por mim.

Por fim, e o mais importante, obrigada pai e mãe por sempre acreditarem em mim, por todas as lágrimas que limparam e os lamentos que ouviram. Obrigada por nunca desistirem de mim.

página propositadamente em branco

RESUMO

Os adesivos estruturais são materiais de base polimérica cujo comportamento mecânico é bastante afetado pelas condições ambientais de temperatura e humidade. Em algumas aplicações, nomeadamente na indústria aeronáutica, os adesivos podem estar sujeitos a ciclos de temperatura que variam entre situações de temperaturas negativas e temperaturas positivas, facto que é designado por ciclos de gelo/degelo.

Tendo por referência a temática das juntas adesivas e o estudo dos fatores que afetam a sua durabilidade, esta dissertação faz um levantamento do estado da arte das ligações adesivas com propósitos estruturais, nomeadamente, vantagens e desvantagens que a sua utilização em diferentes áreas industriais comporta, tipologias mais usadas, distribuição de tensões quando sujeitas a carregamentos tipificados, bem como os métodos de tratamento das superfícies para garantir uma boa adesão entre o adesivo e o substrato.

Considerando o enfoque na envolvente ambiental, é abordado de forma mais extensiva o efeito dessas condições sobre a durabilidade, fazendo referência a estudos relevantes que avaliaram o efeito da submissão a uma exposição cíclica de variações térmicas tipo gelo/degelo. Os principais ensaios normalizados para a avaliação da durabilidade são igualmente referidos como forma de introduzir exploratoriamente a metodologia experimental assente na realização de ensaios mecânicos para medição da evolução da resistência máxima, módulo de elasticidade e capacidade de deformação com o tempo de exposição às condições ambientais definidas.

PALAVRAS-CHAVE

adesivos; durabilidade; ensaios; sobreposição simples; gelo/degelo

página propositadamente em branco

ABSTRACT

Structural adhesives are polymer-based materials whose mechanical behaviour is greatly affected by environmental conditions of temperature and humidity. In some applications, namely in the aeronautical industry, adhesives may be subject to temperature cycles that vary between negative and positive temperatures, a fact that is called freeze/thaw cycles.

Having as a reference the topic of adhesive joints and the study of the factors that affect their durability, this dissertation surveys the state of the art of adhesive joints for structural purposes, namely, the advantages and disadvantages of their use in different industrial areas, the most commonly used typologies, stress distribution when subjected to typified loads, as well as the methods of surface treatment to ensure good adhesion between the adhesive and the substrate.

Considering the focus on the environment, the effect of these conditions on durability is more extensively addressed, making reference to relevant studies that have evaluated the effect of submission to a cyclic exposure to frost/thaw type thermal variations. The main standardised tests for durability assessment are also referred to as a way of exploratorily introducing the experimental methodology based on mechanical tests for measuring the evolution of ultimate strength, modulus of elasticity and deformation capacity with exposure time to the defined environmental conditions.

KEYWORDS

Adhesives; durability; tests; simple overlay; freeze/thaw.

página propositadamente em branco

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XV
1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Contextualização e objetivos.....	17
1.2. Metodologia	17
1.3. Estrutura da tese	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. Ligações adesivas.....	19
2.1.1. Vantagens e desvantagens da utilização dos adesivos	20
2.1.2. Tipos de juntas	21
2.1.3. Áreas de aplicação	23
2.1.4. Tipos de adesivos	25
2.1.5. Preparação Superficial	26
2.2. Tipos de esforços em juntas adesivas	30
2.2.1. Tração e Compressão	30
2.2.2. Corte.....	31
2.2.3. Clivagem.....	31
2.2.4. Arrancamento	32
2.3. Modos de Rotura.....	32
2.4. Resistência da junta.....	33
2.5. Efeito das condições ambientais na durabilidade das juntas adesivas.....	33
2.6. Efeitos dos ciclos térmicos na durabilidade	35
2.6.1. Efeitos a curto prazo	36
2.6.2. Efeitos a longo prazo.....	37
2.6.3. Estudos experimentais.....	38
2.7. Ensaio de durabilidade.....	40
2.7.1. Ensaio para caracterização das condições ambientais isoladamente.....	40
2.7.2. Ensaio para caracterização do efeito combinado de carregamento e condições ambientais.....	42
3. MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1.1. Araldite 420 A/B.....	45
3.1.2. Araldite AV 138	45
3.1.3. Temperatura de transição vítrea, T _g	46
3.2. Fabrico dos provetes de adesivo	46
3.2.1. Preparação do molde.....	47
3.2.2. Aplicação do adesivo.....	47

3.3. Fabrico das juntas.....	49
3.3.1. Preparação superficial dos substratos	49
3.3.2. Colagem	50
3.3.3. Cura e remoção do adesivo em excesso	50
3.4. Medições	52
3.5. Programação e colocação dos provetes na câmara climática.....	52
3.6. Ensaios de caracterização do comportamento	54
3.6.1. Propriedades mecânicas dos substratos.....	54
3.6.2. Caracterização dos adesivos	54
3.6.3. Caracterização do comportamento inicial das juntas.....	57
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1. Resultados com a realização de ciclos de gelo/degelo	59
4.1.1. 420A/B	59
4.1.2. AV138	60
5. CONCLUSÃO	63
5.1. Conclusões finais	63
5.2. Limitações e trabalhos futuros	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
APÊNDICE A	69
ANEXO A	73
ANEXO B	75

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Tipos de geometria de juntas adesivas (adaptado de [1])	21
Figura 2- Forças de arrancamento e clivagem (exemplos a evitar) (adaptado de [1])	21
Figura 3- Melhoria de projeto para que o adesivo trabalhe ao corte (adaptado de [1]).....	22
Figura 4- Exemplo de juntas de sobreposição (adaptado de [4])	22
Figura 5- Exemplos de ligações topo a topo (adaptado de [1])	22
Figura 6- Exemplos de juntas com reforço [4]	23
Figura 7- Aplicação de juntas adesivas na indústria aeronáutica a) Partes com compósitos, b) Partes com adesivo (adaptado de [6])	24
Figura 8- Tecnologia da ligação por adesivos na construção de veículos comerciais. As linhas a vermelho ilustram os locais onde se encontram ligações adesivas [5]	24
Figura 9- Ligação por adesivos na tecnologia médica- endoscópio [5].....	25
Figura 10- Detergente (Proalliance)	27
Figura 11- Lixas (Loja Standar) e máquina de grenalhagem (Coniex)	28
Figura 12- Descarga de Corona [14]	29
Figura 13- Tratamento por chama [12]	29
Figura 14- Tratamento por plasma [12]	30
Figura 15- Esforços de tração e compressão e respetivas distribuições de tensões [18],[14]	30
Figura 16- Esforço de corte e respetiva distribuição de tensões [18],[19]	31
Figura 17- Esforço de clivagem e respetiva distribuição de tensões [6], [20].....	31
Figura 18- Esforço de arrancamento e respetiva distribuição de tensões [18],[19].....	32
Figura 19- Representação esquemática de uma rotura adesiva e de uma rotura coesiva. a) rotura adesiva, b) rotura coesiva [17], [22]	32
Figura 20- Tensão de rotura vs tempo de envelhecimento, para substratos em aço macio e adesivo de epóxido [26]	34
Figura 21- a) Adesivo adsorvido em locais de superfície. b) Adesivo deslocado de locais de superfície [32]	37
Figura 22- Ilustração de um ciclo de congelamento e descongelamento (adaptado de [18])	38
Figura 23- Dependência das leis coesivas relativamente à humidade: a) Leis coesivas Modo I, b) Leis coesivas Modo II [18]	39
Figura 24- Geometria do provete JSS segundo a norma ASTM D1002 [35]	41
Figura 25- Montagem para o ensaio à tração segundo a norma ASTM D1002	41
Figura 26- Ensaio de cunha (wedge test) segundo a norma ASTM D3762 [34]	41
Figura 27- Dispositivo para ensaio de durabilidade em JSS, ASTM D2919 [1]	42
Figura 28- Dispositivo para ensaios de fluência, ASTM D2294-96 a) mola à tração, b) mola à compressão [1].....	43
Figura 29 - Araldite 420 A/B.	45
Figura 30 - AV 138M/HV 998.....	46
Figura 31 - Molde para fabrico de provetes de adesivo.	47
Figura 32- Mistura do epóxido (A) com o endurecedor (B)	47
Figura 33- Preenchimento do molde com o adesivo	48
Figura 34- Provetes de adesivo Araldite 420 A/B.....	48
Figura 35- Preparação dos provetes de adesivo AV 138M/HV 998	48

Figura 36 - Máquina de granalhagem CidBlast série RT 6S.....	49
Figura 37 – Alguns dos substratos após a operação de granalhagem.	49
Figura 38 - Colocação dos fios de nylon para definição da espessura da camada adesiva.	50
Figura 39 – Exemplo do processo de fixação adotado durante o processo de cura (exemplo das juntas AV 138M/HV 998).	50
Figura 40 - Remoção do excesso de adesivo.....	51
Figura 41 - Rotura pelo substrato em juntas de adesivo Araldite 420 A/B em ensaio preliminar com espessura de substrato de 1 mm.	51
Figura 42- Thermotron S/SM 8200.....	52
Figura 43 - Painel de programação.	53
Figura 44 - Colocação das chapas na câmara térmica.	53
Figura 45 - Diagrama tensão versus deformação para provete bulk de Araldite 420 A/B sujeito a tração	54
Figura 46 - Diagrama tensão versus deformação para provete bulk de AV 138M/HV 998 sujeito a tração	55
Figura 47 - Diagrama tensão versus deformação para provete bulk de Araldite 420 A/B sujeito a condições de gelo/degelo	56
Figura 48 - Diagrama tensão versus deformação para provete bulk de AV138 sujeito a condições de gelo/degelo	56
Figura 49 - Diagrama tensão versus deformação para provete de junta adesiva 420 A/B.....	57
Figura 50 - Diagrama tensão versus deformação para provete de junta adesiva AV 138M/HV 998	57
Figura 51 - Comparação da tensão de corte com o decorrer das semanas para o adesivo Araldite 420A/B	59
Figura 52 - Superfície de rotura dos provetes ensaiados a 20 ciclos térmicos	60
Figura 53 - Superfície de rotura dos provetes ensaiados para 40,5 ciclos térmicos.....	60
Figura 54 - Superfície de rotura dos provetes ensaiados para 63 ciclos térmicos.....	60
Figura 55 - Tensão de corte registada nos ensaios em juntas com AV138.....	61
Figura 56 - Superfície de rotura dos provetes AV138 ensaiados a 102 ciclos térmicos.....	61

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1-Efeito da preparação superficial na resistência ao corte de uma junta adesiva [1]	27
Tabela 2- Coeficientes de difusão em diferentes temperaturas para os sistemas de epóxido (adaptado de Zhou, et al).....	34
Tabela 3-Efeito da combinação da humidade com ciclos de gelo/degelo em Modo I e Modo II [26]	39
Tabela 4- Recolha de dados para estudo experimental.....	40
Tabela 5 - Propriedades mecânicas do Alumínio 1050	54

página propositadamente em branco

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
JS	Junta de sobreposição
JSS	Junta de sobreposição simples
UV	Ultravioletas
CAA	Chromic Acid Anodization
PAA	Processo de anodização por ácido fosfórico
DCB	Double Cantilever Beam
ENF	End-Notched Flexure
GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastics
FPL	Forest Products Laboratories
P2	Processo Ativo Químico

Lista de Símbolos

T	Temperatura	°C
S	Tensão de corte no adesivo	MPa
ΔT	Variação de temperatura	°C
E	Módulo de Young	MPa
k	Coefficiente de expansão térmica	°C ⁻¹
G	Módulo de corte	MPa
d	Espessura do adesivo	mm
T_g	Temperatura de transição vítrea	°C
L, l	Comprimento de sobreposição	mm
t	Espessura do substrato	mm

página propositadamente em branco

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a definição de objetivos e a metodologia a seguir para os alcançar no sentido de estudar o efeito da aplicação de sucessivas variações de temperatura (gelo/degelo) no comportamento mecânico de juntas adesivas estruturais.

1.1. Contextualização e objetivos

A implementação de adesivos como meio de união estrutural entre materiais tem crescido de forma significativa. Contudo, os adesivos estruturais são materiais de base polimérica e o seu comportamento é bastante afetado pelas condições ambientais de temperatura e humidade em que estão inseridos. Neste contexto, a bibliografia refere vários trabalhos que visam estudar estes efeitos no comportamento dos adesivos e, em consequência, nas estruturas onde estão aplicados.

A variação das principais propriedades, como a resistência máxima e a capacidade de deformação, são fortemente influenciadas pelos mecanismos de degradação na interface. Frequentemente, um adesivo dúctil pode passar a exibir um comportamento frágil quando a temperatura envolvente cai abaixo da sua temperatura de transição vítrea. A repetição sucessiva, de forma cíclica, provoca um efeito a longo prazo que não é desprezável.

Recorrendo a dois adesivos estruturais, definiu-se como objetivo desta dissertação o estudo da influência das condições de gelo/degelo, fazendo a caracterização experimental do comportamento mecânico e a variação da tipologia da fratura provocada em juntas de sobreposição simples.

1.2. Metodologia

A metodologia de revisão do estado da arte assentou em três tópicos fundamentais. Primeiro foi realizada uma revisão das juntas adesivas estruturais no contexto das ligações entre materiais focando vantagens e desvantagens, tipos de ligações, substratos mais comuns e tipos de adesivos. Numa segunda fase foram tratados o comportamento mecânico e a forma como genericamente os adesivos são afetados pelas condições ambientais, nomeadamente pela humidade e pela temperatura, atuando isoladamente ou em conjunto. Este tópico foi orientado para a importância dos ciclos de gelo/degelo no sentido de definir a abordagem mais adequada a seguir para tratamento deste tema durante a realização do trabalho de dissertação. Finalmente foram abordados os tipos de ensaios mais comuns para caracterizar mecanicamente as juntas e os adesivos. Nas publicações consultadas foi dada particular atenção aos ensaios realizados e ao tratamento do ponto de vista experimental para assim suportar as decisões relativas à componente experimental

Na componente experimental foram realizados ensaios de caracterização mecânica em juntas de sobreposição simples com e sem sujeição a ciclos de gelo/degelo no sentido de perceber qual a sua influência nas principais propriedades mecânicas, tipo de fratura e análise da tipologia do adesivo na superfície de fratura após gelo/degelo repetido.

Para o efeito foram considerados dois tipos de adesivos, 420A/B e AV138, aplicados sobre substratos em alumínio comercial do tipo AA1050. Após acondicionamento durante um período até 12 semanas foram realizados ensaios de tração uniaxial para determinação da resistência mecânica, módulo de elasticidade e capacidade de deformação. A evolução da superfície de fratura foi comparada com a superfície inicial antes da submissão aos ciclos de gelo/degelo.

1.3. Estrutura da tese

No primeiro capítulo, os tópicos incluídos fazem a contextualização do trabalho de revisão bibliográfica, da orientação seguida e dos objetivos a atingir tendo como referência o tema proposto para a dissertação.

No capítulo dois é apresentado o desenvolvimento da revisão bibliográfica, começando por referir as vantagens, e também algumas desvantagens, das juntas adesivas estruturais como método de ligação entre materiais. Os tipos de adesivos e juntas, bem como a necessidade de preparação das superfícies foram abordados, assim como a distribuição de tensões na zona de sobreposição para esforços típicos. Dada a natureza polimérica dos adesivos foi dada ênfase particular às questões relacionadas com a durabilidade e ao seu tratamento do ponto de vista experimental.

No capítulo 3 são referidos os materiais e os métodos que permitiram desenvolver a parte experimental, são mencionados os tipos de adesivos a utilizar, a quantidade de provetes e o método de produção dos mesmos e a programação dos ciclos térmicos na câmara ambiental.

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados retirados dos ensaios de tração relativos a cada tipo de adesivo

No capítulo 5 são retiradas as conclusões finais do trabalho experimental realizado e sugeridas algumas ideias de trabalhos futuros relacionados com o tema.

A bibliografia, que encerra o documento, lista as principais referências utilizadas na escrita do texto, enquanto em anexo é apresentada a informação sobre os adesivos utilizados e disponibilizada pelos fabricantes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo do presente capítulo far-se-á um levantamento do estado da arte atual sobre as ligações adesivas considerando a sua importância como elemento de ligação estrutural e contextualizando o seu comportamento mecânico perante condições ambientais adversas, principalmente as que envolvem ciclos de gelo e degelo. Referenciando diferentes áreas onde as ligações com adesivos assumem um papel cada vez mais relevante são indicadas algumas das principais vantagens e desvantagens referentes a este processo de ligação associando-as às necessidades de preparação dos substratos, aos tipos de esforços predominantes em função da geometria de junta adotada e do sistema substrato vs adesivo.

2.1. Ligações adesivas

As ligações adesivas são um método que permite unir dois ou mais componentes geralmente denominados por substratos. Este método de ligação com fins estruturais tem progressivamente crescido de interesse como provam os inúmeros estudos efetuados no sentido de perceber o seu comportamento mecânico, sobretudo o comportamento sob solicitações cíclicas e o comportamento a longo prazo, de modo a assegurar a necessária confiança para o estabelecimento de critérios de dimensionamento fiáveis. É neste contexto que vemos as juntas adesivas ganharem cada vez mais adeptos da sua utilização nas diferentes áreas de engenharia, desde as de menor exigência até às de maior grau de exigência quanto ao seu desempenho. Por isso, Magalhães [1], refere que a indústria aeronáutica tem sido a principal responsável pelo desenvolvimento de juntas adesivas estruturais, embora nem sempre com os resultados positivos.

Quando fazemos uma retrospectiva do que foi o início do processo de introdução industrial dos adesivos, verificamos que um dos principais problemas se relacionou com o facto de os primeiros adesivos serem baseados em produtos naturais os quais apresentavam pouca durabilidade. O problema foi contornado com o surgimento de adesivos sintéticos, de matriz polimérica, nos anos 40 do século XX. Ainda assim, este tipo de adesivo mostrou alguns pontos fracos, nomeadamente maior fragilidade e maior aptidão para a fratura. Desenvolvimentos posteriores levaram ao surgimento de novos sistemas de adesivos, entre os quais os adesivos de epóxido, onde a questão da fragilidade do sistema base de resina foi melhorada com a adição de partículas de borracha de dimensão muito reduzida. Os adesivos de epóxido, mas também outros, entretanto desenvolvidos, trouxeram um grau de confiabilidade e capacidade de resistir a solicitações que fixaram as ligações adesivas no patamar das aplicações estruturais.

Nos dias de hoje podemos encontrar claramente uma distinção entre as aplicações de adesivos como elemento de vedação e as aplicações estruturais em que a capacidade de suporte de esforços se situa acima dos 7 MPa. Embora seja um fator diferenciador, a capacidade de carga que a junta adesiva permite não é o único que deve ser tido em conta uma vez que as aplicações estruturais estão frequentemente associadas a situações onde o meio envolvente tem um efeito potenciador do grau de exigência necessário para o desempenho mecânico.

2.1.1. Vantagens e desvantagens da utilização dos adesivos

Naturalmente, o principal motivo para o crescente interesse e uso deste tipo de ligações está relacionado com as inúmeras vantagens que possuem, sendo as mais relevantes as enunciadas por Guimarães, A.M., da Silva et al., Banea e da Silva, Tong e Steven [1]:

- as tensões são distribuídas de forma mais uniforme sobre a totalidade da área colada;
- não há alteração estrutural neste tipo de ligação, pode por isso ser efetuado a temperaturas bastante baixas;
- melhor comportamento à fadiga;
- melhor resistência à corrosão;
- facilidade no fabrico de formas complexas;
- capacidade de unir eficientemente materiais de espessuras finas;
- simplicidade de execução que se traduz num custo mais reduzido;
- possibilidade de unir materiais com propriedades diferentes;
- ao contrário das ligações mecânicas tradicionais, este tipo de ligação não danifica os substratos.

Em contrapartida são também notórias algumas desvantagens apontadas a este método de ligação, como por exemplo:

- é essencial uma preparação adequada das superfícies a unir, uma vez que a ligação adesiva tem por base os fenómenos de adesão entre superfícies para poder transferir a carga de forma eficaz;
- a sua durabilidade torna-se limitada quando submetida a condições de temperatura demasiado altas;
- problemas de toxicidade e inflamabilidade;
- sensibilidade a tensões de tração segundo a espessura;
- dificuldade ao nível das inspeções;
- necessitam de um prévio tratamento das superfícies envolvidas;
- podem ocorrer tensões residuais resultantes dos diferentes coeficientes de expansão térmica;
- os esforços de arrancamento e clivagem representam um grave problema para este tipo de ligação.

De acordo com o referido por Mota, A.I.M [2] a suscetibilidade da maior parte dos adesivos à degradação por um ou mais fatores ambientais é uma das principais limitações da aplicação dos adesivos nas ligações com função estrutural. Alguns desses fatores são: a humidade, a temperatura, a exposição à radiação solar, entre outros.

2.1.2. Tipos de juntas

De acordo com o que é referido na bibliografia, Figura 1, podemos encontrar vários tipos de geometria de juntas adesivas. Pela sua simplicidade de realização destacam-se as juntas de sobreposição (JS). Contudo podemos encontrar configurações de juntas com formas muito variadas, passíveis de serem aplicadas industrialmente. A escolha, em cada caso, deve ter em conta alguns aspetos, sobretudo ligados à forma como a zona do adesivo é solicitada. É boa pratica desenvolver juntas em que o adesivo seja solicitado ao corte e evitar os esforços de clivagem e arrancamento que são os que mais penalizam o seu desempenho mecânico. As Figura 2 e Figura 3, ilustram exemplos de situações a evitar e boas práticas, respetivamente, na conceção da junta adesiva.

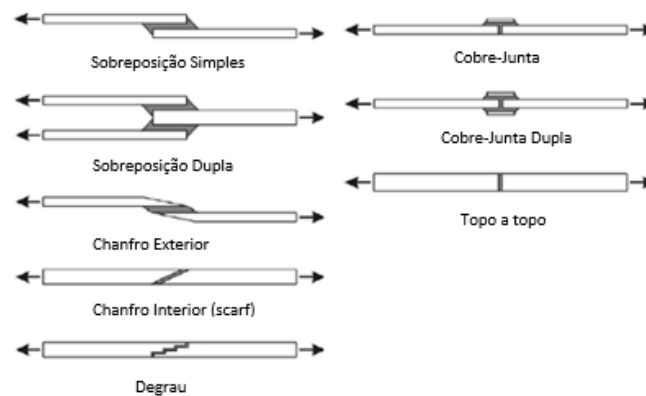


Figura 1- Tipos de geometria de juntas adesivas (adaptado de [1])

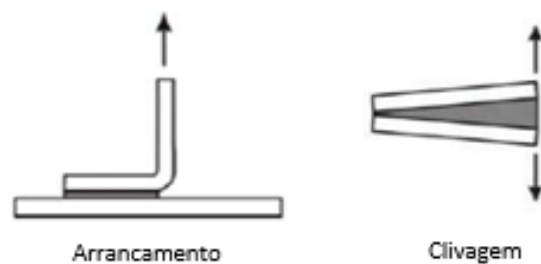


Figura 2- Forças de arrancamento e clivagem (exemplos a evitar) (adaptado de [1])

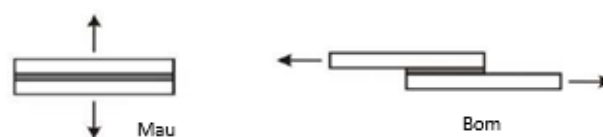


Figura 3- Melhoria de projeto para que o adesivo trabalhe ao corte (adaptado de [1])

Sobreposição simples

A junta de sobreposição simples (JSS), Figura 4 a), é a mais utilizada industrialmente, sobretudo pela facilidade de execução. A sua principal desvantagem assenta no facto do carregamento ocorrer descentrado relativamente ao plano da zona de sobreposição, o que origina um efeito de momento fletor cuja magnitude depende das espessuras do substrato e da camada adesiva, e o aparecimento de tensões normais na direção da espessura do adesivo que provoca um esforço de arrancamento.

Sobreposição dupla

As juntas de sobreposição dupla, Figura 4 b), são uma variação das juntas de sobreposição simples, mas que ao contrário destas permitem alinhar a carga aplicada mais facilmente, de modo a evitar outros tipos de esforços aplicados ao adesivo. Ainda assim, de acordo com Tiago e Silva [3], apesar das juntas de sobreposição dupla apresentarem uma configuração simétrica, estas não são isentas de flexão. De facto, na linha de adesão podem ser desenvolvidas tensões de tração e compressão, quando ocorre flexão nos substratos exteriores.

Como este tipo de junta necessita da adição de mais um substrato, acaba por tornar o processo mais demorado e difícil de executar, além de mais caro.

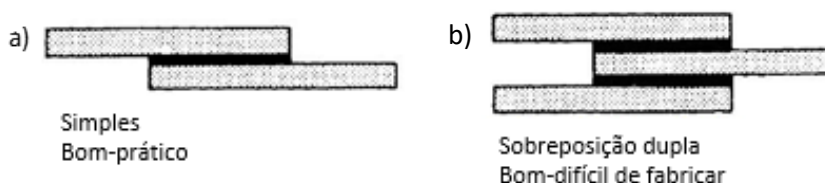


Figura 4- Exemplo de juntas de sobreposição (adaptado de [4])

Junta topo a topo

Este tipo de junta também é simples de fabricar, no entanto, apresenta algumas desvantagens como, por exemplo, não conseguirem resistir a forças que não sejam axiais, pois em qualquer outra direção criam esforços de clivagem. Podem ser feitas algumas alterações na junta que ajudam a melhorar este aspeto, como criar uma junta em degrau ou até mesmo um chanfro interior, Figura 5.

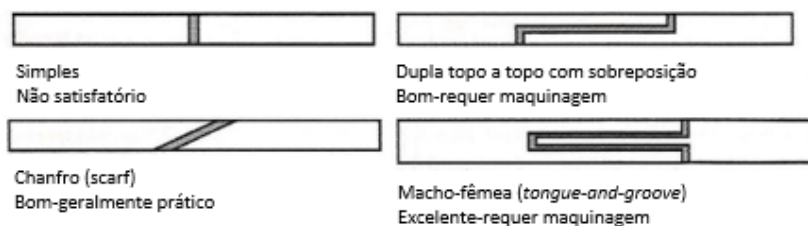


Figura 5- Exemplos de ligações topo a topo (adaptado de [1])

Juntas com reforço

As juntas com reforço (cobre-junta ou cobre-junta dupla), Figura 6, permitem reduzir os esforços de flexão, e quando comparadas com juntas de sobreposição simples, têm a vantagem de serem mais resistentes. Porém, o facto de o fabrico ter um custo mais elevado revela ser uma grande desvantagem para este tipo de junta. A cobre-junta dupla comparada com a cobre-junta possui a vantagem de ser menos solicitada a esforços de arrancamento uma vez que possui um momento fletor menor. De acordo com Amaral, F.F.S [5] consegue-se melhorar a resistência às forças de flexão aumentando a área colada, a flexibilidade do rebordo e a rigidez da base.

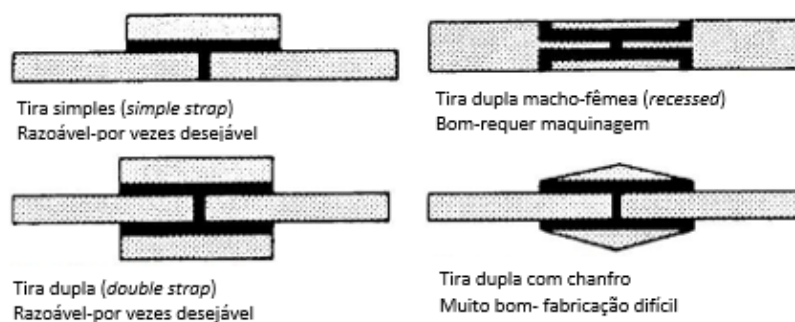


Figura 6- Exemplos de juntas com reforço [4]

2.1.3. Áreas de aplicação

A tecnologia de ligação por adesivos faz parte da vida humana há muito tempo. Os adesivos, como já referido anteriormente podem ser utilizados para juntar partes de objetos do dia-a-dia, bem como produtos mais complexos. No entanto, os adesivos são muitas vezes subestimados por causa de uma das suas vantagens intrínsecas: não são visíveis ao consumidor. Atualmente, dificilmente encontramos alguma área industrial na qual não seja aplicada a tecnologia de ligação por adesivos. De seguida serão abordados de forma resumida alguns exemplos da aplicação das ligações adesivas na indústria.

Indústria Aeronáutica

Na indústria aeronáutica, com vista a reduzir os custos de exploração por passageiro e aeronave e baixar o consumo de combustível, são utilizados os materiais compósitos de matriz polimérica e reforços sob a forma de fibras, bem como ligas de alumínio de elevado desempenho. Os adesivos são frequentemente utilizados para efetuar a ligação destes materiais, podendo, quando isso se justifica, ser um método aplicado em conjugação com outros, como é o caso da ligação conjunta de chapas com adesivos e rebites. Os adesivos de alto desempenho têm a resistência à vibração necessária e são adequados para mudanças repentinas de temperatura e à expansão variável dos substratos. Na Figura 7 podemos observar um exemplo de aplicação na indústria aeronáutica.

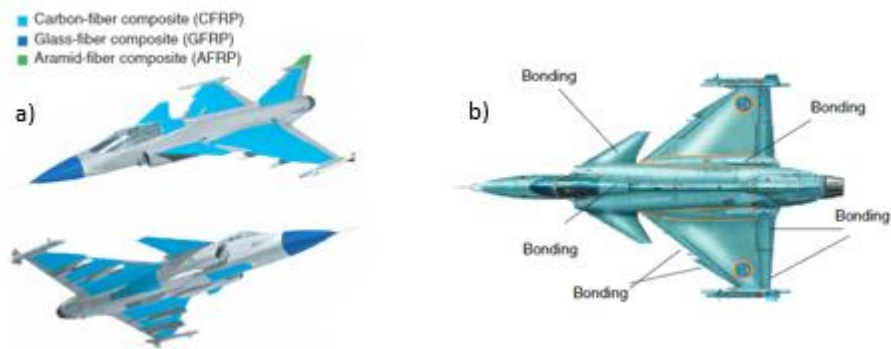


Figura 7-Aplicação de juntas adesivas na indústria aeronáutica a) Partes com compósitos, b) Partes com adesivo (adaptado de [6])

Indústria Automóvel

Nos dias de hoje, entre 15 e 20 kg de adesivo são utilizados num veículo de passageiros. Uma aplicação típica é a ligação nos para-brisas. Ao contrário do que acontecia no passado, hoje o painel já não é inserido, mas sim ligado com um adesivo de poliuretano com propriedades elásticas. A vantagem é que a junta adesiva entre o painel e a carroceria aumenta a rigidez torsional do veículo em 15-20% quando comparada com a do painel inserido. Isto, por sua vez, permite reduzir o peso do veículo [7]. Em muitos veículos modernos, o adesivo é significativamente responsável pela segurança em caso de choque e, deste modo, pela sobrevivência dos ocupantes num acidente.

A ligação adesiva é também cada vez mais utilizada na construção de veículos comerciais. A Figura 8 mostra o exemplo de um camião. Os elementos exteriores da cabine do condutor são feitos num compósito do tipo GFRP e são ligados à parte metálica por adesivos.

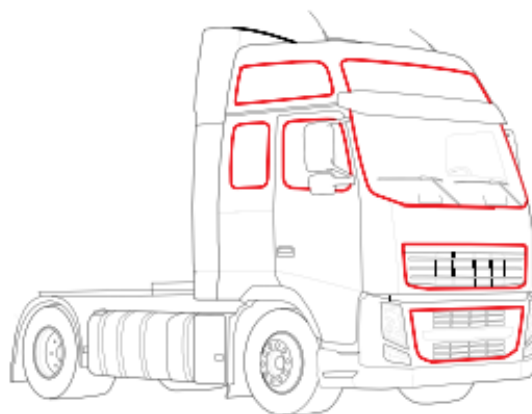


Figura 8-Tecnologia da ligação por adesivos na construção de veículos comerciais. As linhas a vermelho ilustram os locais onde se encontram ligações adesivas [5]

Medicina

Um endoscópio ligado por adesivos, Figura 9, é um exemplo do uso extensivo das ligações adesivas em diversas áreas da tecnologia médica. O diâmetro do tubo de um endoscópio é aproximadamente 2mm e é ligado por um adesivo de cura por UV e de comprimento de onda adaptado, que permite que a luz passe sem ser perturbada durante a examinação [7].

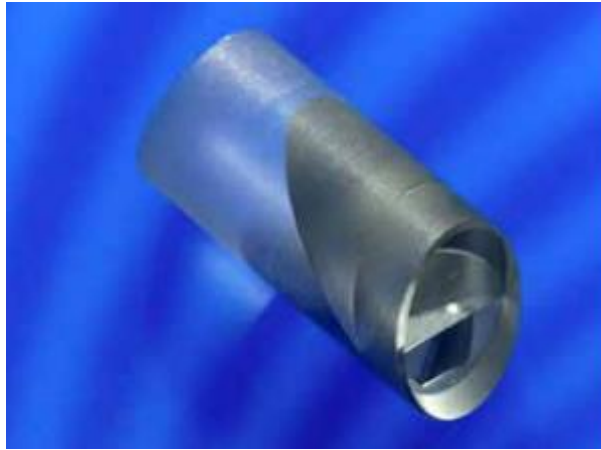


Figura 9-Ligação por adesivos na tecnologia médica- endoscópio [5]

2.1.4. Tipos de adesivos

Considerando apenas os adesivos estruturais, estes podem ser divididos em: epóxicos, fenólicos, poliuretanos, acrílicos modificados.

Epóxicos

Esta é a família mais versátil de adesivos, por ser aquela que melhor adere aos substratos, exceto polímeros e elastômeros devido à baixa energia de superfície que possuem. Podem ser modificados de modo a atingir uma ampla variedade de propriedades. Algumas das suas características mais importantes são:

- a excelente resistência à tração, corte, flexão e exposição a altas temperaturas;
- excelente durabilidade;
- podem ser de um ou dois componentes;
- resistem bem a óleos, humidade e vários solventes.

Contudo apresentam uma fraca resistência ao arrancamento e uma baixa tenacidade. As propriedades destes adesivos podem ser modificadas se forem adicionadas outras resinas (fenólicas, poliamidas, etc), ou elastômeros (poliuretano).

Fenólicos

Os adesivos fenólicos são utilizados majoritariamente para colar madeira, embora possam ser utilizados, também, para a colagem de metal sobre metal garantindo uma resistência mecânica satisfatória [8]. Apresentam boa resistência ao calor, boa estabilidade dimensional e são relativamente baratos. Para além disso, uma junta com um adesivo fenólico apresenta boa resistência a fungos, água, altas e baixas temperaturas (podem ser utilizados no exterior) e, muito importante, boa durabilidade.

Poliuretano

Assim como nos epóxidos, este tipo de adesivos pode ser apresentado completamente no estado sólido ou dissolvido num solvente de uma ou duas partes. Por outro lado, distinguem-se dos mesmos por serem mais flexíveis e terem uma alta resistência ao corte e ao arrancamento. Quando comparados com os dois tipos anteriores (epóxidos e fenólicos), os poliuretanos apresentam um melhor desempenho para temperaturas baixas, uma vez que a temperatura máxima de utilização é cerca de 150 °C. Os adesivos de poliuretano curam à temperatura ambiente, sendo que este processo demora as 24h, ou mais, de duração.

Acrílicos

Dentro desta família de adesivos destacam-se dois tipos: anaeróbicos e cianoacrilatos.

Os adesivos anaeróbicos apresentam-se normalmente sob a forma líquida, são adesivos de um só componente que podem ser curados à temperatura ambiente, o que os torna bastante interessantes face à sua fácil utilização. A cura inicia-se assim que o adesivo entra em contacto com o oxigénio do ar ambiente, daí serem conhecidos como anaeróbicos. Apresentam resistência mecânica bastante variável, podendo ser da ordem da apresentada pelos adesivos de epóxido, e a sua resistência à ação de agentes químicos é relativamente baixa. Estes adesivos têm sido muito utilizados em aplicações de construção mecânica como em fixação de peças estriadas, fixação de rolamentos, no geral em ligação de peças cilíndricas.

Os adesivos de cianoacrilato são conhecidos como as colas que podem colar tudo em segundos e que possuem uma elevada resistência. São adesivos de um só componente e não utilizam solventes. Tal como os anaeróbicos são apresentados sob a forma líquida e curam rapidamente à temperatura ambiente. São muito resistentes ao corte, no entanto, são sensíveis aos choques e vibrações e, também, à ação de agentes químicos.

2.1.5. Preparação Superficial

O comportamento de uma junta adesiva é fortemente determinado pela preparação superficial dos substratos. A preparação permite melhorar as forças de adesão, removendo camadas instáveis de óxidos, gorduras e impurezas persistentes na superfície de colagem [9]. O objetivo desta preparação é garantir que o elemento mais fraco na ligação seja o adesivo ou o aderente o que remete para uma boa força de adesão e evita que a rotura se dê na interface.

Marques, E.A.S [10] diz que, para selecionar o tratamento superficial ideal, é necessário primeiro conhecer a natureza e as principais características físicas e químicas dos materiais selecionados. Como refere Guimarães, A.M [1] todos os substratos devem ser tratados de alguma forma antes da colagem. Esta operação pode passar por um ou uma combinação dos efeitos a seguir referidos: remoção de material, modificação química da superfície e alteração da topografia da superfície. A Tabela 1 seguinte mostra como o efeito da preparação superficial tem impacto na resistência da junta.

Tabela 1-Efeito da preparação superficial na resistência ao corte de uma junta adesiva [1]

Substrato	Tratamento	Adesivo	Res. ao corte (MPa)
Alumínio	Sem tratamento	Epóxico	3,1
	Desengorduramento em vapor		5,8
	Grenalhagem		12,1
	Ataque químico		19,0
Alumínio	Sem tratamento	Vinilo-fenólico	16,8
	Desengorduramento		18,9
	Ataque químico		35,7
Aço inoxidável	Sem tratamento	Vinilo-fenólico	36,0
	Desengorduramento		43,5
	Ataque químico		48,7
Aço laminado a frio	Sem tratamento	Epóxico	20,0
	Desengorduramento em vapor		20,1
	Grenalhagem		29,4
	Ataque químico		30,8
Cobre	Desengorduramento em vapor	Epóxico	12,3
	Ataque químico		16,1

Para o processo de preparação de superfícies existem várias metodologias possíveis que podemos globalmente agrupar em 2 grandes grupos: preparação por processos passivos e preparação por processos ativos

Processos Passivos

Como referido por Pratas, G.D [11] o pré-tratamento é usado para definir o tratamento de superfície mecânico ou químico aplicado ao substrato com intuito de o limpar e de o preparar para a aplicação do revestimento. Este tratamento não altera a natureza química da superfície.

Passivos Químicos: O pré-tratamento químico pode apresentar-se tão simples como uma limpeza com um solvente ou detergente, Figura 10, ou pode ser um sistema multi-estágio a funcionar por aspersão que limpa a peça aplicando ainda uma camada de conversão.



Figura 10- Detergente (Proalliance)

Passivos Mecânicos: Os métodos passivos mecânicos, como a utilização de lixas/escovas, e a grenalhagem, Figura 11, são muito efetivos para provocar um aumento de rugosidade e remover camadas de óxidos e outras camadas fracas. Deve ser realizada uma limpeza da superfície (através de um método passivo químico) antes e depois da preparação mecânica [12].



Figura 11- Lixas (Loja Standar) e máquina de grenalhagem (Coniex)

Processos Ativos

Os processos ativos, contrariamente aos passivos, para além de removerem os óxidos e camadas fracas alteram a natureza química da superfície. São utilizados quando se pretende a máxima resistência e são sempre precedidos dum processo de limpeza passivo.

Ativos Químicos: Os processos ativos químicos são muito utilizados na indústria aeroespacial com vista a proteger o alumínio da oxidação durante um longo período. O ataque ácido irá originar uma camada de óxidos (com aspeto tubular) na superfície do alumínio. Tem como vantagens o facto de diminuir a degradação da resistência da junta ao longo do tempo e promoverem uma maior resistência à corrosão. No entanto são processos caros e tóxicos ao ambiente. Entre estes processos destacam-se:

- FPL (Forest Products Laboratories) é um processo tóxico e poluente;
- P2, desenvolvido a partir do FLP, não degrada muito o alumínio e é menos tóxico que o anterior;
- CAA (chromic acid anodization) é o mais utilizado para proteger o alumínio da oxidação. A adição do ácido crómico permite obter uma camada de oxido mais resistente e durável;
- PAA (Processo de anodização por ácido fosfórico), resulta numa camada de oxido mais espessa, resistente e durável.

Ativos Físicos: Estes processos incluem o método de descarga de Corona, o tratamento por chama e o tratamento por plasma.

Descarga de Corona

O tratamento por descarga de Corona, Figura 12, é usado comumente para melhorar a molhabilidade, adesão e biocompatibilidade de uma superfície polimérica, sem afetar as propriedades *bulk*[13]. O método baseia-se numa descarga de alta frequência que resulta da diferença de potencial no espaço do elétrodo que é preenchido com gás à pressão atmosférica. É uma espécie de método de descarga parcial. Descargas entre os elétrodos resultam na ionização da atmosfera pela qual estão circundados [14].

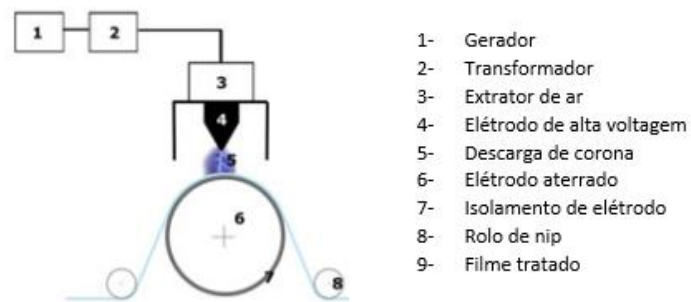


Figura 12- Descarga de Corona [14]

Tratamento por Chama

É um tratamento utilizado para modificar as superfícies poliméricas, em especial de poliolefinas, Figura 13. Consiste na exposição do polímero a uma chama oxidante. Durante a combustão as moléculas do oxigénio são dissociadas em átomos livres que bombardeiam a superfície do material introduzindo grupos funcionais contendo oxigénio.

Tratamento por Plasma

O Plasma é um gás ionizado, composto por várias espécies reativas, incluindo fotões, iões positivos e negativos, moléculas, electrões e radicais livres. Essas espécies reativas criam um ambiente de reacção rápida, onde as superfícies expostas sofrem várias alterações. A sua eficiência é afetada por diversos fatores, como o gás, parâmetros de processamento, equipamento e o substrato [15]. Uma representação esquemática deste processo é ilustrada na Figura 14

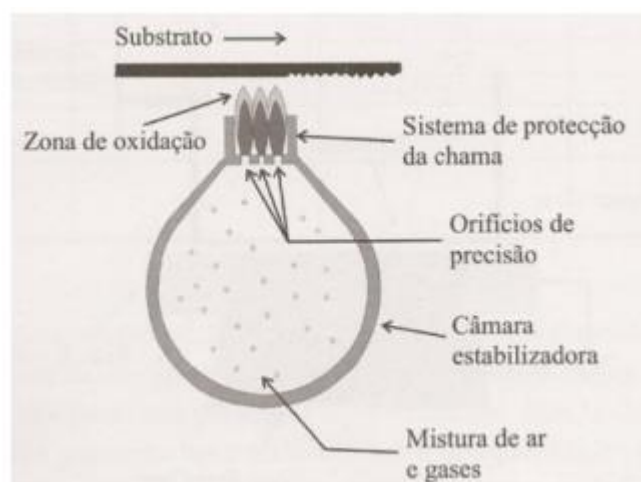


Figura 13- Tratamento por chama [12]

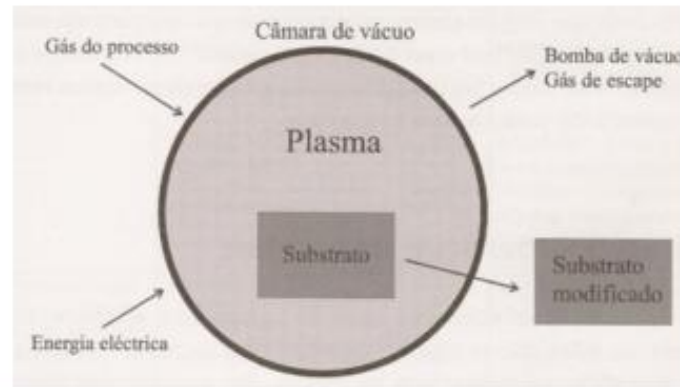


Figura 14- Tratamento por plasma [12]

2.2. Tipos de esforços em juntas adesivas

A existência de várias geometrias possíveis para as ligações com adesivos torna importante a consideração dos esforços a elas associados, sobretudo na medida em que, como se referiu anteriormente, existem esforços para as quais a sua capacidade de resposta é consideravelmente inferior. Genericamente podemos referir que os principais esforços presentes numa junta adesiva são os de tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento.

2.2.1. Tração e Compressão

Quando atuam forças perpendiculares ao plano de corte, desenvolvem-se tensões de tração, Figura 15(superior). As tensões normais distribuem-se de forma uniforme ao longo da área colada. Na geração da junta as superfícies dos substratos devem ser paralelas e as forças perfeitamente perpendiculares a estas. Todavia, devido à dificuldade em controlar a espessura do adesivo e ao facto das forças raramente serem precisamente axiais, originam-se tensões de clivagem e de arrancamento nas extremidades da zona de sobreposição [16]. As forças de compressão tendem a comprimir um substrato contra o outro, Figura 15(inferior). A distribuição da tensão de compressão pelo adesivo é constante, tal como acontece para as forças de tração. Uma junta em compressão pura praticamente não precisa de adesivo [17].

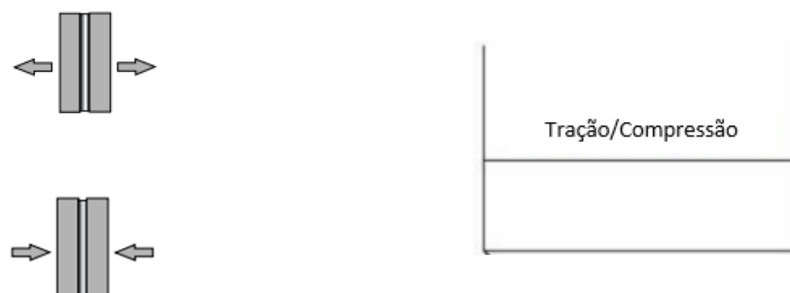


Figura 15-Esforços de tração e compressão e respetivas distribuições de tensões [18],[14]

2.2.2. Corte

As forças de corte, Figura 16, provocam o escorregamento entre os dois aderentes ou substratos. No caso de uma junta de sobreposição simples é possível notar que as extremidades estão sujeitas a um maior nível de tensão do que a parte central. Isto deve-se ao efeito de deformação diferencial de cada um dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição, uma vez que cada aderente se deforma longitudinalmente a uma taxa crescente desde a sua extremidade até à extremidade oposta da sobreposição [17]. Face ao facto de que este efeito se torna mais presente com o aumento do comprimento de sobreposição, pode afirmar-se que a largura de sobreposição tem mais importância que o comprimento. O aumento da largura torna a junta mais resistente, pois aumenta a área em cada extremo da zona de sobreposição, local onde os níveis de tensão são mais elevados.

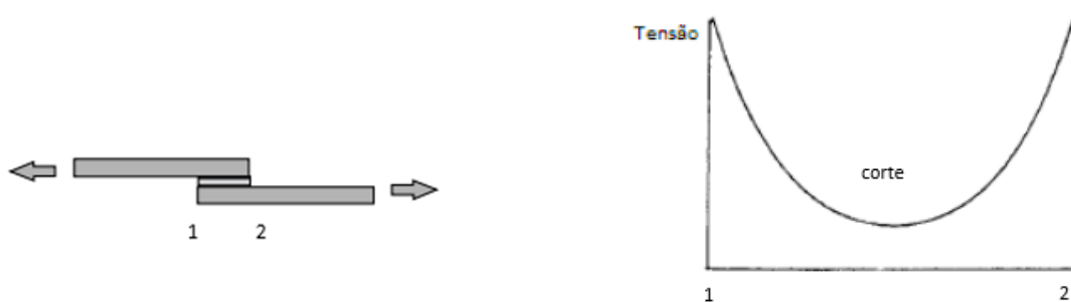


Figura 16- Esforço de corte e respetiva distribuição de tensões [18],[19]

2.2.3. Clivagem

Este tipo de sollicitação, Figura 17, ocorre quando uma força de tração é aplicada na extremidade da zona de sobreposição provocando um esforço de clivagem sobre a camada adesiva.

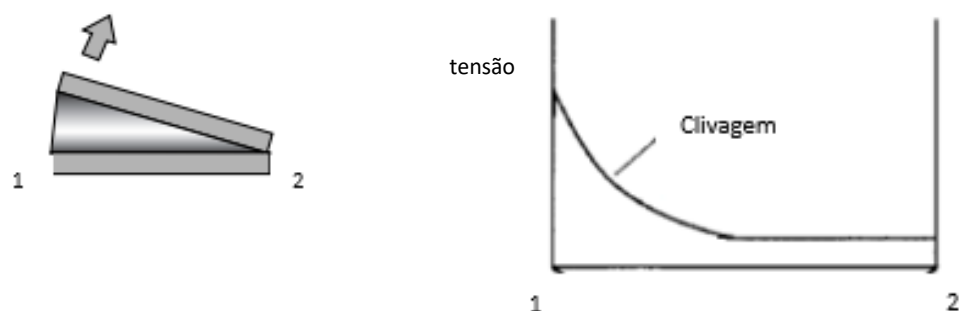


Figura 17- Esforço de clivagem e respetiva distribuição de tensões [6], [20]

2.2.4. Arrancamento

Os esforços de arrancamento, Figura 18, são um caso bastante parecido de clivagem. Porém, no caso do arrancamento acontece que um ou mais dos aderentes são flexíveis o suficiente podendo deformar plasticamente por ação das forças aplicadas, levando à concentração de forças trativas numa zona mais localizada numa das extremidades da ligação.



Figura 18-Esforço de arrancamento e respectiva distribuição de tensões [18],[19]

2.3. Modos de Rotura

De acordo com o que refere a norma ASTM D 5573 – 99 [21] os principais modos de rotura numa junta adesiva podem ser classificados como:

- rotura adesiva (rotura que ocorre na interface entre o aderente e o adesivo);
- rotura coesiva (rotura que ocorre no interior do adesivo);
- rotura mista;
- rotura do substrato.

Embora a rotura deva ser sempre evitada, o modo mais favorável para o adesivo, caso ocorra, é a rotura coesiva. Este modo de rotura demonstra que a adesão do adesivo ao substrato foi bem concebida e que existiu uma preparação superficial correta. Na Figura 19 é possível observar a diferença entre uma rotura adesiva e uma rotura coesiva:

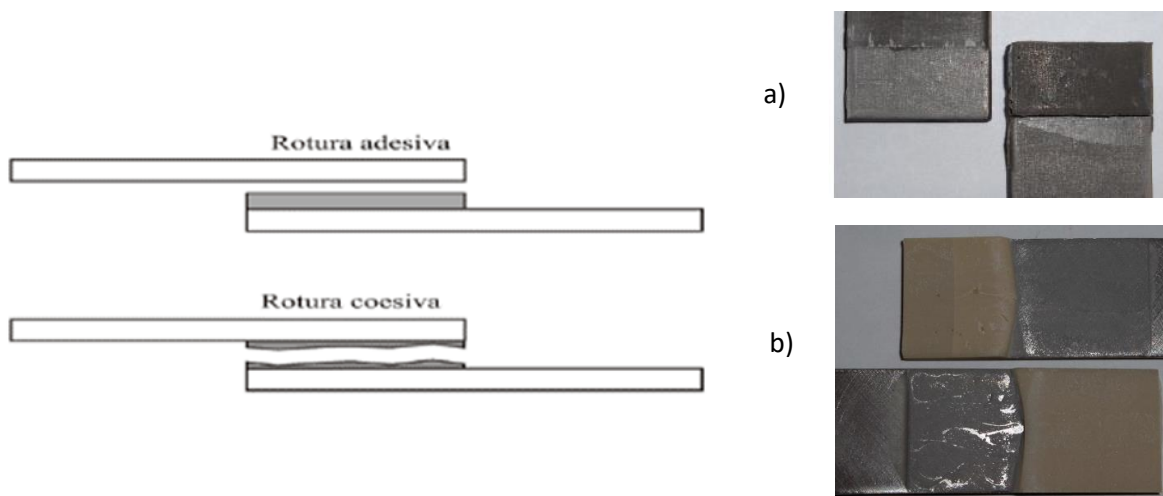


Figura 19-Representação esquemática de uma rotura adesiva e de uma rotura coesiva. a) rotura adesiva, b) rotura coesiva [17], [22]

2.4. Resistência da junta

É importante salientar que a resistência de um adesivo e a resistência de uma junta são conceitos completamente diferentes, na medida em que, um adesivo mais resistente não proporciona obrigatoriamente uma junta mais resistente. A resistência de uma junta colada é influenciada por diversos fatores, entres os quais: as propriedades do material envolvido (adesivo e substrato), parâmetros geométricos da junta (comprimento e largura da sobreposição, geometria dos substratos, espessura do adesivo, entre outros), efeitos térmicos.

Como refere Carbas [23], a resistência da junta aumenta significativamente para valores pequenos da razão entre o comprimento de sobreposição (l) e a espessura do substrato (t). Mas a partir de determinados valores de l/t , o ganho se resistência é marginal e o peso do conjunto aumenta desnecessariamente. Para os adesivos frágeis e substratos de aço duro verifica-se que a partir de um determinado comprimento de sobreposição, o aumento deste não se repercute na resistência da junta, sendo ditada pelas características do adesivo. No caso de substratos que se deformam plasticamente a resistência da junta é ditada pelas características do substrato (domínio plástico) e o aumento do comprimento de sobreposição não se repercute na resistência da junta.

A espessura do adesivo é talvez um dos fatores mais importantes no que toca a garantir uma boa resistência da junta. Para cada tipo de adesivo existe uma espessura definida que garante a melhor resistência do mesmo. Para a maioria dos adesivos estruturais esta espessura está, geralmente, compreendida entre 0,1 e 0,2 mm. Espessuras que ultrapassem o valor recomendado terão um impacto direto na resistência da junta provocando um decréscimo da mesma.

Segundo da Silva e Crocombe [24], juntas de sobreposição simples mais espessas têm menor resistência considerando a plasticidade do adesivo. Uma análise elástica mostra que a distribuição de tensões numa linha de ligação fina é mais concentrada nas extremidades da sobreposição do que uma linha de ligação espessa, que tem uma distribuição de tensões uniforme. Portanto, uma linha de ligação fina atingirá a tensão de cedência a uma carga mais baixa do que uma ligação espessa. Contudo, quando a cedência ocorre em juntas mais espessas, há uma menor “reserva elástica” a sustentar o carregamento.

2.5. Efeito das condições ambientais na durabilidade das juntas adesivas

A durabilidade é um dos grandes problemas das juntas adesivas. O processo de degradação da junta adesiva é acelerado se estiver num ambiente húmido e a temperaturas moderadamente elevadas. As temperaturas elevadas aceleram o mecanismo de difusão da água junto à camada limite superficial (na interface adesivo-substrato), degradando as propriedades de adesão na interface. A difusão da humidade causa alterações dimensionais, cria tensões que provocam fissuração, baixa a temperatura de transição vítrea e pode, em certos casos, levar à hidrólise do próprio adesivo [1]. A estabilidade térmica do adesivo no seu interior e a estabilidade térmica do adesivo na camada limite são partes que devem ser consideradas quando as temperaturas são elevadas [25]. Na Figura 20 pode observar-se a tensão de rotura de juntas de aço macio coladas com um epóxido, sujeita a um envelhecimento a diferentes temperaturas. Pode verificar-se a crescente diminuição da tensão de rotura com o aumento da temperatura e da humidade relativa de 100%, comparativamente com as condições normais (20°C, 55% humidade relativa).

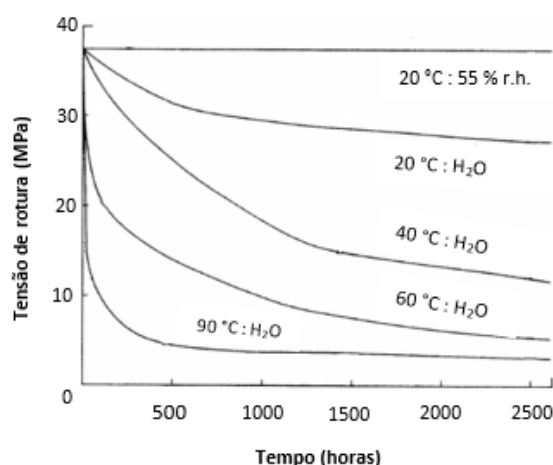


Figura 20-Tensão de rotura vs tempo de envelhecimento, para substratos em aço macio e adesivo de epóxico [26]

O comportamento das juntas adesivas depende fortemente das condições de carregamento e das condições ambientais mais agressivas como a radiação ultravioleta (UV), variações de temperatura e altos níveis de humidade e salinidade. A temperatura e a humidade estão entre os fatores considerados mais importantes no desempenho e têm sido largamente objeto de numerosos estudos, uma vez que colocam desafios consideráveis em grande número de aplicações estruturais. Os adesivos são materiais de natureza polimérica, alguns bastante higroscópicos, mas sempre capazes de absorver quantidades importantes de humidade que levam à formação de mecanismos de absorção e transporte de água responsáveis pela degradação dos mecanismos de ligação intermolecular. O resultado pode motivar situações de inchamento, amolecimento e diluição que afetam as propriedades mecânicas e reduzem a capacidade de resistência estrutural.

Citados por Moraes [27], estudos conduzidos por Zhou *et al* [28] realizados para avaliar o coeficiente de difusão de três sistemas de resina de epóxico em diferentes temperaturas, Tabela 2, mostrou que um aumento da temperatura causou um aumento no coeficiente de difusão e, portanto, uma maior percentagem de água absorvida pelo sistema epoxídico.

Estes resultados foram similares aos encontrados em estudos com adesivos de poliuretano, conforme Bhagavathi, *et al* [29].

Tabela 2- Coeficientes de difusão em diferentes temperaturas para os sistemas de epóxico (adaptado de Zhou, et al)

Sistemas de epóxico	D45 (m ² /s)	D60 (m ² /s)	D75 (m ² /s)	D90 (m ² /s)
TGDMM + DDS	3,13 x 10 ⁻¹¹	6,61 x 10 ⁻¹¹	1,15 x 10 ⁻¹⁰	2,35 x 10 ⁻¹⁰
DGEBA + Mpda	3,35 x 10 ⁻¹¹	7,93 x 10 ⁻¹¹	1,35 x 10 ⁻¹⁰	3,14 x 10 ⁻¹⁰
Fiberite 934	2,08 x 10 ⁻¹¹	5,03 x 10 ⁻¹¹	8,96 x 10 ⁻¹⁰	1,34 x 10 ⁻¹⁰

Segundo Zhou [28] as moléculas de água ligam-se à resina de epóxido por meio de ligações de hidrogénio, classificadas em dois tipos, I e II. As ligações do tipo I correspondem a uma molécula de água que forma uma única ligação de hidrogénio com a rede da resina, sendo mais fácil de ser removida. Nas ligações do tipo II uma molécula de água liga-se à rede da resina através de múltiplas ligações de hidrogénio, sendo mais difícil de ser retirada. A quantidade de água ligada do tipo II depende fortemente do tempo e temperatura de exposição, de forma que quanto maior forem, maior o volume de água ligada por este tipo, fazendo com que o material fique fragilizado. A água ligada pelo tipo I resulta no aumento da mobilidade da cadeia polimérica, atuando como plastificante, enquanto a água ligada pelo tipo II atua na formação de pontes entre os segmentos estruturais, resultando numa reticulação secundária na cadeia polimérica.

Outro estudo realizado por Zhou *et al* [30] aponta que a variação na temperatura de transição vítrea (T_g) da resina de epóxido exposta a um envelhecimento higrotérmico segue a seguinte racionalização:

- (i) a mudança na T_g não depende somente da quantidade de água absorvida;
- (ii) T_g é influenciada pelo histórico higrotérmico do material;
- (iii) para um dado sistema de resina de epóxido, maiores tempos de exposição à temperatura resulta numa maior T_g ;
- (iv) os dois tipos de ligação da água na resina influenciam a T_g de modo distinto e praticamente opostas, onde um dos tipos atua como plastificante, aumentando a mobilidade da cadeia polimérica, causando uma ampla redução da T_g . No segundo tipo diminui T_g como resultado da reticulação secundária.

2.6. Efeitos dos ciclos térmicos na durabilidade

Para além dos efeitos deteriorantes que temperaturas extremas, sejam elas altas ou baixas, provocam nos materiais (adesivo e substrato), existe uma evidente preocupação com os ciclos térmicos. Preocupação essa que advém do facto de existir uma potencial dissimilaridade dos coeficientes de expansão térmica dos aderentes e do adesivo e, conseqüentemente, aparecimento de tensões internas interfaciais.

Segundo Sousa J.M *et al* [31], existem estudos que comprovam que são desenvolvidas tensões internas durante os ciclos térmicos. Quando a temperatura aumenta são formadas tensões de tração devidas a expansão térmica, e quando a temperatura diminui formam-se tensões de compressão. Estas mudanças cíclicas de tensão e temperatura podem levar ao aparecimento de microfissuras e contração do adesivo. Nas juntas adesivas a exposição a estes ciclos térmicos tem um impacto negativo na resistência, sendo que esta diminui.

Ao contrário do que acontece quando a junta é aquecida, em que se formam tensões residuais, quando a junta é arrefecida, a relaxação das tensões reflete-se no aumento da tensão interfacial entre o substrato e a camada adesiva. As temperaturas mais baixas reduzem a mobilidade da cadeia polimérica, e essas tensões de tração não podem ser relaxadas no mesmo estado de tensão inicial até que o ciclo seguinte se inicie. Deste modo, resulta um acumular de tensões térmicas de baixa temperatura dentro de cada ciclo. Esse efeito cumulativo leva ao aumento de tensões residuais que podem eventualmente promover a falha.

2.6.1. Efeitos a curto prazo

Petri, E.M [4] refere que tensões localizadas ocorrem maioritariamente devido aos efeitos imediatos de temperatura e a diferenças no coeficiente de expansão térmica. Tensões térmicas podem facilmente ocorrer durante a vida útil da junta.

Se a temperatura for uniforme ao longo da ligação, a tensão aproximada (para uma ligação rígida fina) pode ser calculada por:

$$S = \frac{\Delta T(k_1 - k_2)}{\left(\frac{1}{E_1}\right) - \left(\frac{1}{E_2}\right)} \quad (1)$$

em que:

S= tensão de corte no adesivo devido às taxas de expansão térmica diferenciais dos substratos, sem considerar a tensão adesiva;

E1, E2= Módulo de Young dos substratos;

ΔT = diferença de temperatura entre temperatura de tensão 0 e temperatura de serviço;

K1, k2= coeficientes de expansão térmica dos substratos.

No caso em que os substratos são rígidos e o adesivo é relativamente flexível e espesso, a maior tensão no adesivo, que ocorre na extremidade da junta, pode ser aproximada pela relação:

$$S = \Delta T(k_1 - k_2)\left(\frac{GL}{2d}\right) \quad (2)$$

sendo:

S= tensão de corte no adesivo devido às taxas de expansão térmica diferenciais dos substratos, sem considerar a tensão adesiva;

G= Módulo de corte do adesivo;

d= espessura do adesivo;

L= comprimento da junta.

Estas expressões excluem a capacidade de deformação do adesivo ou dos substratos, daí serem apenas uma aproximação. Alguns métodos que permitem aliviar esta tensão consistem na utilização de materiais mais flexíveis ou tentativas de combinar melhor os coeficientes de expansão térmica [4]. As fissuras ocorrem quando a tensão localizada é suficientemente grande para conseguir separar fisicamente os substratos. Quando a separação da ligação surge como uma falha no adesivo, geralmente está relacionada com o facto de que uma fenda seguiu a superfície da interface ou porque algum produto químico deslocou o adesivo do substrato.

2.6.2. Efeitos a longo prazo

Dentro dos efeitos de longo prazo podemos considerar os efeitos provocados por esforços mecânicos, como é o caso da fluência, da relaxação ou, em casos de solicitações cíclicas, a fadiga, mas, também, os efeitos a longo prazo provocados pelos efeitos da exposição ambiental.

No caso particular da fluência, é importante realçar que, sendo um material de natureza polimérica, a fluência pode ocorrer no adesivo desde que seja aplicada uma carga suficiente. Geralmente é um processo lento, mas a fluência é mais pronunciada para temperaturas acima da temperatura de transição vítrea do adesivo (T_g).

A temperatura, radiação, humidade, fluidos, gases, carregamentos mecânicos e vácuo são os ambientes extremos mais comuns e são suficientes para causar falha prematura. A acumulação de diferentes estados de tensão (mecânica e química, por exemplo) pode muitas vezes ser um fator que é negligenciado em relação à falha adesiva. Também a combinação de carregamento cíclico com temperatura pode reduzir bastante a durabilidade.

Frequentemente estes vários efeitos atuam conjuntamente com os fatores ambientais. A resistência às condições ambientais necessariamente depende da aplicação. Esses requisitos devem ser estabelecidos antes que a configuração final das juntas e respetiva seleção do material sejam feitas.

Há momentos onde uma ligação curada e não tensionada falha sem razão aparente. Pode apresentar uma aparente falha adesiva sob baixa ou moderada carga após envelhecimento prolongado. Quando um comportamento deste tipo acontece, a causa é muitas vezes o deslocamento do adesivo da superfície por um produto químico do meio ambiente ou presente no substrato, Figura 21. A água, os solventes e até os gases, todos eles podem competir pelos locais de fixação de superfície. A humidade é de longe a substância mais eficaz para a desorção. As ligações conseguem resistir a este efeito apenas se as substâncias de baixo peso molecular não conseguirem penetrar a junta.

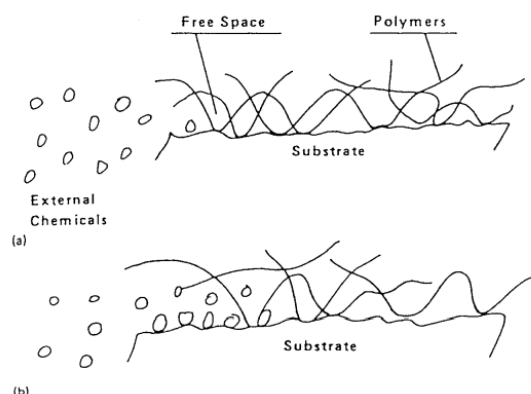


Figura 21-a) Adesivo adsorvido em locais de superfície. b) Adesivo deslocado de locais de superfície [32]

O envelhecimento ambiental causa no geral: tensões internas adicionais, degradação do adesivo, aderente ou interfase ou criação de novas regiões de interfase. A tensão adicional aplicada à ligação adesiva devido ao ambiente pode contribuir de forma positiva ou negativa para as tensões já inerentes à junta. Estes mecanismos de degradação levam a uma diminuição na força de coesão do adesivo. Um exemplo disso é o aquecimento térmico. Este aquecimento pode causar inicialmente

o amolecimento do adesivo e, em seguida, aquecimento adicional leva à oxidação e, finalmente, decomposição das cadeias moleculares. Exposição à humidade pode causar enfraquecimento da ligação coesiva através de um mecanismo de reação de hidrólise. É possível concluir que, as condições ambientais têm, a longo prazo, um grande impacto no que é a resistência da junta.

2.6.3. Estudos experimentais

A literatura refere vários exemplos de estudos experimentais onde os efeitos ambientais sobre a durabilidade das juntas adesivas foram considerados.

Heshmati *et al* [18] realizaram um estudo onde apresentam um método para medir diretamente as leis de coesão dependentes do ambiente de um adesivo estrutural carregado em Modo-I e Modo-II puros. Foram consideradas 3 condições de exposição para avaliar os efeitos da humidade na ligação adesiva. A temperatura de envelhecimento selecionada foi de 45°C de modo a acelerar a difusão da humidade, uma vez que, esta temperatura está 10°C abaixo da temperatura de transição vítrea do adesivo e acredita-se que acelera a difusão da humidade sem ocorrer ativação de reações indesejadas. As condições de exposição foram:

- (i) 45DW: imersão em água destilada a 45°C
- (ii) 45SW: imersão em 5% NaCl água salgada a 45°C
- (iii) 45RH: exposição até 95% humidade relativa a 45°C

Entre 12 amostras, três com provetes DCB (Double Cantilever Beam) e três com provetes ENF (End-Notched Flexure) foram testadas após envelhecimento de 90 dias. As restantes foram colocadas numa câmara ambiental de modo a serem submetidas a ciclos adicionais de congelamento e descongelamento. Para além disso, 3 amostras sem envelhecimento de DCB e mais três de ENF foram submetidas aos ciclos de congelamento e descongelamento. A câmara ambiental utilizada foi programada continuamente de modo a repetir um ciclo térmico como o da Figura 22. As amostras foram então descongeladas durante 6h a +20°C e então a temperatura foi reduzida a uma taxa de 1°C/min para -20°C na qual foram submetidos a 6h de congelamento. Foram realizados testes às amostras de gelo e degelo após serem completados 250 ciclos [18].

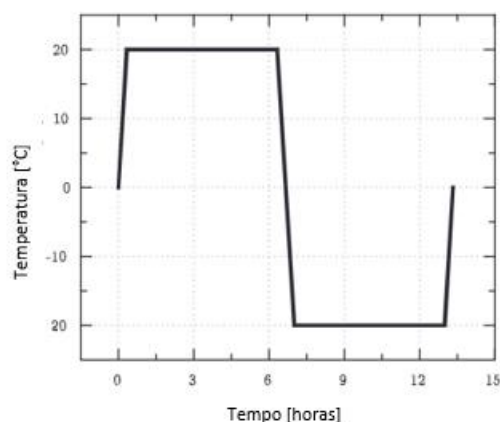


Figura 22- Ilustração de um ciclo de congelamento e descongelamento (adaptado de [18])

Como resultado foi possível observar que o modo de falha da maioria dos provetes submetidos a ciclos de congelamento e descongelamento adicionais foi o de rotura coesiva. A única exceção foi a falha de descolagem interfacial do provete inicialmente envelhecido em 45DW. Esta observação pode dever-se ao facto de o envelhecimento na condição 45DW ter levado a um maior teor de humidade da camada adesiva entre os ambientes testados [18].

Na Figura 23 são apresentadas as leis de coesão do adesivo submetido a ciclos de congelamento-descongelamento na presença/ausência de humidade. Na Tabela 3 são indicados os parâmetros em Modo I e II resultantes do efeito misto de humidade e ciclos de gelo/degelo. Os resultados experimentais mostram que, geralmente, as leis de coesão obtidas para cada cenário de exposição seguem tendências semelhantes.

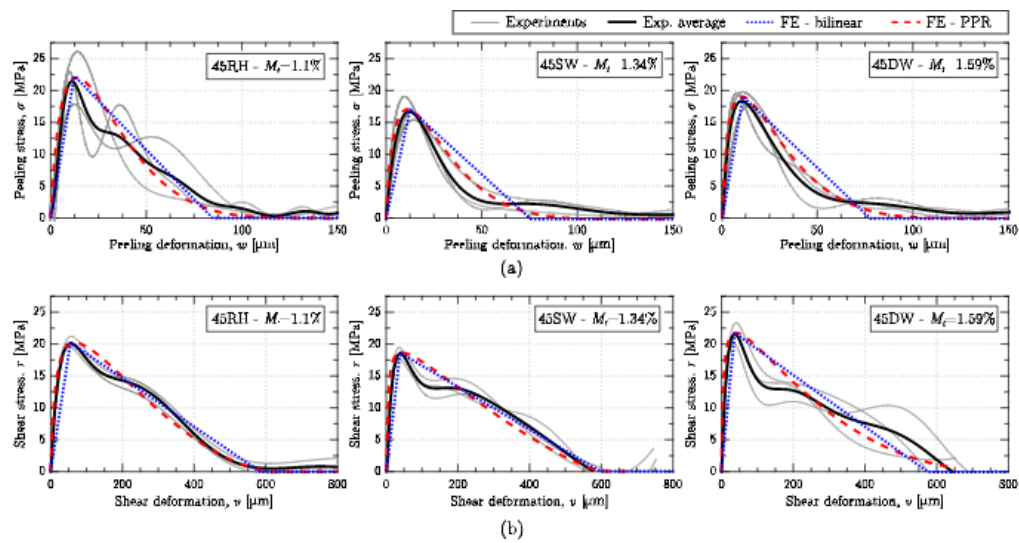


Figura 23-Dependência das leis coesivas relativamente à humidade: a) Leis coesivas Modo I, b) Leis coesivas Modo II [18]

Tabela 3-Efeito da combinação da humidade com ciclos de gelo/degelo em Modo I e Modo II [26]

Condition	Mode I (DCB configuration)					Mode II (ENF configuration)				
	Specimen ID	\bar{f}_i [J/m^2]	σ_{max} [MPa]	w_c [μm]	w_1 [μm]	Specimen ID	\bar{f}_i [J/m^2]	τ_{max} [MPa]	v_c [μm]	v_1 [μm]
Dry + freeze-thaw	DFC1	770	17	182	14	EFC1	4813	25.4	393	40
	DFC2	824	19.7	108	13	EFC2	5299	26.4	322	70
	DFC3	811	16.7	126	18	EFC3	5054	21.8	418	64
	Avg. (\pm SD)	802 (\pm 23)	17.8 (\pm 1.3)	139 (\pm 31)	15 (\pm 2)	Avg. (\pm SD)	5055 (\pm 198)	24.5 (\pm 2.0)	378 (\pm 58)	58 (\pm 13)
45RH + freeze-thaw	DFR1	779	16.2	103	15	EFR1	5889	33.1	432	37
	DFR2	753	17.4	118	15	EFR2	5747	23.7	647	28
	DFR3	827	15.9	115	16	EFR3	6569	31.5	472	57
	Avg. (\pm SD)	786 (\pm 31)	16.5 (\pm 0.6)	112 (\pm 7)	15 (\pm 1)	Avg. (\pm SD)	6068 (\pm 424)	29.4 (\pm 4.1)	517 (\pm 93)	41 (\pm 12)
45SW + freeze-thaw	DFS1	716	16.9	132	13	EFS1	4282	31.6	251	34
	DFS2	723	20.5	107	10	EFS2	4930	27	271	40
	DFS3	700	17.3	118	10	EFS3	4600	24.8	307	40
	Avg. (\pm SD)	713 (\pm 15)	18.2 (\pm 1.6)	119 (\pm 10)	11 (\pm 1)	Avg. (\pm SD)	4604 (\pm 264)	27.8 (\pm 2.8)	276 (\pm 23)	38 (\pm 3)

Na Tabela 4 são indicadas algumas condições experimentais utilizadas por diferentes autores em ensaios de gelo/degelo. Estas condições permitem estabelecer uma referência para o programa previsto na dissertação.

Tabela 4- Recolha de dados para estudo experimental

Número de ciclos	Intervalo de temperatura	Duração	Autor do Artigo
3 sets (150, 250, 350)	-5 °C e 40 °C	6h à T _{mín} + 6h à T _{máx}	Sousa, João M. et al [31]
250 ciclos	-20 °C e 20 °C	12h à T _{mín} + 12h à T _{máx}	Yang, Yongming et al [19]
200 ciclos	-25 °C e 20 °C	4h à T _{mín} + 4h à T _{máx}	Shi, Jia-Wei et al [22]
4 sets (10,25,75,100)	-18 °C e 25 °C	20 min à T _{mín} + 20 min à T _{máx}	Abadi, Mohammad et al [33]

2.7. Ensaios de durabilidade

As propriedades mecânicas dos adesivos são analisadas recorrendo a ensaios mecânicos. O desempenho do adesivo, quer na sua forma maciça, quer quando aplicado numa junta, depende das suas propriedades intrínsecas. As propriedades mecânicas, seja no domínio elástico ou no domínio plástico, bem como o seu comportamento à fratura são determinadas pela realização de ensaios normalizados. Por exemplo, os ensaios de tração, compressão, dureza, fadiga, corte, entre outros. Contudo, os adesivos podem, também, ser avaliados e analisados quanto à sua capacidade para resistir a condições ambientais adversas, recorrendo a ensaios de durabilidade. Estes ensaios permitem avaliar o efeito no comportamento adesivo, bem como o efeito que a preparação superficial tem no desempenho da junta. Podem ser divididos em dois tipos: os que têm como objetivo avaliar as condições ambientais isoladamente e os que avaliam a combinação do efeito das condições ambientais com o carregamento.

2.7.1. Ensaios para caracterização das condições ambientais isoladamente

Estes são ensaios de curta duração cujo objetivo consiste em sujeitar, durante algum tempo, as juntas adesivas a condições ambientais. As condições ambientais são pré-definidas e, geralmente, normalizadas. Posteriormente as juntas são submetidas aos respetivos ensaios e é possível relacionar a resistência da junta sem qualquer exposição às condições ambientais e a resistência da junta após ser envelhecida [1]. Entre os ensaios correntemente utilizados citam-se o ensaio em juntas de sobreposição simples, após exposição mínima de 40 horas às condições ambientais adversas e o ensaio de cunha, conhecido como *wedge test*.

Determinação da durabilidade em junta de sobreposição simples

Consiste num ensaio de tração em juntas de sobreposição simples, cuja metodologia recorre à norma ASTM D1002. As Figura 24 e Figura 25 mostram, respetivamente, como é realizada a preparação e montagem dos provetes, segundo as recomendações da norma anteriormente referida. O provete é constituído por chapas de 1,5 mm.

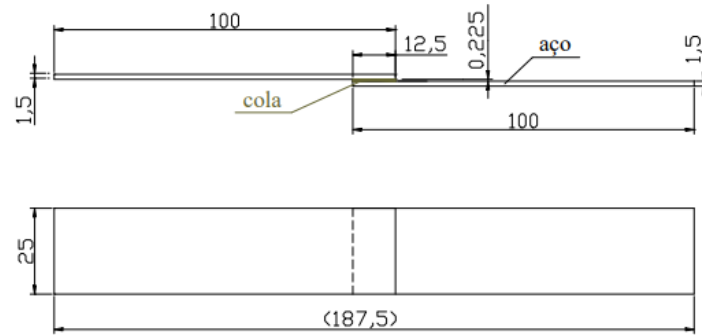


Figura 24-Geometria do provete JSS segundo a norma ASTM D1002 [35]

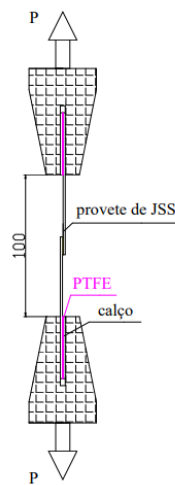


Figura 25-Montagem para o ensaio à tração segundo a norma ASTM D1002

Determinação da durabilidade através do ensaio de cunha

Este ensaio, representado esquematicamente na Figura 26 é normalizado através da ASTM D3762, contudo, não é habitualmente considerado um ensaio quantitativo. Como o nome indica, neste ensaio recorre-se ao uso de uma cunha, a qual é forçada através da camada de adesivo. Deste modo cria-se um esforço de arrancamento com o objetivo de caracterizar o tipo de rotura (capítulo 2.3).

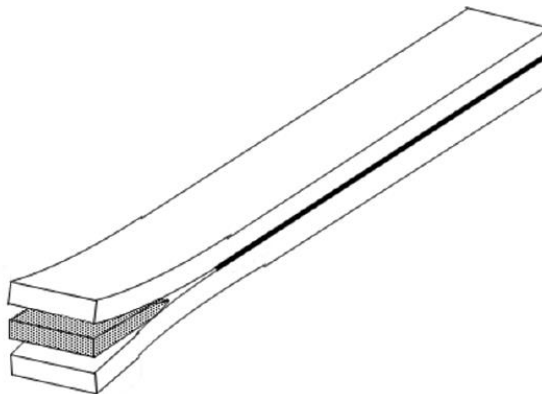


Figura 26- Ensaio de cunha (wedge test) segundo a norma ASTM D3762 [34]

2.7.2. Ensaios para caracterização do efeito combinado de carregamento e condições ambientais

Para a caracterização do efeito combinado de carregamento e condições ambientais existem quatro tipos de ensaios:

- determinação da durabilidade de juntas de sobreposição simples em tensão;
- determinação da durabilidade através do ensaio de Maddison (junta perfurada);
- determinação da durabilidade por arrancamento (junta em T);
- avaliação das condições ambientais no comportamento à fadiga.

Apesar de serem referidos os quatro tipos de ensaios, para a presente dissertação será utilizado apenas o de determinação da durabilidade de juntas de sobreposição simples em tensão, o qual será explicado de forma sucinta no tópico seguinte.

Determinação da durabilidade de juntas de sobreposição simples em tensão

O procedimento deste ensaio é descrito pela norma ASTM D2919. Existem dois dispositivos possíveis para realizar o ensaio sendo que um deles é também utilizado para o ensaio de fluência, Figura 28. São colocados no mínimo 6 provetes nos dispositivos referidos sendo carregados primeiro até cerca de 1% da carga desejada e, após reaperto dos parafusos, carregados até à carga total. É registado o tempo total para a rotura.

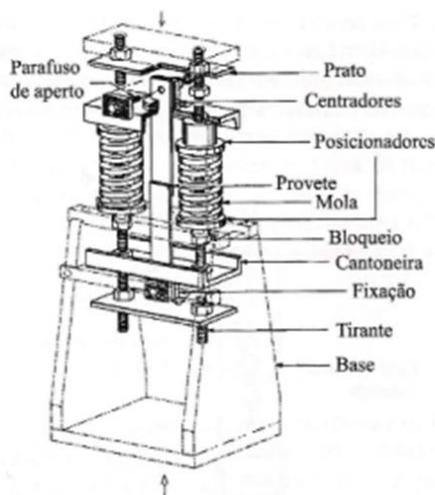


Figura 27-Dispositivo para ensaio de durabilidade em JSS, ASTM D2919 [1]

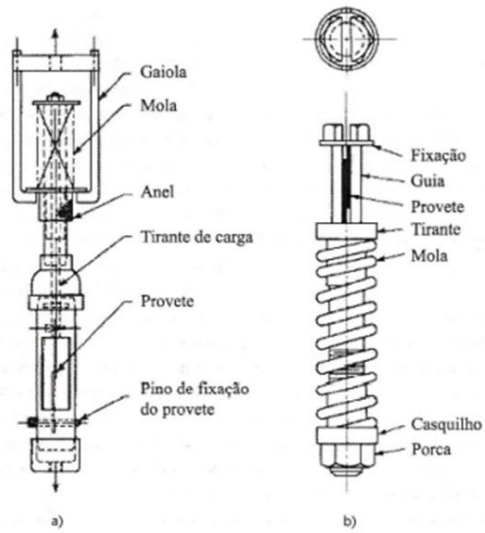


Figura 28- Dispositivo para ensaios de fluência, ASTM D2294-96 a) mola à tração, b) mola à compressão [1]

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os materiais e métodos empregues no desenvolvimento da componente experimental, nomeadamente, a escolha dos adesivos, a preparação superficial dos substratos, a realização das juntas e dos provetes “bulk” para caracterização dos adesivos utilizados.

No sentido de alargar as conclusões do programa experimental a duas diferentes tipologias de comportamento, foram escolhidos dois adesivos, um dúctil e um frágil. A opção recaiu sobre os adesivos Araldite 420 A/B (dúctil) e Araldite AV 138 (frágil).

3.1.1. Araldite 420 A/B

A composição deste adesivo é formada por uma resina de epóxido e um endurecedor, nomeadamente, Araldite A e Araldite B, Figura 29. Este adesivo apresenta um elevado esforço de corte, mesmo a temperaturas até 70°C. A cura deste tipo de adesivo é realizada à temperatura ambiente. As suas características técnicas são apresentadas no Anexo A.

Este adesivo bi-componente é formulado nas proporções de 100 para 40, isto é, 100 gramas de resina para 40 gramas de endurecedor. À temperatura ambiente apresenta o aspeto de uma pasta. Possui um tempo de manuseamento (*handling time*) de cerca de 5 horas e após a sua aplicação, demora entre 2 e 4 horas até atingir a textura de gel, a uma temperatura de 25°C. O processo de cura pode dar-se como concluído ao fim de 1 a 2 semanas à temperatura ambiente. Após finalizada a cura, o adesivo atinge as suas características máximas de resistência [35].



Figura 29 - Araldite 420 A/B.

3.1.2. Araldite AV 138

O adesivo AV 138 é um bi-componente, constituído por uma resina de epóxido (AV 138) e um endurecedor (HV 998), conforme representado na figura 30. Apresenta cura à temperatura ambiente, se combinado nas proporções certas. Deve seguir a razão de mistura de 100/40, ou seja, por cada 100 gramas de resina devem ser adicionados 40 gramas do endurecedor [36] Apresenta elevada rigidez e resistência mecânica mesmo quando a ligação é exposta a ambientes agressivos ou a altas temperaturas. As suas características técnicas, especificadas pelo fabricante, são apresentadas no Anexo B.



Figura 30 - AV 138M/HV 998.

3.1.3. Temperatura de transição vítrea, T_g

O conhecimento da temperatura de transição vítrea (T_g) é de grande importância no que toca à seleção de polímeros para projetos de engenharia. Com a alteração da temperatura, as propriedades dos polímeros são modificadas e ao atingir-se a T_g , dá-se a passagem de um estado vítreo para um estado de amolecimento [37]. A temperatura de transição vítrea relaciona-se com o movimento molecular. Para valores acima da T_g as cadeias poliméricas movem-se livremente, o que resulta num polímero muito flexível. Abaixo da T_g , uma vez que as cadeias possuem menor mobilidade, a estrutura do polímero é “congelada”, resultando um comportamento vítreo. A temperatura de transição vítrea é conhecida por marcar uma alteração das propriedades dos polímeros, nomeadamente a densidade, a rigidez, a capacidade de amortecimento e o coeficiente de expansão [38].

A temperatura de transição vítrea é uma propriedade com bastante importância para este estudo, tendo-se optado por um intervalo de temperaturas de ensaio que permitisse ciclos de gelo/degelo oscilando períodos acima e abaixo das temperaturas de transição dos adesivos escolhidos. Este objetivo tornou-se possível porque as temperaturas de transição vítrea de ambos os adesivos são semelhantes. Segundo um estudo realizado por Carbas [39], para um adesivo AV 138M/HV 998 medido por DSC para uma cura de 4 h a 60 °C, a T_g é aproximadamente de 85 °C. Para o adesivo de Araldite 420 A/B, consta da sua “*data sheet*” que, para um processo de cura de 16h a temperatura de 40°C, a temperatura de transição vítrea é de 56°C. Estes valores foram utilizados como valores de referência para a definição do ciclo de gelo/degelo.

3.2. Fabrico dos provetes de adesivo

Para além do fabrico das juntas, foram produzidos provetes de adesivo (bulk), com vista a avaliar como os mesmos se comportam de modo isolado quando colocados na câmara ambiental, submetidos às mesmas condições de temperatura e ao mesmo número de ciclos que as juntas adesivas.

O seu fabrico foi realizado em 3 passos: Preparação do molde, preparação e aplicação do adesivo e cura.

3.2.1. Preparação do molde

No molde, representado na Figura 31, com capacidade para a realização simultânea de 6 provetes, foi aplicado o desmoldante *Paste Wiz* de modo a garantir a fácil remoção. Este procedimento foi adotado para os dois adesivos e foram produzidos 6 provetes de cada adesivo para a caracterização do comportamento “bulk”.



Figura 31 - Molde para fabrico de provetes de adesivo.

3.2.2. Aplicação do adesivo

O adesivo Araldite 420 A/B foi preparado através da mistura nas proporções de 100g de resina para 40g de endurecedor, utilizando-se para o efeito a pesagem numa balança com resolução de 0,1g. Foi realizada a mistura convenientemente até ficar homogénea e com uma cor esverdeada, Figura 32.

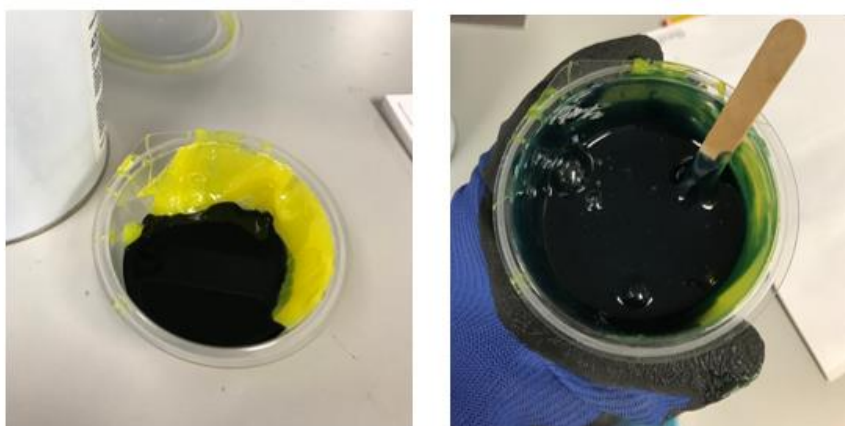


Figura 32- Mistura do epóxido (A) com o endurecedor (B)

Após a mistura procedeu-se à aplicação no molde, Figura 33, procurando evitar a formação de bolhas de ar para garantir a integridade dos provetes. O processo de cura decorreu durante 72h à temperatura ambiente. Após retirados do molde, verificou-se que 4 em 5 provetes apresentavam boas condições para ensaiar. Na Figura 34 é possível observar os provetes obtidos.



Figura 33- Preenchimento do molde com o adesivo

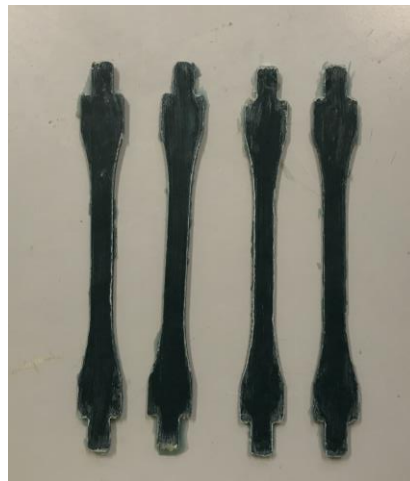
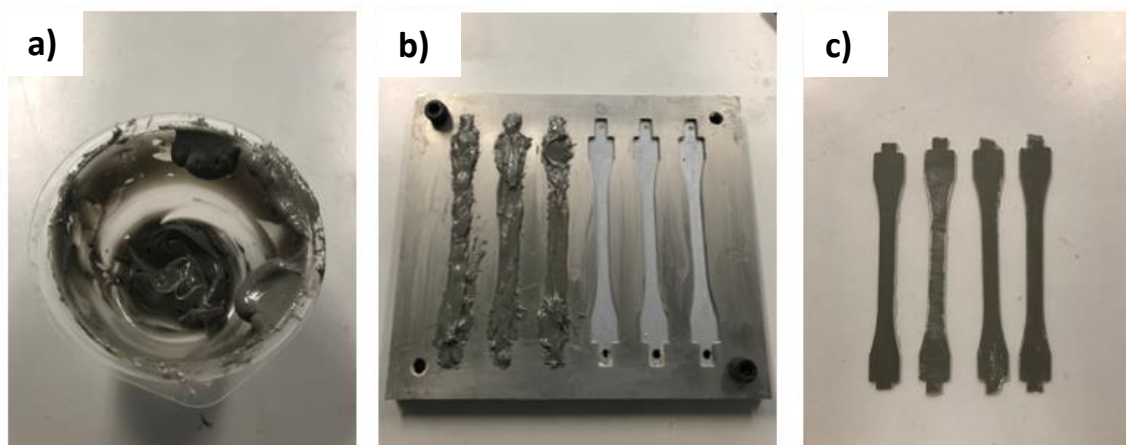


Figura 34- Provetes de adesivo Araldite 420 A/B

Relativamente à preparação dos provetes de Araldite 138M/HV 998, Figura 35, o procedimento foi exatamente o mesmo. Comparativamente à Araldite 420 A/B, a mistura de Araldite AV 138 apresentou-se mais “pastosa” dificultando o seu espalhamento pelo molde.



Legenda: a) preparação; b) aplicação no molde; c) aspeto final após retirada do molde

Figura 35-Preparação dos provetes de adesivo AV 138M/HV 998

3.3. Fabrico das juntas

O fabrico das juntas decorreu em três etapas: preparação superficial, aplicação do adesivo, cura remoção do excesso de adesivo. As três etapas são descritas de seguida.

3.3.1. Preparação superficial dos substratos

As juntas foram realizadas com substratos de alumínio comercial 1050, com dimensões nominais de 14,5x25 (mm) e espessura de 1 mm e 3 mm para aplicação dos adesivos AV138 e 420 A/B, respetivamente.

A preparação superficial iniciou-se pela remoção da sujidade com acetona. Em seguida passou-se à sua granalhagem com vista à remoção das camadas de óxido da superfície. O equipamento utilizado, figura 36, foi o CidBlast série RT 6S, uma pressão de 2,5 bar e granalha com óxido de alumina castanha. Depois da passagem de um jato de ar seco, os substratos foram novamente limpos com acetona, apresentando o aspeto ilustrado na figura 37.



Figura 36 - Máquina de granalhagem CidBlast série RT 6S.

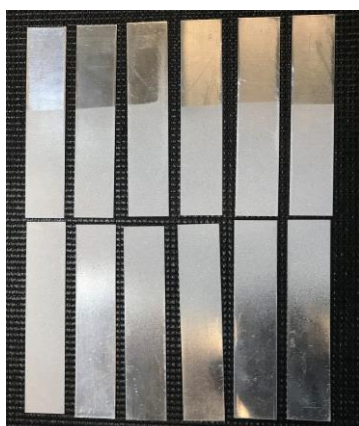


Figura 37 – Alguns dos substratos após a operação de granalhagem.

3.3.2. Colagem

A operação de colagem foi sempre realizada no mesmo dia em que a granalhagem foi efetuada de modo a impedir a formação de nova camada de óxidos.

A exata definição da área de colagem é um aspeto muito importante para a caracterização mecânica posterior. A geometria nominal da área de colagem foi de 14,5 x 25 (mm). Para garantir a espessura de 0,2mm, utilizaram-se dois fios de nylon dispostos paralelamente, como representado na Figura 38.



Figura 38 - Colocação dos fios de nylon para definição da espessura da camada adesiva.

3.3.3. Cura e remoção do adesivo em excesso

As juntas foram mantidas à temperatura ambiente durante 24 horas para se desenvolver o processo de cura. Durante este período manteve-se o seu posicionamento com recurso a um grampo, conforme ilustrado na Figura 39.



Figura 39 – Exemplo do processo de fixação adotado durante o processo de cura (exemplo das juntas AV 138M/HV 998).

Após manutenção por um período de 24 horas, as juntas foram sujeitas a um processo de remoção do excesso de adesivo, com uma lima e uma mó de face plana com granulometria muito baixa, como se pode observar na Figura 40.



Figura 40 - Remoção do excesso de adesivo.

Embora a preparação das juntas com o adesivo Araldite 420 A/B tenha seguido um procedimento semelhante ao utilizado com o adesivo AV138, são de ressaltar algumas notas: o tempo de cura foi de 48 horas à temperatura ambiente. Após verificação em ensaios prévios que a rotura ocorria pelo substrato, Figura 41, a área de colagem foi alterada para as dimensões nominais de 12,5 x 25 (mm) e a espessura dos substratos foi alterada para 3 mm.



Figura 41 - Rotura pelo substrato em juntas de adesivo Araldite 420 A/B em ensaio preliminar com espessura de substrato de 1 mm.

3.4. Medições

Recorrendo a um paquímetro digital, foram realizadas as medições de todas as juntas após finalizado o processo de fabricação. O conjunto completo dos resultados obtidos pode ser encontrado no Apêndice A.

3.5. Programação e colocação dos provetes na câmara climática

Para a realização dos ciclos térmicos de gelo e degelo foi usada a câmara climática Thermotron S/SM – 8200 representada na Figura 42. As câmaras desta série utilizam compressores hermeticamente fechados que proporcionam taxas moderadas de mudança de temperatura enquanto consomem menos energia do que outras câmaras comparáveis. Possuem uma janela aquecida que proporciona uma visão clara da área onde se realizam os testes e que é iluminada por uma luz interior. Para além disso possuem características avançadas como sensores eletrónicos de humidade e controlo de temperatura [40]. O intervalo de temperaturas em que esta câmara opera varia de -70°C a 180°C .

Considerando o objetivo de impor uma amplitude térmica com máximo acima de T_g e mínimo negativo abaixo de T_g , optou-se pela realização de ciclos entre as temperaturas máxima de 90°C e mínima de -10°C . Os ciclos foram programados para uma duração de 8h o que permitiu a realização de um ciclo e meio por dia. É importante salientar que o ciclo de 8h à temperatura máxima foi dividido em 2 partes, 7h são para manter a temperatura constante de 90°C e uma hora para fazer uma passagem gradual dos 90°C para os -10°C . A Figura 43 mostra o painel onde é possível efetuar a programação.



Figura 42- Thermotron S/SM 8200.

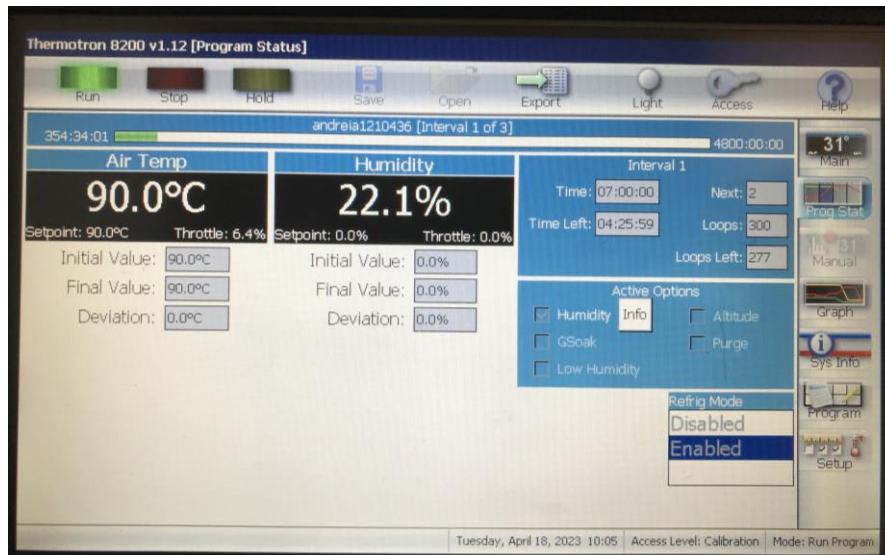


Figura 43 - Painel de programação.

Finalizada a programação, as juntas dos dois adesivos e os respectivos provetes bulk foram colocados na câmara como ilustra a Figura 44.



Figura 44 - Colocação das chapas na câmara térmica.

3.6. Ensaios de caracterização do comportamento

Neste tópico são apresentados os resultados relativos a todos os ensaios de caracterização mecânica dos substratos, adesivos e juntas antes e após a realização dos ciclos de gelo/degelo.

3.6.1. Propriedades mecânicas dos substratos

Para substratos foi utilizado o alumínio comercial com designação Al1050 cujas propriedades mecânicas são fornecidas pela fabricante e apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do Alumínio 1050

Resistência máxima à tração [MPa]	Rp0.2* [MPa]	Temperatura de fusão [°C]	Dureza Brinell HB	Deformação [%]
105-145	75	650	33	12

*Valores mínimos

3.6.2. Caracterização dos adesivos

As propriedades mecânicas dos provetes bulk para os adesivos AV138 e 420 A/B realizaram-se de acordo com a norma ISO 4587:2003 [41].

3.6.2. 1 – Condições iniciais

De um modo semelhante à chapa de alumínio os provetes bulk também foram submetidos a ensaios de tração para análise comparativa com os que foram colocados na câmara. O afastamento entre maxilas manteve-se em 120 mm bem como a velocidade de deslocamento de 5 mm/min. Na Figura 45 são apresentados os resultados do ensaio para o provete bulk de adesivo Araldite 420 A/B, cuja resistência máxima é de 24 MPa, que se aproxima do valor presente na *datasheet* que refere uma resistência máxima de cerca de 29 MPa e o módulo de elasticidade de 1,36 GPa semelhante aos 1,49 GPa do fornecedor.

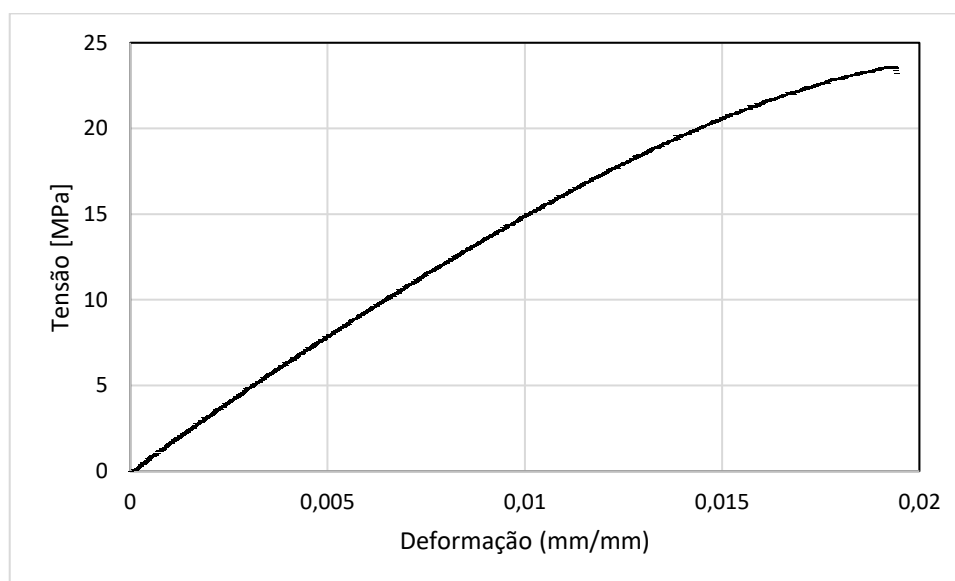


Figura 45 - Diagrama tensão versus deformação para provete bulk de Araldite 420 A/B sujeito a tração

Na Figura 46 de modo semelhante, são apresentados os resultados para o provete bulk em AV 138M/HV 998, cuja resistência máxima atinge os 24 MPa, e um módulo de elasticidade de 3,3 GPa.

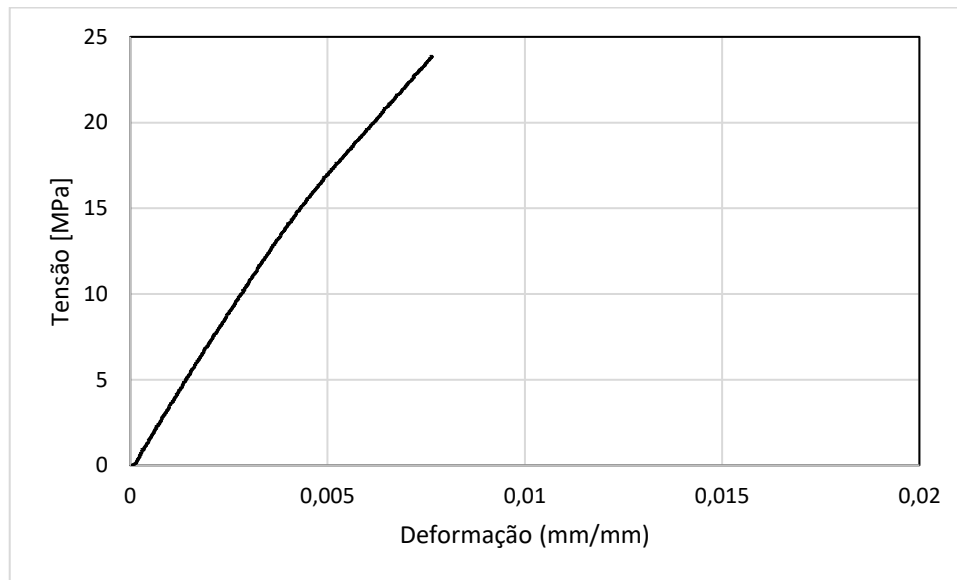


Figura 46 - Diagrama tensão versus deformação para provete bulk de AV 138M/HV 998 sujeito a tração

O valor obtido para o módulo de elasticidade é concordante com o indicado pelo fornecedor, mas a tensão máxima é inferior. O valor mais elevado indicado pelo fornecedor resulta da realização de um tratamento de pós cura que, no presente caso não foi realizado.

3.6.2.2 – Com influência dos ciclos de gelo e degelo

As Figura 47 e Figura 48 indicam a evolução registada por efeito do tempo de exposição. É notório o aumento de resistência verificada nos primeiros 40,5 ciclos, o que evidencia um efeito de pós cura inicial que aumenta a resistência mecânica relativamente às condições padrões. Este facto é visível nos dois adesivos ensaiados. Contudo, para 82,5 ciclos térmicos, que correspondem a 2 meses de ciclos, é notável o decréscimo sofrido tanto ao nível da tensão como da deformação, mais uma vez, para os dois adesivos. Para os provetes bulk de adesivo 420A/B a queda percentual de tensão é de 3% e de 20% para a deformação. No caso dos provetes bulk em adesivo AV138 a queda percentual de tensão é de 23% e de 61,5% para a deformação. É possível observar um maior impacto na queda percentual para os provetes bulk em adesivo AV138, resultando daí uma primeira conclusão de que para os dois adesivos em estudo, os ciclos de gelo/degelo afetam mais os adesivos frágeis.

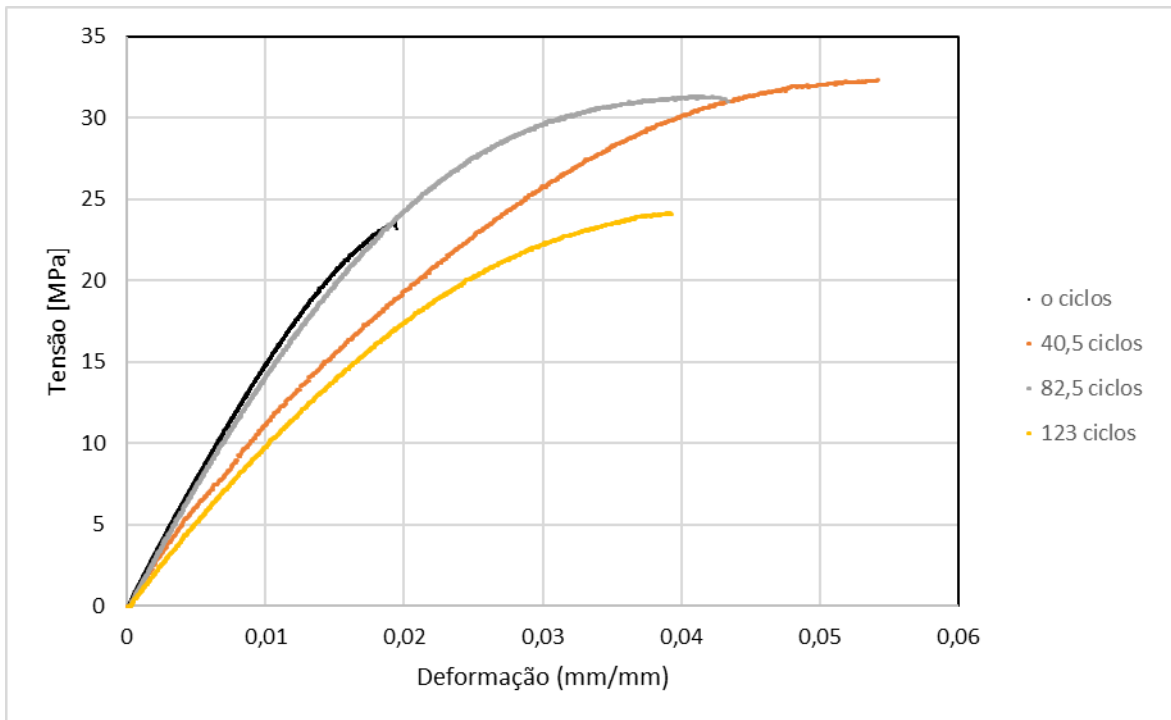


Figura 47 - Diagrama tensão versus deformação para provete bulk de Araldite 420 A/B sujeito a condições de gelo/degelo

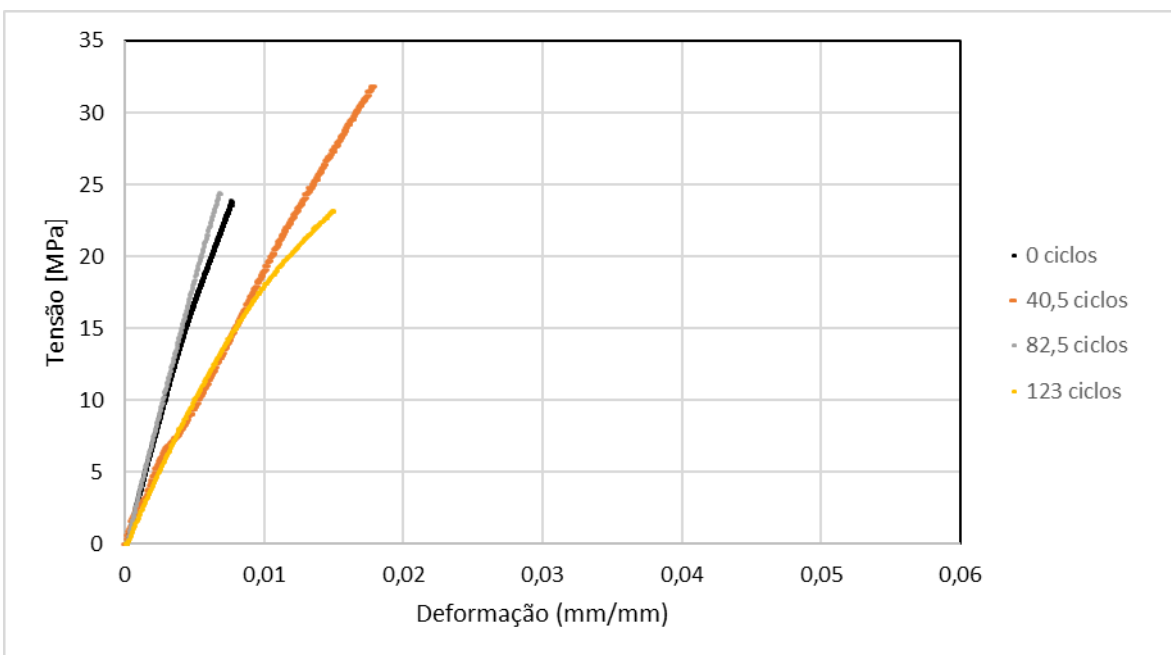


Figura 48 - Diagrama tensão versus deformação para provete bulk de AV138 sujeito a condições de gelo/degelo

3.6.3. Caracterização do comportamento inicial das juntas

As juntas de sobreposição simples foram sujeitas a uma solitação uniaxial de tração com vista à medição das propriedades ao corte. Na Figura 49, referente aos resultados obtidos para a junta com adesivo 420 A/B, pode-se observar que o valor obtido para a resistência máxima ao corte é de 21 MPa. Relativamente ao módulo de corte obteve-se um valor de 0,70 GPa o que vai de encontro ao apresentado na *datasheet* do adesivo, na qual é referido um valor para o módulo de corte de 0,73 GPa.

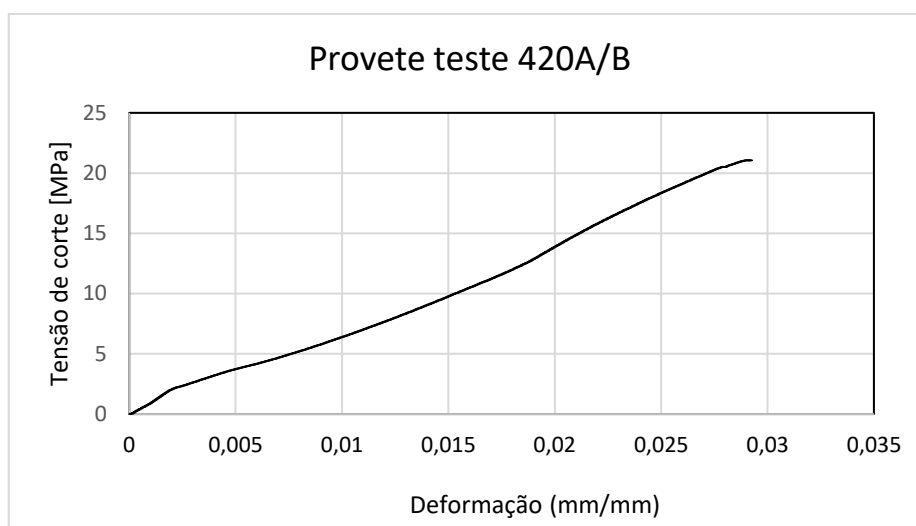


Figura 49 - Diagrama tensão versus deformação para provete de junta adesiva 420 A/B

Relativamente aos resultados retirados para a junta com adesivo AV 138M/HV 998, Figura 50, pode-se observar uma resistência máxima de 7 MPa. Embora o valor referido na *datasheet* para resistência máxima em junções metálicas de alumínio seja de 13 MPa à temperatura ambiente, este não pode ser tido como referência uma vez que, de acordo com o fabricante, foi realizado um tratamento de pós cura a 40°C durante 16h, o que não se aplica no presente estudo.

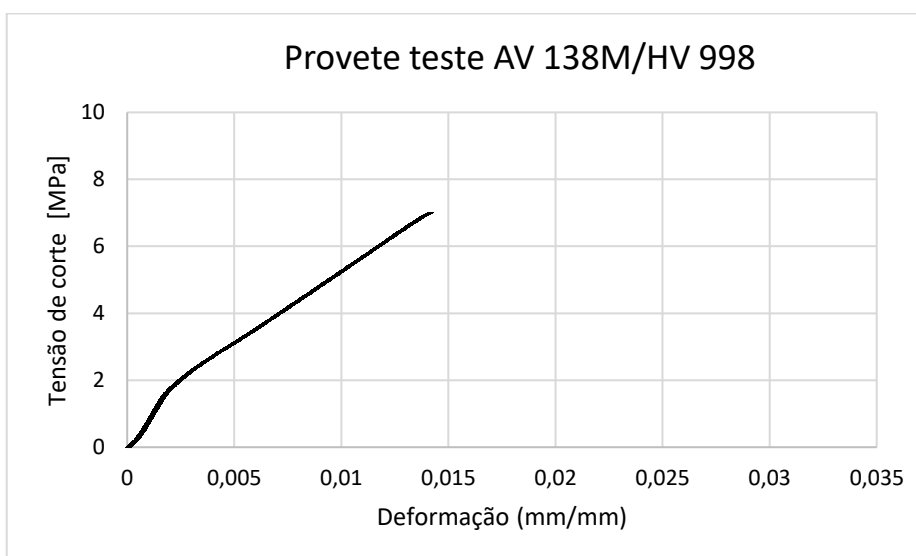


Figura 50 - Diagrama tensão versus deformação para provete de junta adesiva AV 138M/HV 998

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As juntas em 420 A/B e em AV138 foram sujeitas a exposição ininterrupta durante 12 semanas (123 ciclos) para avaliação do comportamento de resistência mecânica e ductilidade, tipo de rotura e aspeto da superfície de fratura. Os resultados encontrados foram comparados com as respetivas condições iniciais.

4.1. Resultados com a realização de ciclos de gelo/degelo

4.1.1. 420A/B

O gráfico da Figura 51 mostra o desenvolvimento da curva de tensão de corte vs deformação de corte ao longo das várias semanas de exposição. Como é possível observar, para 20 ciclos de exposição verificou-se um aumento da tensão e deformação de corte resultante do efeito de pós-cura. Após fabrico, as juntas não foram sujeitas a qualquer processo de cura com a temperatura. Deste modo, verifica-se que este efeito ocorreu durante a exposição às condições de gelo/degelo.

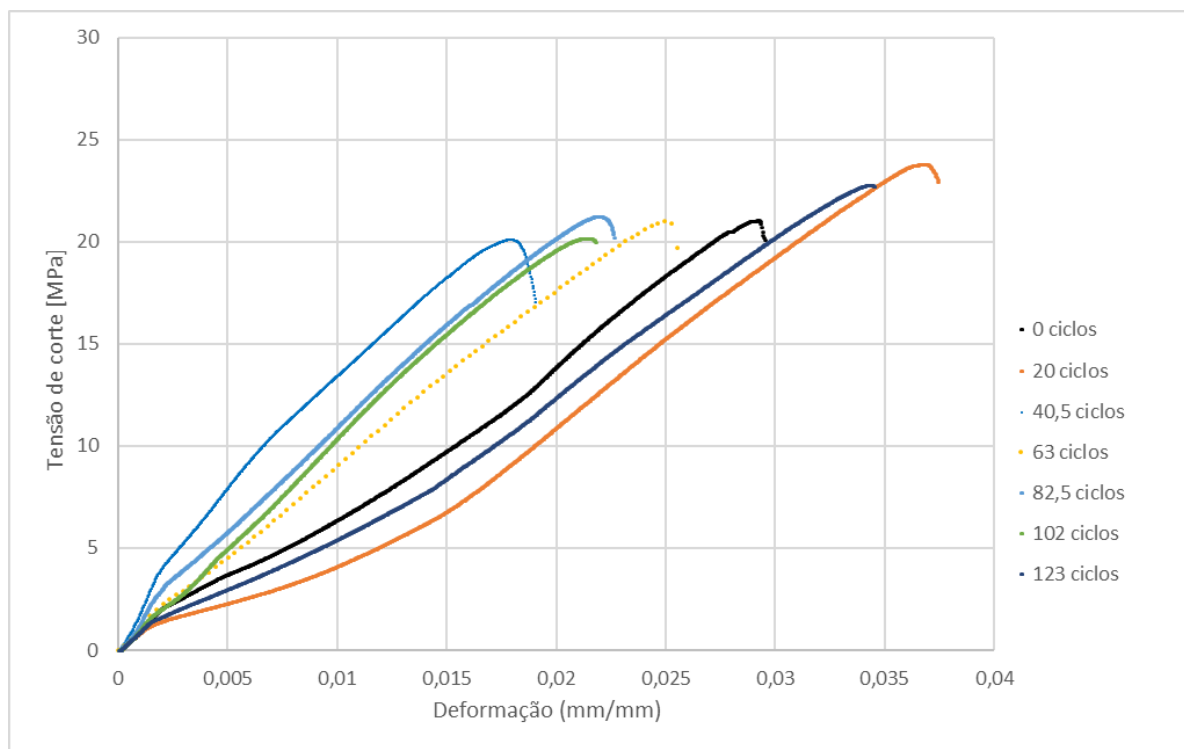


Figura 51 - Comparação da tensão de corte com o decorrer das semanas para o adesivo Araldite 420A/B

Com o decorrer da exposição, as propriedades manifestam uma tendência decrescente, seja na tensão de corte, seja na capacidade de deformação. Às 4 semanas de exposição (40,5 ciclos) a queda percentual, tomando como referência o comportamento às 2 semanas já com o ciclo de pós cura realizado, foi de, aproximadamente, 12 % para a tensão de corte e de 32% para a deformação.

A Figura 52 mostra o tipo de rotura que os 4 provetes ensaiados para 20 ciclos sofreram. É possível notar que todos apresentam o mesmo tipo de rotura, sendo esta uma rotura coesiva, uma vez que, existem vestígios de adesivo em ambas as superfícies da zona de colagem.

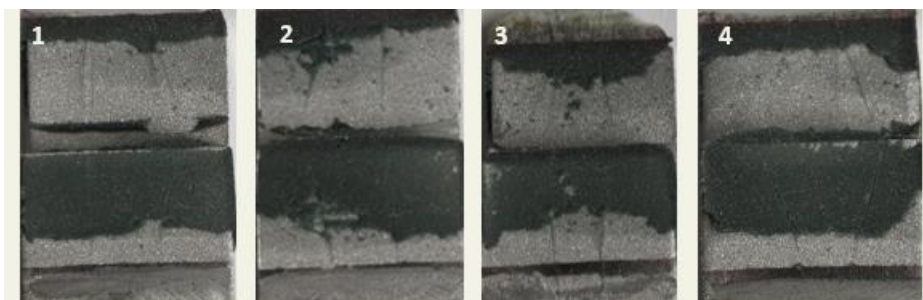


Figura 52 - Superfície de rotura dos provetes ensaiados a 20 ciclos térmicos

No entanto, e quando comparadas com as superfícies de rotura dos provetes submetidos a 40,5 ciclos térmicos (4 semanas) (Figura 53), é notável que com o decorrer das semanas de ensaio, embora a rotura permaneça coesiva, a forma como o adesivo se apresenta é diferente. Contrariamente ao que apresenta a Figura 52, o adesivo indicia fragilidade, assumindo um aspeto mais fragmentado.

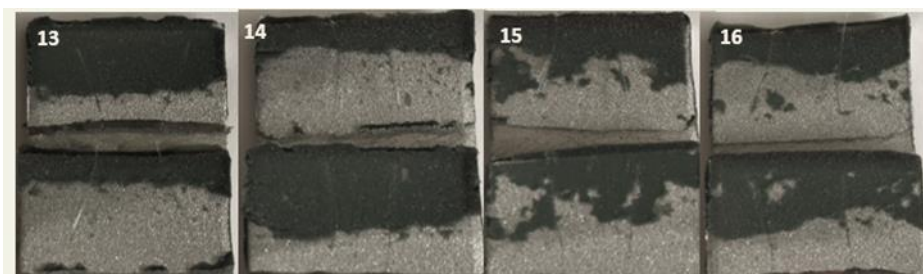


Figura 53 - Superfície de rotura dos provetes ensaiados para 40,5 ciclos térmicos

Este efeito permanece com o decorrer do tempo de exposição, como é possível observar na Figura 54 que apresenta a zona de rotura das juntas submetidas a 63 ciclos térmicos (6 semanas).

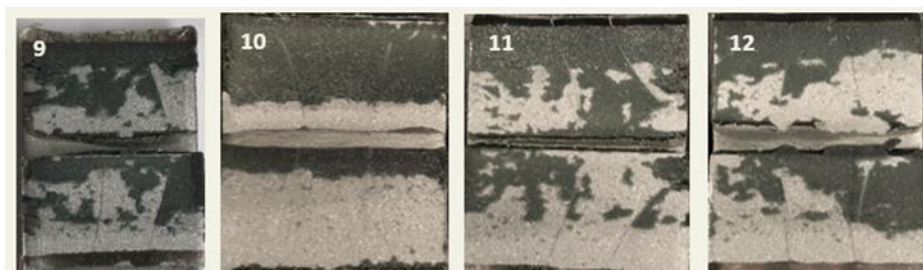


Figura 54 - Superfície de rotura dos provetes ensaiados para 63 ciclos térmicos

4.1.2. AV138

Relativamente às curvas de comportamento à tração referentes ao adesivo AV138, os provetes ensaiados para 0 ciclos térmicos comportaram-se como seria o esperado, fraturando pelo adesivo. Contudo, após serem colocados na câmara térmica estes provetes começaram a apresentar fratura pelo substrato de alumínio, possibilidade que não foi prevista inicialmente. Este tipo de comportamento verificou-se, em geral, em todas as semanas. Na Figura 55, representa-se a tensão máxima registada, quer nos provetes que romperam pela camada adesiva, quer nos provetes em que ocorreu rotura no substrato. Para estes casos, assinalados na figura com a seta ascendente, tomou-se como referência mínima para a tensão de corte a correspondente à provocada pela força máxima medida no ensaio e aplicada na área de colagem.

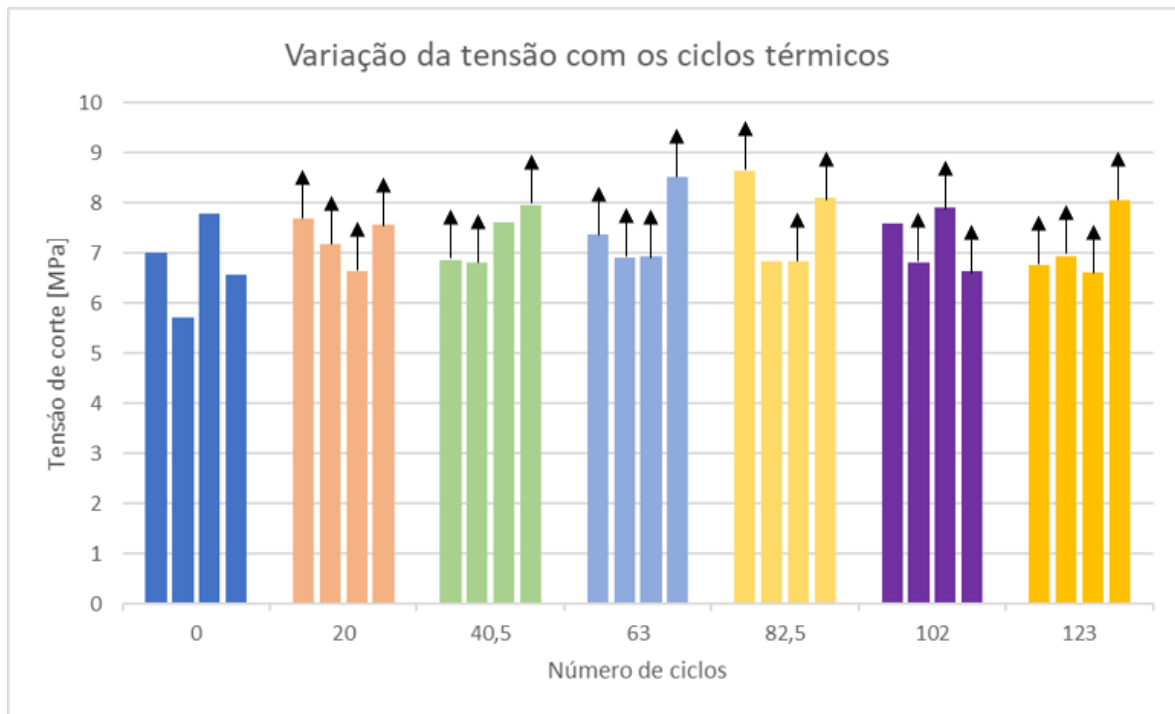


Figura 55 - Tensão de corte registada nos ensaios em juntas com AV138

A Figura 56 visa mostrar o modo de rotura das juntas em adesivo AV 138, como é possível observar a maioria dos provetes rompe pelo substrato e não pelo adesivo, como já mencionado anteriormente. As pontuais roturas pelo adesivo poderão ter origem numa má preparação superficial, ou eventual maior degradação da interface por efeito dos ciclos de gelo/degelo. Em qualquer dos casos, refira-se que o mecanismo de rotura ocorreu de forma adesivas pela interface adesivo/substrato.

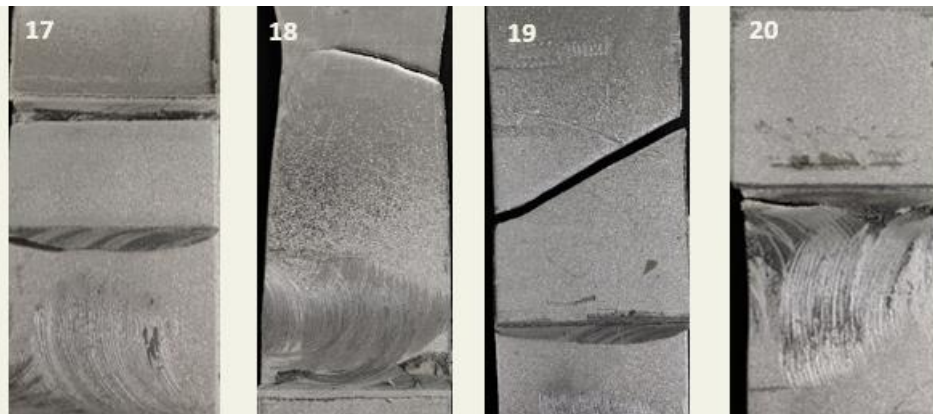


Figura 56 - Superfície de rotura dos provetes AV138 ensaiados a 102 ciclos térmicos

5. CONCLUSÃO

A submissão de adesivos a condições extremas de temperatura sob a forma de ciclos de gelo/degelo tem um efeito bastante pronunciado na resistência mecânica e na capacidade de deformação de adesivos, sejam eles dúcteis ou frágeis. Esta degradação é acompanhada de alterações na morfologia da superfície de fratura e na interface substrato/adesivo.

5.1. Conclusões finais

As principais conclusões a retirar do programa experimental desenvolvido são que:

- ocorreu um efeito de pós cura inicial que aumentou a resistência mecânica relativamente às condições padrões;
- após o efeito de pós cura, que corresponde a 20 ciclos térmicos, é notável o decréscimo sofrido tanto ao nível da tensão como da deformação, e que se verifica para todas as semanas após os 20 ciclos iniciais;
- é possível observar um maior impacto na queda percentual para os provetes bulk em adesivo AV138, resultando daí a conclusão de que os ciclos de gelo/degelo afetam mais os adesivos frágeis;
- nas juntas em adesivo 420 A/B, onde ocorrer rotura coesiva, é visualizado um efeito de fragmentação do adesivo com o decorrer dos ciclos térmicos, o que evidencia fragilidade do mesmo.

5.2. Limitações e trabalhos futuros

Durante o trabalho experimental surgiram algumas contrariedades que, sem colocarem em questão o objetivo inicial de avaliação da degradação dos adesivos e das juntas em condições de gelo/degelo, limitaram algumas conclusões mais extensivas. Neste caso cita-se o aumento de resistência inicial das juntas de sobreposição medida por efeito de pós cura do adesivo HV138 que motivou a passagem de roturas coesivas para roturas pelo substrato. Ainda assim, foi possível verificar ocorrência de efeitos de degradação do adesivo na forma bulk.

Como trabalhos futuros propõe-se:

- a extensão do mesmo programa a substratos de maior resistência mecânica que possam contabilizar o efeito inicial de pós-cura;
- a utilização de outros adesivos, nomeadamente adesivos de base acrílica;
- a introdução do efeito de humidade;
- a introdução do efeito de carregamento simultâneo;
- o desenvolvimento de um planeamento de experiências baseado no método de Taguchi como forma de encontrar a relação entre as variáveis estatisticamente mais relevantes para o comportamento dos adesivos e juntas adesivas em condições de gelo/degelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. G. Magalhães, L. F. M. da Silva, and M. F. F. S. Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. Publindustria, 2007.
- [2] A. I. M. Mota, “Juntas de sobreposição simples com camada adesiva compósita”, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2013.
- [3] T. P. V. da Silva, “Estudo de juntas adesivas tubulares com defeito: análise experimental e numerica por modelos de dano coesivo”, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2018.
- [4] E. M. Petrie, *Handbook of Adhesives and Sealants*.
- [5] F. F. S. Amaral, “Estudo numérico de juntas adesivas com materiais hiperelásticos”, Instituto Politécnico de Bragança, 2018.
- [6] B. Taljsten, “The importance of bonding – a historic overview and future possibility”, *Advances in Structural Engineering*, vol. 9, 2006.
- [7] A. G. F. IFAM and B. Mayer, *Adhesive Bonding Technology in the 21st Century*.
- [8] J. L. S. Esteves, “Estudo do comportamento de adesivos estruturais”, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 1990.
- [9] G. W. Critchlow and D. M. Brewis, “Adhesion and Adhesives”, *Internation Journal of Adhesion & Adhesives*.
- [10] E. A. de S. Marques, R. J. C. Carbas, A. F. de G. Tenreiro, and L. F. M. da Silva, *Introdução às ligações adesivas estruturais*. 2021.
- [11] G. D. Prata, “Importância do pré-tratamento químico e o seu impacto na qualidade do revestimento de substratos de alumínio”, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2018.
- [12] “Slides da Disciplina- Processos de Ligação”, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2021.
- [13] J. E. Mark, B. Erman, and C. M. Roland, *The Science and Technology of Rubber*, 4th ed. 2013.
- [14] J. Van Twisk and R. F. Wegman, *Surface Preparation Techniques for Adhesive Bonding*, 2nd ed. 2013.
- [15] Y. Wu, J.-H. Cheng, and D.-W. Sun, “Blocking and degradation of aflatoxins by cold plasma treatments: Applications and mechanisms,” *Trends Food Sci Technol*, vol. 109, pp. 647–661, Mar. 2021.
- [16] S. L. S. Nunes, “Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2015.
- [17] A. M. G. Pinto, “Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos”, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2007.
- [18] M. Heshmati, R. Haghani, and M. Al-Emrani, “Dependency of cohesive laws of a structural adhesive in Mode-I and Mode-II loading on moisture, freeze-thaw cycling, and their synergy,” *Mater Des*, vol. 122, 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.03.016.
- [19] Y. Yang, M. A. G. Silva, H. Biscaia, and C. Chastre, “Bond durability of CFRP laminates-to-steel joints subjected to freeze-thaw,” *Compos Struct*, pp. 243–258, 2019.
- [20] U. T. F. Carvalho, “Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2016.
- [21] ASTM D 5573 - 99, “Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints,” 2019
- [22] J.-W. Shi, W.-H. Cao, L. Chen, and A.-L. Li, “Durability of wet lay-up BFRP single-lap joints subjected to freeze-thaw cycling,” *Constr Build Mater*, 2020.
- [23] R. J. C. Carbas, “Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi,” Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2008.

- [24] L. F. M. da Silva, T. N. S. S. Rodrigues, M. A. V Figueiredo, M. F. S. F. de Moura, and J. A. G. Chousal, "Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength," *Journal of Adhesion*, vol. 82, 2006.
- [25] L. M. B. S. Teixeira, "Caracterização do comportamento mecânico de juntas de sobreposição simples coladas com Adesivos Estruturais," Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2000.
- [26] A. J. Kinloch, *Adhesion and Adhesives: science and technology*. London, 1990.
- [27] C. E. Moraes, "Adesivos Estruturais Baseados em Epóxi na Indústria Petroquímica: Uma revisão," Universidade Estadual Paulista, 2021.
- [28] J. ZHOU and J. P. LUCAS, "Hygrothermal effects of epoxy resin. Part I: the nature of water in epoxy.," *Polymer (Guildf)*, vol. 40, pp. 5505–5512, 1999.
- [29] L. et al BHAGAVATHI, "Hygrothermal aging, fatigue and dynamic mechanical behavior of cellulosic particles reinforced one-component moisture curable polyurethane adhesive joints," *Int J Adhes Adhes*, vol. 105, pp. 1–10, 2021.
- [30] J. ZHOU and J. P. LUCAS, "Hygrothermal effects of epoxy resin. Part II: variations of glass transition temperature.," *Polymer (Guildf)*, vol. 40, pp. 5513–5522, 1999.
- [31] J. M. Sousa, J. R. Correia, J. P. Firmo, S. C. Fonseca, and J. Gonilha, "Effects of thermal cycles on adhesively bonded joints between pultruded GFRP adherends.," *Compos Struct*, vol. 202, pp. 518–529, Oct. 2018.
- [32] G. L. Schneberger, "Polymer Structure and Adhesive Behavior," *Adhesives and Manufacturing*, 1983.
- [33] M. Abedi, S. E. M. Torshizi, and R. Sarfaraz, "Damage mechanisms in glass/epoxy composites subjected to simultaneous humidity and freeze-thaw cycles," *Eng Fail Anal*, 2021.
- [34] ASTM D3762, "Standard Test Method for Adhesive-Bonded Surface Durability of Aluminum (Wedge Test)," Dec. 31, 2010
- [35] HUNSTMAN, "Araldite 420 A/B"
- [36] HUNTSMAN, "Araldite AV 138M with Hardener HV 998," 2004
- [37] R. J. C. Carbas, A. C. M. Reis, and L. F. M. da Silva, "Effect of the cure temperature on the glass transition temperature of epoxy adhesives," *Mecânica Experimental*, Porto, pp. 9–18, 2014.
- [38] Y. Zhang, R. D. Adams, and F. M. L. da Silva, "A Rapid Method of Measuring the Glass Transition Temperature Using a Novel Dynamic Mechanical Analysis Method," *J Adhes*, vol. 89, pp. 785–806, 2013.
- [39] R. J. C. Carbas, A. C. M. Reis, and L. F. M. da Silva, "EFEITO DA TEMPERATURA DE CURA NA TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA DE ADESIVOS EPÓXIDOS EFFECT OF THE CURE TEMPERATURE ON THE GLASS TRANSITION TEMPERATURE OF EPOXY ADHESIVES," *Experimental*, vol. 23, pp. 9–18, 2014.
- [40] Thermotron, "S/SM-8200 Series Environmental Test Chambers Datasheet," 2023
- [41] ISO 4587:2003, "Adhesives — Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies", 2003.

APÊNDICE A

ARALDITE HV138

Provete	Espessura 1 [mm]	Espessura 2 [mm]	Largura [mm]	Espessura da junta [mm]	Espessura do adesivo [mm]
1	0,94	1,01	25,36	2,13	0,18
2	0,96	1,00	25,47	2,27	0,31
3	0,99	1,01	25,67	2,37	0,37
4	0,98	0,97	25,41	2,21	0,26
5	1,00	1,00	25,44	2,23	0,23
6	0,97	0,99	25,46	2,23	0,27
7	0,99	0,99	25,83	2,41	0,43
8	0,93	1,02	25,51	2,28	0,33
9	0,98	1,01	25,4	2,13	0,14
10	0,98	0,97	25,42	2,13	0,18
11	0,99	1,07	26,5	2,18	0,12
12	1,02	0,97	25,31	2,11	0,12
13	0,96	0,96	25,68	2,13	0,21
14	0,97	0,99	25,35	2,23	0,27
15	1,03	0,99	25,42	2,27	0,25
16	0,94	0,98	25,78	2,20	0,28
17	0,95	1,01	26,36	2,41	0,45
18	0,98	0,99	25,21	2,17	0,20
19	0,96	0,99	25,56	2,22	0,27
20	1,05	0,98	25,91	2,16	0,13
21	1,00	1,10	25,63	2,15	0,05
22	0,95	0,99	25,42	2,30	0,36
23	0,99	1,02	27	2,51	0,50
24	0,97	0,94	25,17	2,21	0,30

ARALDITE 420A/B

Provete	Espessura 1 [mm]	Espessura 2 [mm]	Largura [mm]	Espessura da junta[mm]	Espessura do adesivo [mm]
1	2,97	2,94	25,2	6,17	0,26
2	2,89	2,88	25,4	6,00	0,23
3	2,91	3,04	25,3	6,07	0,12
4	2,88	2,94	25,17	6,21	0,39
5	3,07	3,04	25,48	6,36	0,25
6	2,96	2,92	24,92	6,07	0,19
7	2,95	2,91	25,13	6,07	0,21
8	3,07	2,99	25,46	6,17	0,11
9	2,90	3,14	25,36	6,21	0,17
10	2,99	2,97	6,28	25,62	0,32
11	2,91	2,93	6,23	25,49	0,39
12	2,92	2,96	6,13	25,65	0,25
13	3,13	2,95	6,22	25,52	0,14
14	2,96	2,96	6,21	25,69	0,29
15	2,95	3,04	6,19	25,22	0,20
16	3,00	3,00	6,26	25,74	0,26
17	2,94	2,93	6,22	25,65	0,35
18	3,05	2,93	6,16	25,89	0,18
19	3,11	3,04	6,32	25,73	0,17
20	2,95	2,96	6,17	25,5	0,26
21	2,97	2,96	6,15	25,83	0,22
22	2,95	3,09	6,13	25,87	0,09
23	2,97	3,02	6,37	25,78	0,38
24	2,96	3,02	6,17	26,26	0,19

PROVETES BULK

Provete	Espessura 1 [mm]	Espessura 2 [mm]	Largura 1 [mm]	Largura 2 [mm]
1 420A/B	2,1	2,15	10,11	10,16
2 420A/B	2,00	2,12	10,10	10,10
3 420 A/B	1,99	2,05	10,08	10,15
1 HV138	2,06	2,08	10,14	10,09
2 HV138	2,03	2,04	10,04	9,97
3 HV138	2,07	2,10	10,11	10,09

ANEXO A

HUNTSMAN

Enriching lives through innovation

Advanced Materials

Araldite® 420 A/B

Structural Adhesives

ARALDITE® 420 A/B

Two component epoxy adhesive system

Key properties

- Very high lap shear and peel strength
- Bonds a wide variety of materials (metal, composite and thermoplastics)
- Good moisture resistance
- Extremely tough and resilient adhesive

Description

ARALDITE® 420 A/B is a two-component room temperature curing, epoxy adhesive paste of high strength and toughness. Performances can be enhanced by post-curing at elevated temperature. It is suitable for bonding a wide variety of metals, ceramics and many other substrates in common use.

Product data

Property	Araldite 420 A	Araldite 420 B	Mixed Adhesive
Colour (visual) (A112)*	Yellow	Blue	Dark green
Specific gravity	1.2	1.0	approx. 1.1
Viscosity at 25 °C (A93) (Pa.s)*	100-300	0.6-1.4	35-45
Lap shear strength at 23 °C (A501)*	-	-	> 30 MPa
Pot Life (100 gm at 25°C)	-	-	Ca. 60 min

* Specified data are on a regular basis analysed. Data which is described in this document as 'typical' is not analysed on a regular basis and is given for information purposes only. Data values are not guaranteed or warranted unless if specifically mentioned.

Processing

Pretreatment

The strength and durability of a bonded joint are dependent on proper treatment of the surfaces to be bonded. At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone, iso-propanol (for plastics) or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt. Low grade alcohol, gasoline (petrol) or paint thinners should never be used. The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching ("pickling") the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment

Mix ratio	Parts by weight	Parts by volume
Araldite 420 A	100	100
Araldite 420 B	40	50

The resin and hardener should be blended until they form a homogeneous mix.

Araldite® 420 A/B is available in cartridges incorporating mixers and can be applied as ready to use adhesive with the aid of the tool recommended by Huntsman Advanced Materials

Tensile strength at 23°C (ISO 527)	(typical average value)	29 MPa
E-modulus		1495 MPa
Elongation at break		4.6 %
Shore Hardness (D scale) (ISO 868/03)	(typical average value)	
Cure 16 hours/ 40°C , tested at 23°C, 50%RH		75 D
Shear modulus G' (ISO 6721)	(typical average value)	
Cure: 16 hours/ 40°C		
	-20°C - 1.00 GPa	
	0°C - 880 MPa	
	23°C - 730 MPa	
	60°C - 74 MPa	
	90°C - 5.5 MPa	

ANEXO B

ARALDITE®
Adesivos Estruturais

HUNTSMAN

Araldite® AV 138 Endurecedor HV 998

Adesivo epóxi bi-componente com altas resistências mecânicas sob ação de calor.

Principais propriedades

- Baixa emissão de gases e perda de voláteis
- Excelente resistência química
- Resistente a temperaturas de até 120°C
- Cura a baixas temperaturas acima de 5°C
- Pasta tixotrópica, ótimo preenchimento e baixo escoamento

Descrição

O Araldite AV 138 com o Endurecedor HV 998 é um sistema bi-componente que, quando combinados na proporção correta, apresenta-se como uma pasta que cura à temperatura ambiente proporcionando um resultado de material com alta rigidez e resistências mecânicas excelentes mesmo quando as uniões coladas com esse sistema forem submetidas a altas temperaturas de trabalho e em ambientes agressivos. A baixa emissão de gases torna esse sistema indicado para uso em aplicações em telecomunicações, eletrônica e aeroespacial.

Propriedades Típicas

Propriedade	AV 138	HV 998	Mistura
Cor (visual)	Bege	Cinza	Cinza
Densidade (g/cm ³)	1,7	1,7	1,7

Processamento

Pré-tratamento: A resistência e durabilidade de uma junta colada são dependentes do apropriado tratamento das superfícies a serem coladas.

Como recomendação básica, as superfícies a serem coladas devem ser limpas com agentes desengraxantes tais como: acetona; tricloroetileno ou outro material semelhante oferecido no mercado para esse fim para remover todos os traços de óleo, graxa e sujeira.

Álcool, gasolina ou diluidores/solventes para pintura nunca devem ser utilizados.

As mais fortes e duráveis colagens são obtidas quando, após a limpeza, são usadas ações mecânicas de abrasão, jateamento ou lixamento ou uso de produtos apropriados para ataque químico. A ação mecânica de escarificação deve ser seguida de uma segunda operação de limpeza.

Proporção da mistura (peso ou volume): 100 Araldite AV138 para 40 Endurecedor HV998

Mistura: Pesar cada um deles de forma precisa ($\pm 5\%$) em recipientes limpos. Colocar a resina e o endurecedor juntos e mexer durante, no mínimo, 3 minutos, para que o resultado seja homogêneo. Não se esquecer de raspar as laterais, o fundo do recipiente e a própria espátula/pá misturadora várias vezes para assegurar a uniformidade da mistura.

Aplicação do adesivo: A mistura, de resina e endurecedor, é aplicada com espátula sobre as superfícies, pré tratadas, a serem unidas.

Uma camada de 0,05 a 0,1mm proporcionará os melhores resultados de resistência ao cisalhamento tratativo da união colada.

As partes devem unidas com o adesivo, posicionadas e presas tão logo o adesivo tenha sido aplicado. Comprimir a área de contato vai assegurar melhores resultados de cura.

**Propriedades Típicas
do Produto Curado**

Propriedade	Método de Ensaio	Valores de Teste ⁽¹⁾
Peso específico a 23°C (g/cm ³)	PM 49/70	1,7
Dureza, Shore D a 23°C	PM 119-0/82	84-86
Descascamento a 23°C (Roller peel) (kg/mm)	ISO 4578	1,8
Resistência à tração a 23°C (N/mm ²)	DIN 53455	40-45
Módulo na tração a 23°C (N/mm ²)	DIN 53455	4.700
Alongamento até ruptura, na tração a 23°C	DIN 53455	1,2%
Corrosão eletrolítica (testado 4 dias a 40°C com 92% um.rel. ar conforme DIN 50015)	DIN 53489	graduado AN1
Coefficiente de expansão térmica (18-93°C)	VSM 77110	67 x 10 ⁻⁶ mm/mm°C
Resistividade volumétrica a 22°C (a 50Hz)	VSDE 0303	1.8x10 ¹⁷ ohm cm
Resistência elétrica a 22°C (valor instantâneo)	VSM 7710	45.8kV
Teste de fadiga em junções simples (90-130Hz)	DIN 532852	
25% do carregamento estático até a falha		>10 ⁷ ciclos
30% do carregamento estático até a falha		10 ⁵ -10 ⁶ ciclos

Módulo de cisalhamento ⁽¹⁾

25°C -	3.000N/mm ²
50°C -	2.000N/mm ²
75°C -	400N/mm ²
100°C -	100N/mm ²
125°C -	3N/mm ²
150°C -	2N/mm ²