

INTRODUÇÃO ÀS LIGAÇÕES ADESIVAS ESTRUTURAIS

EDUARDO A. S. MARQUES
RICARDO J. C. CARBAS
A. FRANCISCO G. TENREIRO
LUCAS F. M. DA SILVA

AUTORES

Eduardo. A. S. Marques · Ricardo. J. C. Carbas · A. Francisco G. Tenreiro · Lucas. F. M. da Silva

TÍTULO

INTRODUÇÃO ÀS LIGAÇÕES ADESIVAS ESTRUTURAIS

EDIÇÃO

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.
Tel. 220 939 053 · E-mail: geral@quanticaeditora.pt · www.quanticaeditora.pt
Praça da Corujeira n.º 38 · 4300-144 PORTO

CHANCELA

Engebook – Conteúdos de Engenharia

DISTRIBUIÇÃO

Booki – Conteúdos Especializados
Tel. 220 104 872 · Fax 220 104 871 · E-mail: info@booki.pt · www.booki.pt

APOIO

SIKA Portugal . www.sika.pt

REVISÃO

Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.

DESIGN

Delineatura – Design de Comunicação · www.delineatura.pt

IMPRESSÃO

Novembro, 2021

DEPÓSITO LEGAL

489607/21



A **cópia ilegal** viola os direitos dos autores.
Os prejudicados somos todos nós.

Copyright © 2021 | Todos os direitos reservados a Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.
A reprodução desta obra, no todo ou em parte, por fotocópia ou qualquer outro meio, seja eletrónico, mecânico ou outros, sem prévia autorização escrita do Editor e do Autor, e ilícita e passível de procedimento judicial contra o infrator.

Este livro encontra-se em conformidade com o novo Acordo Ortográfico de 1990, respeitando as suas indicações genéricas e assumindo algumas opções específicas.

CDU

621 Engenharia mecânica em geral.

621.7 Tecnologia mecânica em geral: processos, ferramentas, máquinas, equipamentos

ISBN

Papel: 9789899017856

E-book: 9789899017863

Catálogo da publicação

Família: Engenharia Mecânica

Subfamília: Materiais / Metalúrgica

INTRODUÇÃO ÀS LIGAÇÕES ADESIVAS ESTRUTURAIS

EDUARDO A. S. MARQUES
RICARDO J. C. CARBAS
A. FRANCISCO G. TENREIRO
LUCAS F. M. DA SILVA

ÍNDICE

PREFÁCIO	IX
1. INTRODUÇÃO ÀS LIGAÇÕES ADESIVAS	11
1.1. Definição de conceitos básicos	14
1.2. Contextualização histórica	15
1.3. Principais características das ligações adesivas.....	16
1.3.1. Vantagens das juntas adesivas.....	16
1.3.2. Limitações das juntas adesivas	17
1.4. Exemplos de aplicações de juntas adesivas.....	19
1.4.1. Indústria automível e ferrovia	19
1.4.2. Indústria aeronáutica e aeroespacial	20
1.4.3. Indústria naval.....	21
1.4.4. Construção civil.....	22
1.4.5. Calçado	23
2. TEORIA DA ADESÃO	25
2.1. Forças de adesão	27
2.2. Molhagem	28
2.3. Teorias da adesão.....	32
2.3.1. Teoria mecânica.....	32
2.3.2. Teoria da adsorção física e química	33
3. PREPARAÇÃO SUPERFICIAL	35
3.1. Seleção de um tratamento de preparação superficial.....	38
3.2. Processos de tratamento superficial.....	40
3.2.1. Processos passivos	40
3.2.1.1. Limpeza química.....	40
3.2.1.2. Processo de abrasão	41
3.2.1.3. Granalhagem.....	42
3.2.2. Processos ativos.....	43
3.2.2.1. Processo de tratamento ativo de metais.....	43
3.2.2.2. Processos de tratamento ativo de polímeros	44
4. SELEÇÃO DE ADESIVOS E PRINCIPAIS FAMÍLIAS DE ADESIVOS	47
4.1. Estrutura molecular.....	49
4.2. Forma física	51

4.3. Desempenho mecânico.....	52
4.4. Método de endurecimento ou implementação.....	52
4.4.1. Endurecimento por reação química.....	53
4.4.2. Endurecimento por processos físicos.....	53
4.5. Composição química.....	54
4.5.1. Adesivos estruturais.....	54
4.5.1.1. Epóxidos.....	54
4.5.1.2. Poliuretanos.....	55
4.5.1.3. Acrílicos.....	56
4.5.2. Comparação do desempenho dos diferentes adesivos estruturais.....	57
4.6. Processo de seleção de adesivos.....	58
4.6.1. Ensaio de caracterização mecânica.....	58
4.6.1.1. Ensaio de tração e compressão.....	59
4.6.1.2. Ensaio ao corte.....	60
4.6.1.3. Energia de fratura.....	61
4.7. Influência da temperatura.....	61
4.8. Efeito da humidade.....	62
4.9. Efeito da taxa de deformação.....	63
5. PROCESSOS DE MANUFATURA DE JUNTAS ADESIVAS.....	65
5.1. Armazenamento.....	68
5.1.1. Tempo de armazenamento.....	68
5.2. Doseamento e mistura de adesivos.....	69
5.2.1. Doseamento de adesivos.....	70
5.2.2. Mistura.....	70
5.3. Processo de aplicação de adesivos e a influência da sua forma física.....	71
5.4. Montagem e fixação de juntas adesivas.....	73
5.4.1. Controlo da espessura.....	75
5.4.2. Montagem da junta.....	75
5.5. Endurecimento do adesivo.....	76
5.5.1. Processos de cura por aplicação de calor.....	76
6. CONTROLO DE QUALIDADE.....	79
6.1. Controlo das matérias primas.....	82
6.1.1. Controlo das propriedades mecânicas e físicas.....	82
6.1.1.1. Determinação da temperatura de transição vítrea.....	82
6.1.2. Controlo da energia superficial.....	83
6.2. Controlo da manufatura de juntas adesivas.....	85
6.3. Controlo de estruturas coladas.....	86
6.3.1. Tipos de defeitos presentes em juntas adesivas.....	86
6.3.2. Testes destrutivos.....	87
6.3.2.1. Ensaio em componentes (proof tests).....	87
6.3.2.2. Análise fractográfica.....	88
6.3.3. Testes não destrutivos.....	88
6.3.3.1. Teste de batimento.....	89
6.3.3.2. Ultrassons.....	89
6.3.3.3. Emissão acústica.....	90
7. SAÚDE E SEGURANÇA.....	91
7.1. Precauções gerais para o manuseamento de adesivos.....	94
7.1.1. Equipamento de proteção individual.....	95

7.2.	Perigos associados aos tipos de adesivos mais comuns	97
7.2.1.1.	Epóxidos.....	97
7.2.1.2.	Poliuretanos.....	97
7.2.1.3.	Acrílicos	97
7.3.	Precauções com processos de preparação de superfície.....	98
8.	PROJETO DE JUNTAS ADESIVAS	99
8.1.	Carregamentos típicos de juntas adesivas.....	101
8.2.	Principais configurações geométricas de juntas adesivas.....	102
8.2.1.	Modos de falha de juntas adesivas e a sua influência no processo de projeto.....	103
8.2.1.1.	Falha adesiva.....	103
8.2.1.2.	Falha coesiva no adesivo.....	103
8.2.1.3.	Falha coesiva no aderente.....	104
8.3.	Previsão de forças de rotura de juntas adesivas.....	104
8.3.1.	Previsão de forças de rotura usando métodos analíticos	104
8.3.2.	Volkersen.....	105
8.3.3.	Goland e Reissner.....	108
8.3.4.	Hart-Smith.....	109
8.4.	Crítérios de rotura	110
8.4.1.	Falha no adesivo	110
8.4.1.1.	Cedência generalizada do adesivo	110
8.4.2.	Falha nos substratos.....	111
8.4.2.1.	Cedência dos substratos	111
8.4.2.2.	Modelo de Adams.....	112
8.4.2.3.	Rotura interlaminar de substratos compósitos.....	112
8.5.	Previsão de forças de rotura usando métodos numéricos.....	113
8.6.	Parâmetros com efeito no desempenho mecânico das juntas adesivas	114
8.6.1.	Efeito da espessura da camada adesiva	114
8.6.2.	Efeito do comprimento de sobreposição	115
8.6.2.1.	Comprimento de sobreposição e resistência dos adesivos.....	115
8.6.2.2.	Comprimento de sobreposição e resistência dos substrato.....	116
8.6.3.	Substratos de material compósito.....	117
8.6.4.	Efeito da temperatura e das tensões térmicas	118
8.7.	Otimização do desempenho de juntas adesivas	119
8.7.1.	Uso de filetes de adesivo e modificações dos substratos.....	119
8.7.2.	Juntas adesivas mistas.....	120
8.7.3.	Juntas adesivas híbridas.....	121
8.7.4.	Uso de reforços localizados.....	122
9.	DURABILIDADE	123
9.1.	Efeitos ambientais.....	125
9.1.1.	Envelhecimento por absorção de humidade.....	125
9.1.2.	Temperatura.....	127
9.2.	Condições de carregamento.....	128
9.2.1.	Iniciação de dano e curva S-N	129
9.2.2.	Propagação de fenda e Lei de Paris	130
9.3.	Fluência.....	132
	LEITURAS RECOMENDADAS	CXXXV
	ÍNDICE DE FIGURAS	CXXXVII

PREFÁCIO

Esta pequena obra dá uma primeira introdução ao tema das ligações adesivas estruturais. Esta tecnologia de ligação está hoje em dia presente em muitas aplicações, especialmente na área do transporte, porque é um método de ligação muito eficiente que permite aligeirar a estrutura. Veículos desportivos, veículos elétricos, comboios de alta velocidade, etc. são exemplos de estruturas que incluem quilogramas de adesivo na sua conceção. Por conseguinte, é importante que as ligações adesivas estejam incluídas nos cursos de engenharia mecânica e afins como um dos processos de fabrico de modo a permitir uma formação mais atualizada dos engenheiros.

Este breve texto é suficiente para ter uma primeira noção da tecnologia ao nível da licenciatura. Aborda questões teóricas, mas também permite um suporte para atividades mais práticas de fabricação, teste mecânico e projeto de juntas adesivas. O texto é muito conciso e simples e está acompanhado de um número elevado de figuras que permitem assimilar com mais facilidade a informação exposta.

Os autores agradecem o apoio incondicional da Quântica Editora, especialmente ao Eng. António Malheiro.

Os autores
Eduardo Marques
Ricardo Carbas
A. Francisco G. Tenreiro
Lucas F. M. da Silva

INTRODUÇÃO ÀS LIGAÇÕES ADESIVAS



1. INTRODUÇÃO ÀS LIGAÇÕES ADESIVAS

Os métodos de ligação são soluções tecnológicas que permitem unir dois ou mais componentes, criando estruturas complexas que não podem ser obtidas através de um processo de fabrico direto. Embora diversos processos de ligação clássicos estejam ao dispor de um engenheiro projetista, como o uso de parafusos, a soldadura ou a rebiteagem, o uso de ligações adesivas tem aumentado de forma significativa, impulsionado pelas vantagens inerentes deste processo e pela constante evolução tecnológica associada à formulação de adesivos, tratamentos superficiais e processos de fabrico. Hoje em dia é cada vez mais habitual encontrar produtos tecnológicos cuja existência apenas é possível com o uso de ligações adesivas. Um exemplo clássico destes produtos são os telemóveis modernos, cuja complexa construção em vidro, metal e polímero é resultado do uso de ligações adesivas entre os seus diversos componentes.

O estudo das ligações adesivas e da adesão é hoje em dia uma ciência complexa que, como vemos ao longo deste livro, requer conhecimentos de Física, Química e Mecânica, para atividades como o projeto de junta, a preparação de superfícies e a seleção e modificação de materiais. Numa ligação adesiva, a componente chave é obviamente o adesivo, um material que, quando aplicado em superfícies de outros materiais, estabelece uma união física entre eles, capaz de resistir a forças de separação. É, contudo, importante compreender que nem todos os adesivos têm o mesmo comportamento sendo essencial diferenciar entre os adesivos estruturais e os não estruturais. Assim sendo, um adesivo estrutural é um adesivo que pode resistir a cargas substanciais e que é responsável pela resistência e rigidez da estrutura. Por convenção, é habitual classificar como adesivos estruturais aqueles que apresentam uma resistência ao corte superior a 7 MPa. De uma junta adesiva estrutural espera-se também que seja estável ao longo da vida útil da estrutura, ou seja, que as suas propriedades não se degradem, que o projeto da junta seja bem executado e que o processo de manufatura seja realizado de modo a obter uma junta adesiva que apresente, em serviço, um desempenho similar ao projetado.

1.1. DEFINIÇÃO DE CONCEITOS BÁSICOS

No estudo de juntas adesivas é necessário definir com precisão os conceitos e componentes mais importantes. O adesivo é então a substância que inicialmente preenche a lacuna entre os materiais a colar, que a eles adere e solidifica. Quando a aplicação é de natureza não-estrutural, o adesivo toma por vezes o nome de vedante, o que indica uma função mais orientada para a vedação de gases ou líquidos e menos adequada para o suporte de carga. Os materiais a serem colados são chamados de substratos. Após a colagem são chamados de aderentes, embora na prática estes dois termos sejam por vezes usados de forma intermutável. Entre o adesivo e o aderente, existe também a formação de uma interface. A interface é o plano de contacto entre a superfície dos dois materiais (conforme mostrado na Figura 1.1.).

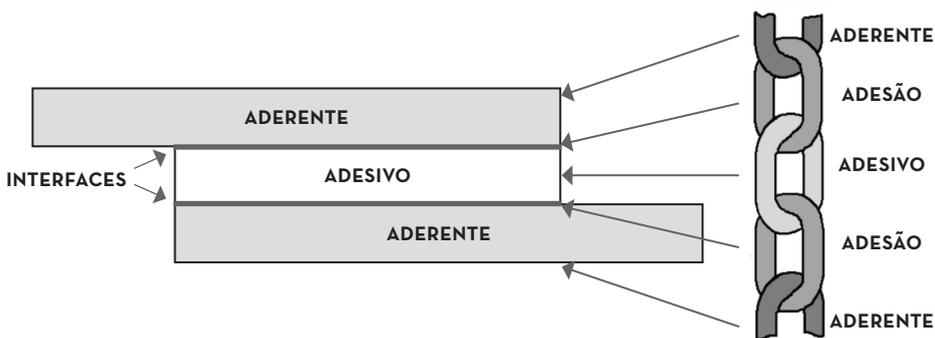


Figura 1.1. Componentes principais de uma junta adesiva.

Os adesivos operam explorando os fenómenos de adesão. Estudaremos este assunto em mais pormenor no capítulo seguinte deste livro, mas por agora podemos definir a adesão como um processo de atração entre duas substâncias, resultante de forças intermoleculares entre elas estabelecidas. Em contraste, no interior do adesivo e do substrato encontramos as forças de coesão, as quais mantêm o material coeso. Uma junta adesiva é o conjunto formado pelo adesivo, os aderentes e a interface, mas poderá também incluir camadas intermédias como primários ou revestimentos. Um primário é uma substância que é utilizada para inibir a corrosão e para melhorar o nível de adesão com o adesivo e o aderente.

Numa junta ideal, devidamente projetada e manufacturada, o aderente deverá ser sempre o componente mais fraco. Por outras palavras, pretende-se que a presença da junta nunca reduza a resistência da estrutura que a contém.

1.2. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

Ao longo da história da humanidade, os adesivos desde sempre encontraram múltiplos usos. De facto, vestígios arqueológicos sugerem que há 200.000 anos atrás, os Neandertais utilizavam um adesivo à base de alcatrão para fabricar machados e lanças. Muitos milénios mais tarde os adesivos surgem em papel de destaque na mitologia grega, que nos conta como Icáro e Dédalo criaram asas colando penas com cera para escapar de Creta e como estas falharam quando expostas ao calor gerado pelo sol e à humidade do mar (um problema de durabilidade). Séculos depois os Romanos alargaram grandemente a variedade de adesivos em uso, criando colas produzidas através de recursos naturais, como a cozedura de resíduos de peixe, cera de abelhas e alcatrão, usando estes materiais para a produção de navios e outros produtos. De forma notável, alguns destes produtos ainda eram usados no final do século XX.

Os primeiros adesivos estruturais surgiram no final do século XIX e em 1900 os primeiros adesivos baseados em polímeros sintéticos foram introduzidos, tendo sido o seu uso rapidamente generalizado. Uma das primeiras aplicações estruturais de adesivos verificou-se durante a Primeira Grande Guerra Mundial, onde adesivos foram utilizados para a união das estruturas e dos revestimentos das aeronaves militares (Figura 1.2.). A criação de adesivos a partir de derivados de petróleo revolucionou tanto a versatilidade como as capacidades dos adesivos. Entre 1920 e 1940, foram feitos progressos significativos nesta área, mas o uso de adesivos em aplicações estruturais ainda era encarado com alguma relutância.



Figura 1.2. Aeronaves usadas na Primeira Grande Guerra Mundial de construção em madeira colada.

A principal revolução na aplicação e nas capacidades dos adesivos ocorreu durante a Segunda Guerra Mundial, onde novos adesivos foram formulados para utilização na indústria aeronáutica. Aeronaves e outro equipamento militar foram produzidos a um ritmo frenético e as exigências sobre os componentes produzidos obrigaram à implementação de novas metodologias de ligação estrutural. A utilização de adesivos foi alargada a uma miríade de aplicações estruturais e não estruturais e desde então o desenvolvimento de novos adesivos e processos de colagem nunca mais abrandou. Hoje em dia, é impensável conceber a nossa vida sem esta tecnologia de união. O uso de adesivos é agora uma tecnologia de união madura, segura e eficiente, que permite a construção de produtos de alto desempenho.

1.3. PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS LIGAÇÕES ADESIVAS

As ligações adesivas apresentam características muito peculiares que as distinguem de outros métodos de ligação ditos convencionais, tais como as ligações soldadas, aparafusadas ou rebitadas.

1.3.1. Vantagens das juntas adesivas

Quando devidamente implementadas, as ligações adesivas apresentam a capacidade única de proporcionar uma distribuição de tensões mais uniforme, com uma redução das concentrações de tensão (evitando ligações pontuais que apresentam um elevado nível de tensão), uma vez que a ligação obtida é praticamente contínua, conforme mostrado na Figura 1.3.

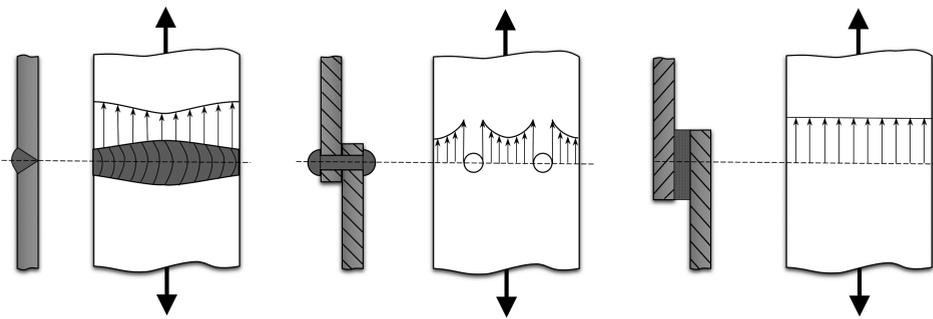


Figura 1.3. Comparação das distribuições de tensões obtidas com juntas soldadas, rebitadas e juntas adesivas.

Esta distribuição de tensão uniforme confere também às juntas adesivas uma excelente resistência à fadiga. A Figura 1.4. demonstra que uma junta adesiva consegue ter um desempenho à fadiga próximo do exibido pelo metal base, algo que não sucede com uma junta rebitada.

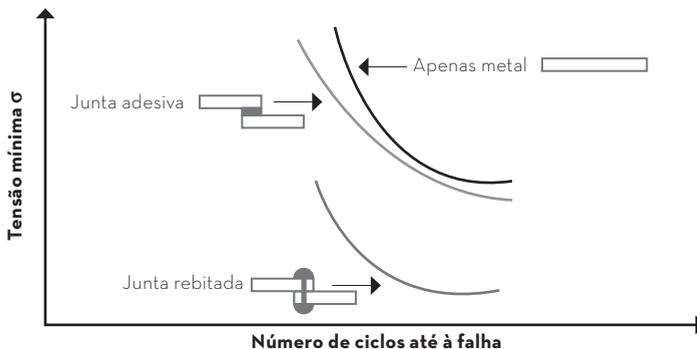


Figura 1.4. Comparação do desempenho à fadiga do material base, juntas rebitadas e juntas coladas.

Os adesivos permitem a construção de estruturas mais leves, sem elementos adicionais como parafusos e soldas e apresentam uma maior flexibilidade em termos de conceção e de processos de fabrico, prestando-se facilmente à implementação em processos automatizados. Uma

das principais vantagens das ligações adesivas prende-se com o fato de serem capazes de unir uma vasta gama de materiais com relativa facilidade, incluindo materiais da natureza muito diferente (por exemplo, na união de metais e polímeros).

As juntas adesivas podem também ser aplicadas com facilidade em grandes áreas de colagem, melhorando a distribuição de tensões e a rigidez estrutural com limitadas implicações no custo ou na simplicidade do processo. Apresentam boas propriedades de amortecimento de vibrações e atuam como vedantes, combinando a função de unir e vedar numa única camada. Não requerem furos ou outras alterações geométricas dos substratos, uma característica que é especialmente útil para unir materiais compósitos, uma vez que estes perdem resistência quando modificados desta forma. Usando juntas adesivas é também possível evitar processos de corrosão galvânica e potenciar o isolamento elétrico e térmico, pois a camada adesiva assegura a inexistência de contacto direto entre as peças a colar.

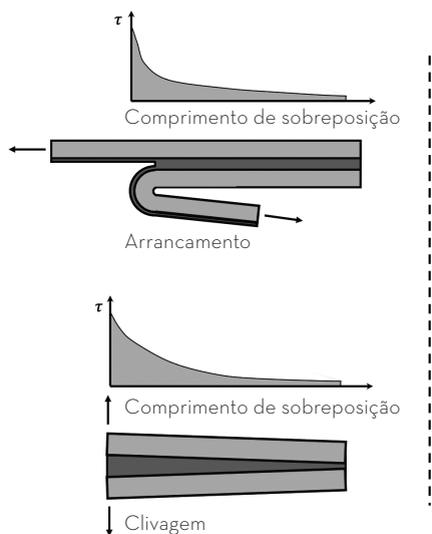
1.3.2. Limitações das juntas adesivas

Algumas importantes limitações estão associadas ao uso de juntas adesivas, tais como a exigência de uma seleção cuidadosa e adequada de tratamento de superfície, especialmente para aderentes poliméricos. Como veremos nos capítulos seguintes, uma preparação de superfície incorreta pode ter um efeito importante na resistência das juntas.

As ligações adesivas apresentam também baixa resistência a esforços de arrancamento e de clivagem. A clivagem ocorre quando a carga é concentrada numa extremidade da junta, enquanto o lado oposto permanece praticamente sem tensão. Este tipo de carga tem o efeito de abrir a junta, quase como se uma alavanca fosse aplicada na extremidade da camada adesiva. Consequentemente, as tensões atuantes sobre o adesivo tornam-se máximas perto da área onde a carga de clivagem está a ser aplicada e mínimas na extremidade oposta da junta. É esta concentração de tensões que resulta numa resistência à clivagem muito baixa.

Já as cargas de arrancamento são concentradas ao longo de uma fina linha na borda da camada adesiva e ocorrem principalmente quando pelo menos um substrato é muito flexível. Estes modos de carregamento são mostrados esquematicamente na Figura 1.5.

CARREGAMENTOS INDESAJÁVEIS



CARREGAMENTOS PREFERENCIAIS

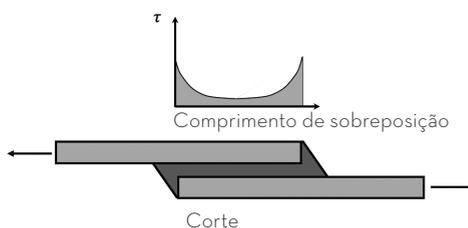


Figura 1.5. Cargas de arrancamento e clivagem e corte aplicadas a uma junta adesiva.

O arrancamento é um dos carregamentos mais gravosos a que um adesivo pode estar sujeito. Neste caso, a carga que estamos a aplicar está concentrada apenas numa área muito pequena, o que explica a limitada resistência oferecida pelo adesivo e, consequentemente, pela junta. É indispensável usar geometrias que evitam tensões localizadas e que garantam uma distribuição de tensões uniforme. Caso os carregamentos não sejam perfeitamente paralelos à camada adesiva poderão surgir importantes esforços de arrancamento ou de clivagem.

Um dos maiores desafios associado ao uso de juntas adesivas em aplicações de grande responsabilidade prende-se com a baixa resistência dos adesivos a condições ambientais extremas. Os adesivos, como materiais poliméricos, apresentam em muitos casos grande variação das suas propriedades mecânicas em função da exposição às condições ambientais, o que requer a realização de ensaios de caracterização e validação para que o projeto das juntas seja capaz de prever esta redução de desempenho.

A produção industrial com adesivos cria também alguns desafios importantes, como aqueles associados à manipulação das estruturas imediatamente após a aplicação do adesivo, uma vez que o mesmo se encontra num estado não totalmente endurecido. Na prática, isto significa que as juntas coladas não estão imediatamente prontas para serem manuseadas após o fabrico, o que pode atrasar alguns processos de produção. Como tal, existem também requisitos especiais de fixação que são fundamentais para manter as peças unidas durante o processo de endurecimento. Finalmente, existem dificuldades associadas à desmontagem de peças coladas, o que cria desafios tanto na reparação como na reciclabilidade das estruturas.

1.4. EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DE JUNTAS ADESIVAS

Potenciados pelas vantagens acima discutidas, os adesivos podem hoje ser encontrados em diversas aplicações tecnológicas, entre as quais se incluem, por exemplo, a indústria automóvel, aeronáutica, a construção civil e até o fabrico de sapatos. As seções seguintes detalham estas aplicações, realçando as contribuições positivas associadas ao uso de adesivos.

1.4.1. Indústria automóvel e ferroviária

De forma a cumprir exigentes metas de emissão de poluentes, a indústria automóvel tem envidado esforços para reduzir o peso estrutural dos veículos que produz, recorrendo a soluções de construção que combinam diferentes materiais na mesma estrutura, tais como aço, ligas metálicas leves, compósitos ou polímeros, criando estruturas altamente otimizadas. Esta abordagem requer a utilização simultânea de muitas técnicas de união diferentes, tais como soldadura, deformação plástica e a ligação adesiva, conforme mostrado na Figura 1.6. De facto, as ligações adesivas prestam-se a este tipo de utilização híbrida, combinando as suas características com as de outros processos de ligação complementares.

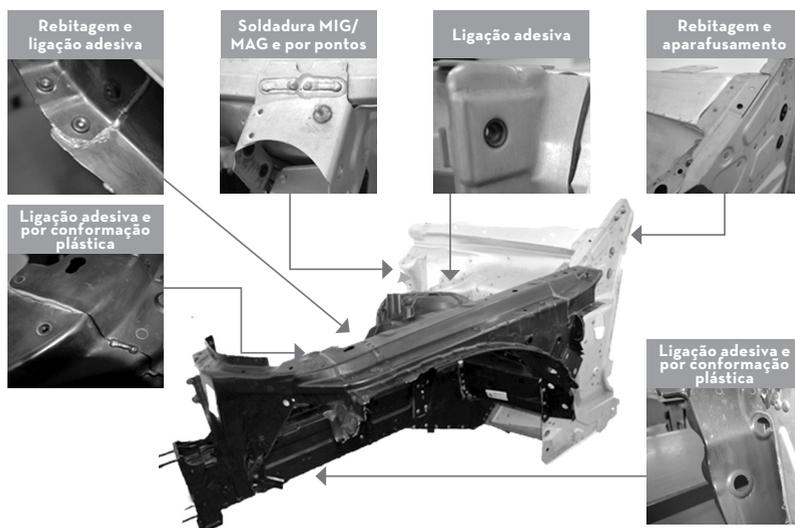


Figura 1.6. Elementos de chassi de veículo combinando construção colada com outros métodos de ligação estrutural.

Este tipo de construção tem sido também adotado pelos fabricantes de veículos de transporte público, como os metropolitanos e os autocarros. Para montar os diversos componentes e elementos que fazem parte destes veículos (constituídos por metais, materiais compósitos e vidro), a união adesiva representa uma tecnologia que permite ótimo desempenho mecânico e permite facilmente unir diferentes materiais. Adesivos flexíveis (como os poliuretanos) são tipicamente utilizados para unir painéis laterais, estruturas de tejadilho e janelas, conforme pode ser visto na Figura 1.7.

União dos painéis exteriores

União de tejadilho



Colagem de painéis de vidro

Figura 1.7. Aplicações da tecnologia de ligação adesiva na estrutura de veículos de transporte público.

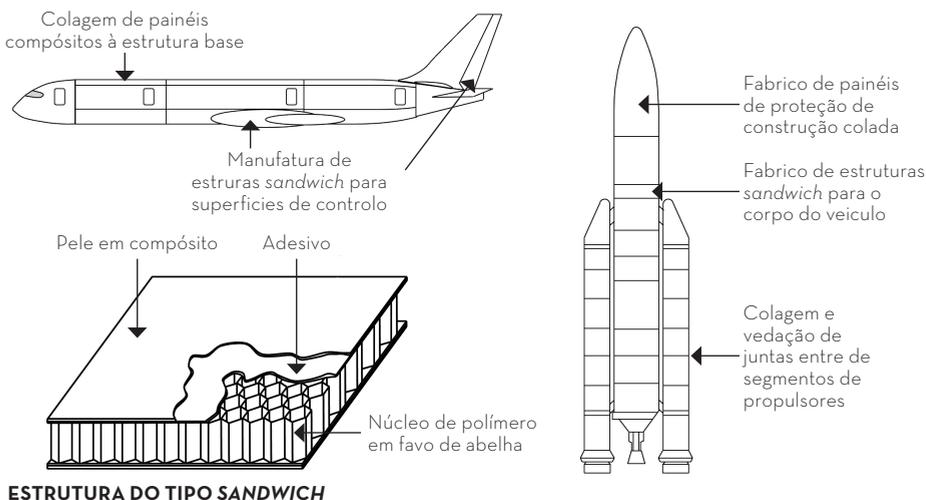
1.4.2. Indústria aeronáutica e aeroespacial

Na indústria aeronáutica, os processos clássicos de união baseados na rebiteagem proporcionam uma técnica rápida, barata e eficaz de união de materiais, e que pode ser facilmente automatizada. Este processo é também adequado para unir materiais complexos e de natureza dissimilar, tais como os compósitos e as ligas leves de alumínio. No entanto, a rebiteagem requer a realização de muitos furos, que podem ser fonte de grandes concentrações de tensão e requerem a utilização de vedantes para assegurar a estanqueidade. A presença das cabeças de rebite expostas pode também ser prejudicial para as qualidades aerodinâmicas da aeronave, exigindo o uso de rebites com cabeça embebida, mais dispendiosos e menos práticos.

As ligações adesivas surgem como uma alternativa muito válida para aplicações aeronáuticas, permitindo combinar materiais diferentes sem a introdução de grandes tensões térmicas, livres de furos e outras modificações geométricas. Permitem também criar materiais de construção inovadores, tais como as rígidas e leves estruturas em *sandwich* (como mostrado na Figura 1.8.) combinando leves núcleos com peles de elevada resistência. Permitem também obter superfícies com boas qualidades aerodinâmicas, impermeáveis a líquidos e gases.

Também a indústria aeroespacial faz uso extensivo de adesivos na construção de veículos de lançamento e satélites. Os adesivos são usados não só para a montagem da estrutura destes veículos, recorrendo também às estruturas *sandwich*, mas encontram também uso em outras aplicações mais particulares, tais como os painéis de proteção térmica, onde a excelente resistência térmica e flexibilidade de adesivos à base de silicone permite suportar

as temperaturas elevadas da reentrada atmosférica e acomodar os grandes diferenciais de expansão volumétrica que daí resultam.



ESTRUTURA DO TIPO SANDWICH

Figura 1.8. Uso de adesivos em construção de aeronáutica e aeroespacial e pormenor de uma estrutura *sandwich*.

No entanto, existem ainda algumas limitações associadas à utilização de adesivos na indústria aeronáutica. Por exemplo, uma vez que as juntas adesivas são fortemente sensíveis à contaminação, é essencial assegurar uma sala limpa e inerte durante a aplicação de adesivos. Existe também, por parte dos projetistas aeronáuticos, um limitado conhecimento do desempenho dos adesivos a longo prazo, especialmente quando expostos a condições de serviço que incluem níveis extremos de humidade e temperatura. Por último, existe também dificuldade em detetar alguns defeitos existentes em juntas adesivas (por exemplo, a adesão fraca) e muitos organismos reguladores não permitem a utilização de adesivos em estruturas de voo primárias sem algum tipo de método de união de reforço adicional (por exemplo, o uso de rebites).

1.4.3. Indústria naval

Em navios de grandes dimensões é habitual encontrar uma construção metálica unida com processos de soldadura. No entanto, alta temperatura associada a este processo gera uma distorção significativa das peças a serem unidas. Para grandes navios, estas distorções são muitas vezes aceitáveis, mas para navios mais pequenos, que usam substratos mais finos esta distorção é excessiva. Como tal, embarcações de menor dimensão (como barcos de recreio) tendem a evitar a construção metálica e optam por uma construção compósita colada, usufruindo também do menor peso associado a este processo. A Figura 1.9. mostra um exemplo deste tipo de veículos e um pormenor construtivo, nomeadamente a ligação colada entre o casco exterior e o revestimento interno.



Figura 1.9. Construção de barcos de recreio com recurso à ligação adesiva.

O casco destes navios recorre também frequentemente a painéis do tipo *sandwich*, com peles compósitas e reforços colado por adesivo. Esta construção dá origem a uma estrutura de alta resistência e tenacidade, um aspeto muito importante para resistir às cargas geradas pela ondulação. Outras propriedades importantes associadas à utilização da colagem em aplicações navais são as excelentes características de amortecimento e a impermeabilização que são conferidas à estrutura do navio.

1.4.4. Construção civil

Embora de forma menos visível, a ligação adesiva desempenha um papel crucial na construção civil, onde os adesivos são parte integrante diversas aplicações, mostradas de forma resumida na Figura 1.10.



Figura 1.10. Aplicação de ligações adesivas na construção civil. Colagem de revestimentos cerâmicos (esquerda). Montagem e vedação de painéis de vidro (centro). Ancoragem de elementos roscados em betão (direita).

Por exemplo, argamassas adesivas são utilizadas para assegurar uma colagem flexível e duradoura de revestimentos cerâmicos, garantindo a integridade da construção sob utilização normal e até nos piores cenários, tais como terremotos. O uso de adesivos é também amplamente usado na montagem de grandes painéis de vidro. Este tipo de ligação está sujeito a grandes diferenças na expansão térmica entre o vidro e a estrutura metálica que o suporta, as quais podem gerar tensões elevadas e eventualmente levar à rotura das placas

de vidro. O uso de ligações adesivas, com adesivos flexíveis permite suportar o vidro de uma forma segura, absorvendo as diferenças de expansão térmica.

Finalmente, a construção civil usa também adesivos em sistemas de ancoragem, uma aplicação altamente exigente em termos mecânicos. Em alternativa a um sistema de fixação mecânica, um adesivo pode ser utilizado para fixar os componentes (tais como varões roscados) à estrutura de edifício. Esta solução construtiva proporciona grande resistência e é altamente flexível, não exigindo a furações precisas para se ajustar às dimensões exatas do varão roscado.

1.4.5. Calçado

Nos últimos 20 anos, a indústria do calçado substituiu os métodos tradicionais de produção (quase exclusivamente artesanais) por métodos de produção mais modernos, utilizando uma gama muito mais vasta de materiais, tais como têxteis ou espumas. No entanto, estes materiais mais macios não podem ser costurados, uma vez que são facilmente danificados pelos furos inerentes ao processo de costura. Para estes novos materiais, só a união adesiva pode assegurar uma junta forte e durável. A comparação entre um processo tradicional de costura e um processo de ligação adesiva é mostrada na Figura 1.11.



Figura 1.11. Processo tradicional de fabrico por costura (esquerda) e a aplicação de adesivo no fabrico de calçado (direita).

TEORIA DA ADESÃO

2

2. TEORIA DA ADESÃO

À primeira vista, um processo de ligação adesiva parece bastante simples e direto. Inicia-se com um processo de aplicação de um adesivo, o mesmo endurece e cria-se finalmente uma ligação perfeita entre o adesivo e o aderente. No entanto, se for efetuada uma preparação incorreta da superfície dos substratos, há uma grande probabilidade de que a ligação entre o adesivo e o substrato seja imperfeita, limitando a capacidade de carga e originando uma falha prematura. Na realidade, os fenómenos de adesão envolvidos no processo de ligação são bastante complexos e é importante ter pelo menos uma compreensão básica dos mecanismos envolvidos para que seja possível desenhar e projetar juntas fortes e duráveis.

2.1. FORÇAS DE ADESÃO

Começando com uma visão muito simplista, visualizemos os adesivos como pontes entre as superfícies dos aderente. Há dois tipos de forças essenciais em jogo neste modelo. A primeira é a adesão – a força de ligação entre o adesivo e o aderente. A segunda é a coesão – a força interna do adesivo e do aderente. A falha de uma união adesiva pode ocorrer de três formas possíveis, como ilustrado na Figura 2.1. Estas são a falha adesiva (falha na interface), falha coesiva (que pode ocorrer no seio do adesivo ou do aderente) e finalmente falha mista, onde existe uma combinação de falha adesiva e coesiva na mesma superfície de fratura.

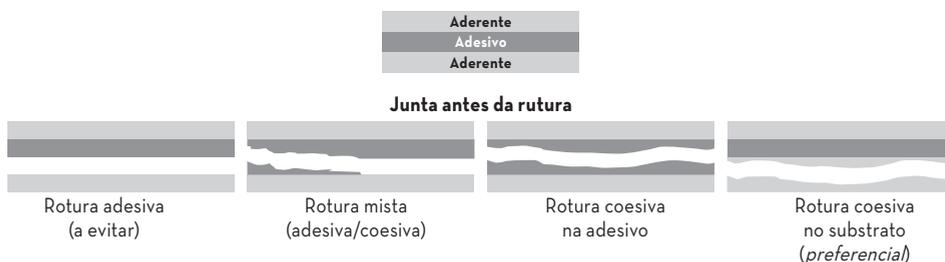


Figura 2.1. Modos de falha possíveis numa junta adesiva.

Na interface, os adesivos ligam-se aos aderentes através de ligações químicas e o tipo de forças envolvidas dependem da natureza química das superfícies dos materiais em questão. As ligações que se podem formar dividem-se em ligações primárias e secundárias.

As ligações primárias são aquelas onde existe partilha ou transferência de eletrões entre os átomos envolvidos e como tal incluem as ligações iónicas, covalentes e metálicas. São ligações muito fortes (100-1000 kJ/mol) mas que operam a distâncias muito curtas, apenas eficazes em alguns angstroms de distância (10^{-10} m). Em contraste, as ligações secundárias não dependem da partilha ou transferência de eletrões, mas sim da interação entre os dipolos atômicos e moleculares. Entre estas contam-se as forças de van der Waals e as ligações de hidrogénio. São forças capazes atuar em distâncias relativamente longas, mas muito mais fracas (<100 kJ/mol).

A Figura 2.2. mostra como a energia de ligação destas forças primárias e secundárias varia com a distância.

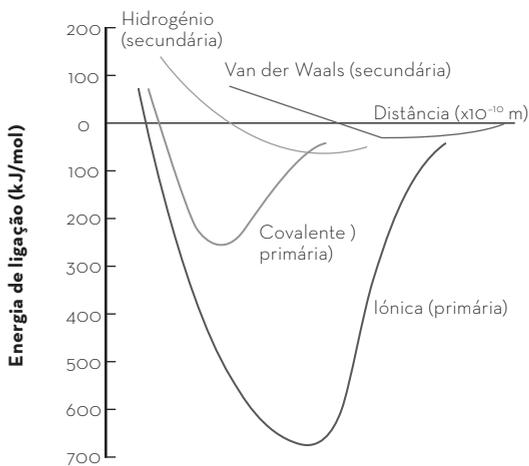


Figura 2.2. Energia de ligação das forças primárias e secundárias envolvidas no processo de adesão.

2.2. MOLHAGEM

Além das forças de ligação presentes, outro fator importante para o nível de adesão é a molhagem do substrato pelo adesivo, ou seja, a maneira como este se espalha sobre a superfície a colar.

Um dos parâmetros que mais influencia a molhagem é a rugosidade de uma superfície. No entanto, não existe um valor ótimo universal para a rugosidade e, conseqüentemente, torna-se necessário adaptar a preparação da superfície ao material que será colado, considerando também o tipo de adesivo que será aplicado.

É importante chamar a atenção para a diferença de escala entre a rugosidade e as forças envolvidas na adesão. A diferença é tão vasta que, quando comparados com as distâncias minúsculas em que as ligações químicas operam, os perfis de rugosidade são quase como montanhas. Mesmo o valor mais pequeno de rugosidade é mil vezes mais substancial do que o nível de ação das forças de ligação.

Numa primeira análise, é fácil pensar que as forças químicas só poderiam atuar sobre os picos de rugosidade. Contudo, a grande vantagem do uso de um adesivo é a sua capacidade de ultrapassar esta diferença de escala. Se se espalhar perfeitamente na superfície e se for possível obter um contacto íntimo entre todas as superfícies a colar e o adesivo, quer a rugosidade, quer as ligações químicas entre materiais poderão contribuir grandemente para o grau de colagem. O espalhamento é ideal se o adesivo for líquido e puder fluir livremente ao longo de toda a superfície rugosa, preenchendo todas as cavidades conforme ilustrado na Figura 2.3.

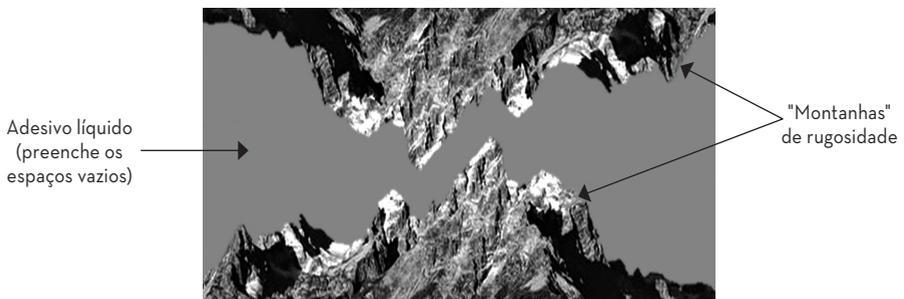


Figura 2.3. Papel do adesivo no estado líquido no preenchimento dos espaços vazios entre substratos.

Posteriormente à molhagem, ocorrerá uma mudança de fase através de um processo de endurecimento e a ligação efetiva entre os aderentes e o adesivo terá lugar (Figura 2.4.). Note-se que o aumento da rugosidade superficial influencia a molhabilidade e deve ser adequadamente compreendido para assegurar a qualidade da ligação. Alterações na rugosidade da superfície podem ser conseguidas através de métodos de preparação da superfície, sendo esta uma das operações mais delicadas e importantes no fabrico de juntas. Este tópico será discutido em maior profundidade no Capítulo 3.

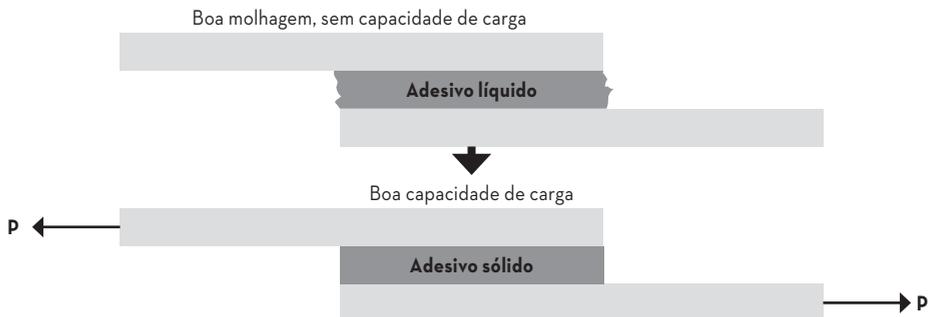


Figura 2.4. Processo de molhagem de um adesivo no estado líquido e posterior solidificação.

Num cenário ideal, os adesivos líquidos seriam sempre capazes de molhar completamente todas as superfícies a colar, mas isto nem sempre ocorre e o adesivo é por vezes repellido pela superfície. Um fenómeno análogo pode ser visto nas folhas de certas plantas quando estas recebem orvalho ou chuva. As gotas de água assumem a forma de uma esfera, em vez de criar uma película uniforme e bem espalhada na superfície das folhas, como mostra a Figura 2.5. Este fenómeno ocorre porque a superfície é hidrofóbica, repelindo moléculas de água. Este grau de molhagem (ou a molhabilidade) é na prática determinado por um balanço de forças entre o adesivo e as forças coesivas.



Figura 2.5. Gotas de água na superfície de uma folha.

Num líquido, como é o caso de um adesivo não endurecido, as forças de atração entre as moléculas estão numa condição de equilíbrio em todas as direções. Mas na superfície do líquido este tipo de equilíbrio não pode existir, porque não há moléculas vizinhas do lado de fora da superfície e as moléculas são sujeitas apenas a uma força que as puxa para dentro do líquido (ver Figura 2.6). Para trazer novas moléculas à superfície, deverá ser realizado trabalho, fazendo assim com que as moléculas à superfície tenham uma energia superior àquelas do interior. Esta energia extra das moléculas que estão à superfície que é designada por 'energia livre de superfície' ou simplesmente por 'energia de superfície', expressa como energia por unidade de área (com unidades mJ m^{-2}). Mais precisamente, esta é a energia necessária para criar uma unidade de área numa superfície.

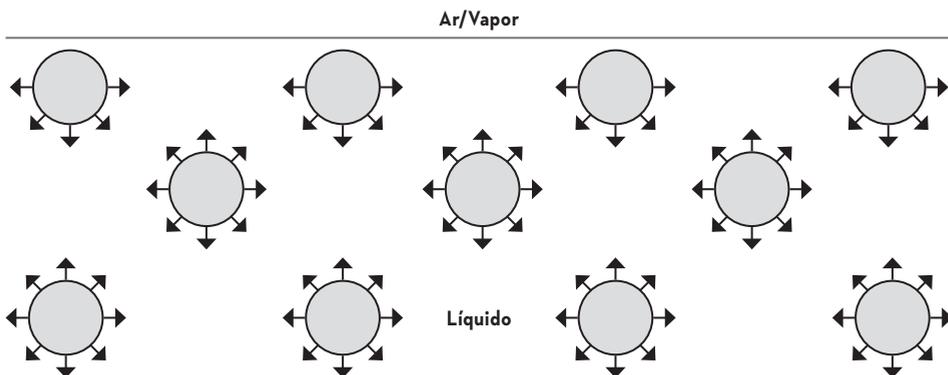


Figura 2.6. Equilíbrio entre ar e líquido na superfície de um líquido.

O princípio de energia mínima é utilizado para determinar se um líquido se espalha ou não numa superfície sólida. É este princípio que explica que um líquido se espalha num sólido com uma maior energia de superfície e não num com baixa energia de superfície. Se a superfície sólida de elevada energia for substituída por uma superfície de menor energia (o líquido), então a energia total do sistema é reduzida e isso será um processo espontâneo. Resumidamente podemos dizer que se:

- Energia do líquido (γ_L) < Energia do sólido (γ_S) o líquido espalha-se
- Energia do líquido (γ_L) > Energia do sólido (γ_S) o líquido não se espalha

As superfícies de elevada energia são aquelas onde a γ_S varia entre 500 e 5000 mJ m⁻², correspondendo, por exemplo a metais e os seus óxidos ao vidro e o diamante. Todos estes são materiais duros com elevado ponto de fusão. Já as superfícies de baixa energia apresentam uma γ_S entre 5 e 100 mJ m⁻²; e nelas se incluem a maioria dos sólidos orgânicos e os materiais poliméricos, materiais geralmente macios e com baixos pontos de fusão. Num exemplo prático, se considerarmos um adesivo epóxico, com energia superficial de 47 mJ m⁻², este irá espalhar-se bem numa superfície de alumínio (energia superficial de cerca de 500 mJ m⁻²). No entanto, se este mesmo adesivo for aplicado a uma superfície de teflon (com energia de 18 mJ m⁻², não haverá boa molhagem da superfície e o adesivo formará gotas esféricas na superfície.

O ângulo de contacto entre a gota de líquido e a superfície sólida proporciona uma medida inversa de molhabilidade e permite determinar a energia superficial recorrendo à equação de Young. O ângulo formado pela superfície sólida e a linha tangente à superfície superior no ponto final chama-se ângulo de contacto, conforme ilustrado na Figura 2.7. O ângulo de contacto é, portanto, uma informação valiosa para determinar as condições ótimas de molhabilidade da superfície a colar.

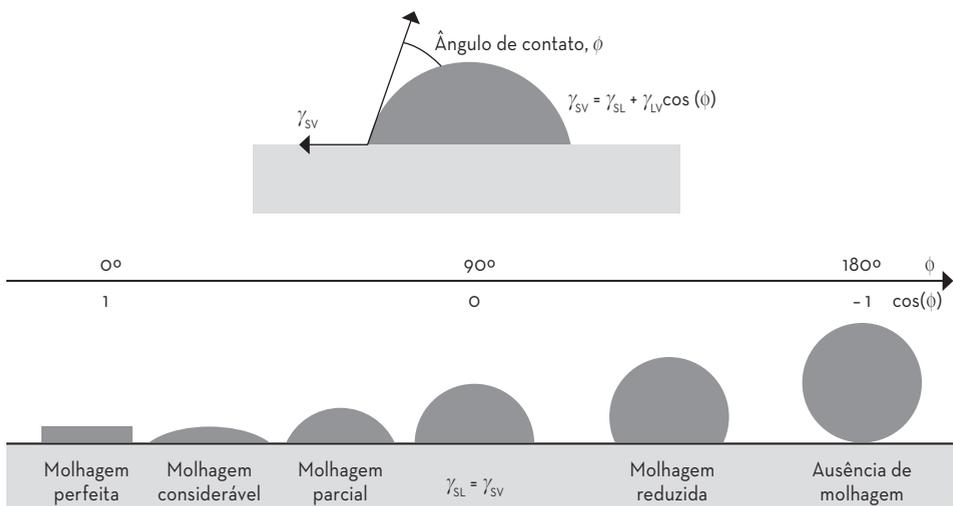


Figura 2.7. Ângulo de contacto de um líquido aplicado numa superfície e a equação de Young.

Medir a energia superficial de um líquido é um procedimento relativamente fácil, o qual pode ser feito usando um teste de capilaridade. Em materiais sólidos as metodologias aplicadas são normalmente um pouco mais complexas, dependendo da medição direta do ângulo de contato ou do uso de tintas com diferentes níveis de energia superficial. As técnicas habitualmente utilizadas para medir esta propriedade em superfícies sólidas serão discutidas com mais detalhe no Capítulo 6 deste livro.

2.3. TEORIAS DA ADESÃO

O fenômeno de adesão tem sido alvo de intenso estudo e investigação, do qual resultaram diversas teorias que procuram explicar a sua existência. Note-se que cada uma destas teorias aborda a adesão sob o ponto de vista um mecanismo particular, embora a adesão seja na realidade o resultado da soma de uma variedade de forças mecânicas, físicas e químicas que atuam em conjunto e interagem umas com as outras. Estas forças incluem o encravamento mecânico, que é causado pela ancoragem mecânica do adesivo na topografia da superfície, as forças eletrostáticas, geradas pelo diferencial de eletronegatividade entre os substratos a ligar e o adesivo, e os mecanismos de adesão baseados em forças intermoleculares e químicas que ocorrem na zona da interface. As teorias que explicam a existência destas forças são a teoria mecânica, teoria da adsorção, teoria da difusão e a teoria eletrostática. A teoria mecânica e a teoria da adsorção são descritas em detalhe nas seções seguintes.

2.3.1. Teoria mecânica

De acordo com a teoria mecânica, a adesão ocorre se houver um certo nível de irregularidades na superfície, resultante de rugosidade ou porosidade. Um processo de encravamento mecânico ocorre quando o adesivo líquido penetra e preenche todas as cavidades e irregularidades do substrato e posteriormente solidifica, impedindo a separação.

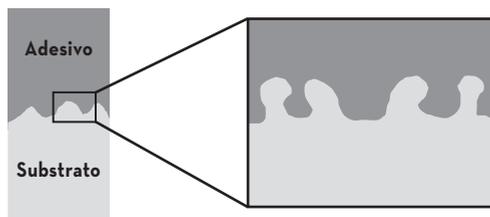


Figura 2.8. Princípio de encravamento mecânico entre adesivo e substrato.

Esta teoria pressupõe que o adesivo seja capaz de molhar o substrato de forma completa e que apresente as capacidades de escoamento (propriedades reológicas) adequadas para penetrar nos poros e vazios de uma forma rápida. Embora este seja um mecanismo importante, em muitos casos uma boa adesão pode ser obtida entre superfícies perfeitamente lisas, o que mostra que apesar de o encravamento mecânico ajudar à adesão, não é um mecanismo universal, passível de ser aplicado a todos os casos.

2.3.2. Teoria da adsorção física e química

A teoria da adsorção para a adesão supõe que a adesão é resultado das forças de ligação que são geradas quando as moléculas do adesivo e do substrato são colocadas em contacto muito próximo.

No caso da adsorção física, a ligação é criada essencialmente por ligações secundárias como as forças de van der Waals. Estas são as forças mais importantes no processo de adsorção e intervém em praticamente todas as ligações adesivas. No entanto, para que sejam eficazes, é essencial garantir uma molhagem de boa qualidade, de forma a trazer um grande número de cadeias moleculares do adesivo para a proximidade da superfície do substrato. Uma representação esquemática da adsorção física é mostrada na parte esquerda da Figura 2.9.

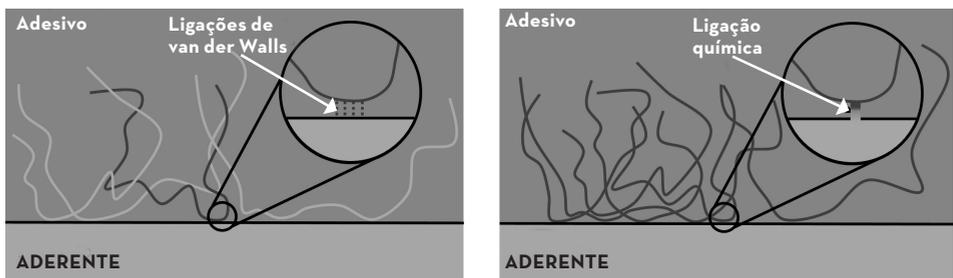


Figura 2.9. Princípio de adsorção física (esquerda) e química (direita) entre adesivo e substrato.

Em contraste, um processo de adsorção química requer o estabelecimento de ligações químicas entre os átomos do adesivo e o substrato, conforme ilustrado na parte direita da Figura 2.9. Estas podem incluir interações ácido-base, ligações de hidrogénio e até ligações primárias. As ligações químicas primárias são extremamente fortes e contribuem significativamente para o nível de adesão em alguns casos. As ligações por adsorção química podem ser potenciadas com uso de agentes de ligação e de promotores de adesão (como primários).

**PREPARAÇÃO
SUPERFICIAL**

3

3. PREPARAÇÃO SUPERFICIAL

Como vimos no capítulo anterior, a preparação da superfície de um substrato é uma tarefa fundamental na criação de uma junta adesiva forte e durável, pois afeta de forma drástica o nível de adesão entre o adesivo e o substrato, controlando assim a resistência da junta. De facto, havendo necessidade de projetar uma nova junta colada, a seleção do tratamento mais adequado para a junta em questão é sem dúvida uma das etapas mais críticas, uma vez que uma preparação de superfície incorreta ou insuficiente resultará quase sempre numa junta com uma capacidade muito reduzida de suportar cargas. O efeito da preparação de superfície é extremamente importante para juntas que serão expostas a condições ambientais exigentes, uma vez que estas são altamente suscetíveis à falha interfacial.

O objetivo da preparação da superfície é, portanto, otimizar as forças de adesão entre a superfície do substrato e a camada de adesivo. Para este fim, deverá ser procurado um compromisso entre a molhabilidade da superfície, a viscosidade do adesivo e a rugosidade do substrato. Idealmente, o adesivo deve espalhar-se pela superfície, o que significa que o adesivo escolhido deve molhar a superfície do substrato, mas sem detrimento da compatibilidade química (ao nível intermolecular e de interações químicas) entre o adesivo e a camada superficial do substrato.

Deverá ser também assegurado que não existe qualquer tipo de “camada fraca” entre o adesivo e o substrato. Este tipo de camada é relativamente comum e pode ter várias origens, tais como películas de contaminantes, camadas de óxido, corrosão, partículas soltas, pó ou mesmo gordura. Um exemplo desta camada é mostrado na Figura 3.1.

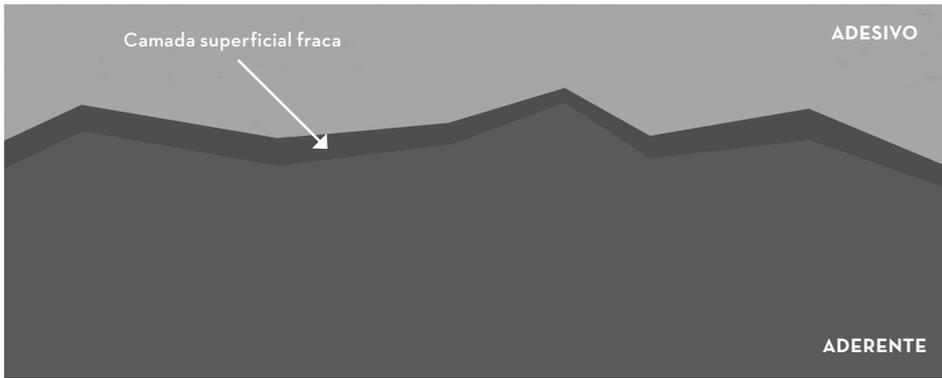


Figura 3.1. Camada fraca na superfície de um substrato.

3.1. SELEÇÃO DE UM TRATAMENTO DE PREPARAÇÃO SUPERFICIAL

Para selecionar o tratamento de superfície ideal, é primeiro necessário conhecer a natureza e as principais características físicas e químicas dos materiais selecionados. De facto, este é um dos principais desafios associados às atividades de preparação de superfície, uma vez que a ligação adesiva pode ser aplicada a um vasto número de materiais, cada um com o seu conjunto de técnicas de preparação apropriadas. O tipo de preparação de superfície determinará inequivocamente o comportamento da junta, algo que pode ser facilmente observado na Figura 3.2. Nesta figura é mostrado um trabalho experimental, onde três preparações de superfície diferentes são usadas para a colagem de um plástico, sendo evidente que o tipo de fratura e o comportamento mecânico obtido muda significativamente com o tipo de preparação escolhido.

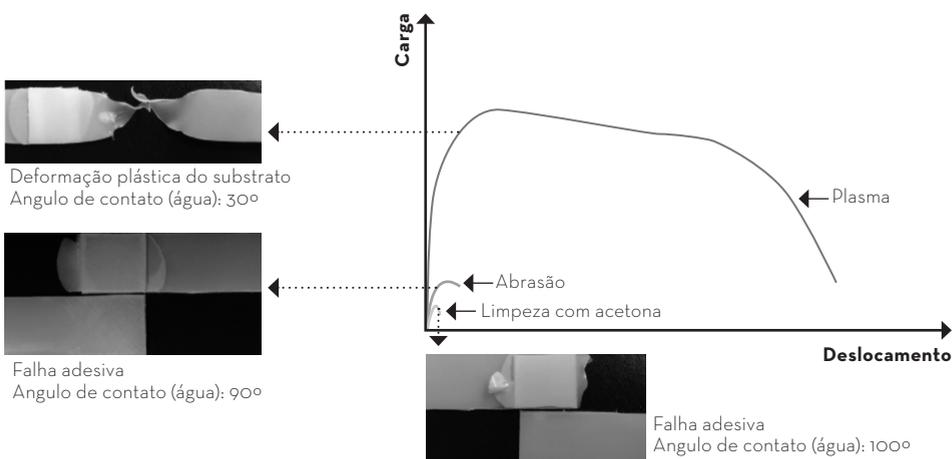


Figura 3.2. Influência de preparação superficial na resistência de uma junta adesiva.

Note-se também que os tratamentos de superfície apresentam um papel fundamental na durabilidade das juntas adesivas. Como mostrado na, embora muitos tratamentos superficiais apresentem resistência similares imediatamente após a colagem, tal não ocorre a longo prazo, especialmente se a junta for sujeita a condições ambientais adversas (Figura 3.3).

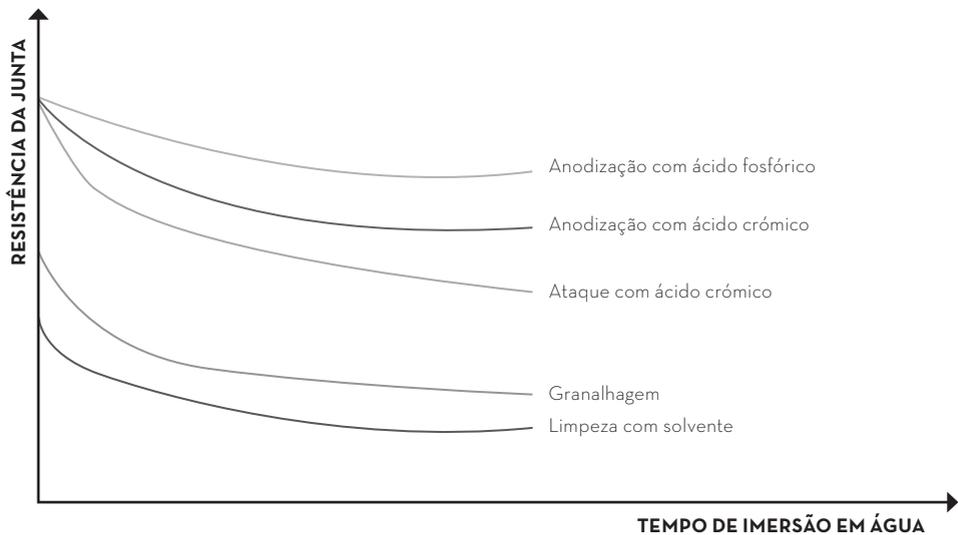


Figura 3.3. Influência do tipo de preparação superficial na durabilidade de uma junta adesiva.

Os tratamentos de superfície adequados para uso com metais dependem de diversos fatores. O mais importante destes prende-se com a camada de óxido à superfície. É sabido que existem óxidos estáveis, fortemente ligados aos materiais base, enquanto outros óxidos encontram-se dispostos em camadas com baixa resistência mecânica. Normalmente, a natureza dos óxidos em materiais fornecidos não é bem conhecida, pelo que é aconselhável removê-los e substituí-los por um óxido estável e bem controlado. Idealmente, a preparação da superfície deve remover todas as camadas superficiais até que o metal de base seja exposto.

Em contraste, os polímeros têm naturalmente uma baixa energia superficial e apresentam superfícies muito dinâmicas, que se alteram mais facilmente do que as dos metais. Em muitos casos, encontram-se também nestas superfícies substâncias associadas a produção (como agentes desmoldantes) e camadas orientadas, as quais podem influenciar grandemente a resistência interfacial de uma junta, mesmo que não alterem de forma significativa as propriedades mecânicas do polímero de base. As superfícies dos polímeros são, portanto, regiões muito dinâmicas, que estabelecem continuamente novos equilíbrios internos com o interior do polímero e equilíbrios externos com o ambiente. Diversos contaminantes podem ser encontrados nas superfícies de polímeros, incluindo plastificantes e lubrificantes assim como agentes desmoldantes, hidrofóbicos e anti-estáticos, assim como zonas contaminadas pelo contato com as mãos, ricas em íons cloreto, aminoácidos, ureia, amoníaco, gordura.

Os compósitos exibem algumas das propriedades inerentes a cada constituinte, mas também um novo conjunto de propriedades que surgem da formação de uma região interfacial. Em aplicações estruturais, as ligações adesivas são quase sempre a técnica de eleição para a união de compósitos de matrizes poliméricas reforçados com fibras, uma vez que não requerem furos ou outras modificações no material compósito. No entanto, é difícil assegurar uma adesão ótima aos compósitos, uma vez que, tal como descrito para os polímeros, as superfícies destes materiais são normalmente cobertas com agentes desmoldantes à base de silicone ou teflon, resultantes dos seus processos de fabrico. Como consequência, as energias de superfície exibidas são frequentemente muito baixas, especialmente nos compósitos com matrizes termoplásticas. Embora seja fundamental limpar estes contaminantes, a utilização de tratamentos abrasivos intensivos é fortemente desaconselhada, pois pode causar danos severos na superfície e até danificar o material de reforço. É, portanto, essencial que seja feita uma seleção cuidadosa dos procedimentos de tratamento da superfície.

3.2. PROCESSOS DE TRATAMENTO SUPERFICIAL

Os tratamentos de superfície encontram-se habitualmente classificados em dois grandes grupos: os tratamentos passivos e os tratamentos ativos. Quando um tratamento passivo é aplicado, não existe modificação da natureza química da superfície aderente. Tais tratamentos limitam-se a limpar e remover as camadas fracas da superfície. Embora estes processos tenham um contributo importante para melhorar a adesão, em bastantes casos tal ação não é suficiente, o que requer a realização de tratamentos ativos. Ainda assim, os tratamentos passivos são quase sempre utilizados como um passo inicial na preparação de uma superfície, expondo o material base que, se necessário, pode depois ser processado utilizando um tratamento ativo.

Os processos ativos podem também ser utilizados para a limpeza e remoção das camadas fracas, mas a sua principal vantagem prende-se com o facto de alterarem a natureza química da superfície, sendo esta a razão para a denominação “ativa”. Estes processos podem ainda ser divididos em tratamentos físicos ou químicos, dependendo da forma como modificam a superfície.

3.2.1. Processos passivos

3.2.1.1. Limpeza química

Os processos químicos visam essencialmente remover áreas oleosas ou gordurosas, que dão origem a níveis de adesão muito baixos. Em diversas aplicações de ligação, de cariz não estrutural, estes processos são muitas vezes suficientes. Já em aplicações estruturais de alta responsabilidade, a limpeza química surge frequentemente como o primeiro passo de um processo mais complexo de tratamento de superfícies.

O desengorduramento é o método mais simples de limpeza química, sendo crucial para a obtenção de uma superfície limpa, aumentando assim sua energia livre da superfície e melhorando o nível de espalhamento dos adesivos. Este processo pode ser implementado através de limpeza manual (mostrada na Figura 3.4.), imersão, pulverização, vapor ou auxiliado por exposição a ultrassons. Destes, os três primeiros métodos são certamente os mais simples e fáceis de implementar, mas também são os mais difíceis de controlar, uma vez que a sua eficácia depende quase inteiramente da experiência do operador que executa a tarefa. Os agentes de limpeza utilizados para realizar o tratamento passivo de superfície devem remover todos os contaminantes solúveis da superfície do substrato. Os agentes polares dissolvem os contaminantes polares, enquanto os agentes não polares apresentam melhor desempenho em superfícies com contaminantes não polares



Figura 3.4. Limpeza manual de um substrato com recurso a um solvente (acetona).

Em termos gerais, os tratamentos mecânicos, químicos, eletroquímicos, e alguns outros tratamentos alternativos produzem níveis de adesão e durabilidade muito superiores aos resultantes de um simples processo de desengorduramento.

3.2.1.2. Processo de abrasão

A abrasão manual, ou em alguns casos, a abrasão com ajuda de equipamentos e máquinas (como conseguido, por exemplo, utilizando lixadoras de cinta) é muito utilizada para preparar a superfície de um substrato, sendo um método prático e que não exige grandes investimentos em equipamento especializado. O uso de abrasão é ideal quando o trabalho em pequena escala deve ser feito numa oficina ou em uso doméstico, embora seja encontrado com frequência em aplicações industriais.

Tal como a limpeza química anteriormente descrita, os processos manuais de abrasão, utilizando lixa, escovas e lâ metálica, dependem largamente da experiência do operador. Se executados incorretamente, originam resultados inconsistentes e só devem ser utilizados se nenhum outro método for possível. Além disso, quando um processo de abrasão a seco é empregue, é fortemente recomendado incluir no procedimento um desengorduramento

prévio, evitando que os resíduos de superfície fiquem incrustados na superfície a ser tratada ou sejam transferidos para outras áreas da superfície, reduzindo a eficácia do processo.

Recomenda-se que a abrasão da superfície seja feita em movimentos alternados e cruzados (perpendiculares entre si), a fim de garantir que não existe uma direção tratada preferencial na superfície. Após a conclusão do processo, as partículas e o pó devem ser cuidadosamente limpos da superfície, o que pode ser conseguido utilizando um jato de ar comprimido sem óleo, ou repetindo um processo de limpeza química.

3.2.1.3. Granalhagem

O uso de um jato de granalha ou de areia, é um processo amplamente utilizado na preparação de superfícies, sendo particularmente útil para substratos metálicos. Neste método, ar comprimido é usado para projetar partículas abrasivas contra a superfície a tratar, permitindo uma rápida e eficaz remoção de contaminantes e camadas de óxido. Este método requer algum investimento em equipamento especializado, embora o custo do equipamento de granalhagem não seja muito elevado devido à sua construção relativamente simples, tal como apresentado na Figura 3.5. É de notar que cada tipo de material requer um procedimento de granalhagem distinto, utilizando formas, tamanhos de partículas e pressões de funcionamento diferentes.

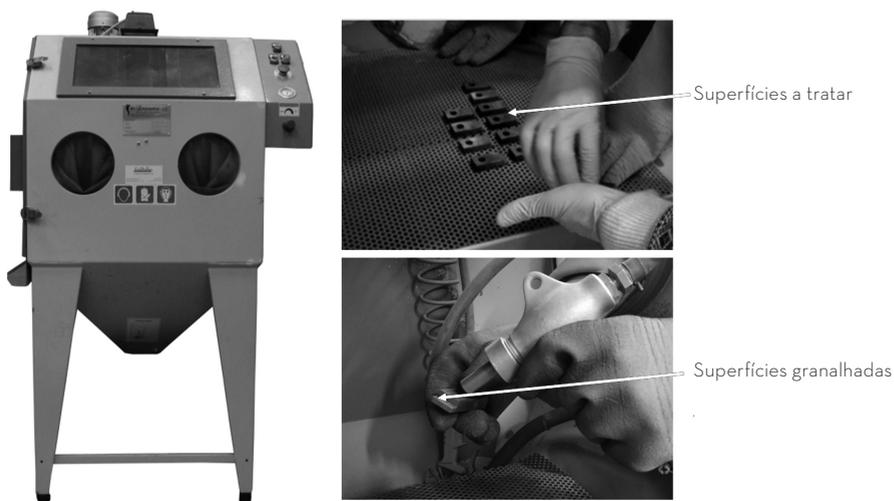


Figura 3.5. Processo de granalhagem de um substrato metálico.

Em muitos materiais, as superfícies processadas desta forma originam um aumento notório e importante do nível de adesão. Contudo, a rugosidade excessiva pode causar uma diminuição da resistência devido à formação de poros na superfície, que pode ser a fonte de fendas em serviço, especialmente em componentes que em serviço sejam sujeitos a cargas de fadiga.

3.2.2 Processos ativos

Os processos químicos ativos são bastante diversos e formulados de uma forma otimizada para os materiais alvo. Os tratamentos aplicados aos metais diferem muito dos aplicados aos polímeros, uma vez que o objetivo deste tratamento é radicalmente diferente. No caso dos metais, as camadas de óxido e outras camadas fracas são removidas, promovendo um aumento da rugosidade e levando a uma melhoria na adesão mecânica, seguindo uma linha de ação próxima da conseguida com métodos passivos. Nos polímeros o tratamento químico é geralmente mais difícil, tendo como objetivo ativar uma superfície e criar locais reativos. Estes locais reativos irão suportar ligações van der Waals, químicas e pontes de hidrogénio. Podem também ter uma contribuição positiva (mas limitada) para o encravamento mecânico

3.2.2.1. Processo de tratamento ativo de metais

O método químico baseia-se no princípio da solubilidade dos óxidos, hidróxidos e outros compostos de superfície no decapante. O agente decapante pode ser um ácido (H_2SO_4 , HCl, HNO_3 ou HF) ou uma base (NaOH), e todos os produtos da reação são geralmente solúveis num meio aquoso.

Os tratamentos eletroquímicos são especialmente utilizados no tratamento de alumínio e ligas de titânio na indústria aeronáutica, seguindo um processo vulgarmente chamado de anodização. Neste tratamento ocorre a formação e crescimento de uma camada de óxido com uma estrutura celular bem definida. O tratamento tem lugar em banhos de anodização ácida, onde o substrato a ser tratado atua como um ânodo (com carga positiva). Os substratos tratados com métodos eletroquímicos apresentam bons níveis de adesão, estabilidade a longo prazo e resistência à corrosão. As diferenças entre uma superfície de liga de alumínio tratada e não tratada estão representadas na Figura 3.6.

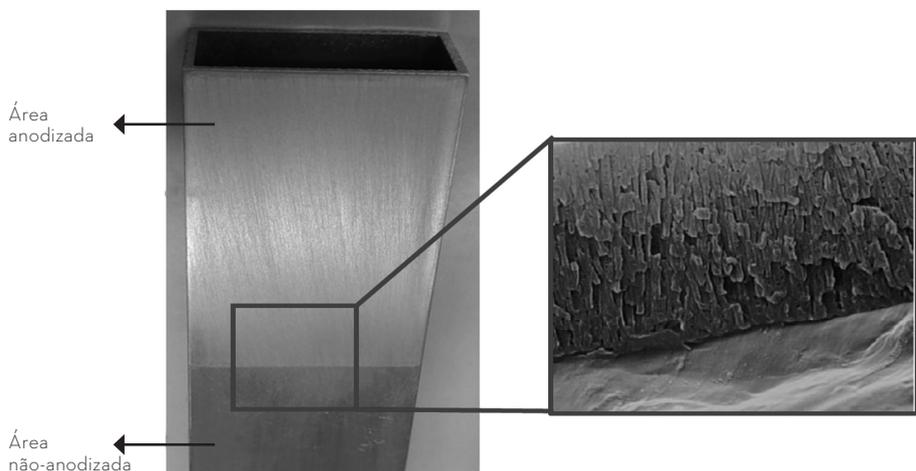


Figura 3.6. Anodização de um substrato de alumínio.

Estas alterações são facilmente observadas a olho nu, mas são especialmente óbvias quando observadas por um microscópio eletrônico. Nos tratamentos eletroquímicos, apenas óxidos condutores de iões (por exemplo, Al_2O_3 , TiO_2) podem ser depositados em camadas espessas por anodização, a Figura 3.7. representa esquematicamente a camada de óxido formada na superfície de um metal, mostrando os poros que podem potenciar o encravamento mecânico do adesivo.

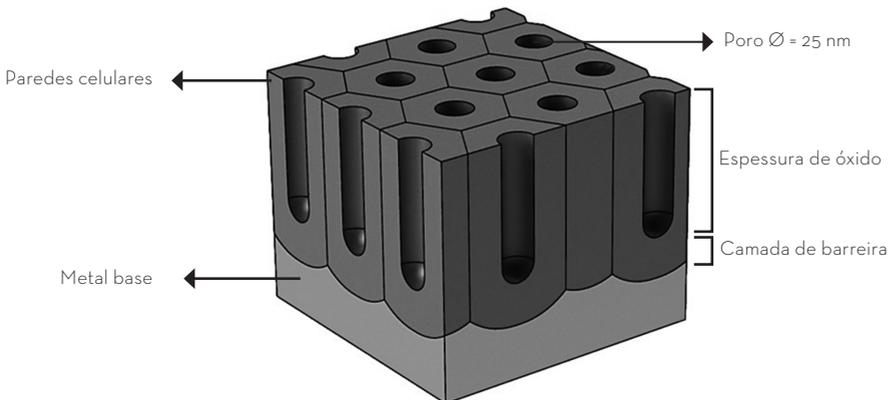


Figura 3.7. Esquema representativo da estrutura criada durante o processo de anodização.

3.2.2.2. Processos de tratamento ativo de polímeros

Existem diversos tratamentos ativos de polímeros adequados para a preparação de substratos de juntas adesivas. No entanto, o tratamento por chama, por plasma e por descarga de corona são atualmente os mais relevantes em termos industriais.

Chama

O tratamento à chama é um tratamento de superfície para polímeros muito simples e barato que é realizado expondo a superfície dos substratos a uma chama. O objetivo deste tratamento é a oxidação da superfície do polímero, a qual conduzirá à formação de complexos químicos favoráveis ao estabelecimento das ligações desejadas. Os fenômenos que intervêm na superfície são do mesmo tipo dos que ocorrem em métodos alternativos como o tratamento de plasma ou a descarga de corona, mas este é um método mais energético e denso em energia, com mais potencial para danificar os substratos se usado incorretamente. Os seus efeitos deterioram-se rapidamente com o tempo, uma vez que o material tratado, agora altamente ativo, reage quimicamente com a atmosfera. Consequentemente, a colagem deve ser realizada imediatamente após o tratamento ou dentro de um curto período de tempo.

Plasma

No tratamento por plasma, os polímeros são expostos a um jato de plasma, alterando a sua química superficial. O plasma é constituído por uma massa de ar que foi sujeita a uma forte descarga elétrica, o que provoca a dissociação das ligações moleculares dos seus gases constituintes, transformando-o num plasma contendo partículas carregadas (elétrões e iões positivos) que reage facilmente com materiais poliméricos. A maioria dos materiais poliméricos apresenta superfícies quimicamente inertes e não porosas, com baixa energia superficial, pouco recetivas à ligação adesiva. O tratamento de superfície à base de plasma retifica esta situação, formando uma superfície quimicamente ativa, que adere prontamente aos adesivos. O tratamento com plasma pode ser realizado com ar ionizado (plasma atmosférico) ou com um gás específico, ionizado dentro de uma câmara selada (plasma de baixa pressão). Um exemplo de um tratamento por plasma de um material compósito e o seu efeito no ângulo de contato é mostrado na Figura 3.8.

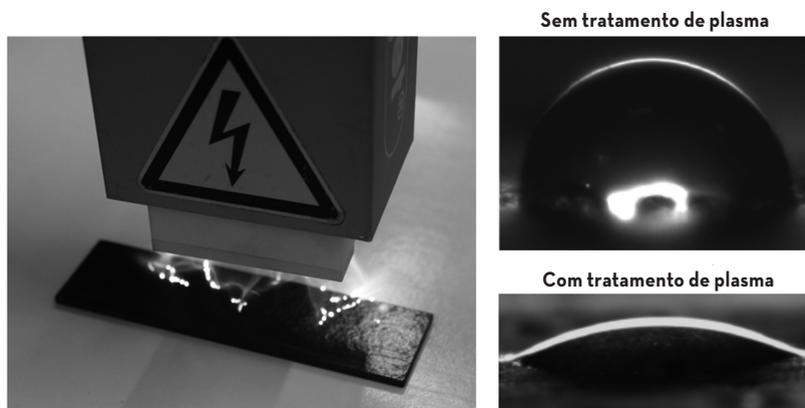


Figura 3.8. Tratamento por plasma de um material compósito e o seu efeito no ângulo de contato.

Descarga de corona

O tratamento de descarga de corona (CDT) é uma técnica de modificação da superfície que aplica um plasma para promover modificações nas propriedades de uma superfície. Um plasma de descarga de corona é simplesmente o ar altamente ionizado que envolve um material condutor altamente carregado eletricamente e que se encontra exposto à atmosfera. Este tratamento foi inicialmente desenvolvido para tratar filmes poliméricos destinados a processos de pintura e de revestimento, mas o seu potencial para as juntas adesivas foi rapidamente notado. Este tipo de equipamento é ideal para o tratamento de formas planas como as películas, permitindo que ambos os lados sejam tratados simultaneamente.

**SELEÇÃO DE
ADESIVOS E
PRINCIPAIS
FAMÍLIAS
DE ADESIVOS**

4

4. SELEÇÃO DE ADESIVOS E PRINCIPAIS FAMÍLIAS DE ADESIVOS

Este capítulo contém uma descrição dos principais tipos de adesivos disponíveis no mercado, as suas vantagens, limitações e utilizações típicas, permitindo a sua utilização como referência num processo de seleção de material. Contudo para poder compreender as suas diferenças, é importante classificar primeiro os adesivos em categorias bem definidas. Os adesivos são um conjunto diversificado de materiais e existem diversos principais métodos de classificação adequados para os dividir. Aqui apresentam-se cinco destes métodos: a estrutura molecular, a composição química, a forma física, o desempenho mecânico e, por último, o método de endurecimento.

4.1. ESTRUTURA MOLECULAR

A maioria dos adesivos são polímeros, partilhando grande parte da sua química básica com os plásticos que usamos extensivamente na nossa vida quotidiana. Estes materiais apresentam longas moléculas, compostas por muitas unidades repetidas que são chamadas de monómeros. Os monómeros são unidos em cadeias poliméricas segundo um processo a que chamamos de polimerização (Figura 4.1).

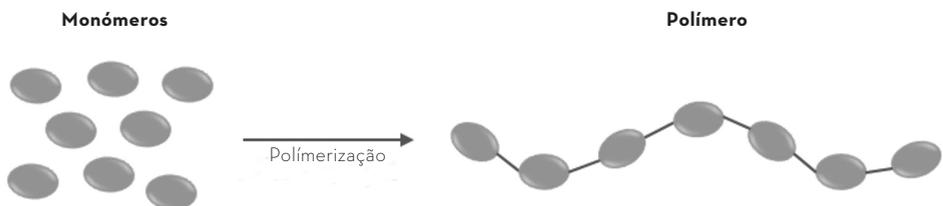


Figura 4.1. Processo de polimerização.

Os materiais poliméricos apresentam três tipos de estruturas moleculares distintas, dando origem aos polímeros termoendurecíveis, termoplásticos e elastômeros. Também nos adesivos podemos encontrar esta classificação. As estruturas típicas destes tipos de polímeros podem ser encontradas na Figura 4.2.



Figura 4.2. Estruturas moleculares típicas de polímeros termoplásticos, elastômeros e termoendurecíveis.

Os termoendurecíveis são polímeros que apresentam cadeias poliméricas compactas, que, devido à sua proximidade, estão unidas por muitas ligações químicas (estrutura altamente reticulada). Os termoendurecíveis são materiais que não derretem com a temperatura, o que significa que podem operar a temperaturas relativamente elevadas e sem danos. A esmagadora maioria das ligações adesivas estruturais recorre a adesivos termoendurecíveis, uma vez que estes apresentam propriedades mecânicas e de durabilidade superiores.

Em contraste com os termoendurecíveis, os termoplásticos apresentam uma estrutura molecular muito mais aberta, com menos ligações entre as diferentes cadeias poliméricas. As cadeias estão assim muito mais livres para se moverem e para deslizar umas em relação às outras. A principal consequência desta liberdade é o facto de os termoplásticos poderem derreter e tornar-se líquidos acima de uma dada temperatura (a temperatura de fusão). Os adesivos termoplásticos têm uma resistência relativamente baixa e são altamente flexíveis, não sendo especialmente adequados para aplicações estruturais. Assim sendo, os adesivos termoplásticos são preferencialmente usados em aplicações com baixas cargas, como a montagem de painéis, revestimentos e cabos.

Os elastômeros são os polímeros com o mais alto grau de liberdade na sua estrutura molecular, apresentando longas cadeias poliméricas que só estão interligadas por ligações amplamente espaçadas. Como resultado, um adesivo de elastômero é muito flexível e pode ser esticado até comprimentos várias vezes mais longos do que o seu comprimento inicial. A resistência de adesivos baseados em elastômeros é bastante baixa, mas a sua elevada flexibilidade é muito útil em aplicações onde é fundamental absorver vibrações ou permitir movimentos relativos entre componentes.

Podemos também encontrar polímeros híbridos, correspondendo àqueles que não se encaixam num único grupo dos três apresentados anteriormente. São normalmente compostos por uma combinação de substâncias com estruturas moleculares distintas. Um exemplo importante são os adesivos termoendurecíveis, modificados com partículas de borracha. Nestes materiais, um adesivo termoendurecível altamente reticulado (e como tal rígido e frágil) é reforçado com partículas de borracha (um elastómero). Quando uma fenda surge neste material, o movimento da mesma será retardado ao atingir as partículas de borracha, conforme mostrado na Figura 4.3. A fenda terá de contornar a partícula e energia será consumida no processo de separação da partícula da matriz adesiva. Os adesivos reforçados combinam assim a alta resistência dos adesivos termoendurecíveis com a tenacidade elevada dos materiais elastoméricos. De facto, muitos dos adesivos estruturais disponíveis no mercado exploram algum tipo de reforço deste tipo, uma vez que permite uma importante melhoria do comportamento mecânico a um baixo custo.

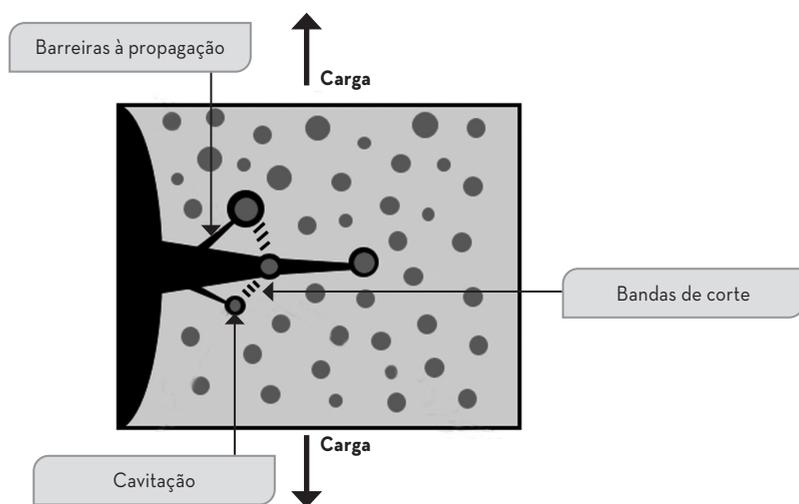


Figura 4.3. Mecanismo de reforço de um polímero reforçado com partículas de borracha.

4.2. FORMA FÍSICA

A forma física de um adesivo é um fator importante no seu processo de seleção, uma vez que determinará se um adesivo é adequado para utilização numa determinada aplicação e processo de manufatura. Por exemplo, se for necessário aplicar um adesivo num espaço apertado e relativamente inacessível, apenas um adesivo líquido pode ser utilizado. Em contraste, para preencher um vazio com uma espessura superior a 0,2 mm, apenas um adesivo em pasta será adequado, uma vez que apresenta a viscosidade necessária para permanecer no lugar e não fluir para fora da camada adesiva. Por conseguinte, é muito importante conhecer as diferentes formas físicas que os adesivos podem apresentar.

Os adesivos podem ser encontrados na forma líquida, como pastas, filmes e fitas adesivas. Em geral, os adesivos em pasta encontram utilização extensa na indústria automóvel e na produção de pás de torres eólicas, onde as suas boas capacidades de preenchimento de lacunas são cruciais. Os adesivos em filme são normalmente encontrados em aplicações aeronáuticas, uma vez que fornecem uma forma muito precisa de medir o adesivo e de controlar a forma da camada adesiva. A Figura 4.4. mostra o aspeto visual destas quatro principais formas de adesivos.

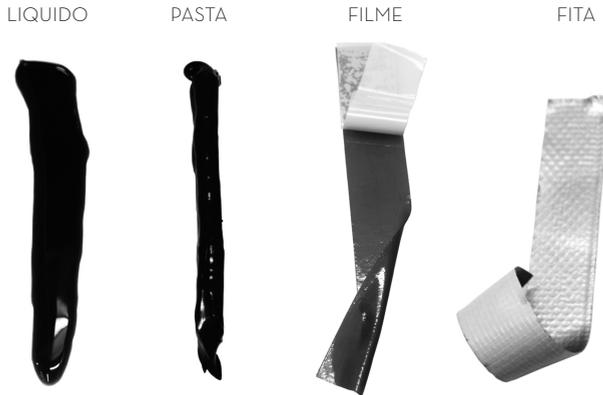


Figura 4.4. Exemplos das diferentes formas de adesivos.

4.3. DESEMPENHO MECÂNICO

Por convenção, diz-se que os adesivos estruturais são aqueles que apresentam uma resistência à tração superior a 7 Newton de força para cada milímetro quadrado de área colada (ou 7 MPa). Abaixo deste valor encontramos os adesivos não estruturais, muitas vezes também chamados de vedantes. Este valor mostra a notável capacidade de carga dos adesivos estruturais, pois mesmo o adesivo estrutural mais fraco pode suportar um quilograma (que exerce 9,8 Newton de força) numa área de colagem muito limitada, ligeiramente superior a 1 por 1 mm. Já os adesivos estruturais de alto desempenho podem atingir resistências à tração de 40 ou mesmo 50 MPa, o que é mais do que suficiente para o uso em produtos sujeitos a elevados carregamentos, como chassis de automóveis ou estruturas para a construção civil.

4.4. MÉTODO DE ENDURECIMENTO OU IMPLEMENTAÇÃO

O método de endurecimento, também coloquialmente chamado método de cura, é o método através do qual o adesivo se torna suficientemente sólido para suportar uma carga em serviço. Normalmente este processo envolve uma mudança de forma (de líquido para sólido), mas note-se que nem todos os adesivos passam por uma transição de fase. Por exemplo, os adesivos sensíveis à pressão, ou *pressure sensitive adhesives* (PSAs), mantêm-se sempre no estado sólido e são ativados meramente pela aplicação de pressão.

4.4.1. Endurecimento por reação química

Diversos adesivos são fornecidos em dois componentes diferentes que, quando misturados, reagem entre si e criam uma massa adesiva no estado sólido. Estes dois componentes são chamados de resina (o componente principal do polímero) e endurecedor (o composto químico que reagirá com a resina). A reação entre estes dois componentes causará a sua polimerização e reticulação, sendo usualmente de natureza exotérmica. Antes da mistura estar completa, estes componentes são muito estáveis.

Em alternativa, alguns adesivos são fornecidos com a resina e o endurecedor já misturados num único recipiente, conhecidos como adesivos de uma parte ou monocomponentes. Para que estes adesivos não endureçam é crucial que sejam armazenados a baixas temperaturas. Os processos de polimerização e reticulação são, como muitos processos químicos, acelerados pelo calor. Através do armazenamento de um adesivo pré-misturado a baixas temperaturas, é possível retardar o processo de endurecimento. Existem outros tipos de adesivo de uma parte que não requerem a existência de um endurecedor e resina separados, pois endurecem através da aplicação de uma fonte de energia externa ou na presença de um catalisador. Por exemplo, muitos adesivos e pastas utilizadas em odontologia endurecem quando expostos à luz ultravioleta (UV). Esta luz irá fornecer a energia necessária para iniciar o processo de reticulação. Outras fontes de radiação, tal como luz visível ou os feixes de eletrões, podem ser também utilizadas para endurecer adesivos.

4.4.2 Endurecimento por processos físicos

Muitos adesivos de baixa resistência são fornecidos sob a forma de uma suspensão num solvente volátil ou em água. Os mais conhecidos são os adesivos de contacto, habitualmente usados para colar componentes de tecido ou sapatos. Após a aplicação, estes adesivos deverão ser expostos a uma fonte de calor e o solvente evapora, sendo que apenas o adesivo seco permanece. As superfícies a serem coladas devem então ser forçadas a entrar em contacto, gerando-se uma ligação forte. Note-se que estes adesivos nunca sofrem uma alteração química, e o seu funcionamento é semelhante ao dos PSA, mas são fornecidos numa solução líquida. A utilização de solventes químicos altamente voláteis tem sido gradualmente reduzida e a utilização de soluções à base de água é cada vez mais procurada, uma vez que reduz a exposição aos perigos para a saúde e à poluição associada a estes materiais.

Outro tipo comum de adesivo que é implementado através de um processo físico são os adesivos termofusíveis, também conhecidos como colas quentes ou "hotmelts". Estes adesivos apresentam uma base termoplástica não sofrem qualquer tipo de alteração química durante a sua aplicação. São simplesmente aquecidos até uma temperatura acima da sua temperatura de fusão, tornam-se líquidos e fluem e molham a superfície a ser colada. Assim que a fonte de calor é removida, arrefecem e solidificam, criando a ligação desejada.

4.5. COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química de um adesivo refere-se aos principais compostos químicos presentes na formulação do adesivo. Esta é uma forma muito comum de classificar adesivos, pois a maior parte dos fabricantes de adesivos opta por dividir os seus catálogos desta forma. No entanto, note-se que adesivos com a mesma base química podem exibir propriedades muito distintas, pelo que um processo de seleção de adesivos nunca deverá ser apenas baseado neste critério.

4.5.1 Adesivos estruturais

4.5.1.1. Epóxidos

Os adesivos epóxidos são conhecidos como os reis dos adesivos, uma vez que estes são materiais relativamente fortes e rígidos, com uso extenso em aplicações estruturais (Figura 4.5). Em aplicações onde o desempenho mecânico máximo é indispensável, os adesivos epóxidos são muitas vezes a única escolha possível.

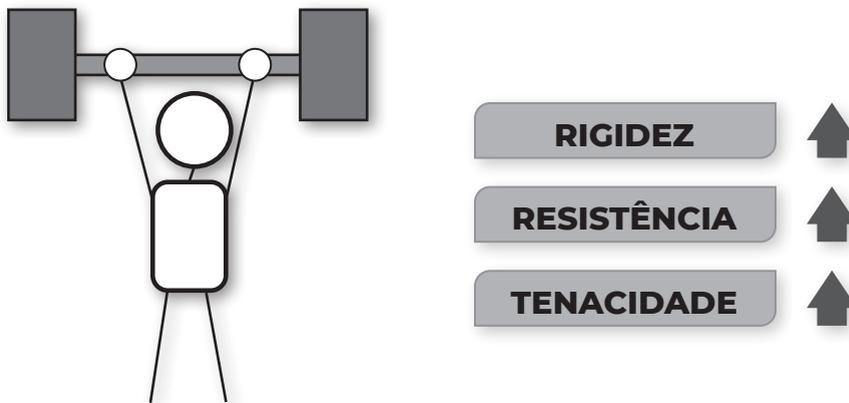


Figura 4.5. Algumas das principais características dos adesivos epóxidos.

Os adesivos epóxidos curam exotermicamente (ou seja, libertam calor durante o processo de cura) e são também muito estáveis dimensionalmente, com um nível de contração relativamente baixo. A contração é a redução do volume que o adesivo sofre durante a cura, algo prejudicial para as características geométricas da junta e que pode também induzir tensões indesejáveis na camada adesiva. Em geral, os epóxidos curados são muito estáveis e duráveis, e não são danificados pelo contacto com água, solventes ou óleos. Os adesivos epóxidos podem ser fornecidos sob a forma de uma resina e endurecedor separado (duas partes) ou como monocomponentes.

Os epóxidos de um único componente apenas endurecem com a exposição a altas temperaturas. No entanto, não podem ser armazenados durante longos períodos de tempo, especialmente se não forem mantidos sobre condições de refrigeração. Já nos adesivos de duas partes, a cura pode ser feita à temperatura ambiente e o armazenamento é por regra um pouco mais longo.

Como termoendurecíveis altamente reticulados, os epóxicos são fortes e rígidos, mas bastante frágeis. É por este motivo que as versões comerciais de epóxicos são geralmente híbridas, reforçadas com pequenas quantidades de borracha ou outro material tenaz. Em epóxicos não reforçados, as fendas podem progredir facilmente e sem obstáculos, mas a presença de pequenas partículas de borracha impedirá esta propagação livre das fissuras.

Além da adição de borracha, é também comum encontrar adesivos epóxicos reforçados com outros materiais para alcançar uma melhoria de propriedade específica. Por exemplo, os híbridos de epóxido-poliuretano são extremamente populares na indústria automóvel, combinando a rigidez e resistência da resina epóxida com a tenacidade do poliuretano, o que lhes confere excelentes capacidades de absorção de impacto. Estes materiais, muito resistentes e dúcteis, conhecidos como adesivos resistentes ao impacto, podem unir superfícies que não foram previamente preparadas (que estão, por exemplo, contaminadas com óleo), características que os tornam especialmente adequados para a união de carroçarias de veículos.

4.5.1.2. Poliuretanos

Os poliuretanos (Figura 4.6) encontram-se disponíveis em formulações de uma e duas partes. As variantes de um componente (por vezes referidas como 1C ou 1K PUR) são aquelas que apresentam maior flexibilidade e endurecem por reação com o vapor atmosférico. Consequentemente, o processo de cura é geralmente muito lento (dura vários dias) e também dependente de um teor mínimo de humidade do ar (aproximadamente 40% de humidade relativa), embora temperaturas elevadas possam ser utilizadas para acelerar o processo de cura.

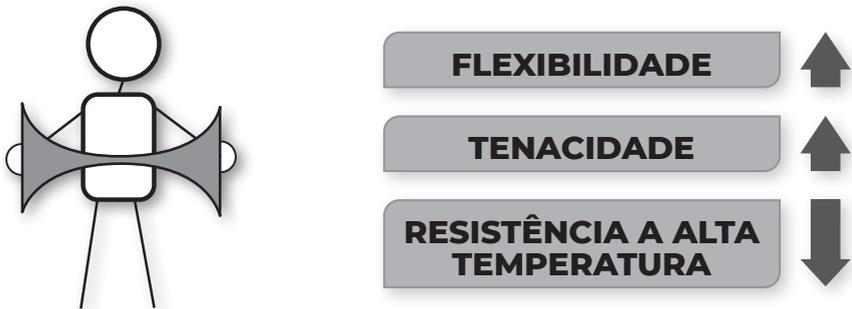


Figura 4.6. Algumas das principais características dos poliuretanos.

Estes materiais são conhecidos pela sua excelente resistência a temperaturas muito baixas, embora o seu desempenho mecânico seja relativamente reduzido a altas temperaturas. São também capazes de ligar substratos com baixa energia superficial, como o vidro ou plásticos, embora a utilização de primários seja frequentemente recomendada para obter máxima durabilidade. Os adesivos de poliuretano de um componente são tipicamente encontrados em aplicações que requerem boas capacidades de vedação e de flexibilidade. De facto, a aplicação por excelência dos adesivos de poliuretano de um componente é na colagem de para-brisas de um veículo, onde estas duas características são cruciais.

Em contraste, os sistemas de duas partes (comercialmente chamados de 2C ou 2K PUR) são preferencialmente utilizados em aplicações estruturais porque apresentam uma resistência

muito elevada tanto a cargas de corte como de arrancamento. Adicionalmente, estes materiais são dotados também de uma excelente capacidade de absorver impactos e vibrações, de ligar substratos difíceis de colar e apresentam ainda boa durabilidade em condições ambientais muito adversas. A formulação em duas partes confere-lhes um endurecimento muito rápido, sem dependência da aplicação de humidade ou calor. Uma aplicação importante dos poliuretanos de duas partes é a ligação de painéis em estruturas de automóveis.

4.5.1.3. Acrílicos

Os adesivos de base acrílica, embora não tão fortes e rígidos como os epóxicos, encontram uma utilização extensiva em aplicações estruturais devido à sua cura extremamente rápida, o que pode acelerar os processos de produção de componentes colados (Figura 4.7).

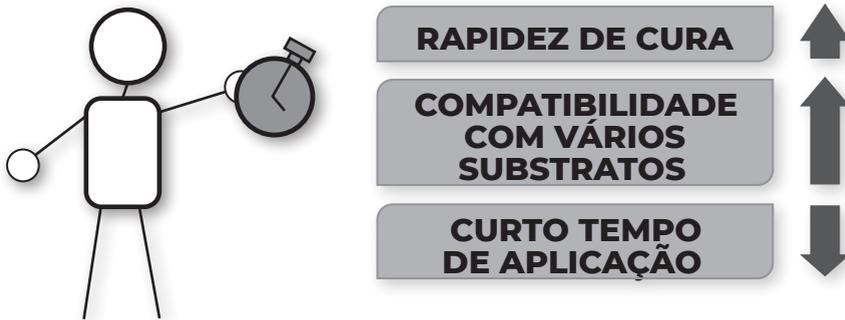


Figura 4.7. Algumas das principais características dos adesivos acrílicos.

Apresentam também uma capacidade excelente de unir superfícies mal preparadas, mesmo aquelas que estão contaminadas com óleo, o que permite eliminar algumas morosas etapas de preparação de superfície. Os adesivos de base acrílica são normalmente divididos em três grandes grupos: adesivos anaeróbicos, cianoacrilatos e acrílicos modificados.

Anaeróbicos

A expressão “adesivo anaeróbico” é usada para designar um adesivo que não necessita de contacto com o ar para endurecer. Estes são vulgarmente chamados de adesivos para roscas (*threadlocking*). Nesta aplicação, um adesivo de um componente é utilizado para garantir que parafusos ou outros componentes roscados não se soltam durante o serviço. O processo de endurecimento destes adesivos requer duas condições, a primeira é a falta de ar (já previamente discutida), uma condição que é criada quando o adesivo é aplicado dentro de uma rosca. A segunda é a presença de um elemento catalisador que dê início ao processo de colagem, sendo este normalmente o metal que forma o rosca do parafuso. O endurecimento é geralmente rápido, finalizando-se dentro de poucos minutos ou horas.

Cianoacrilatos

O segundo grande grupo de adesivos de base acrílica engloba os cianoacrilatos, vulgarmente encontrados nas chamadas “supercolas”. São adesivos líquidos de um componente

que curam em minutos, catalisados pela presença de humidade e relativamente frágeis. Estes adesivos de baixa resistência mecânica são usados em reparos e outras aplicações relativamente específicas, onde pequenos componentes devem ser unidos de forma precisa e rápida. Note-se que é impossível colar grandes áreas com estes materiais porque o processo de cura começa quase imediatamente após a aplicação.

Acrílicos modificados

Os acrílicos modificados são adesivos com excelente desempenho mecânico baseados em metacrilato de metilo. São adesivos de dois componentes que podem ombrear com os epóxis e os poliuretanos de dois componentes nas principais aplicações estruturais. Embora a sua resistência e rigidez sejam inferiores das exibidas pelos epóxidos, contam-se entre os adesivos estruturais que endurecem mais rapidamente, não necessitando de longos períodos de cura ou de estufas de temperatura controlada para completar os seus processos de endurecimento. Contêm frequentemente borracha e agentes de reforço adicionais, assegurando boa tenacidade. Os metacrilatos de metilo são amplamente utilizados em aplicações altamente tecnológicas tais como as indústrias aeroespacial, automóvel e de construção naval.

4.5.2. Comparação do desempenho dos diferentes adesivos estruturais

Para concluir, podemos observar, na Figura 4.8., uma comparação do comportamento à tração de diferentes adesivos estruturais. Torna-se evidente que existe uma ampla variedade de comportamentos, desde a rigidez extrema e a ausência de ductilidade do epóxido não reforçado até à absoluta flexibilidade do poliuretano de uma partes, que se mantém totalmente elástico para grandes valores de deformação, exibindo também uma resistência à rotura muito reduzida.

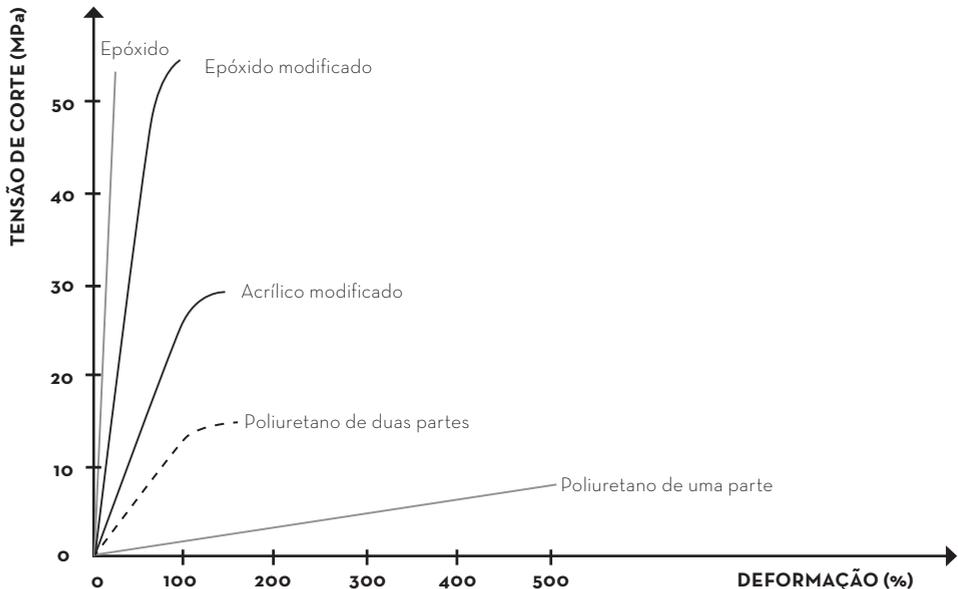


Figura 4.8. Comparação do comportamento à tração de diferentes adesivos.

4.6. PROCESSO DE SELEÇÃO DE ADESIVOS

O processo de seleção de um adesivo é bastante complexo e requer um conhecimento exato de diferentes aspetos relacionados com a configuração da junta e do seu carregamento, do processo de fabrico que pode ser implementado e das condições de serviço e ambientais às quais a junta estará sujeita.



Figura 4.9. Processo de seleção de um adesivo ou vedante.

Obviamente, as propriedades dos adesivos e dos substratos são também um parâmetro crucial e fundamental, sendo a determinação destas propriedades discutida em mais detalhe nas secções seguintes. Um diagrama simplificado de um processo de seleção de um adesivo pode ser encontrado na Figura 4.9.

4.6.1. Ensaios de caracterização mecânica

A caracterização mecânica de adesivos é realizada com recurso a uma ampla variedade de ensaios, utilizados para determinar parâmetros tais como força, rigidez e energia crítica da fratura. São estes ensaios que permitem distinguir os adesivos rígidos, fortes e frágeis, daqueles que são mais dúcteis, flexíveis e capazes de absorver energia, ajudando assim na identificação do adesivo ideal para uma determinada aplicação. A Figura 4.10. mostra como um ensaio de caracterização pode ser usado para identificar dois adesivos de natureza muito distinta.

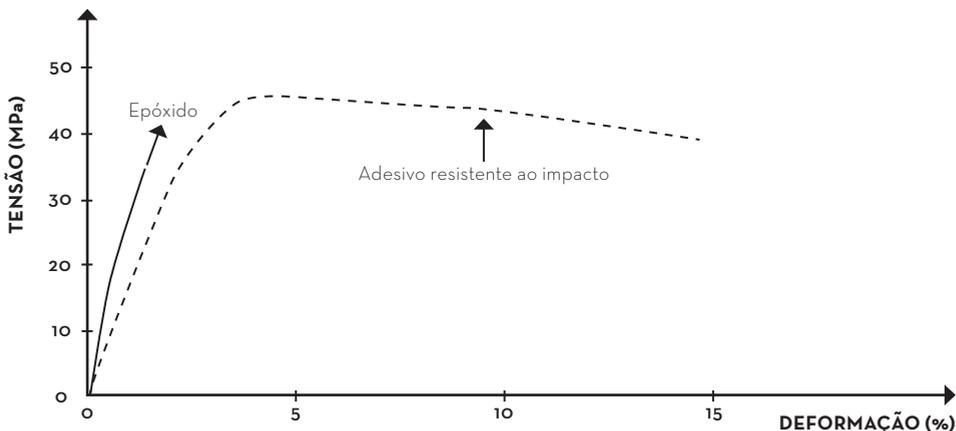


Figura 4.10. Comparação do desempenho mecânico de um adesivo epóxido rígido e de um adesivo híbrido resistente ao impacto.

Também importante é o facto destes ensaios permitirem determinar as propriedades mecânicas necessárias para criar modelos de projeto de juntas adesivas. Alguns destes modelos dependem apenas das propriedades elasto-plásticas do adesivo (como a rigidez e resistência), enquanto outros modelos mais sofisticados têm em conta a energia crítica de fratura para modelar com precisão o início e a propagação dos danos, um tema que será aprofundado no Capítulo 8.

4.6.1.1. Ensaio de tração e compressão

Os ensaios de tração permitem determinar como um adesivo (e apenas só o adesivo) se comportará quando carregado sob tensão. Neste caso, uma amostra do material será tracionada e tentará resistir a esta carga até que à sua eventual rotura. Recolhendo informação de carga e de deformação (com recurso a células de carga e um sistema de extensometria) torna-se possível criar uma curva tensão-deformação e assim caracterizar com precisão a rigidez a resistência e a tensão de cedência de um adesivo sujeito a cargas de tração. Um exemplo de uma curva de tensão é mostrado na Figura 4.11.

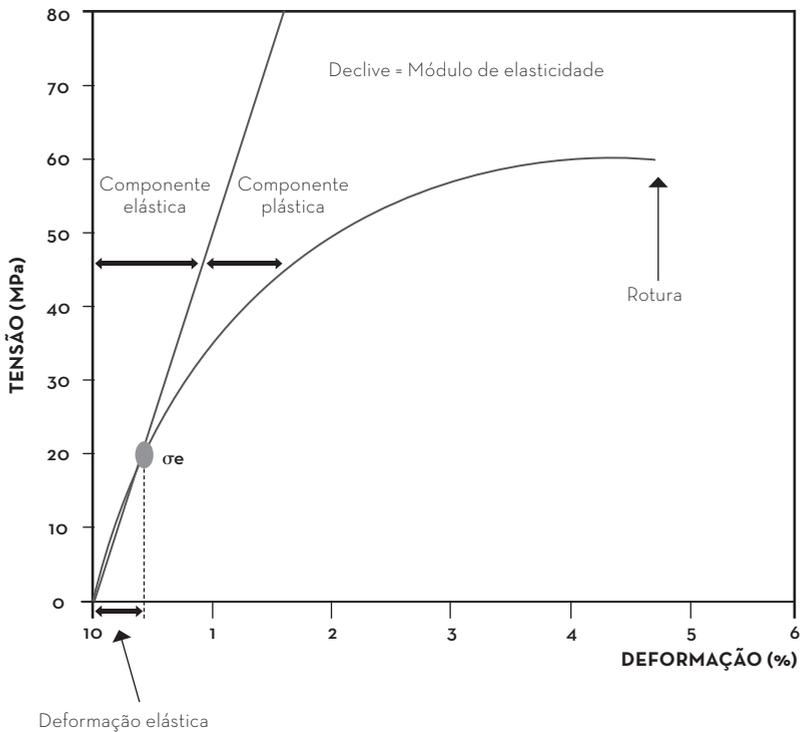


Figura 4.11. Propriedades extraídas de uma curva de tensão-deformação típica de um ensaio de tração.

Os testes de tração de adesivos podem ser também usados para obter uma estimativa da elasticidade e ductilidade totais do material (a sua capacidade de deformar antes de sofrer rotura), embora esta medição seja muito dependente de defeitos presente no adesivo.

É também possível sujeitar os adesivos a ensaio de compressão, os quais requerem a utilização de um sistema de estabilização do provete de adesivo, para evitar a falha por encurvadura. Note-se que embora a rigidez de um adesivo à compressão seja muito similar àquela obtida em tração, a resistência à compressão é usualmente mais elevada, podendo ser 20% a 40% superior, como mostrado esquematicamente na Figura 4.12. Note-se, no entanto, que os adesivos raramente são utilizados para suportar cargas de compressão, havendo outros processos de ligação mais eficazes para este propósito.

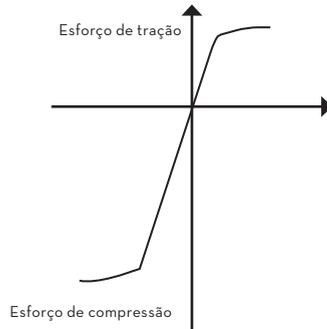


Figura 4.12. Comparação entre o comportamento à tração e compressão de um adesivo estrutural.

4.6.1.2. Ensaio ao corte

Os testes ao corte de adesivos recorrem a duas cargas paralelas, mas opostas, que provocam um efeito de corte no material. Os ensaios ao corte são mais relevantes para testar adesivos do que os ensaios de tração, uma vez que este é o carregamento preferencial para uso em juntas adesivas. Uma condição de corte distribui a carga de forma mais uniforme por toda a camada adesiva, criando cargas de arrancamento muito mais baixas.

Existem várias metodologias de ensaio adequadas para realizar testes de corte, cada uma com diferentes características. O primeiro método que discutiremos é o *Thick Adherent Shear Test* (TAST). Este teste utiliza uma geometria que se assemelha bastante a uma junta de sobreposição simples, mas com substratos muito espessos, o que assegura rotação mínima da junta durante o teste, limitando cargas de arrancamento garantindo um estado de corte quase puro na camada adesiva. A geometria de um provete TAST é mostrada na Figura 4.13.

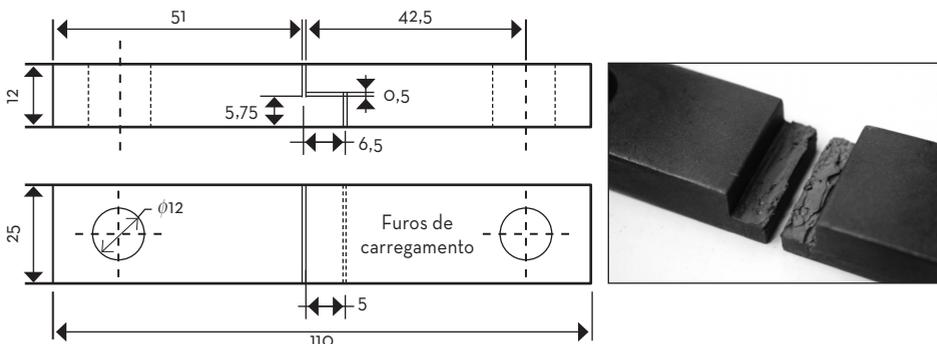


Figura 4.13. Geometria do provete TAST usado para ensaios ao corte (dimensões em mm).

4.6.1.3. Energia de fratura

Quando uma fenda cresce num material, gera novas superfícies expondo novos átomos que possuem uma energia potencial maior do que a dos átomos que não são perturbados dentro do material. A maior energia potencial deve-se ao facto de os átomos de superfície não estarem ligados a outros átomos, criando uma condição mais instável (um fenómeno análogo ao que gera a energia superficial). Assim, uma fenda só se propagará se a redução da energia potencial for maior do que a energia necessária para criar a nova superfície da fenda. A taxa de libertação de energia crítica, ou a energia da fratura, corresponde à energia mínima que deve ser fornecida ao material para que a fenda inicie a sua propagação. A utilização de um adesivo com elevada energia de fratura garantirá que a junta colada seja capaz de resistir aos danos antes de falhar, permitindo criar uma junta que não só é forte, mas que também falha de uma forma muito mais segura e previsível.

O método mais comum utilizado para a determinação da energia de fratura de adesivos é o teste *Double Cantilever Beam* (DCB) (Figura 4.14.). Neste teste, dois substratos paralelos são unidos por um adesivo. O provete é então sujeito a uma carga de tração numa das suas extremidades, formando-se uma fenda que se propaga ao longo da camada adesiva. Usando esta técnica torna-se possível determinar a energia de fratura de um adesivo carregado em modo I (tração). A determinação da energia de fratura pode ser feita usando diferentes metodologias, conhecidas como esquemas de redução de dados, que procuram compreender como ocorre a propagação da fenda em função da carga aplicada ao provete e converter esta informação num valor de energia de fratura.

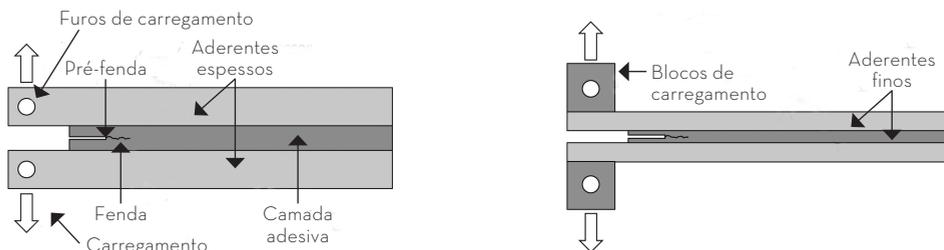


Figura 4.14. Configurações de provetes do tipo DCB.

4.7. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

Conforme mostrado de forma esquemática na Figura 4.15., as propriedades mecânicas de um adesivo (tal como a rigidez e a resistência) dependem fortemente da temperatura de serviço e da proximidade desta à temperatura de transição vítrea (T_g). Para temperaturas abaixo da T_g , o módulo e a resistência do adesivo aumentam de forma significativa enquanto a ductilidade diminui. Mas à medida que a temperatura de serviço se aproxima da T_g há uma rápida redução do módulo e da resistência e o adesivo já não pode suportar cargas substanciais, aproximando-se do comportamento de uma vedante ou uma borracha. O conhecimento de T_g é, portanto, crucial num processo de seleção de adesivo. Os processos utilizados para a determinação de T_g de um adesivo são descritos em detalhe no Capítulo 7.

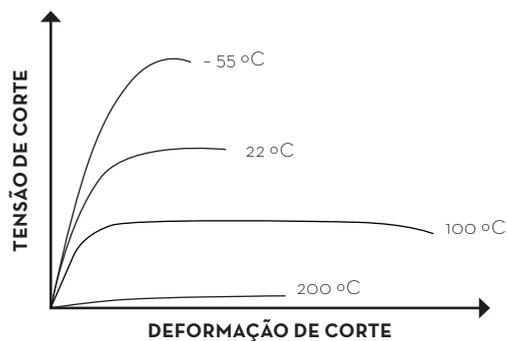


Figura 4.15. Representação esquemática da influência da temperatura no comportamento à tração de um adesivo estrutural

4.8. EFEITO DA HUMIDADE

A humidade tem também um efeito importante no desempenho mecânico de um adesivo estrutural. Quando uma junta é sujeita a um ambiente húmido, quer o adesivo quer o interface adesivo-substrato podem absorver algum dessa humidade. A água absorvida irá ligar-se às cadeias poliméricas do adesivo ou ocupará espaços livres no seio do adesivo até que uma situação de saturação seja atingida. À medida que a água vai sendo absorvida, o comportamento do adesivo será cada vez menos rígido e menos resistente. No entanto, a ductilidade do adesivo tende a aumentar, uma vez que à presença da água facilita o movimento relativo das cadeias poliméricas. Este comportamento é claramente mostrado na Figura 4.16. O tema da degradação do adesivo será revisitado no Capítulo 9 deste livro.

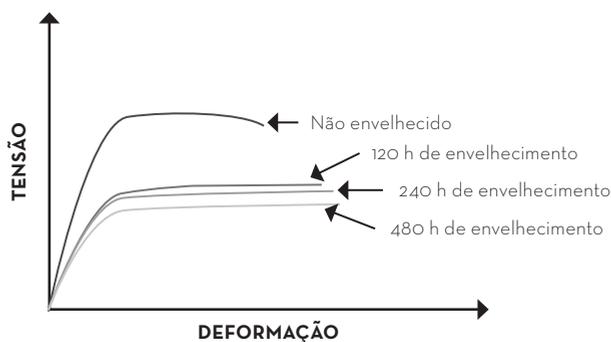


Figura 4.16. Representação esquemática da influência da humidade no comportamento à tração de um adesivo estrutural

4.9. EFEITO DA TAXA DE DEFORMAÇÃO

A taxa de deformação, ou seja, a velocidade à qual um adesivo ou uma junta é solicitado, tem também um importante efeito no comportamento mecânico de um adesivo. Isto deve-se ao facto dos adesivos, como a maior parte dos polímeros, exibirem um comportamento viscoelástico e viscoplástico tendo, portanto, propriedades mecânicas que são também dependentes do fator tempo. Tipicamente, um adesivo solicitado sob condições de impacto irá exibir um maior rigidez e resistência, conforme mostrado na Figura 4.17. De forma análoga ao que acontece para ensaios de adesivos a baixas temperaturas, é também usual verificar uma redução da ductilidade associada a este tipo de carregamentos.

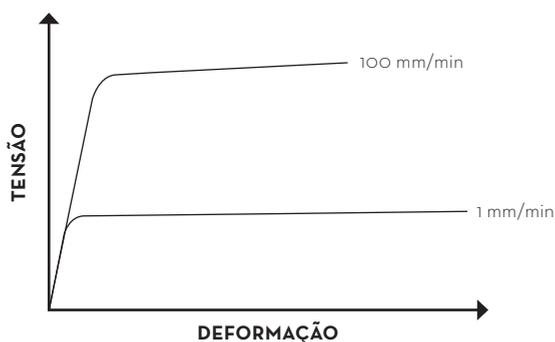


Figura 4.17. Representação esquemática da influência da taxa de deformação no comportamento à tração de um adesivo estrutural

**PROCESSOS
DE
MANUFATURA
DE JUNTAS
ADESIVAS**

5

5. PROCESSOS DE MANUFATURA DE JUNTAS ADESIVAS

A implementação prática de uma junta adesiva, ou seja, o fabrico da junta, pode ser conseguida de muitas maneiras distintas, sendo a seleção do processo de fabrico dependente da natureza do produto final e do equipamento disponível. Uma junta adesiva pode ser produzida manualmente, em produção de pequenas séries ou pode ser executada por equipamento automatizado, operando a velocidade elevada em linhas de montagem e em grande escala.

Neste capítulo, veremos que o processo de fabrico de uma junta colada consiste em várias sub-etapas sequenciais. Este procedimento inclui a preparação da superfície do substrato, o doseamento e mistura de adesivos, aplicação do adesivo, a montagem da junta e o processo de endurecimento dos adesivos. Em alguns casos poderão ser também realizadas atividades de acabamento. Estas etapas encontram-se resumidas de forma esquemática na Figura 5.1.

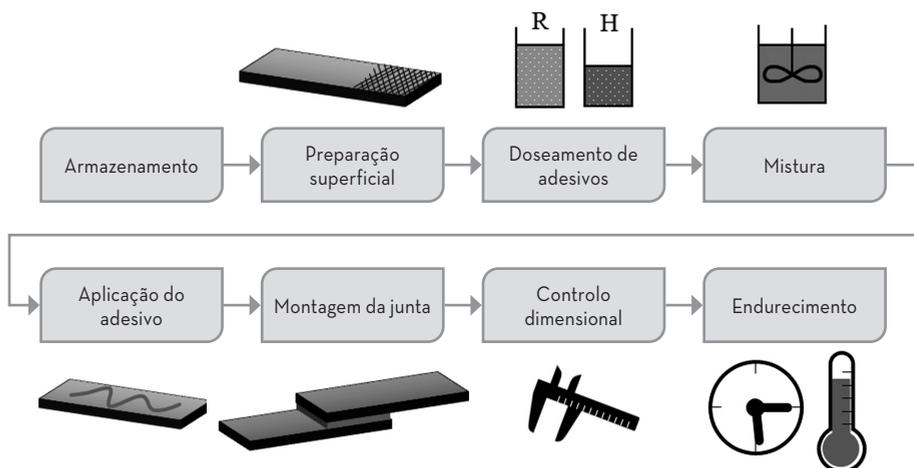


Figura 5.1. Etapas associadas à manufatura de uma junta adesiva.

5.1. ARMAZENAMENTO

O armazenamento de um adesivo é uma etapa relativamente menosprezada do processo de fabrico, mas que pode resultar em problemas graves se não for realizada corretamente. Como vimos anteriormente, muitos adesivos são compostos altamente reativos que podem facilmente degradar-se e tornar-se inutilizáveis se não forem armazenados em condições ótimas. Um mau armazenamento pode afetar não só a resistência final da junta, mas também a qualidade do processo de fabrico. Por exemplo, foi demonstrado experimentalmente que um adesivo em filme de base epóxico, quando armazenado a uma temperatura excessiva, pode perder cerca de 20% da sua resistência ao corte. A mesma investigação mostrou também que se o mesmo adesivo for armazenado num ambiente com humidade excessiva, o efeito prejudicial é ainda mais pronunciado, levando a uma queda de quase 40% na resistência ao corte.

5.1.1. Tempo de armazenamento

Existem diversos aspetos que devem ser considerados no armazenamento de um adesivo, a maioria dos quais está relacionada com as condições ambientais enfrentadas pelo adesivo durante o armazenamento. Os mais importantes são o tempo de armazenamento, o nível de humidade, a temperatura, a exposição à luz e à radiação ultravioleta (UV) e a presença de contaminantes.

O conceito de tempo de armazenamento, por vezes referido com a expressão inglesa *shelf-life*, é extremamente importante para o correto acondicionamento do adesivo, indicando o tempo máximo que um adesivo pode ser armazenado, sob condições especificadas e sem alterações significativas nas propriedades. Estas alterações de propriedades estão geralmente diretamente relacionadas com o aumento da viscosidade do adesivo. Para adesivos de um componente, que incluem a resina e o catalisador ou agente de cura num único recipiente, a reação de cura está sempre a ocorrer, mesmo à temperatura ambiente. De facto, quanto mais tempo o adesivo permanece armazenado, mais este processo de endurecimento progride, até que seja atingido um ponto em que o adesivo é excessivamente viscoso e não pode ser utilizado para criar uma ligação duradoura (Figura 5.2).



Figura 5.2. Relação entre viscosidade e tempo de armazenamento de um adesivo.

A humidade é geralmente prejudicial para os adesivos armazenados, causando danos através de dois mecanismos distintos. O primeiro destes mecanismos é a absorção direta de humidade pelo adesivo. Neste caso, a presença de água alterará diretamente as propriedades adesivas, reduzindo significativamente a sua resistência e aumentando a ductilidade, como vimos no final do Capítulo 4. O outro mecanismo de dano por humidade está associado ao facto de muitos adesivos usarem a humidade como catalisador para a reação de cura, tais como alguns adesivos de poliuretano de um componente. Neste caso, se for permitido que a humidade ambiental atinja o adesivo armazenado, este aumentará a sua viscosidade muito rapidamente e tornar-se-á inutilizável num período de tempo curto.

A temperatura de armazenamento tem um efeito que é semelhante ao tempo de armazenamento. Num adesivo de um componente, a reação de cura ocorre sempre a uma taxa que é diretamente proporcional à temperatura de armazenamento. Neste caso, o armazenamento a baixas temperaturas é altamente recomendado, pois permitirá reduzir a progressão deste processo de cura e retardar o aumento da viscosidade. Muitos adesivos de um componente necessitam de armazenamento a temperaturas muito abaixo da temperatura ambiente. Nestas condições, recomenda-se que se mantenha o recipiente à temperatura ambiente durante algum tempo antes de utilizar o adesivo. Isto é feito para que a condensação possa ser evitada, pois o vapor de água presente na atmosfera tende a condensar-se naturalmente na superfície de um adesivo muito frio. Este processo ajuda também o adesivo a atingir a temperatura ambiente antes de ser aplicado, facilitando a aplicação. O tempo específico em que o adesivo deve ser mantido à temperatura ambiente é normalmente definido pelo fabricante. Adicionalmente, se um adesivo endurecer através da exposição à radiação UV, o armazenamento num recipiente permeável a esta radiação causará um aumento gradual da viscosidade até o adesivo, um processo semelhante ao que ocorre com um adesivo de cura térmica armazenado a altas temperaturas.

5.2. DOSEAMENTO E MISTURA DE ADESIVOS

Medir e misturar uma quantidade precisa do adesivo a aplicar numa junta é uma atividade muito importante, especialmente quando se considera a utilização de um adesivo de duas partes separadas (resina e endurecedor). Neste caso, uma relação incorreta entre o peso da resina e o endurecedor pode alterar significativamente as propriedades do adesivo e a evolução do processo de endurecimento. Mesmo que o adesivo tenha apenas um componente, é também muito importante medir e aplicar a quantidade certa de adesivo na junta, uma vez que é fundamental minimizar o desperdício (excesso de adesivo) e evitar situações em que o adesivo aplicado é insuficiente, levando ao aparecimento de vazios e outros defeitos severos.

5.2.1. Doseamento de adesivos

Em adesivos de dois componentes, não só a quantidade do adesivo, mas também a relação peso (ou volume) da resina e do endurecedor deve ser medida com precisão. Alguns adesivos são fornecidos em recipientes ou latas e alguns outros sob a forma de cartuchos. Devido à sua geometria, os cartuchos são concebidos para dispensar a relação correta entre a resina e o endurecedor e a junta e assim, quando o adesivo é fornecido em cartuchos, normalmente não há necessidade de medir a relação de peso das duas partes do adesivo como uma etapa separada. Ainda assim, é fundamental controlar a quantidade de adesivo a ser aplicada à junta, o que pode ser feito pesando a mistura completa ou medindo o volume a ser bombeado por um sistema de aplicação automatizado.

5.2.2. Mistura

Após o doseamento correto de adesivos de dois componentes, a resina e o endurecedor devem ser misturados da forma mais uniforme possível, sem introdução de ar. Existem diversas técnicas para misturar a resina e o endurecedor e a sua seleção depende principalmente da escala do processo de fabrico. As operações de fabrico mais modestas recorrem a métodos manuais, enquanto as operações de maior escala empregam frequentemente maquinaria movida a energia, capaz de processar maiores quantidades de adesivo.

No fabrico em pequena escala, a mistura de adesivos é frequentemente conseguida manualmente. Um operador pesará, como descrito acima, os dois componentes da mistura adesiva e misturá-los-á manualmente usando uma espátula ou uma outra ferramenta manual. Este processo requer experiência por parte do operador, uma vez que é bastante difícil evitar a introdução de bolhas de ar nesta mistura. Se a resina e o endurecedor forem fornecidos em cartuchos, a mistura do adesivo é geralmente efetuada utilizando um bocal especial fornecido pelo fabricante, ligado à extremidade do cartucho. Os componentes adesivos são extrudidos do recipiente por ação manual ou recorrendo a um sistema pneumático, sendo forçados através de um bico misturador, o qual apresenta uma geometria labiríntica ou helicoidal para que os componentes dos adesivos sejam forçados a mudar de direção várias vezes e assim misturar-se. A Figura 5.3. mostra diversos tipos de pistolas aplicadoras, cartuchos de adesivos e bicos misturadores.



Figura 5.3. Pistolas aplicadoras e respetivos cartuchos de adesivos (esquerda) e bicos misturadores (direita)

5.3. PROCESSO DE APLICAÇÃO DE ADESIVOS E A INFLUÊNCIA DA SUA FORMA FÍSICA

Como vimos anteriormente, o processo de aplicação de um adesivo em condições industriais, pode ser executado manualmente por um técnico especializado ou pode ser parte de um procedimento automatizado utilizando robots. Em qualquer dos casos, o fabrico de uma junta adesiva durável e consistente é um desafio importante, mesmo para geometrias de juntas simples.

Independentemente do modo de aplicação (manual ou automático), o processo de aplicação do adesivo depende em grande medida da forma do adesivo. Em termos de viscosidade, os adesivos podem ser categorizados em quatro grupos, incluindo a pasta (alta viscosidade), líquido (baixa viscosidade), fita adesiva e película adesiva. Cada uma destas formas requer processos de aplicação e adequa-se para configurações de junta muito diferentes.

Se um adesivo for fornecido numa forma líquida, então flui facilmente e cobre totalmente a superfície do substrato quando é aplicado (bom molhamento). Os adesivos na forma líquida são adequados para utilização em locais de difícil acesso e podem molhar muito bem os substratos. Contudo, devido à baixa viscosidade, são mais adequados para a utilização de em camadas finas, especialmente aquelas em que a espessura do adesivo é inferior a 0,1 mm. Utilizando adesivos líquidos, o excesso de adesivo escoar muito facilmente, conduzindo a resíduos significativos. Devido à mesma razão, é também bastante difícil criar camadas espessas de adesivo utilizando um adesivo líquido. Encontramos frequentemente estes adesivos a serem utilizados em aplicações manuais de baixa resistência, aplicados com pincéis, rolos simples, seringas, tubos ou aplicadores pressurizados.



Figura 5.4. Processo de aplicação de um adesivo na forma líquida.

Os adesivos em pasta são muito mais viscosos do que os adesivos líquidos e requerem um processo de aplicação que possa fornecer uma força ou pressão para os transferir para a superfície do substrato. A aplicação pode ser feita manualmente, com espátulas, lâminas ou raspadores ou utilizando equipamento especializado, tais como pistolas aplicadoras de atuação mecânica ou pneumática. De facto, a utilização de equipamento de aplicação motorizado é geralmente inevitável quando um operador necessita de aplicar adesivos em pasta de alta viscosidade, que não fluem para fora da camada adesiva (adesivos tixotrópicos). Os adesivos em pasta são geralmente preferidos pelas indústrias que fabricam componentes

onde existem grandes vazios a preencher. Por exemplo, os adesivos em pasta permitem ligar com segurança componentes de turbinas eólicas em que a camada adesiva tem até 10 mm de espessura ou nas estruturas de automóveis em que são utilizadas espessuras adesivas de até 1 mm para compensar pequenos desalinhamentos naturalmente resultantes do processo de estampagem do metal.



Figura 5.5. Processo de aplicação de um adesivo em pasta.

Durante a aplicação de adesivos em pasta, a forma do cordão de adesivo depositado é muito importante para garantir a ausência de ar aprisionado. As boas práticas de aplicação de adesivos em pasta impõem que a forma do cordão de adesivo inclua sempre um percurso que permita ao ar escapar da junta durante o processo de montagem dos substratos, conforme ilustrado na Figura 5.6. As imagens do lado esquerdo mostram cordões de adesivo que, quando os substratos estão fechados, não geram espaços fechados que impeçam o movimento do ar. Em contraste, as formas do lado direito originam áreas fechadas onde o ar fica retido. Note-se, no entanto, que a geometria ótima corresponde ao cordão disposto em *zig-zag*, uma vez que esta estabelece um equilíbrio entre a criação de percursos para escoamento de ar e a máxima cobertura da superfície.

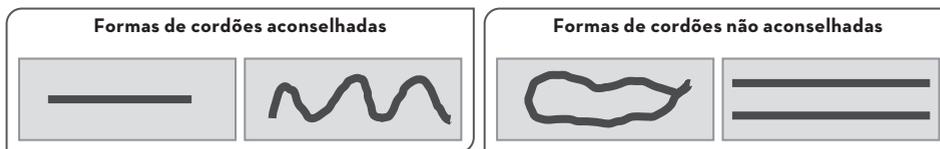


Figura 5.6. Exemplos de diferentes cordões de adesivo com geometrias que facilitam a fuga de ar (aconselhadas, à direita) e as que tendem a aprisionar ar (não aconselhadas, à esquerda).

Os adesivos em filme são normalmente encontrados em aplicações altamente evoluídas tecnologicamente, tais como a construção de estruturas aeronáuticas, as quais requerem uma camada adesiva muito fina entre os componentes colados. Nestes materiais, um adesivo que endurece com a temperatura (de uma parte) é fornecido sob a forma de um filme, embebido num material de suporte, que pode ser, por exemplo, uma fina camada de tecido de algodão. Os adesivos em filme permitem um desperdício mínimo, não requerem mistura e são fáceis de processar. O seu processo de aplicação é muito diferente do adotado para adesivos líquidos e pastosos, porque podem ser cortados e aplicados com muita precisão nas superfícies a colar. Isto permite que a sua aplicação seja efetuada

com excelente repetibilidade e conduz a geometrias e espessuras de camada adesiva altamente consistentes. No entanto, apresentam dois grandes inconvenientes. O primeiro prende-se com o facto de estarem normalmente limitados a superficies planas ou ligeiramente curvas e o segundo está relacionado com o seu custo, uma vez que estes materiais são bastante caros devido ao seu processo de fabrico complexo.

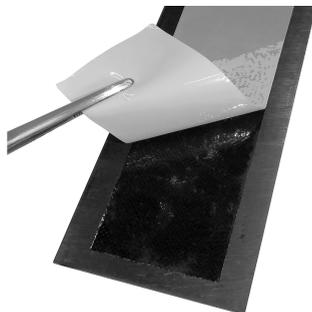


Figura 5.7. Processo de aplicação de um adesivo em filme.

Finalmente, as fitas adesivas apresentam-se como algo semelhantes aos adesivos em filme, mas a diferem no facto de a maioria das fitas adesivas não conterem adesivos curáveis por calor, mas utilizarem em vez disso adesivos sensíveis à pressão (PSAs). Como vimos anteriormente, os PSAs são adesivos que funcionam sempre numa fase sólida e não requerem endurecimento.

5.4. MONTAGEM E FIXAÇÃO DE JUNTAS ADESIVAS

O ato de montar uma junta adesiva é uma das etapas mais críticas do processo de fabrico de uma peça colada, pois é nesta fase que os dois (ou mais) substratos e o adesivo são finalmente reunidos. Obviamente, qualquer erro ou hesitação durante este passo resultará numa junta insatisfatória com problemas geométricos e outros defeitos. Nesta secção vamos discutir as ferramentas e técnicas que devem ser utilizadas para assegurar a geometria correta e a ausência de defeitos numa junta adesiva durante o processo de montagem (e o seu posterior endurecimento).

Durante a montagem de uma junta é normalmente difícil assegurar o alinhamento adequado dos substratos, pois estes deslizam facilmente sobre o adesivo não curado, que atua quase como se de um lubrificante se tratasse. A solução para este problema consiste em utilizar um dispositivo ou ferramenta que possa assegurar que o adesivo e os substratos permanecem imóveis e localizados com precisão durante o processo de endurecimento que se seguirá. Estas ferramentas são normalmente denominadas de moldes, gabaritos ou dispositivos de fixação. Os moldes têm normalmente uma construção simples, mas engenhosa, utilizando blocos posicionadores e pinos para restringir o movimento lateral e vertical das peças a serem coladas, conforme mostrado na Figura 5.8. Utilizando moldes, torna-se possível definir o comprimento da sobreposição, a espessura do adesivo e até conferir características geométricas especiais à junta, tais como filetes no adesivo que transborda nas extremidades da zona colada.

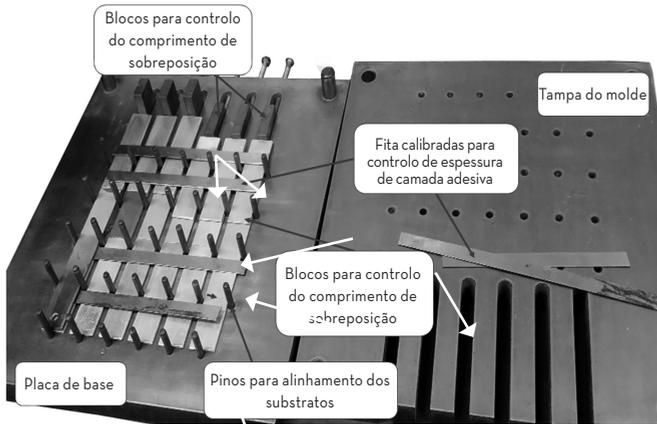


Figura 5.8. Molde para construção de juntas de simples sobreposição e os seus principais componentes.

Os gabaritos ou moldes devem também garantir a aplicação de pressão uniforme durante o processo de endurecimento. Para utilização com adesivos que são curados a alta temperatura, o molde deve ser preferencialmente composto do mesmo material que os substratos. Isto assegura a inexistência de diferenças nos coeficientes de expansão térmica entre o molde e os substratos, evitando o aparecimento de tensões térmicas na junta, à medida que os materiais se expandem (e contraem) com a temperatura durante um processo de endurecimento. É também fundamental assegurar que os moldes sejam revestidos com um material que impeça o adesivo de se colar ao próprio molde (como um agente desmoldante ou um revestimento de politetrafluoroetileno (Teflon)).

Em aplicações mais complexas, em que o uso de um molde não é possível, podem ser criados sistemas que recorrem a grampos e fixadores dispostos ao longo da peça a colar, conforme mostrado na Figura 5.9. De forma a controlar a espessura, deverão ser previstas zonas para aplicação de calços que impeçam o contacto direto entre os substratos e a expulsão do adesivo.



Figura 5.9. Sistema de fixação de uma estrutura colada usada na indústria automóvel.

5.4.1. Controlo da espessura

A espessura do adesivo é talvez um dos parâmetros geométricos mais importantes que devem ser controlados durante o fabrico e que tem uma grande influência no desempenho mecânico da junta. Para este fim, os moldes são utilizados em conjunto com outros componentes, tais como calços, fios ou placas com espessura calibrada igual à espessura adesiva desejada. Contudo, outras abordagens podem também ser consideradas, tais como a introdução de esferas de vidro para controlar a espessura (Figura 5.10.). O diâmetro das esferas deverá ser praticamente igual à espessura do adesivo pretendida. Contudo, deve notar-se que as esferas podem afetar a resistência da junta, uma vez que podem atuar como um defeito dentro da camada adesiva.

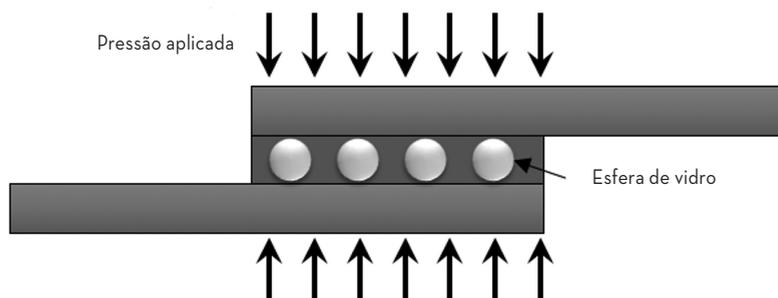


Figura 5.10. Uso de esferas de vidro para controlo de espessura.

Alternativamente, podem ser usados componentes chamados de calços ou espaçadores (*packing shims* em inglês) que forçam a separação física dos substratos. Estes componentes tem a vantagem adicional de poderem ser desenhados para controlar a forma do filete de adesivo (conforme exibido na Figura 5.11.) algo que, como veremos no Capítulo 8, pode resultar em melhorias no desempenho mecânico da junta.

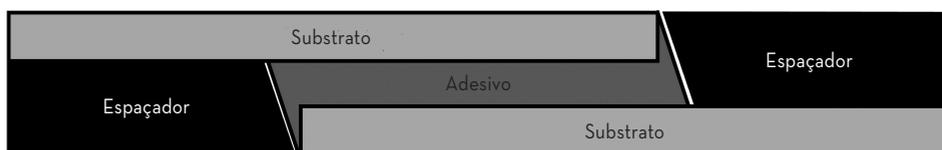


Figura 5.11. Uso de espaçadores para controlo simultâneo de espessura da camada adesiva e forma do filete.

5.4.2. Montagem da junta

Com um dos substratos localizados no molde ou gabarito e o adesivo aplicado, resta apenas sobrepor o outro substrato na junta para completar a montagem da mesma. É nesta fase que o ar pode facilmente ficar preso na camada adesiva e como tal a aplicação dos substratos deve ser realizada de uma forma que minimize a criação de vazios dentro da camada adesiva. Consequentemente, recomenda-se a aplicação do substrato superior num movimento progressivo, em que uma das extremidades do substrato contacta

primeiro com o adesivo, seguido de um movimento de basculamento até que ambos os substratos estejam totalmente paralelos (Figura 5.12.).

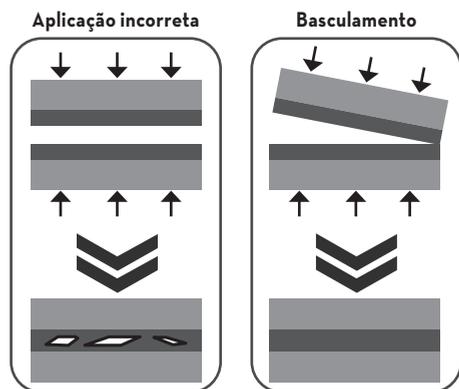


Figura 5.12. Método de aplicação de substratos por basculamento.

Naturalmente, este procedimento é apenas adequado para componentes e provetes de pequena escala e pode ser difícil de implementar em estruturas da maior dimensão. Em aplicações mais substanciais, os componentes a serem colados são fixados uns aos outros usando grampos manuais ou pneumáticos. Neste caso, a aplicação da pressão de aperto pode ser controlada localmente, para assegurar que a força de fecho seja primeiro aumentada numa das extremidades do componente, proporcionando um caminho para a fuga de ar, seguida de uma força de fecho na extremidade oposta, finalmente montando a junta.

5.5. ENDURECIMENTO DO ADESIVO

Um passo importante no processo de fabrico de juntas é o processo de endurecimento onde o adesivo é finalmente convertido para um estado sólido e pode suportar cargas mecânicas. Os adesivos podem endurecer de diversas formas, tais como reação química, perda do solvente ou simplesmente através da mudança de fase. Esta secção descreverá as particularidades associadas ao fabrico de juntas coladas que utilizam adesivos curáveis por calor e adesivos que curam através da perda de solvente

5.5.1. Processos de cura por aplicação de calor

A maioria dos adesivos utilizados em aplicações estruturais de alta resistência geralmente endurecem após a conclusão de uma reação química, que pode ser iniciada pela adição de um endurecedor ou, no caso de um adesivo de uma parte, expondo o adesivo ao calor, humidade ou radiação. Durante o processo de endurecimento, o tempo e temperatura são os dois principais fatores que influenciam a taxa de reticulação do adesivo curado, uma indicação da eficácia do processo de cura na conversão dos monómeros em um polímero forte e altamente reticulado.

Nos adesivos de cura térmica, o tempo de endurecimento é função da temperatura de endurecimento. Normalmente, quanto maior for a temperatura, menor será o tempo necessário para o endurecimento. Se esta temperatura não for corretamente definida, então o adesivo não será completamente endurecido (temperatura demasiado baixa) ou pode ser até danificado e queimado (temperatura demasiado alta). De forma a evitar estes problemas, o equipamento de cura térmica deve proporcionar uma temperatura uniforme e estável durante o processo de cura, sendo a utilização de uma estufa ventilada para a cura a quente do adesivo altamente recomendada. Note-se que existem muitas outras opções de equipamento para a cura térmica, que podem ser mais adequadas para aplicações específicas e determinadas geometrias de componentes. Por exemplo, embora a utilização de placas quentes possa ser bastante localizada nas superfícies externas do componente a colar, estas funcionam bastante bem para a cura de componentes colados muito finos, onde chapas de material são coladas umas às outras.

Técnicas de endurecimento baseadas em indução e aquecimento dielétrico podem ser utilizadas para aquecer e curar o adesivo localmente. Como esquematicamente mostrado na Figura 5.13., ao passar uma corrente elétrica através de um elemento de indução, correntes de Foucault serão induzidas em partes condutoras devido às interações com o campo magnético. Estas correntes fluem nas partes condutoras, as quais aquecerão rapidamente por efeito de Joule. No entanto, é de notar que a utilização desta abordagem exige que um material condutor esteja em contacto com a camada adesiva para que o calor possa ser transferido para os adesivos não condutores. Quando os substratos são metálicos, podem desempenhar diretamente este papel. Caso os substratos sejam não-metálicos, como é o caso de juntas com substratos poliméricos ou compósitos, é possível adicionar algumas partículas magnéticas à camada adesiva. Estas partículas irão permitir a formação de correntes de Foucault, gerando calor. Este calor será então indiretamente transferido para o adesivo.

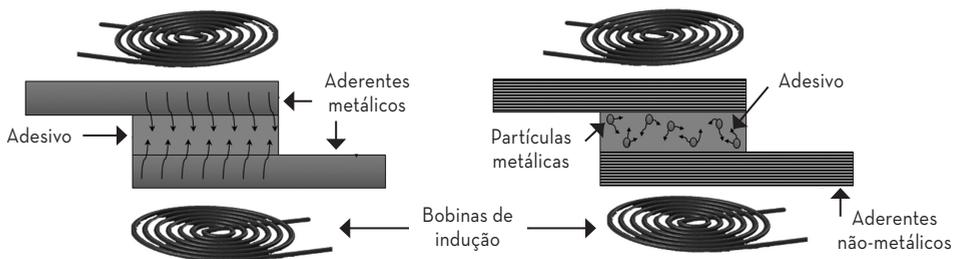


Figura 5.13. Processo de aquecimento por intermédio de indução.

Outro método de aquecimento local usa o aquecimento dielétrico, que se baseia na irradiação por micro-ondas. As micro-ondas passam através do material a ser aquecido e interagem com as suas moléculas, provocando a sua vibração. Estas vibrações aumentam a frequência das colisões entre moléculas, o que gera calor. A Figura 5.14. mostra um

esquema de um aquecimento por intermédio de uma técnica dielétrica. Esta abordagem apenas é aplicável a materiais dielétricos (isoladores elétricos que podem ser polarizados por um campo elétrico aplicado), entre os quais se incluem a maior parte dos polímeros. Se o adesivo não for dielétrico, então não é possível aquecer diretamente o adesivo usando o método dielétrico. Contudo, as partículas dielétricas podem ser adicionadas ao adesivo para permitir a utilização desta técnica.

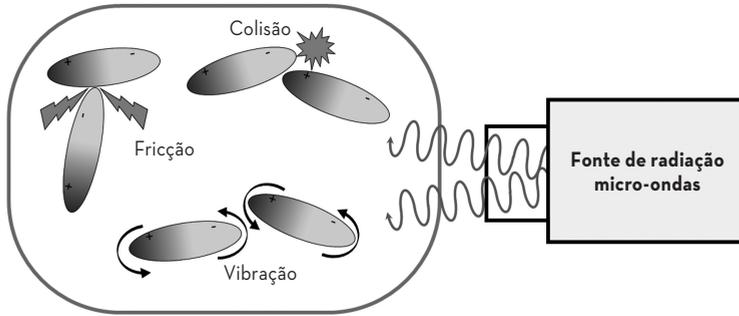


Figura 5.14. Processo de aquecimento por intermédio de micro-ondas.

As mantas aquecidas são equipamento móveis utilizados para o aquecimento local de grandes estruturas. Nestas aplicações, a manta é aquecida utilizando energia elétrica e disposta sobre a área colada, sendo o calor gerado transferido para a junta para endurecer o adesivo. Como as mantas são flexíveis, são adequadas para estruturas com geometrias curvadas. São usadas, por exemplo, para a reparação de grandes tubagens e a fuselagem de aviões (Figura 5.15.).

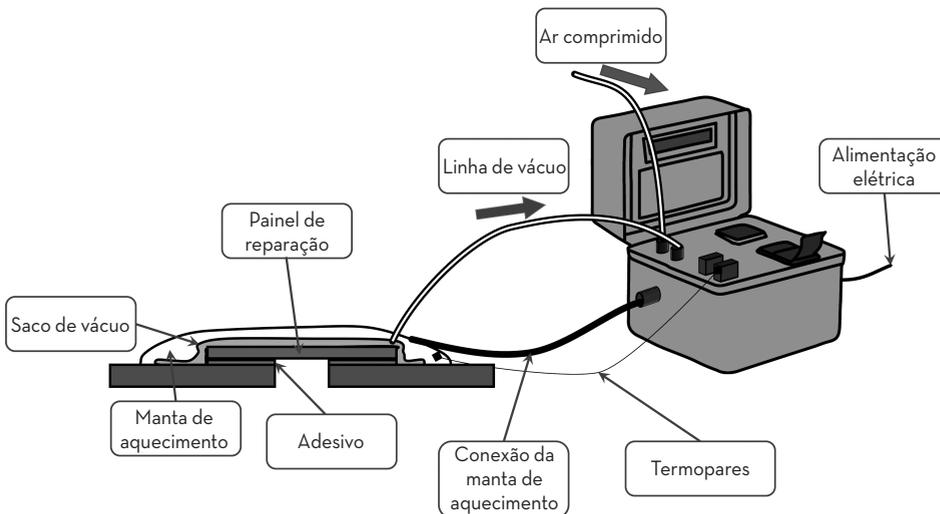


Figura 5.15. Aquecimento localizado de reparações coladas com recurso simultâneo a uma manta de aquecimento e um saco de vácuo.

**CONTROLO
DE
QUALIDADE**



6. CONTROLO DE QUALIDADE

A obtenção de uma junta forte e durável só é possível se o adesivo e os substratos exibirem um desempenho de acordo com os pressupostos seguidos durante a fase de projeto de junta. Em aplicações de elevada responsabilidade é crucial assegurar que o adesivo seja aplicado de forma uniforme ao longo de toda a área colada, que o nível de adesão seja adequado e que os materiais do adesivo e do aderente não se tenham deteriorado ou degradado. A implementação de processos de controlo de qualidade é um passo fundamental para assegurar que a junta acabada cumpre todos os requisitos de qualidade necessários.

A qualidade de juntas adesivas é produto de vários diversos fatores, os quais devem ser controlados ao longo das etapas do processo de fabrico. A avaliação da qualidade das matérias-primas é a primeira destas etapas. O passo seguinte é consiste no controlo das condições de armazenamento. A avaliação do processo efetivo de manufatura é a terceira etapa, englobando um controlo dos processos de endurecimento, monitorizados com base em requisitos rigorosos no que respeita a tempo, temperatura e pressão. Parâmetros geométricos, como o alinhamento dos aderentes, a forma e tamanho dos filetes e a espessura da camada adesiva são também partes importantes do controlo de qualidade das juntas que devem ser realizados durante o processo de fabrico. Finalmente, já com a junta completa, podem ser aplicadas diferentes metodologias de ensaio para avaliar a qualidade do produto final. Estas são divididas em ensaios destrutivos, onde é necessário sacrificar um componente ou estrutura para determinar o seu desempenho e ensaios não destrutivos, que podem ser realizados na peça que será efetivamente submetida ao serviço.

6.1. CONTROLO DAS MATÉRIAS PRIMAS

6.1.1. Controlo das propriedades mecânicas e físicas

As propriedades mecânicas dos adesivos e dos substratos devem ser analisadas utilizando abordagens de ensaio padronizadas. Em geral, a resistência à tração e ao corte são bons parâmetros de controlo para os adesivos e substratos, uma vez que estas propriedades são frequentemente empregues nas fases de projeto. Idealmente, adesivos de diferentes recipientes ou lotes (selecionados aleatoriamente) devem ser testados nesta etapa de controlo de qualidade. Se os materiais forem aprovados nos testes de controlo de qualidade, poderão ser utilizados para o fabrico de juntas ou seguir para armazenamento, para ser utilizados mais tarde. No caso específico dos adesivos já é sabido que as condições corretas de armazenamento desempenham um papel fundamental na minimização da degradação adesiva e que como tal as recomendações do fabricante devem ser escrupulosamente cumpridas.

Em algumas aplicações mais tecnologicamente avançadas, o controlo das matérias-primas utilizando simples testes de resistência não é suficiente, sendo necessário controlar outras propriedades mecânicas e físicas dos adesivos e substratos. Estes ensaios podem incluir ensaios de energia de fratura, fadiga, desempenho ao impacto, fluência e até a determinação precisa da sua composição química.

6.1.1.1. Determinação da temperatura de transição vítrea

A determinação da temperatura de transição vítrea é um elemento essencial do controlo de adesivos destinados a uso em temperaturas elevadas. Para um polímero, existe uma transição clara entre um comportamento vítreo (elevada rigidez e baixa ductilidade) e um comportamento típico de uma borracha (baixa rigidez e alta ductilidade), separada pela temperatura de transição vítrea (T_g). Os adesivos estruturais que se destinam ao uso em alta temperatura devem operar sempre abaixo da sua T_g , evitando-se assim que os mesmos apresentem uma quebra drástica das suas propriedades mecânicas. Existem diversos métodos que permitem determinar a temperatura de transição vítrea, mas o mais eficaz é o método de análise mecânica-dinâmica (*dynamical mechanical analysis*, ou DMA).

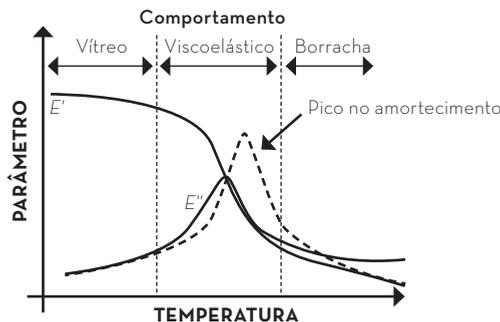


Figura 6.1. Transição entre comportamento vítreo e borracha, com identificação da temperatura de transição vítrea através do pico de amortecimento ($\tan \delta$).

O DMA é um teste onde uma amostra de adesivo é submetida a uma carga oscilatória com uma frequência específica. A temperatura da câmara que contém o adesivo é variada, sendo medida a resposta dinâmica do material. A determinação da T_g com recurso ao teste DMA recorre ao facto de que os polímeros exibem uma fase de viscoelasticidade muito elevada próxima da T_g , onde as suas características de amortecimento são extremamente elevadas. Desta forma, a vibração de um provete de adesivo será fortemente amortecida próximo da T_g , permitindo assim a identificação com um nível de precisão desta temperatura, conforme mostrado na Figura 6.1.

6.1.2. Controlo da energia superficial

A molhabilidade e a energia superficial podem ser estimadas ou até medidas na linha de produção com recurso a diferentes abordagens. O teste de quebra de água é uma técnica clássica, não destrutiva, simples e barata, adequada para avaliar o estado dos aderentes. Usando esta técnica, pode-se determinar rapidamente se uma superfície foi contaminada. O teste de quebra de água inicia-se com a pulverização de água na superfície. Se gotas de água forem visíveis na superfície, isto representa um sinal da presença de contaminantes hidrofóbicos (Figura 6.2.). No entanto, esta técnica não é apropriada para uma avaliação precisa da energia superficial dos aderentes.



Figura 6.2. Teste de quebra de água. À esquerda: superfície com baixa energia superficial. À direita: superfície com alta energia superficial

O uso de marcadores do tipo Dyne é uma técnica mais precisa que pode ser utilizada para a avaliação da qualidade da energia de superfície. Um marcador especial, contendo tinta correspondente a um dado nível de energia superficial, é utilizado para traçar uma linha ao longo da superfície do aderente. O operador deve avaliar visualmente a linha criada pelo marcador. A linha poderá quebrar em várias pequenas gotas, como mostrado na parte superior da Figura 6.3. ou pintar perfeitamente a superfície (parte inferior da Figura 6.3.). Se a linha for quebrada com um determinado grau de marcador, então deve ser utilizado outro marcador com um número inferior de energia superficial. Este procedimento deve ser continuado até que a linha sólida não se quebre após a aplicação. O número presente no marcador corresponderá então à energia superficial do aderente.



Figura 6.3. Marcadores para controlo da energia superficial e exemplo de linhas por eles geradas numa superfície polimérica. No exemplo mostrado a energia superficial está contida entre 44 e 30 mJ m⁻²

Finalmente, a técnica mais precisa que pode utilizada para controlar a energia superficial, consiste em medir diretamente o ângulo de contacto de uma gota sobre a superfície e com essa informação calcular a energia superficial do substrato. Para realizar este teste de controlo de qualidade uma gota deve ser libertada por uma seringa na superfície do substrato. Utilizando uma câmara de alta resolução a forma da gota é registada em grande detalhe e processada por software de processamento de imagem. O ângulo de contacto entre a gota e a superfície aderente poderá ser assim medido com precisão (Figura 6.4). Para calcular a energia livre da superfície a partir do ângulo de contacto, o ângulo de contacto de pelo menos dois líquidos deve ser analisado.

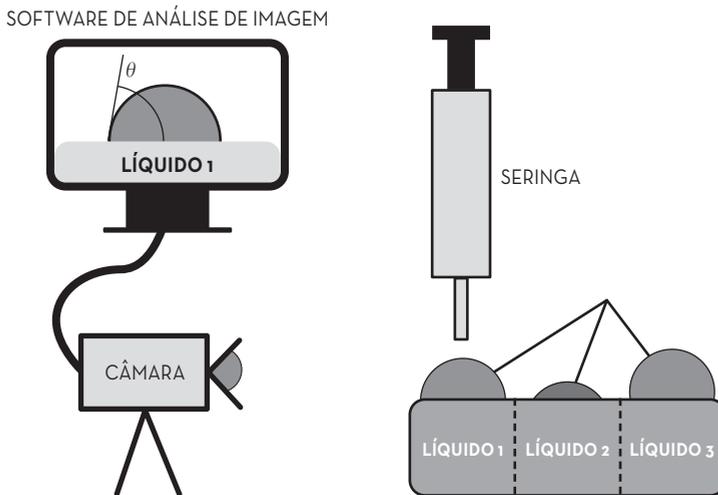


Figura 6.4. Sistema ótico de determinação de energia superficial baseado na medição de ângulo de contacto.

Deve-se notar que o controlo de qualidade da molhabilidade deve ser efetuado nos materiais no estado fornecido e também em substratos preparados prontos para a colagem, ou seja, imediatamente após a preparação da superfície. Desta forma pode-se detetar a presença de contaminações inesperadas durante todo o processo produtivo.

6.2. CONTROLO DA MANUFATURA DE JUNTAS ADESIVAS

Os processos da montagem de juntas adesivas consistem em três sub-etapas essenciais, que correspondem à aplicação de adesivo, a montagem da junta, e o endurecimento do adesivo. Cada uma destas três fases tem as suas particularidades, o que significa que a qualidade de cada etapa deve ser controlada separadamente. Por exemplo, para a aplicação do adesivo, deverá ser verificado se a quantidade do adesivo aplicado é suficiente para cobrir toda a área colada e se a mesma é suficiente para formar os filetes com a forma desejada nas extremidades da sobreposição. A espessura do adesivo é outro fator geométrico que pode alterar significativamente a resistência da junta. Durante o processo de colagem, a espessura do adesivo deve ser controlada com precisão. A temperatura e humidade são também parâmetros importantes que devem ser controlados durante a preparação do adesivo e a sua aplicação na superfície, pois alteram a reologia do adesivo e as propriedades do mesmo.

Um dos passos mais importante no processo de fabrico de uma junta é sem dúvida o processo de endurecimento, no qual o adesivo é convertido para um estado sólido. O tempo, a temperatura e a pressão aplicada são os três principais fatores que influenciam o processo de endurecimento. Em muitos adesivos, o tempo de endurecimento é função da temperatura e, caso esta seja mal controlada, o endurecimento pode ser incompleto ou pode ocorrer a deterioração do adesivo e substratos. Um método habitualmente usado para controlar a temperatura da camada adesiva durante o processo de endurecimento é a utilização de termopares ou sensores de temperatura integrados na instalação de aquecimento (por exemplo, um forno). Contudo, esta não é uma abordagem de controlo recomendada, uma vez que a temperatura nominal indicada pelo equipamento de aquecimento é normalmente mais elevada do que aquela a que o adesivo está sujeito. Neste caso, dispositivos de medição da temperatura (por contacto ou sem contacto), como os mostrados na Figura 6.5., devem ser utilizados para verificar com precisão a temperatura da camada adesiva. O método de contacto utiliza um sensor do tipo termopar, que gera um potencial elétrico proporcional à temperatura. O sensor deve estar em contacto direto com o objeto onde a temperatura está a ser medida. Caso seja adotada uma técnica sem contacto, podem ser utilizados termómetros que analisem a radiação infravermelha emitida (IR). Os termómetros sem contacto podem medir a temperatura da junta à distância.



Figura 6.5. Sistema de termopar para medição por contacto da temperatura (esquerda) e câmara de infravermelhos para medição da temperatura sem contacto (direita).

6.3. CONTROLO DE ESTRUTURAS COLADAS

6.3.1. Tipos de defeitos presentes em juntas adesivas

Fatores como erros de fabrico, más condições de armazenamento, presença de contaminantes e grandes tensões internas são todos suscetíveis de introduzir defeitos no interior da camada adesiva ou nas interfaces de juntas adesivas. A presença de defeitos deve ser detetada sempre que possível, pois estes podem alterar significativamente a resistência da junta e conduzir a falhas prematuras. O tipo, tamanho e localização do defeito são três fatores importantes que afetam a resistência da junta e devem ser determinados utilizando os métodos de controlo de qualidade.

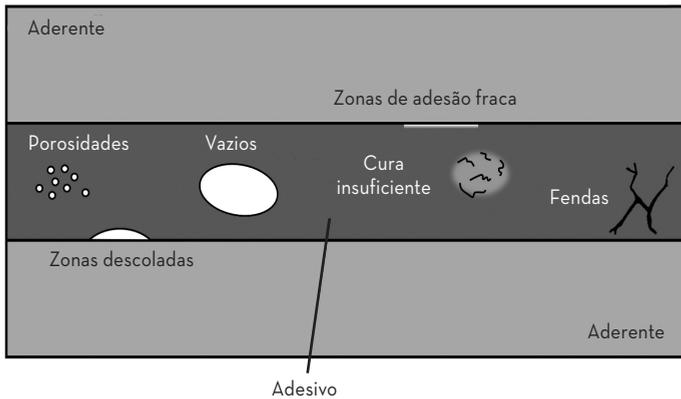


Figura 6.6. Principais tipos de defeitos que podem surgir numa junta adesiva.

Entre os defeitos que podem ser observados numa junta encontramos porosidades, fissuras, vazios, descolamentos, presença de objetos estranho, má cura e zonas com adesão fraca (ver Figura 6.6.). Entre os defeitos mencionados, a adesão fraca é certamente o mais preocupante, uma vez que a sua deteção, utilizando as técnicas destrutivas e não destrutivas correntes, é muito difícil.

Numa situação de adesão fraca, existe um contacto completo, mas com pouca resistência entre o adesivo e os substratos. Não se observa a descontinuidade típica de uma zona descolada, mas também não há uma capacidade de suportar qualquer tipo de carregamento. Os tratamentos de superfície, que como vimos anteriormente são uma parte importante do processo de fabrico, desempenham um papel fundamental para evitar a adesão fraca, assegurando que os contaminantes são removidos da superfície e que existe uma forte ligação química entre a superfície do adesivo e o material adesivo.

6.3.2 Testes destrutivos

Diversos procedimentos de ensaio destrutivos podem ser utilizados para a determinação do desempenho de juntas e estruturas coladas e a identificação de defeitos. Enquanto muitos destes testes são padronizados e destinados a serem realizados em amostras bem definidas (já discutidos no final do Capítulo 4 deste livro), outros são mais flexíveis, destinados a avaliar o desempenho de componentes e estruturas reais.

6.3.2.1. Ensaios em componentes (*proof tests*)

Os testes em componente são ensaios mecânicos em que a carga aplicada é superior ao limite suportado pelo componente em teste. Estes ensaios são categorizados como ensaios destrutivos, pois podem resultar na falha do conjunto colado. No entanto, um componente colado pode sobreviver a estes testes se suportar as cargas de prova aplicadas sem qualquer falha. Os testes de capotamento de autocarros ou os testes de colisão em automóveis (Figura 6.7) são exemplos bem conhecidos destes testes. Outro exemplo são os testes realizados em asas de aviões, onde uma asa de teste tem de suportar cargas até 150% das cargas de serviço esperadas.



Figura 6.7. Teste de uma estrutura automóvel.

Uma das principais questões associadas a estes ensaios é a sua baixa sensibilidade a defeitos muito pequenos, os quais não afetam grandemente os resultados destes testes, mas que podem ter consequências graves sob outros tipos de cargas e condições ambientais, como cargas de fadiga e altas temperaturas, por exemplo.

6.3.2.2. Análise fractográfica

A análise da superfície da fratura (fractografia) é uma metodologia para a avaliação da qualidade das juntas adesivas que sofreram rotura. A presença de vazios, fraca adesão, contaminantes e regiões com insuficiente, podem ser detetados através da fractografia. A análise fractográfica pode consistir numa simples verificação visual a olho nu ou pode ser parte de um procedimento avançado de controlo de qualidade, apoiado por equipamento avançado, como por exemplo sistemas de espectroscopia de raios-X (EDS), análise por microscopia eletrónica de varrimento (SEM) ou microscopia de força atómica (AFM). Utilizando SEM é também possível analisar com precisão os mecanismos de falha (Figura 6.8).

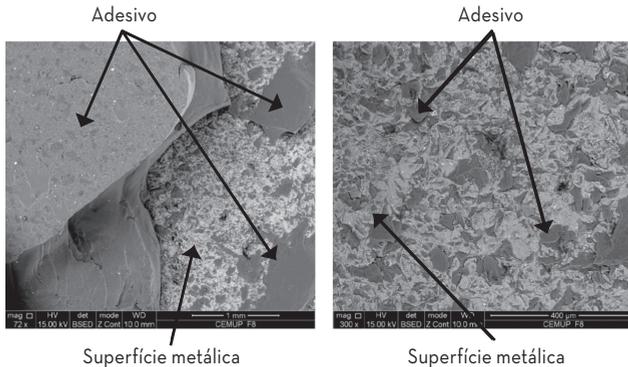


Figura 6.8. Exemplo de imagens obtidas com recurso a uma análise SEM da superfície de rotura mista de uma junta adesiva.

6.3.3. Testes não destrutivos

Uma verificação visual da qualidade de uma junta adesiva completa e intacta pode ser realizada a olho nu ou com a ajuda de um instrumento simples (por exemplo, utilizando uma lupa). Como mostrado na Figura 6.9., verificações visuais são fundamentalmente mais apropriadas para a identificação de defeitos ou falhas que são perceptíveis no exterior da junta.

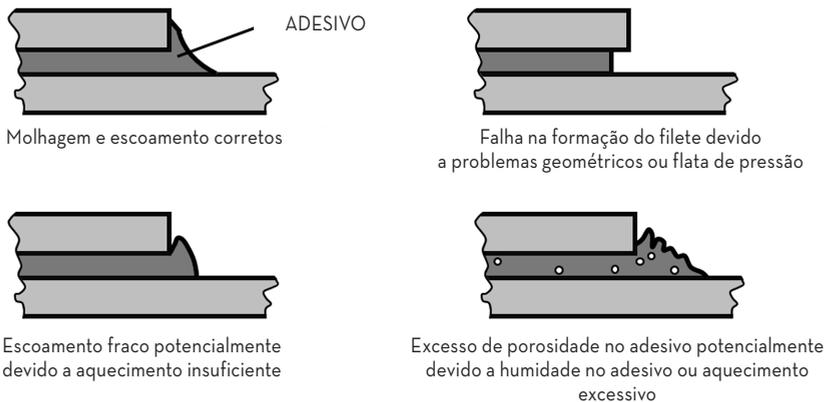


Figura 6.9. Defeitos em juntas adesivas visualmente detetáveis.

Falhas geométricas tais como desalinhamentos, espessura não uniforme do adesivo e filetes de forma incorreta podem também ser determinadas com recurso a uma verificação visual. A inspeção visual pode funcionar como um passo inicial para a avaliação da qualidade das montagens coladas. Com base nesta análise, a junta pode ser aprovada para serviço ou pode ser remetida para outros procedimentos de ensaios não destrutivos mais avançados. Embora o método de inspeção visual seja uma abordagem simples para o controlo da qualidade das juntas, o operador que efetua esta inspeção deve ser altamente qualificado e experiente. Entre os ensaios não destrutivos mais comuns contam-se o teste de batimento, a análise por ultrassons e o teste de emissão acústica, os quais se descrevem em mais detalhe nas seções seguintes.

6.3.3.1. Teste de batimento

Tal como a inspeção visual, o teste de batimento, ou *tap test* (Figura 6.10.) conta-se entre as abordagens de ensaio não destrutivo mais simples. Neste teste é utilizado um martelo para bater nas superfícies da junta. Um operador altamente qualificado terá então que ouvir e avaliar a onda sonora refletida para determinar se a junta apresenta ou não um defeito. A presença de grandes áreas não coladas entre o aderente e o adesivo ou a presença de vazios alteram de forma notória o tom do som refletido. A presença de vazios ou defeitos gera um som grave, que difere do som mais agudo típico de uma junta sem defeitos. Embora seja eficaz na deteção da existência de muitos defeitos, esta abordagem é incapaz de fornecer informações precisas sobre o tamanho ou o tipo dos defeitos.

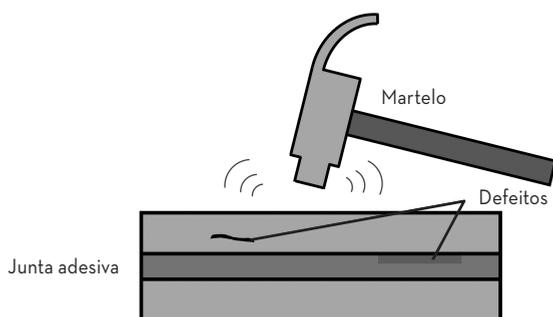


Figura 6.10. Teste de batimento para identificação de defeitos em juntas adesivas.

6.3.3.2. Ultrassons

Muitas técnicas de inspeção não destrutivas baseiam-se na análise das ondas mecânicas que percorrem o material e interagem com os defeitos. O ensaio ultrassónico é outro ensaio não destrutivo utilizado para inspeção de juntas adesivas, baseado em ondas mecânicas. Nesta técnica, ondas mecânicas com frequências na gama ultrassónica são forçadas a propagar-se através da junta (Figura 6.11.). Quando estas ondas encontram um defeito (por exemplo, um vazio ou uma fenda), refletem-se ondas que serão diferentes das

ondas transmitidas. A diferença entre as duas ondas (refletidas e transmitidas) pode ser interpretada como a presença de um defeito.

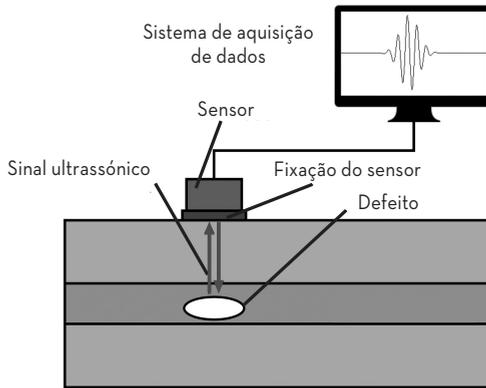


Figura 6.11. Ensaio ultrassônico para identificação de defeitos em juntas adesivas.

6.3.3.3. Emissão acústica

O ensaio das emissões acústicas é também um método de ensaio baseado no som. Neste método, múltiplos sensores acústicos devem ser colocados na superfície da junta. Durante o teste (ou mesmo em serviço), qualquer evento relacionado com a criação de danos dentro da amostra, como propagação de fissuras e descolagem, levará à geração de ondas sonoras que serão detetadas pelos sensores acústicos (conforme mostrado na Figura 6.12.). Embora o teste de emissão acústica seja categorizado como um teste não destrutivo, as amostras devem ser carregadas mecanicamente para que alguns danos se possam propagar durante o teste. Assim, alguns autores classificam a emissão acústica também como um ensaio destrutivo, embora se espere que a estrutura analisada ainda esteja apta para ser utilizada. O tamanho exato ou tipo de defeito é geralmente difícil de detetar utilizando esta técnica, mas a aparecimento e crescimento inicial dos defeitos pode ser detetado com precisão utilizando este método.

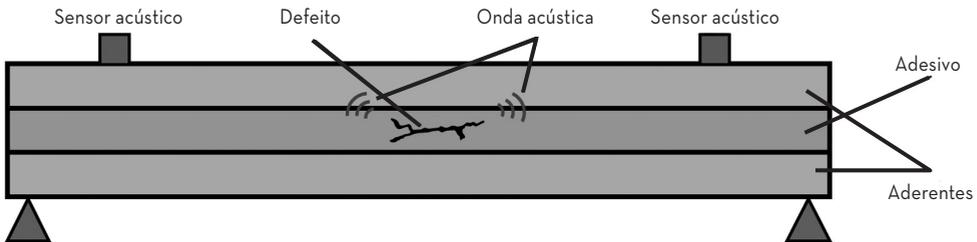


Figura 6.12. Ensaio de emissão acústica para identificação de defeitos em juntas adesivas.

**SAÚDE E
SEGURANÇA**

7

7. SAÚDE E SEGURANÇA

Como resultado do constante desenvolvimento tecnológico e das vantagens inerentes às ligações adesivas, o uso de adesivos em aplicações industriais aumentou de forma significativa nas últimas décadas. No entanto, esta enorme expansão deu origem a uma variedade de materiais e condições de trabalho possivelmente perigosas e também a um grande volume de resíduos resultantes, que devem agora ser eliminados de forma adequada.

Por conseguinte, é muito importante que aqueles que operam com estes materiais estejam familiarizados com os procedimentos seguros para o seu manuseamento e eliminação. Por outro lado, a reparabilidade e a reciclagem são também questões particularmente sensíveis no âmbito da tecnologia de adesão. As juntas adesivas não são particularmente fáceis de separar, especialmente se forem coladas com adesivos de alto desempenho ou aplicadas em grandes áreas. Por conseguinte, a fácil desmontagem das juntas é raramente desejada, ao contrário do que é conseguido com outros métodos de união, tais como a fixação mecânica com recursos a parafusos. Por exemplo, os adesivos mais utilizados no sector dos transportes são à base de resina epóxida, materiais termoendurecíveis e que não podem ser refundidos para simplificar processos de desmontagem e de reciclagem.

Perante diretrizes internacionais que forcem uma cada vez maior reciclabilidade dos materiais usados no sector dos transportes, esta característica pode ser um obstáculo a uma aplicação mais alargada de adesivos. Contudo, o estudo dos adesivos não estagnou e estão constantemente a ser criadas novas formulações destinadas a mitigar estes problemas. O desenvolvimento de tecnologias e processos inovadores para uma fácil reciclagem e para simplificar a reparação de estruturas coladas é atualmente objeto de pesquisa nos sectores académicos e industriais.

7.1. PRECAUÇÕES GERAIS PARA O MANUSEAMENTO DE ADESIVOS

Existem uma série de precauções gerais que devem ser adotadas para o seguro manuseamento de adesivos, que incluem o uso de equipamento de proteção adequado e interpretação correta dos avisos e documentação fornecida com estes materiais. De facto, independentemente do produto utilizado, o trabalho nunca deve começar sem que o operador leia e compreenda as fichas técnicas e de segurança relevantes (Figura 7.1.). Quando confrontado com a necessidade de operar com estas substâncias químicas, o operador deverá avaliar cuidadosamente os avisos de saúde e segurança para as diferentes fases do processo de produção das juntas, desde o armazenamento/manuseamento e preparação da superfície até à aplicação e cura do adesivo e, munido com esta informação, selecionar o equipamento de proteção adequado e delinear um processo produtivo que minimize a exposição a riscos.

Henkel

Ficha de segurança de acordo com o Regulamento (CE) n.º 1907/2006

LOCITTE SI 5926 HL known as

SECCÃO 1.1

1.1. Identificador do produto
LOCITTE SI 5926 HL known as

1.2. Utilização identificadas no âmbito previsto:
Vulcão de silicone

1.3. Identificação do fornecedor
HENKEL ADHESIVES S.A.
Bilhoes 72-84
08005 Barcelona

ES
Tel.: +351 (219) 578
Fax N.º: +351 (219) 578
www.products@henkel.com

1.4. Número de telefone de emergência
Henkel Adhesives, S.A. Portugal: 800
CIVIL - 351 808 250 143

2.1. Classificação da substância

Classificação (C.F.P.):
A substância ou mistura não é classificada.

2.2. Elementos do rótulo

Elementos do rótulo (C.F.P.):
A substância ou mistura não é classificada.

2.3. Outros perigos

Não contém peróxidos, não inflamável, não oxidante nem é possível a libertação de ácidos.

FICHA DE DADOS DE SEGURANÇA
de acordo com o Regulamento (CE) No. 1907/2006

ARALDITE® 2021-1 A

Versão: 1.1 Data de revisão: 03.05.2016 Número SDS: 400001013351 Data de última emissão: 14.09.2015 Data de primeira emissão: 14.09.2015

Toxicidade para órgãos-alvo específicos - exposição única, Categoria 3, Sistema respiratório H335 resp

Toxicidade crónica para o ambiente aquático, Categoria 3 H412 efeito

2.2 Elementos do rótulo
Rótulo (REGULAMENTO (CE) N.º 1272/2008)

Pictogramas de perigo :

Palavra de advertência : Perigo

Advertências de perigo : H225, H314, H317, H335, H412

Recomendações de prevenção : P201, P280, P303 + P361 + P533, P304 + P340 + P333 + P313, P305 + P351 + P338, P370 + P378

Armazenagem: P235
Destruição: S09, PT-AM - - - 400001013351

HUNTSMAN
Epoxy Resin Group Innovation

FICHA DE DADOS DE SEGURANÇA
Conforme regulamentação (EC) No. 1907/2006 (REACH), Anexo II - Portugal

Sika Monotop 620

SECCÃO 1: Identificação da substância/mistura e da sociedade/empresa

1.1 Identificador do produto
Nome do Produto : Sika Monotop 620

1.2 Utilizações identificadas relevantes da substância ou mistura e utilizações desaconselhadas
Não disponível.

1.3 Identificação do fornecedor da ficha de dados de segurança
Fabricante/Distribuidor : Sika Portugal SA
Rua de Santarém 113
4401-292 V.N. Gaia Portugal

Número de Telefone : +351 223 776 900
No. do Fax : +351 223 702 512
Endereço electrónico da pessoa responsável por este SDS : EHS@pt.sika.com

Número de telefones de emergência : Centro Informativo Anti-venenos: 808 250 143

1.4 Número de telefone de emergência
Fabricador
Número de telefone : Centro Informativo Anti-venenos: 808 250 143

SECCÃO 2: Identificação dos perigos

2.1 Classificação da substância ou mistura
Definição do produto : Mistura
Classificação de acordo com a Directiva 1999/45/CE (DPS)
O produto é classificado como perigoso de acordo com a Directiva 1999/45/CE e suas emendas.
Classificação : Xi, R41, R37/38
Perigos para a saúde humana : Risco de lesões oculares graves. Irritante para as vias respiratórias e pele.
Consultar a Secção 16 para obter o texto integral das frases R ou das declarações H acima referidas. Consultar a Secção 11 para obter informações pormenorizadas sobre sintomas e efeitos na saúde.

2.2 Elementos do rótulo
Símbolo(s) de perigo :

Indicação de Perigo : Irritante
Frases de risco : R41- Risco de lesões oculares graves. R37/38- Irritante para as vias respiratórias e pele.
Frases de segurança : S26- Em caso de contacto com os olhos, lavar imediatamente e abundantemente com água e consultar um especialista. S36- Usar um equipamento protector para os olhos/face.

Ingredientes perigosos :
Elementos de etiquetagem suplementares : Não é aplicável.

Data de lançamento : 21.09.2011. MSDS Nº. : 22433-1 9/60

Figura 7.1. Fichas de segurança típicas de adesivos.

Também as embalagens dos produtos apresentam etiquetas informativas com informação muito concretas sobre o nível de perigosidade dos produtos. Esta informação surge na forma de pictogramas informativos, listagem dos riscos principais e a indicação das ações a tomar em caso de contacto direto com o produto. A Figura 7.2. mostra um exemplo de uma dessas etiquetas informativas para o caso concreto da acetona, um produto muito utilizado no processo de desengorduramento associado à preparação de superfície.

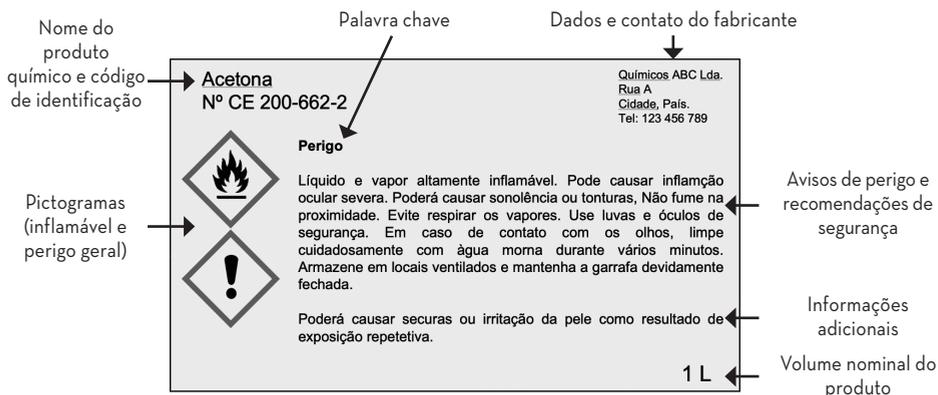


Figura 7.2. Indicações típicas encontradas na embalagem de um produto químico.

7.1.1. Equipamento de proteção individual

O uso de equipamento de proteção individual (EPI) é essencial para proteger os que operam com adesivos dos perigos associados aos adesivos e a todos os outros equipamento e produtos envolvidos no processo de colagem. Existem diversos pictogramas que alertam o utilizador da necessidade de utilizar um dado tipo de EPI, como os mostrados na Figura 7.3.



Figura 7.3. Símbolos dos principais equipamentos de proteção e segurança.

Existem vários tipos de tarefas associadas a trabalhos de ligação adesiva que têm o potencial de causar lesões oculares graves. A utilização de óculos de segurança é obrigatória nas operações em que um risco desta natureza tenha sido identificado e não possa ser totalmente eliminado ou reduzido. A escolha de óculos de segurança adequados dependerá principalmente da natureza do risco e das tarefas a realizar.

Grande parte do trabalho de aplicação de adesivos é de natureza manual e expõe as mãos dos operadores a diversos perigos, sendo indispensável o uso de luvas de segurança apropriadas. Existem pelo menos dez tipos diferentes de luvas de segurança, sendo essencial saber como diferenciá-las, uma vez que cada tipo será adequado para proteger de um conjunto muito específico de riscos. Entre estes tipos de luvas encontram-se as luvas anti-corte, as luvas de látex natural, as luvas de látex nitrílico, luvas de malha de aço, luvas de

PVC, e as luvas de alta temperatura. As luvas mais habitualmente utilizadas para manusear produtos químicos são as luvas de látex nitrílico e natural, uma vez que estas asseguram um elevado nível de flexibilidade e de resistência contra a maioria dos produtos químicos. Quando a preparação da superfície é realizada com jato de granalha, recomenda-se o uso de luvas de PVC, uma vez que estas proporcionam uma excelente proteção contra a abrasão. Já o uso de luvas térmicas é obrigatório quando o trabalho é realizado a temperaturas extremas. Estas luvas protegem contra queimaduras, causadas pelo contacto com temperaturas muito altas ou muito baixas.

Os sapatos de segurança são também um equipamento de proteção individual essencial em operações de colagem em ambiente industrial. Os sapatos de proteção usados para evitar lesões são geralmente compostos por uma parte superior em couro, uma palmilha para absorver os impactos causados pelo peso do corpo do utilizador e a sola, que deve oferecer resistência contra abrasão, isolamento elétrico e proteger do contacto com substâncias tóxicas, químicas e quentes.

Algumas substâncias utilizadas em processos de ligação adesiva libertam substâncias nocivas e voláteis que podem permanecer no ar e ser inaladas pelos trabalhadores. Assim, a qualidade do ar num laboratório ou ambiente industrial dedicado à colagem deve ser sempre controlada para garantir o bem-estar dos trabalhadores. Para assegurar a qualidade do ar e garantir que o nível de compostos voláteis (geralmente abreviado como COV) não atinge valores tóxicos, o local de trabalho deve ser adequadamente ventilado e/ou equipado com dispositivos que garantam a reposição do ar e a sua filtragem. A Figura 7.4. mostra um sistema de filtragem adequado para a operação com adesivos e outros produtos a este processo associados. Se isto for de todo impossível, os operadores deverão utilizar máscaras com elementos de filtragem adequados para os compostos presentes.



Figura 7.4. Laboratório com sistema de extração adequado para processos de colagem.

7.2. PERIGOS ASSOCIADOS AOS TIPOS DE ADESIVOS MAIS COMUNS

7.2.1.1. Epóxidos

Como referido anteriormente neste livro, os epóxidos são dos adesivos mais utilizados em aplicações estruturais. Considerando um adesivo epóxido de dois componentes (endurecedor e resina), a resina é geralmente o componente que apresenta os riscos associados mais graves. As resinas epóxidas em forma líquida ou pastosa (não curadas) são geralmente irritantes para os olhos e a pele e tóxicas para os organismos aquáticos. Os principais perigos associados aos adesivos epóxidos consistem na reação exotérmica e no fenómeno de sensibilização da pele humana à resina. O primeiro destes perigos é minimizado através da mistura dos componentes adesivos em quantidades e nas proporções recomendadas pelo fabricante na ficha técnica e evitando o contacto direto com a mistura. O processo de sensibilização assume frequentemente a forma de uma reação alérgica que se desenvolve após contacto repetido com a pele. Esta reação pode ocorrer vários dias após o contacto com o material e surge geralmente sob a forma de dermatite nas áreas onde ocorreu o contacto.

7.2.1.2. Poliuretanos

Os poliuretanos são formados pela reação de um polioliol com diisocianatos ou isocianatos de polímero na presença de catalisadores e aditivos. Os diisocianatos causam irritação dos olhos, nariz, garganta, pulmões e pele. Estes materiais podem também causar reações alérgicas através da sensibilização da pele e dos pulmões. No entanto, uma vez curados, os poliuretanos são geralmente considerados como materiais seguros. As formulações monocomponentes não necessitam de precauções especiais porque são pré-ligados e não libertam monómeros de isocianato livres. Em adesivos de dois componentes devemos assegurar a razão de mistura correta e adequada para evitar a libertação de produtos resultantes de reações incompletas. Em muitos casos, podem ser necessárias medidas de precaução adicionais, tais como a utilização de máscaras, filtros respiratórios e câmaras de aplicação filtradas. Os poliuretanos de dois componentes curam exotermicamente e a temperatura gerada neste processo também pode representar riscos importantes.

7.2.1.3. Acrílicos

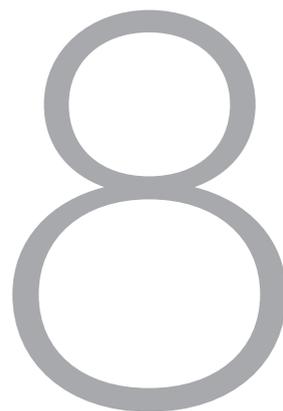
Os adesivos acrílicos são tipicamente divididos em três grandes grupos: os adesivos anaeróbicos, os cianoacrilatos e, finalmente, os acrílicos modificados. As resinas acrílicas utilizadas como adesivos são geralmente o resultado da mistura de acrílico e ácido metacrílico com outros químicos. Uma vez terminado o processo de formação, a resina acrílica resultante é um material de alto peso molecular com boa estabilidade e relativamente seguro. No entanto, é possível que algumas destas resinas tenham quantidades residuais

de acrilato de etilo, que é reconhecido como um carcinogéneo. Os cianoacrilatos (vulgarmente chamados de super-colas) aderem muito rapidamente à pele e podem causar lesões na sua remoção. Os acrílicos modificados, para além do perigo inerente relacionado com os seus componentes químicos, apresentam um odor forte e pungente, que embora não necessariamente perigoso, pode ser muito desagradável em exposições prolongadas.

7.3. PRECAUÇÕES COM PROCESSOS DE PREPARAÇÃO DE SUPERFÍCIE

Uma das fases mais perigosas em processos de preparação de superfícies é o desengorduramento das superfícies a colar, que usualmente recorrem a produtos fortemente tóxicos e corrosivos e incluem soluções ácidas (sulfúrico, nítrico, etc.), solventes (tricloroetano, clorofórmio, tetracloroeto de carbono, tricloroetileno, etc.) e soluções alcalinas (cianetos, bórax, silicatos de sódio, etc.). Os materiais que compõem as superfícies a serem preparadas também requerem atenção especial no seu manuseamento. Assim, é também extremamente importante estar ciente das características perigosas e das precauções de segurança exigidas pelos materiais a serem unidos. As placas de poliéster, por exemplo, podem emitir vapores de estireno que podem ser altamente irritantes. Outro exemplo são os plastificantes que podem ser libertados a partir de alguns materiais poliméricos com implicações ecológicas e funcionais. Na preparação de superfície de metais é também frequente encontrar banhos eletrostáticos que podem recorrer a soluções nocivas. Caso sejam usados processos mais energéticos com recurso a equipamento especializado, destacam-se os riscos potenciais associados à exposição térmica, vibração, elevadas tensões elétricas e os riscos associados ao corte, contusão e esmagamento.

**PROJETO
DE JUNTAS
ADESIVAS**



8. PROJETO DE JUNTAS ADESIVAS

O projeto de uma junta é uma das etapas mais complexas associadas à criação de uma junta adesiva. No seu essencial, esta atividade consiste na seleção dos materiais a usar e na definição da geometria da junta, garantindo que esta possa suportar uma carga específica ou um conjunto de condições de carga sem falhar.

8.1. CARREGAMENTOS TÍPICOS DE JUNTAS ADESIVAS

As juntas adesivas podem ser empregues numa grande variedade de estruturas, suportando diversos tipos de carregamentos. Sujeita a determinados carregamentos, uma junta adesiva funcionará de forma excepcional e constituirá uma alternativa viável aos métodos clássicos de união como a soldadura ou a fixação, enquanto noutros esta será uma solução construtiva com um desempenho insatisfatório. Cabe ao projetista compreender estas particularidades e ajustar a geometria da junta em conformidade.

Os quatro principais modos de carga que uma junta adesiva pode enfrentar são mostrados na Figura 8.1. Estes são o corte, tração, arrancamento e clivagem. As cargas de tração são conhecidas como cargas em “modo I” e as cargas de corte são conhecidas como cargas em “modo II” ou “modo III”. Qualquer tipo de carga que seja uma combinação entre estes dois tipos de carregamento é conhecido como carga de modo misto.

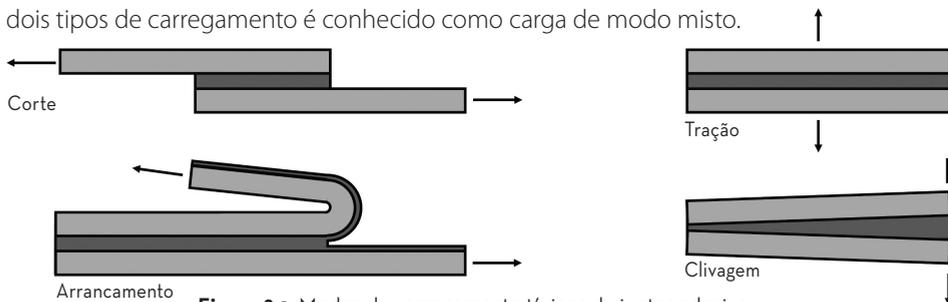


Figura 8.1. Modos de carregamento típicos de juntas adesivas.

Entre estes quatro modos de carregamento, o carregamento de corte é de longe o mais preferível para as juntas adesivas. Nesta condição de carga, a camada adesiva está relativamente bem alinhada com a direção da carga, o que significa que toda a camada adesiva pode contribuir positivamente para suportar a carga. Ao conceber uma junta adesiva, deve-se sempre tentar assegurar esta é a condição encontrada, garantindo que os aderentes transportam a carga da forma mais paralela possível à camada adesiva.

Como vimos no Capítulo 1, as cargas de arrancamento representam o pior cenário. A maioria dos adesivos estruturais oferece resistências muito limitadas sob este tipo de carregamento, que concentra a carga atuante numa área muito reduzida e leva inevitavelmente à falha prematura do adesivo. Note-se que existem alguns adesivos que podem funcionar de forma algo satisfatória sob cargas de arrancamento, sobretudo os poliuretanos e silicões, cuja elevada elasticidade permite a distribuição das tensões atuantes por uma área maior, mesmo quando sujeitos a cargas de arrancamento altamente concentradas.

8.2. PRINCIPAIS CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS DE JUNTAS ADESIVAS

O número de geometrias que podem ser utilizadas para criar juntas adesivas é muito vasto, com diversas soluções distintas. Exemplos das geometrias de junta mais comuns são mostrados na Figura 8.2.

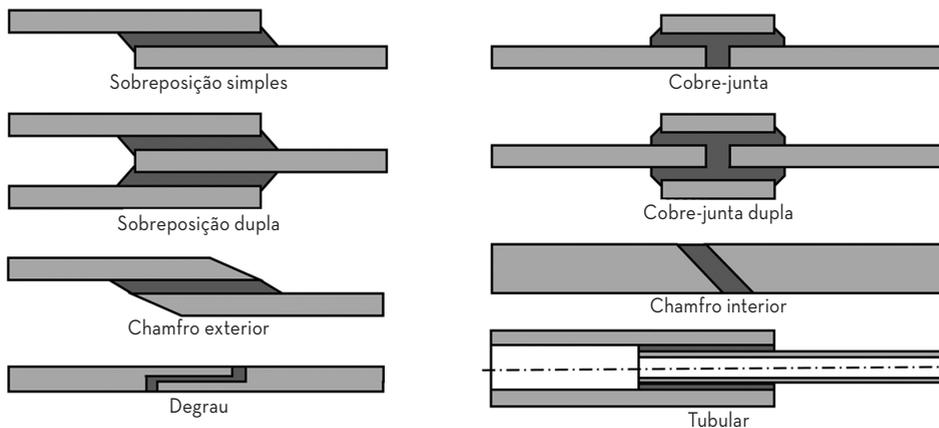


Figura 8.2. Configurações geométricas típicas de juntas adesivas.

Entre estes, a junta de sobreposição simples (JSS) é talvez a mais importante, devido à sua simplicidade e eficácia. As juntas adesivas funcionam melhor sob corte e a JSS explora plenamente este facto, oferecendo uma camada adesiva relativamente bem alinhada com a direção da carga. Note-se, contudo, que é possível melhorar substancialmente o desempenho da JSS com recurso a geometrias mais complexas. Isto deve-se ao facto de os aderentes da JSS não estarem perfeitamente alinhados, o que cria um desequilíbrio de

carga na camada adesiva. Este desequilíbrio permite o aparecimento de tensões de arrancamento nas extremidades do comprimento de sobreposição, induzidas por um elevado um momento fletor. Geometrias alternativas, como a junta de sobreposição dupla, alinham a carga de forma mais eficaz com as camadas adesivas e operam num estado de corte mais perfeito, embora sejam mais difíceis de fabricar e mais dispendiosas.

8.2.1. Modos de falha de juntas adesivas e a sua influência no processo de projeto

Antes de avançarmos para uma descrição das metodologias que permitem prever a força de uma junta adesiva, recordemos brevemente os modos de falha de uma junta adesiva, os quais nos permitirão compreender as capacidades e limitações de alguns dos modelos apresentados. Como vimos anteriormente, numa junta adesiva existem três possíveis modos principais de falha, definidos pela localização da própria falha na junta. Estes são a falha adesiva, onde a junta falha na interface entre o adesivo e o aderente, a falha coesiva no adesivo, onde apenas a camada adesiva falha e, por último, a falha no próprio aderente, enquanto o adesivo e a interface permanecem intactos.

8.2.1.1. Falha adesiva

A falha na interface adesivo-aderente, conhecida como falha adesiva ocorre quando há uma perda de adesão entre o adesivo e o adesivo aderente. A ligação química e mecânica que deve ligar solidamente o adesivo ao aderente perde-se (ou é inexistente) e existe uma separação clara dos materiais na interface. Note-se que este é de longe o pior cenário para uma junta adesiva, uma vez que o adesivo é essencialmente inútil e a carga que a junta irá suportar é praticamente nula. A teoria da adesão afirma que se houver uma boa molhagem do adesivo na superfície, o trabalho de adesão é superior ao trabalho de coesão, assegurando que a falha nunca ocorrerá na interface. Uma vez que não existe um modelo que possa prever este tipo de falha, a única linha de ação de um projetista consistente em fazer os possíveis para evitar completamente este modo de falha, utilizando adesivos e substratos diferentes e mais compatíveis, e utilizar um tratamento de superfície eficaz, promovendo uma molhagem adequada da superfície.

8.2.1.2. Falha coesiva no adesivo

No modo de falha coesivo no adesivo, é apenas o adesivo que atinge o seu limite e falha. Neste caso, podemos partir do pressuposto que temos uma boa adesão na interface adesivo-aderente e que como tal utilizámos o adesivo até ao seu limite, tornando este modo de falha muito mais aceitável do que a falha adesiva. No entanto, não devemos ficar completamente satisfeitos com esta falha, pois a junta continua a ser o elo fraco na nossa estrutura colada. De qualquer modo, este modo de falha permite determinar com precisão a resistência da camada adesiva utilizando uma grande variedade de modelos que se baseiam nas propriedades mecânicas dos adesivos.

8.2.1.3. Falha coesiva no aderente

A falha coesiva no aderente é a mais desejável de todos os modos de falha porque significa que concebemos uma junta adesiva que é de facto mais forte do que o material que estamos a unir. Note-se que a falha no aderente não significa necessariamente que este se parta completamente. Muitas vezes, as cargas de rotura conduzem à deformação permanente do aderente (no caso dos metais) ou rotura interlaminar (no caso dos compósitos), que podem também desencadear a falha da camada adesiva.

8.3. PREVISÃO DE FORÇAS DE ROTURA DE JUNTAS ADESIVAS

A previsão de forças de rotura de juntas adesivas pode ser efetuada com base em métodos analíticos, que usam expressões matemáticas para calcular o nível de tensão em juntas adesivas ou em métodos numéricos, que usam modelos mais complexos para calcular campos de tensões e de deslocamentos em modelos geométricos das juntas adesivas e do seu carregamento.

8.3.1. Previsão de forças de rotura usando métodos analíticos

O uso de métodos analíticos foi o primeiro método usado para determinar a resistência de juntas adesivas, ainda na primeira metade do Séc. XX. Estes modelos consistem em expressões matemáticas que relacionam a geometria da junta e o seu carregamento com as propriedades do material e permitem a determinação das tensões que atuam sobre a camada adesiva. A tensão máxima (ou uma combinação de valores de tensão) presente na junta é então comparada com a resistência mecânica dos materiais, utilizando um determinado critério de falha. Se esta resistência for excedida, é expectável que a junta falhe. Alguns modelos analíticos permitem inclusivamente determinar se a falha irá ocorrer na camada de adesiva (falha coesiva do adesivo) ou no aderente (falha coesiva do aderente). Começaremos por comparar primeiro as capacidades de cálculo da tensão dos diferentes modelos analíticos para JSS e depois discutiremos os critérios de falha adequados.

A definição de tensão de corte é a base para o mais simples de todos os modelos analíticos de JSS. Este modelo, mostrado na Figura 8.3., é conhecido como o modelo da cedência generalizada do adesivo, assume que toda a camada adesiva está a ser carregada de forma uniforme (pelo que a área resistente é efetivamente toda a área colada). Assume também que a tensão de corte pode ser calculada diretamente com a carga que atua sobre os aderentes (marcada como P na Figura 8.3.).

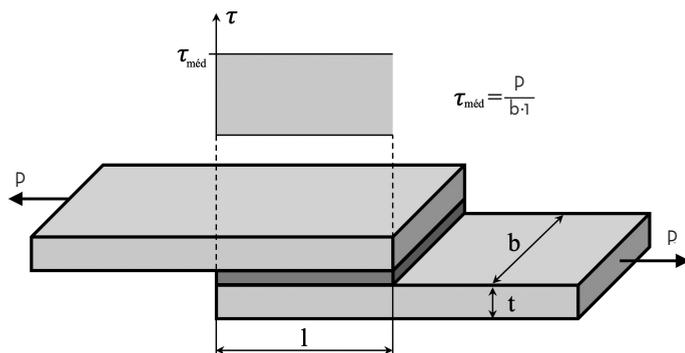


Figura 8.3. Determinação da tensão de corte média atuante numa junta de simples sobreposição.

No entanto, este modelo pressupõe que o aderente não se deforma (nem elasticamente nem plasticamente) e que existe uma distribuição uniforme e constante de tensão de corte ao longo da camada adesiva, o que não é verdade para todos os adesivos. Na prática, a previsão da resistência das juntas assumindo uma tensão uniforme na camada adesiva só é possível para adesivos elásticos (muito flexíveis e altamente deformáveis).

8.3.2. Volkersen

Em 1938, Volkersen demonstrou que, para a maior parte dos adesivos, a tensão de corte não está distribuída de forma uniforme. Em termos simples, Volkersen mostrou que, numa junta carregada e com aderentes deformáveis, a camada adesiva terá também de se deformar para acompanhar os aderentes. Uma vez que as extremidades dos aderentes se encontram mais carregadas, cria-se um diferencial de deformações, o qual força o adesivo a deformar-se também de forma desigual, sendo que é nas extremidades do comprimento de sobreposição que a tensão de corte atinge o valor máximo. A Figura 8.4. destaca claramente este efeito e mostra a distribuição da tensão de corte resultante, com picos nas extremidades de sobreposição.

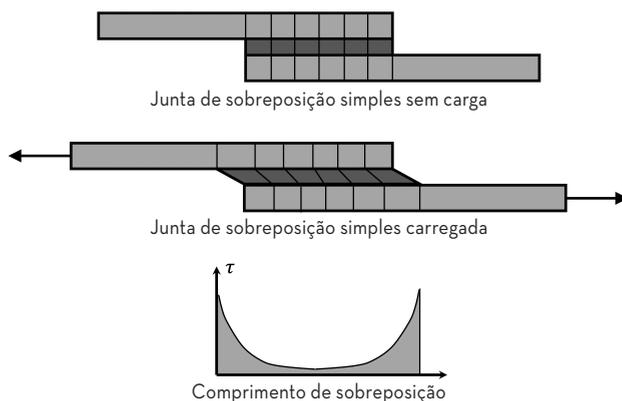


Figura 8.4. Deformação diferencial de uma junta adesiva determinada com recurso ao modelo de Volkersen e respetiva distribuição de tensão de corte.

Segundo este modelo, um adesivo rígido sujeito a esta deformação diferencial exibirá uma distribuição de tensão de corte com elevados picos de concentração de tensão. Conclui-se, portanto, que um adesivo excessivamente rígido não é de todo recomendado para utilização em juntas adesivas, pois não acomoda a deformação inevitável dos aderentes sem gerar grandes tensões. De forma similar, o uso de substratos flexíveis irá também deteriorar o desempenho de um adesivo rígido.

A implementação do modelo de Volkersen baseia-se na geometria mostrada na Figura 8.5., requerendo o comprimento de sobreposição da junta (l), a espessura dos dois substratos (t_1 e t_2), a espessura da camada adesiva (t_a). No que concerne as propriedades mecânicas, o modelo de Volkersen requer apenas o conhecimento do módulo de elasticidade dos substratos (E_1 e E_2) e o módulo de corte do adesivo (G_a).

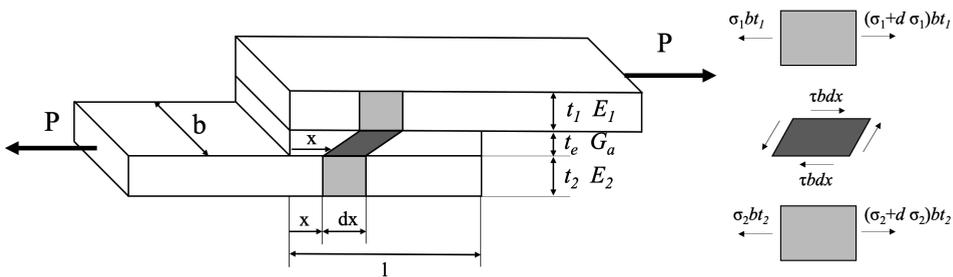


Figura 8.5. Geometria e diagrama de corpo livre do adesivo e dos substratos usados para o modelo de Volkersen.

A distribuição da tensão de corte no adesivo (τ) em função da carga aplicada (P) pode ser obtida da seguinte forma:

Inicialmente, deverá ser feito o balanço das cargas atuantes no substrato superior:

$$\sigma_1 b t_1 + \tau b dx = (\sigma_1 + d\sigma_1) b t_1 \Rightarrow \frac{d\sigma_1}{dx} = \frac{\tau}{t_1} \quad \mathbf{8.1}$$

Este será seguido do balanço das forças do substrato inferior:

$$\sigma_2 b t_2 = (\sigma_2 + d\sigma_2) b t_2 + \tau b dx \Rightarrow \frac{d\sigma_2}{dx} = \frac{\tau}{t_2} \quad \mathbf{8.2}$$

O equilíbrio da junta é obtido com recurso a:

$$P = \sigma_1 b t_1 + \sigma_2 b t_2 \quad \mathbf{8.3}$$

Deformação de corte no adesivo:

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \frac{\tau}{G_a} \\ \gamma &= \frac{1}{t_a} (u_1 - u_2) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{d\gamma}{dx} = \frac{1}{G_a} = \frac{d\tau}{dx} = \frac{1}{t_a} \left(\frac{du_1}{dx} - \frac{du_2}{dx} \right) = \frac{1}{t_a} \left(\frac{\sigma_1}{E_1} - \frac{\sigma_2}{E_2} \right) \quad \mathbf{8.4}$$

A partir das Equações 8.1, 8.2 e 8.4:

$$\frac{1}{G_a} \frac{d\tau}{dx} = \frac{t_1}{G_a} \frac{d^2\sigma_1}{dx^2} = -\frac{t_2}{G_a} \frac{d^2\sigma_1}{dx^2} \Rightarrow t_1 \frac{d^2\sigma_1}{dx^2} = \frac{G_a}{t_a} \left(\frac{\sigma_1}{E_1} - \frac{\sigma_2}{E_2} \right) \quad \mathbf{8.5}$$

A partir da Equação 8.3:

$$\sigma_2 = \frac{P}{bt_2} - \sigma_1 = \frac{t_1}{t_2} \sigma_1 \quad \mathbf{8.6}$$

Substituindo a Equação 8.6 na Equação 8.5:

$$\frac{d^2\sigma_1}{dx^2} = -\gamma^2 \sigma_2 + C_0 = 0 \quad \mathbf{8.7}$$

onde

$$\lambda^2 = \frac{G_a}{t_a} \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right)$$

$$C_0 = \frac{G_a}{t_a} = \frac{P}{bE_2 t_2 t_1}$$

A solução da Equação 8.7 é do tipo:

$$\sigma_1 = A \cosh(\lambda x) + B \sinh(\lambda x) + \frac{C_0}{\lambda^2} \quad \mathbf{8.8}$$

Com as condições de fronteira seguintes:

$$\sigma_1 = 0, \sigma_2 = \frac{P}{bt_2} \text{ para } x = 0 \quad \mathbf{8.9}$$

$$\sigma_2 = 0, \sigma_1 = \frac{P}{bt_1} \text{ para } x = 1 \quad \mathbf{8.10}$$

Usando as Equações 8.9, 8.10 e 8.8, podemos determinar as constantes A e B:

$$A = \frac{C_0}{\lambda^2}$$

$$B = \frac{C_0}{\lambda^2} \frac{\cosh(\lambda l) - 1}{\sin(\lambda l)} + \frac{P}{bt_1} \frac{1}{\sinh(\lambda l)}$$

A solução final para a Equação 9.7 é:

$$\sigma_1 = -\frac{C_0}{\lambda^2} \cosh(\lambda l) + \left[\frac{C_0}{\lambda^2} [\cosh(\lambda l) - 1] + \frac{P}{bt_1} \right] \frac{\sinh(\lambda x)}{\sinh(\lambda l)} + \frac{C_0}{\lambda^2} \quad \mathbf{8.11}$$

A partir da Equação 8.1:

$$\tau_1 = t_1 - \frac{d\sigma}{dx} = \frac{C_0 t_1}{\lambda^2} \lambda \sinh(\lambda x) + \left[\frac{C_0 t_1}{\lambda^2} [\cosh(\lambda l) - 1] + \frac{P}{b} \right] \frac{\lambda \cosh(\lambda x)}{\sinh(\lambda l)} \quad \mathbf{8.12}$$

Substituindo C_0 e λ^2 e usando $\bar{\tau} = \frac{P}{bl}$:

$$\frac{\tau}{\bar{\tau}} = \frac{\lambda l}{\phi \sinh(\lambda l)} [(\phi - 1) \cosh(\lambda(l-x)) + \cosh(\lambda x)] \quad \mathbf{8.13}$$

onde

$$\phi = \frac{E_1 t_1}{E_2 t_2} + 1 \quad \mathbf{8.14}$$

Em que que:

$$\frac{t(0)}{\bar{\tau}} = \frac{\lambda l}{\phi \sinh(\lambda l)} [(\phi - 1) \cosh(\lambda l) + 1]$$

$$\frac{t(l)}{\bar{\tau}} = \frac{\lambda l}{\phi \sinh(\lambda l)} [(\phi - 1) + \cosh(\lambda l)]$$

Fazendo:

$$\frac{E_1 t_1}{E_2 t_2} \phi - 1 \quad \mathbf{8.15}$$

Para juntas balanceadas, $\phi = 2$, i.e. $\phi - 1 = 1$

Chegando-se assim à expressão final do modelo de Volkersen:

$$\frac{\tau(0)}{\bar{\tau}} = \frac{\tau(l)}{\bar{\tau}} \frac{\lambda l}{2 \sinh(\lambda l)} [1 + \cosh(\lambda l)] \quad \mathbf{8.16}$$

8.3.3 Goland e Reissner

Goland e Reissner basearam o seu trabalho na formulação de Volkersen, mas acrescentaram o efeito da flexão ao modelo. Como vimos anteriormente, a geometria de uma junta do tipo JSS está naturalmente desequilibrada, induzindo tensões de arrancamento na camada adesiva. A formulação de Goland e Reissner mostra que quanto mais espessa for a camada adesiva, maior será o efeito de flexão sobre a junta, pois mais desalinhados se tornam os aderentes, como mostrado na Figura 8.6.

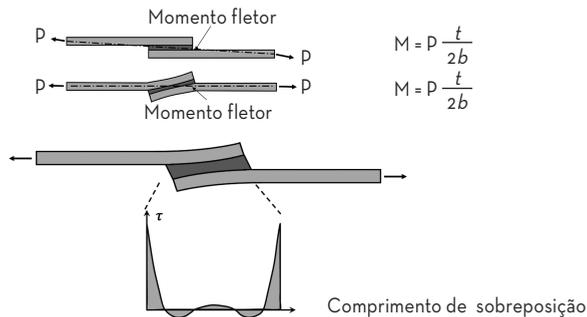


Figura 8.6. Momento fletor atuante numa junta de sobreposição simples previsto pelo modelo de Goland e Reissner e respetiva influência na distribuição de tensão de corte.

Estas tensões de arrancamento surgem novamente nas extremidades da sobreposição, no mesmo local onde Volkersen previu picos na distribuição da tensão de corte (Figura 8.3). Como tal, torna-se evidente que estas áreas são de longe as mais carregadas numa junta adesiva e são elas que definem a resistência de uma junta de simples sobreposição.

8.3.4. Hart-Smith

Até este ponto, apenas abordamos modelos que não consideram a deformação plástica do adesivo. Tanto o modelo de Volkersen e de Goland e Reissner consideram o adesivo como sendo um material puramente elástico, o que significa que as tensões geradas na junta são sempre diretamente proporcionais à deformação nela patente. Mas como sabemos, poucos são os adesivos que se comportam deste modo. Na realidade, a maioria dos adesivos tem a capacidade de se deformar plasticamente antes da rotura. Isto tem implicações na resistência da junta, pois as tensões são distribuídas de forma diferente ao longo da camada adesiva se o adesivo sofrer deformação plástica durante o processo de carregamento da junta.

O modelo proposto por Hart-Smith demonstra que, mesmo que exista cedência plástica do material nas extremidades do comprimento de sobreposição (caso B na Figura 8.7), uma grande parte da camada adesiva pode ainda suportar carga adicional. Este modelo representa com bastante fidelidade o comportamento de um adesivo dúctil sujeito a grandes deformações plásticas. Contudo, a sua utilização prática é por vezes limitada pelo facto de ser fundamental obter propriedades precisas do adesivo no domínio elasto-plástico.

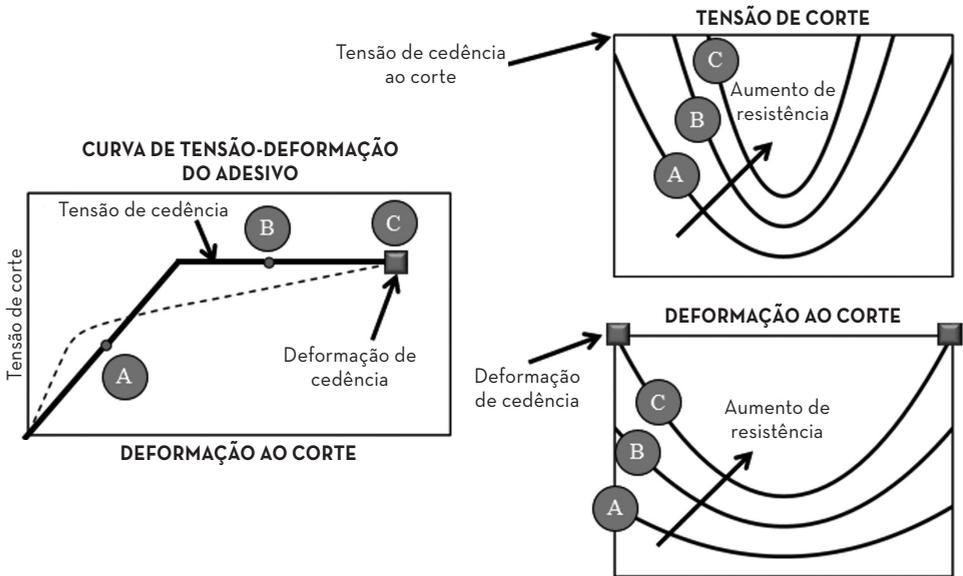


Figura 8.7. Demonstração da resistência de junta adicional conferida pela plastificação do adesivo, tal como previsto pelo modelo de Hart-Smith.

8.4. CRITÉRIOS DE ROTURA

Ao longo deste capítulo foram discutidos modelos que nos fornecem distribuições de tensão ao longo da camada adesiva ou do aderente. Contudo, é necessário perceber que estes modelos apenas nos indicam qual é o estado de tensão presente na junta para uma determinada condição de carregamento e não permitem a determinação direta da resistência da junta. De forma a prever se e quando uma junta colada irá falhar, é necessário combinar estes modelos com um critério de falha adequado.

8.4.1. Falha no adesivo

8.4.1.1. Cedência generalizada do adesivo

Em adesivos frágeis, que permitem um nível de deformação plástica muito limitado, a falha ocorre frequentemente porque a tensão de corte máxima do adesivo é atingida. Nestes casos, uma análise puramente elástica, como a proposta por Volkersen, é perfeitamente adequada. Se estivermos perante um carregamento onde são geradas elevadas tensões de arrancamento, uma abordagem baseada no modelo de Goland e Reissner será mais apropriada, uma vez que este modelo permite simultaneamente determinar a distribuição da tensão de arrancamento e de corte, as quais podem ser utilizadas para identificar se o adesivo atinge a sua resistência máxima (em modo I ou modo II).

No entanto, como vimos anteriormente, na maior parte dos casos os adesivos sofrem um processo de plastificação durante o carregamento, o que resulta em cargas de rotura que na prática são superiores às previstas pelos métodos que apenas consideram o comportamento elástico. Esta condição limite é mostrada como caso C na Figura 8.7. Na Figura 8.8. mostra-se uma curva de carga-deslocamento, semelhante às que podem ser obtidas testando experimentalmente uma amostra, a qual ilustra como o processo de plastificação tem um impacto importante na previsão da carga de falha e na exatidão dos resultados obtidos.

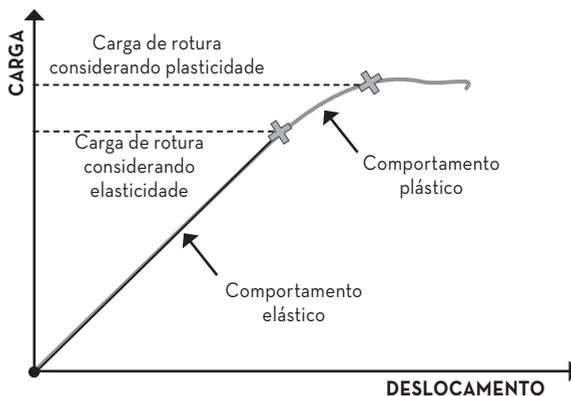


Figura 8.8. Demonstração da carga de rotura superior e deslocamento adicional previstos por critérios de rotura que contemplem plasticidade.

Um caso especial do modelo Hart-Smith é a cedência generalizada do adesivo. Neste caso, considera-se um adesivo tão flexível que pode ser deformado de forma perfeitamente uniforme, distribuindo as tensões de corte ao por toda a camada adesiva. Este método é adequado para adesivos muito dúcteis, ou seja, aqueles com mais de 20% de deformação à rotura quando sujeitos ao corte. O mesmo modelo também se adequa a adesivos elásticos (adesivos altamente deformável, como poliuretanos de uma parte ou silicones). Contudo, neste último caso, a redistribuição de tensões não se deve à ductilidade do adesivo, mas sim ao facto de o adesivo ser altamente flexível.

8.4.2. Falha nos substratos

8.4.2.1. Cedência dos substratos

Em juntas com aderentes metálicos, a rotura da junta pode ser iniciada através da deformação plástica do metal. Assim, se soubermos que o nível de tensão que atua sobre um aderente excede a tensão de cedência do metal utilizado, podemos assumir com segurança que a junta irá falhar. Note-se que isto não significa necessariamente que os aderentes metálicos se rompem e que a camada adesiva permanece intacta. De facto, a cedência do aderente metálico irá ocorrer principalmente perto das extremidades do comprimento de sobreposição, como mostra a Figura 8.9 (onde existem concentrações de tensão) e a deformação localizada do aderente irá sobrecarregar excessivamente o adesivo. Assim, a falha do aderente traduzir-se-á, de facto, numa falha da camada adesiva.

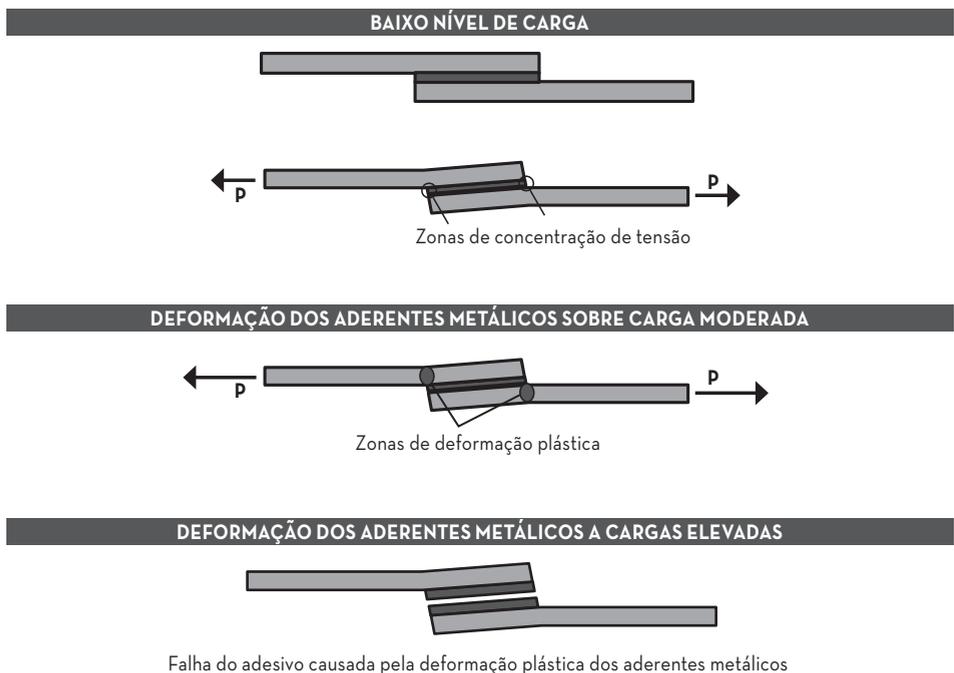


Figura 8.9. Processo de rotura de uma junta adesiva com aderentes metálicos sujeitos a plastificação.

8.4.2.2. Modelo de Adams

Um método simples para determinar a resistência de juntas adesivas foi proposto por Adams em 2002, considerando duas condições: a falha do adesivo por cedência generalizada e a falha do aderente por deformação plástica, mostradas na Figura 8.10. A cedência do substrato continua a assumir que a tensão de corte está uniformemente distribuída ao longo da área colada. No entanto, a falha do aderente é analisada de uma forma um pouco mais complexa, considerando duas regiões diferentes. Na primeira região, a falha do aderente dependerá do comprimento de sobreposição utilizado. Para comprimentos de sobreposição muito maiores, a carga gerada é suficiente para plastificar os aderentes, representando uma tensão aplicada que é superior à resistência à tração do material do aderente.

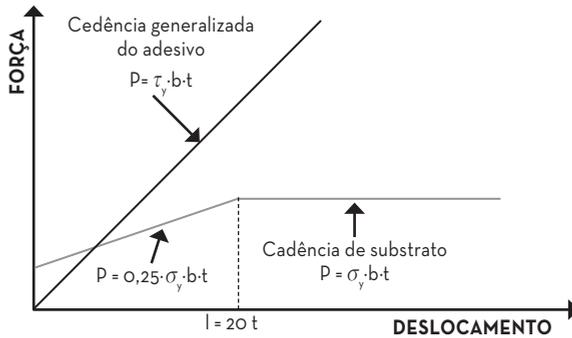


Figura 8.10. Modelo de Adams para determinação da falha de uma junta adesiva.

8.4.2.3. Rotura interlaminar de substratos compósitos

Em juntas com aderentes compósitos, os critérios de falha apropriados baseiam-se geralmente na análise da tensão de arrancamento gerada nas extremidades do comprimento de sobreposição. Isto deve-se ao facto de as tensões de arrancamento terem um efeito muito negativo nos materiais compósitos, conforme ilustrado na Figura 8.11.

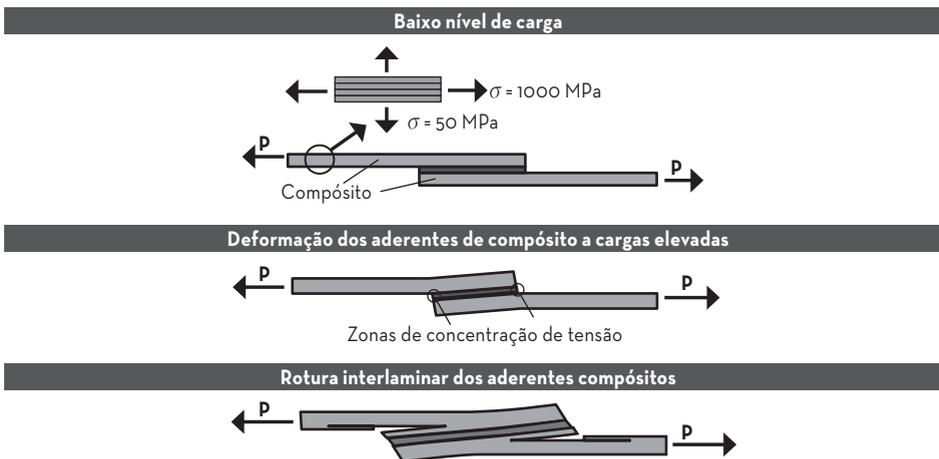
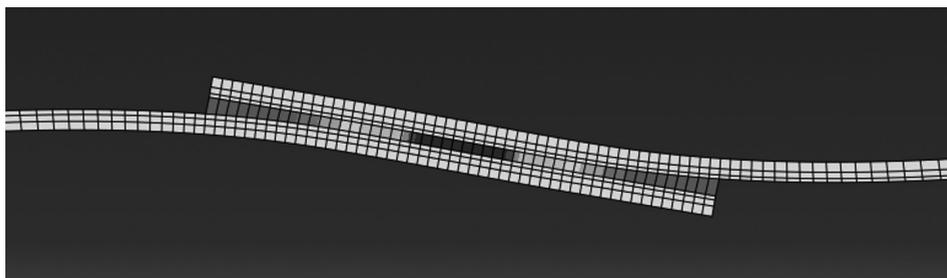


Figura 8.11. Processo de rotura interlaminar de uma junta adesiva com aderente compósito.

A maioria dos compósitos de alta resistência utilizados em aplicações de engenharia utiliza uma construção onde camadas de um reforço de fibra (que pode ser, por exemplo, fibra de carbono ou fibra de vidro) são empilhadas umas sobre as outras e unidas por uma resina. Esta construção significa que, se o compósito for carregado paralelamente às camadas de reforço, exibirá uma resistência extraordinariamente elevada. No entanto, se a carga for aplicada perpendicularmente a estas camadas, as fibras fortes e rígidas do reforço não serão capazes de suportar. Neste caso, a matriz de resina que mantém as camadas juntas, que é quase sempre um material polimérico, será o elo mais fraco da cadeia e a falha ocorrerá por um processo de rotura interlaminar. Assim sendo, caso a tensão de arrancamento gerada por uma junta adesiva exceda a resistência interlaminar do compósito é expectável que a junta falhe prematuramente no seu aderente.

8.5. PREVISÃO DE FORÇAS DE ROTURA USANDO MÉTODOS NUMÉRICOS

O uso do método de elementos finitos (MEF) é uma importante técnica de projeto que trouxe uma elevada flexibilidade ao projeto de elementos estruturais e de juntas adesivas. O método dos elementos finitos divide uma estrutura numa malha de elementos mais pequenos e mais fáceis de estudar, ligados por nós. A esta rede de elementos é aplicado um conjunto de restrições bem definidas, conhecidas como condições de fronteira, que definem com precisão as solicitações a que estes elementos estão sujeitos. Com base nesta malha é possível estabelecer um sistema de equações que representam a totalidade do problema, combinando a influência de cada nó e elemento e das suas condições de fronteira. Em última análise, o objetivo de uma análise com o método dos elementos finitos é determinar o deslocamento dos nós (D), tendo conhecimento prévio da rigidez do corpo (K) e das cargas e reações que atuam sobre ele (R). Assim, podemos estabelecer a equação fundamental da FEA, sumariamente representada na Figura 8.12.



$$KD = R$$

- ✓ Aplicável a qualquer geometria
- ✓ Permite a determinação de qualquer campo de tensão
- ✓ Maior dificuldade em estudos paramétricos

Figura 8.12. Sumário das características de um modelo numérico de elementos finitos.

8.6. PARÂMETROS COM EFEITO NO DESEMPENHO MECÂNICO DAS JUNTAS ADESIVAS

Diversos estudos foram realizados em juntas com geometrias simples para determinar o efeito de diversos parâmetros geométricos e das propriedades dos adesivos no desempenho mecânico das juntas adesivas. Nesta secção é descrito o efeito da espessura, do comprimento de sobreposição e das propriedades dos substratos e dos adesivos. Também é descrito o efeito da temperatura e como esta modifica quer a resistência dos adesivos quer o campo de tensões que atua na junta. São tecidas também algumas considerações relativas a modelos analíticos que podem ser úteis para a determinação do desempenho das juntas. Sugere-se ao leitor que pretenda aprofundar o seu conhecimento sobre juntas adesivas estruturas em replicar alguns destes estudos, os quais podem ser realizados com recurso a materiais e adesivos relativamente simples.

8.6.1. Efeito da espessura da camada adesiva

A espessura da camada adesiva foi desde sempre um dos parâmetros geométricos mais estudados no projeto de juntas adesivas. Diversos estudos realizados sobre este parâmetro mostraram que a utilização de grandes espessuras de adesivo não é necessariamente a melhor opção. Testes experimentais demonstraram que existe uma espessura ideal de adesivo, que é de cerca de 0,1 – 0,2 mm para adesivos relativamente rígidos, tais como os epóxidos (como mostrado na Figura 8.13.). Para adesivos mais flexíveis e com significativa capacidade de deformação elástica (como os silicones), este valor é um mais elevado, subindo para 1 mm.

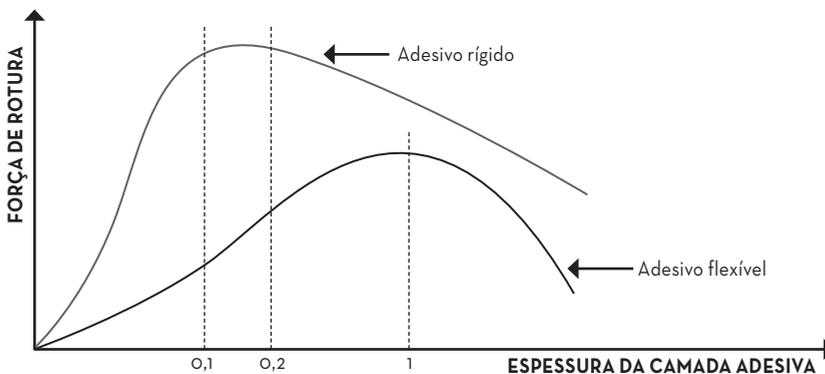


Figura 8.13. Evolução da força de rotura em função da espessura da camada adesiva para dois tipos de adesivos.

A maioria dos modelos analíticos apresentados neste capítulo preveem que o aumento da espessura do adesivo deverá resultar num aumento da força de rotura da junta, conduzindo a uma distribuição de tensões mais suave. No entanto, tal como referido acima, a experiência prática mostra que isto não é verdade. Várias explicações foram propostas

para este efeito, mas o consenso atual é de que as espessuras maiores levam a um maior desalinhamento das cargas que atuam na camada adesiva, o que se traduz em grandes momentos de flexão. Estes grandes momentos de flexão são responsáveis pela geração de tensões de arrancamento que, como vimos, são altamente prejudiciais para a resistência da camada adesiva. Embora esta explicação sugira que a camada adesiva ideal teria uma espessura quase nula para minimizar os momentos de flexão, na prática isto não é possível, uma vez que camadas adesivas muito finas são muito suscetíveis ao aparecimento de áreas onde simplesmente não há adesivo e onde os aderentes contactam diretamente, reduzindo assim a capacidade de suportar cargas.

8.6.2. Efeito do comprimento de sobreposição

8.6.2.1 Comprimento de sobreposição e resistência dos adesivos

A Figura 8.14. mostra, de forma simplificada, o efeito do tipo de adesivo e do comprimento de sobreposição no comportamento de uma junta adesiva. Consideremos primeiro o caso de um adesivo rígido usado para ligar aderentes de aço de alta resistência. Para comprimentos de sobreposição muito pequenos, a resistência da junta será principalmente limitada pela resistência da camada adesiva, a qual tem uma área resistente (área colada) pequena. O modelo analítico proposto por Volkersen será adequado para este caso, pois o adesivo comporta-se de forma elástica. No entanto, à medida que aumentamos esta área resistente, obtemos um aumento linear da resistência da junta e eventualmente chegaremos a um patamar na carga de rotura. Ou seja, aumentar ainda mais o comprimento de sobreposição não será vantajoso para o desempenho da junta. Encontramos, portanto, uma situação onde um modelo que preveja a cedência do substrato é adequado (por exemplo o modelo proposto por Adams).

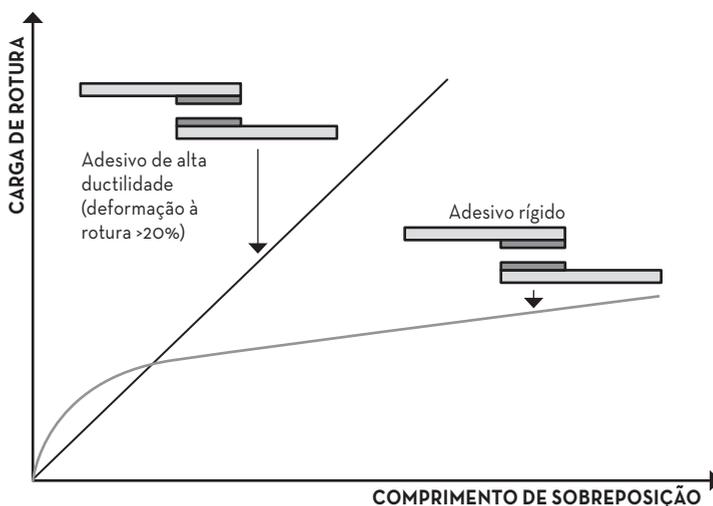


Figura 8.14. Evolução da força de rotura em função do comprimento de sobreposição para dois tipos de adesivos.

Recordemos a discussão sobre a distribuição da tensão de corte atuando sobre uma camada adesiva. Como vimos, os picos de tensão nas extremidades da sobreposição são a principal causa de falha das camadas adesivas rígidas e mesmo que aumentemos a sobreposição para valores extremamente grandes, estes picos de tensão estarão sempre presentes, levando a uma melhoria modesta da resistência das juntas. De uma forma mais simples, a área no centro do comprimento da sobreposição está praticamente descarregada e acrescentar mais comprimento a esta região nada faz para aumentar a resistência da junta.

Em contraste, os adesivos muito dúcteis são capazes de ceder antes de partir e, tal como descrito por Hart-Smith, esta cedência ajudará a redistribuir uniformemente as tensões ao longo de todo o comprimento de sobreposição. Desta forma, a formação de concentrações de tensão nas extremidades da sobreposição é menos provável e o adesivo pode utilizar toda a área colada disponível. O resultado é uma junta com uma força de rotura que é diretamente proporcional ao comprimento de sobreposição e como tal o modelo da cedência generalizada torna-se adequado para este propósito. Note-se que embora este exemplo se concentre num adesivo muito dúctil, o mesmo seria verdade para um adesivo extremamente elástico e flexível, tal como um poliuretano, pois a grande flexibilidade destes adesivos é também propícia à uniformização das tensões.

8.6.2.2. Comprimento de sobreposição e resistência dos substratos

A Figura 8.15. mostra, de forma simplificada, o efeito do tipo de substrato e do comprimento de sobreposição no comportamento de uma junta adesiva. O primeiro caso que podemos discutir é o que corresponde a aço de alta resistência colado com adesivo dúctil. Como mostra a Figura 8.15., esta configuração apresenta uma relação proporcional entre a força de rotura e o comprimento de sobreposição, pelas razões que explicámos acima (distribuição uniforme de tensões que permite utilizar toda a área colada). Novamente, encontramos uma situação adequada ao uso do modelo da cedência generalizada do adesivo.

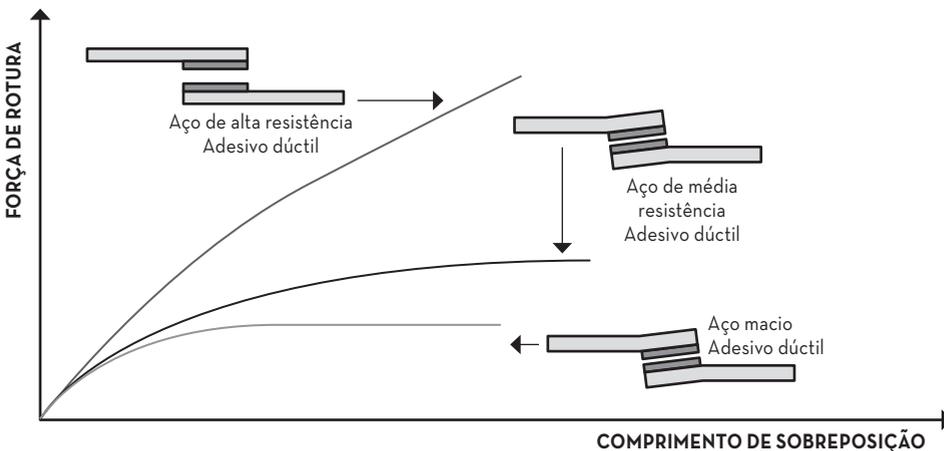


Figura 8.15. Evolução da força de rotura em função do comprimento de sobreposição para três tipos de substratos.

Consideremos agora uma junta fabricada utilizando o mesmo adesivo dúctil e aderentes com baixa resistência à ruptura, como por exemplo um aço macio. Neste caso, encontraremos inicialmente um aumento relativamente linear da resistência da junta à medida que aumentamos o comprimento da sobreposição, que acabará por estabilizar num patamar. Ao contrário do que foi mostrado na Figura 8.14., este patamar não é o produto de falha do adesivo, mas é sim causado pela cedência do aderente. De facto, à medida que o aderente começa a ceder, são impostas grandes tensões ao adesivo que o forçam a falhar quase imediatamente. Ou seja, o que aparenta ser uma falha no adesivo é na realidade produto da excessiva deformação do aderente. Assim sendo, aumentar ainda mais o comprimento da sobreposição não produzirá qualquer melhoria, uma vez que a resistência do aderente é agora o principal fator limitador. Este caso é mostrado como uma linha inferior na Figura 8.15.

Finalmente, se utilizarmos aderentes com uma resistência intermédia (algures entre aço de alta resistência e aço macio), encontraremos novamente um patamar na força de ruptura da junta, mas a um maior valor de carga de ruptura, uma vez que o aderente de aço com resistência intermédia exigirá cargas mais elevadas para ceder. Este comportamento é representado pela linha intermédia na Figura 8.15.

Estes exemplos mostram claramente que a resistência do aderente desempenha um papel importante na determinação da forma como a resistência da junta evolui com o comprimento da sobreposição. Aderentes de alta resistência permitem que os adesivos dúcteis utilizem plenamente o comprimento de sobreposição disponível, enquanto os aderentes de baixa resistência limitam o desempenho da junta, uma vez que acabarão por ceder plasticamente e causar a falha da camada adesiva. Tal como no exemplo anterior, a previsão da resistência da junta para estes casos poderá ser conseguida com recurso a um modelo que assuma a deformação plástica dos substratos (cedência dos substratos ou Adams).

8.6.3. Substratos de material compósito

Um caso especial de dependência do comprimento de sobreposição é frequentemente encontrado na ligação adesiva de materiais compósitos. Já anteriormente discutimos como as tensões de arrancamento na camada adesiva podem ser transferidas para os aderentes compósitos e causar falha interlaminar no aderente. Contudo, esta falha está também diretamente relacionada com o comprimento de sobreposição, como nos mostra a Figura 8.16. Para comprimentos de sobreposição mais pequenos, a tensão de arrancamento gerada nas extremidades da sobreposição não é suficiente para causar a ruptura interlaminar dos aderentes compósitos. Mas à medida que aumentamos o comprimento de sobreposição, a camada adesiva será sujeita a tensões cada vez mais elevadas e acabará por atingir níveis de tensão de arrancamento que podem causar a ruptura interlaminar do aderente compósito. Neste caso, mesmo que aumentemos o comprimento de sobreposição, a resistência da junta é determinada pela resistência interlaminar do compósito aderente, conduzindo novamente a um patamar da força de ruptura.

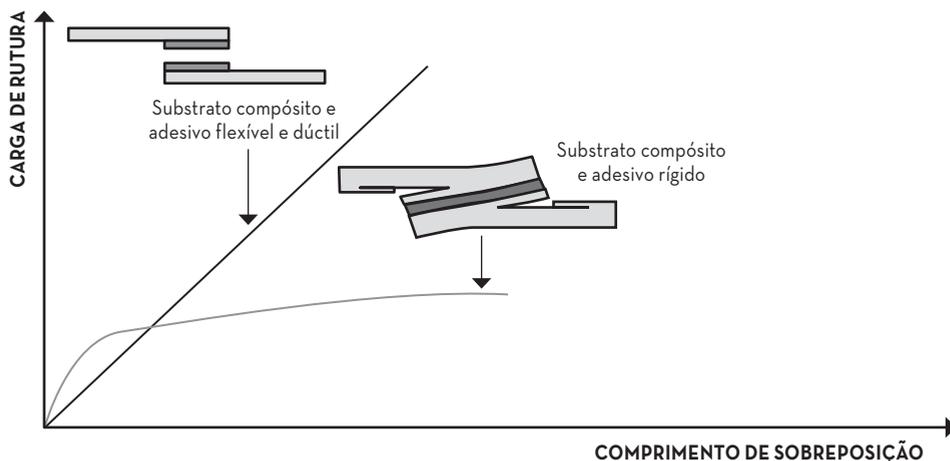


Figura 8.16. Evolução da força de rutura em função do comprimento de sobreposição para juntas com substratos compósitos e dois tipos diferentes de adesivos.

Como descrito anteriormente, a previsão da rutura interlaminar de um compósito requer um modelo que seja capaz de determinar as tensões de arrancamento, como é o caso do modelo de Goland e Reissner.

8.6.4. Efeito da temperatura e das tensões térmicas

A temperatura de serviço pode ter um efeito significativo no desempenho de uma junta colada, o que pode ocorrer de diferentes formas. Talvez a mais importante destas seja a redução das propriedades dos adesivos e dos aderentes que normalmente ocorre com o aumento da temperatura de serviço. Os adesivos, como os outros materiais poliméricos, são bastante sensíveis à temperatura e podem fornecer resistência coesiva insuficiente se forem forçados a funcionar acima da sua temperatura de transição vítrea. Ao projetar uma junta que irá funcionar a temperaturas relativamente altas ou baixas, é necessário utilizar propriedades mecânicas que foram determinadas à temperatura de serviço efetiva.

Outro importante efeito da temperatura no desempenho das juntas coladas prende-se com o aparecimento de tensões térmicas residuais, causadas pelas variações de temperatura. Os adesivos e os aderentes apresentam coeficientes de expansão térmica muito diferentes, muitas vezes com diferenças de uma ordem de grandeza (pelo menos 10 vezes superior ou inferior). Quando são expostos a temperaturas elevadas, estes materiais irão expandir-se de forma muito diferente. No entanto, como estão agora ligados entre si, torna-se fisicamente impossível que esta expansão ocorra livremente, gerando tensões residuais que são aplicadas na camada adesiva. As tensões residuais não são normalmente importantes quando os aderentes são do mesmo material, mas no caso de juntas com aderentes de natureza dissimilar, em que o material de um aderente é muito diferente do outro, a junta pode ficar altamente carregada com tensões residuais térmicas, mesmo antes de lhe ser aplicada qualquer carga mecânica (Figura 8.17).

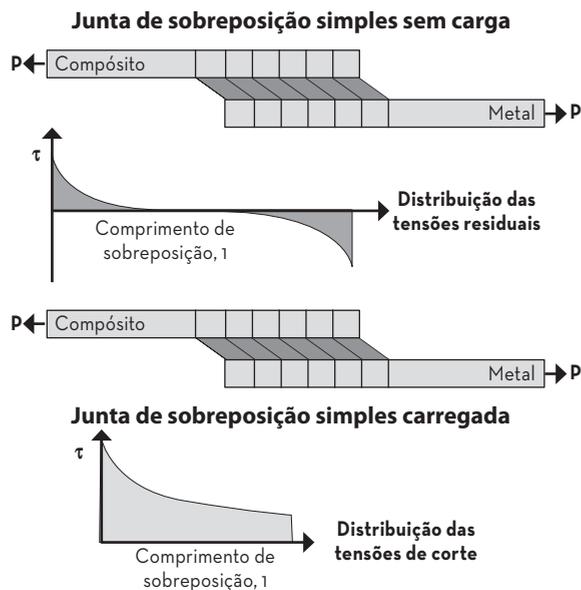


Figura 8.17. Tensões residuais causadas pelo uso de aderentes com coeficientes de expansão térmica díspares.

8.7. OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE JUNTAS ADESIVAS

8.7.1. Uso de filetes de adesivo e modificações dos substratos

A utilização de um filete de adesivo é, de longe, um dos métodos mais simples e mais eficazes para melhorar o desempenho de uma junta adesiva. Como mostrado na Figura 8.18., um filete é um volume de adesivo que flui para fora da camada adesiva e que liga gradualmente ambos os aderentes, permitindo a transferência de tensões numa maior área. Os filetes propiciam uma distribuição de tensão de corte mais suave e uniforme, mais próxima daquela que é obtida quando se utiliza um adesivo muito flexível e dúctil.

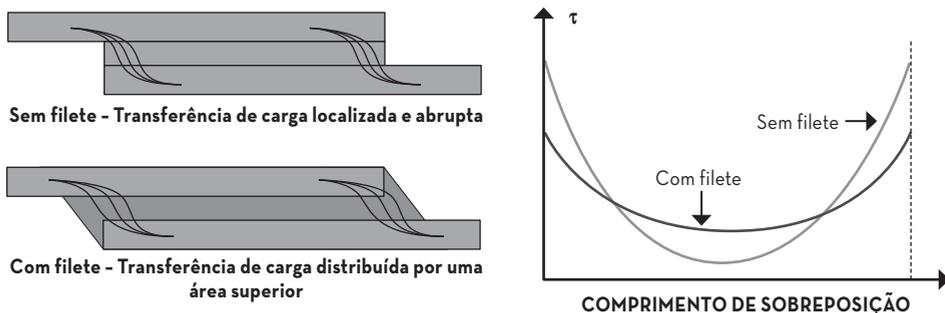


Figura 8.18. Influência da presença de um filete na distribuição da tensão de corte de uma junta de simples sobreposição.

Os filetes de adesivo são bastante simples de fabricar e, em alguns casos, nem sequer requerem um esforço adicional para os criar, uma vez que o excesso de adesivo que flui para fora da junta criará naturalmente uma forma de filete que, embora pouco refinada, é ainda assim perfeitamente capaz de transferir cargas e aliviar as tensões presentes naquelas regiões.

De forma análoga ao uso de filetes no adesivo, também os substratos podem ser modificados para reduzir as tensões atuantes nas extremidades do comprimento de sobreposição. Tais modificações podem tomar a forma de chanfros exteriores ou interiores e podem até ser combinados com a presença de filetes adesivos para melhorar reduzir ainda mais as tensões atuantes (Figura 8.19).

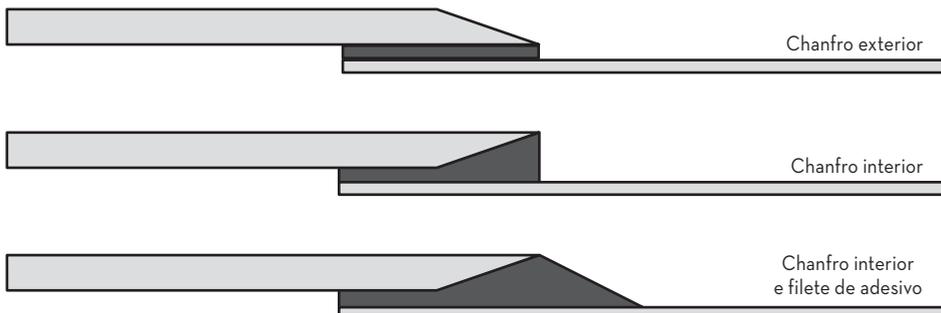


Figura 8.19. Exemplos de modificações de substratos para redução das tensões nas extremidades do comprimento de sobreposição.

8.7.2. Juntas adesivas mistas

As juntas adesivas mistas são juntas que combinam dois ou mais adesivos na mesma camada adesiva, como se mostra na Figura 8.20. A utilização de dois adesivos distintos pode ser explorada para reduzir as concentrações de tensão nas extremidades da sobreposição, típicas das JSS e melhorar o desempenho das juntas de diversas formas.

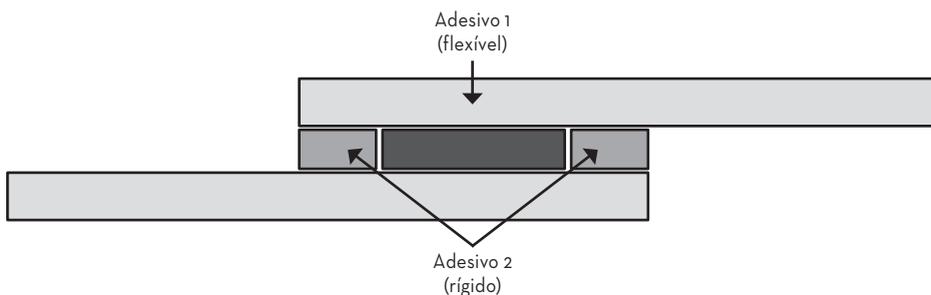


Figura 8.20. Conceito de uma junta adesiva mista.

Para que seja eficaz, uma junta mista deverá apresentar um adesivo mais flexível nas extremidades da sobreposição e um adesivo rígido na secção central da junta, uma área menos sujeita a deformação durante a carga. A presença do adesivo dúctil nas extremidades da

sobreposição pretende reduzir com sucesso o efeito da concentração de tensão, enquanto o adesivo rígido na parte central é capaz de suportar a maior parte da carga sem falhas. Esta combinação conduz a ganhos importantes na resistência das juntas, pressupondo uma boa seleção dos adesivos utilizados. De uma forma mais simplificada, podemos dizer que uma junta adesiva mista bem concebida exibirá um desempenho superior à soma das suas partes, ou seja, a de cada um dos adesivos que a compõem utilizados isoladamente.

A utilidade de uma junta adesiva mista não está apenas relacionada com a melhoria da resistência das juntas. A utilização desta solução construtiva pode também melhorar o comportamento das juntas a baixas ou altas temperaturas, fazendo uso de uma combinação de adesivos resistentes a altas temperaturas com adesivos resistentes a baixas temperaturas. Fortuitamente, esta combinação é especialmente adequada para utilização em juntas adesivas mistas, uma vez que os adesivos de baixa temperatura (tais como silicones) são inerentemente flexíveis e os adesivos de alta temperatura (tais como formulações de epóxidos resistentes à temperatura), são inerentemente rígidos.

8.7.3. Juntas adesivas híbridas

A junta híbrida é outra configuração capaz de aumentar o desempenho de uma junta adesiva e encontra já uso extenso em diversas aplicações. As juntas híbridas combinam a ligação adesiva com outros métodos de união, como por exemplo, a soldadura, rebiteagem ou fixação com parafusos. Um exemplo de uma junta híbrida que combina a ligação adesiva com rebiteagem é mostrada na Figura 8.21.

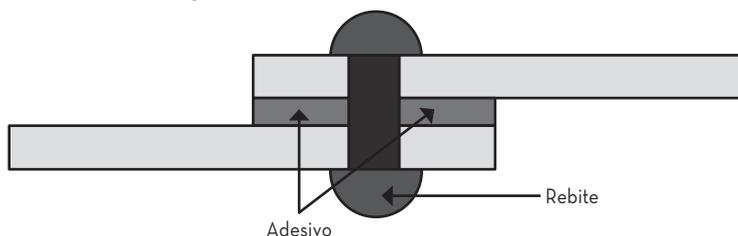


Figura 8.21. Junta adesiva híbrida (rebite + adesivo)

As juntas híbridas são utilizadas não só para aumentar o desempenho da junta, mas também para facilitar o processo de fabrico, fornecendo um método eficaz para imobilizar os substratos enquanto o adesivo cura, dispensando assim a necessidade de usar moldes ou grampos. A indústria automóvel combina a soldadura por pontos e a colagem adesiva nos veículos que fabrica, uma vez que a soldadura por pontos assegura instantaneamente uma ligação sólida entre componentes enquanto o adesivo não é curado. Quando o veículo entra em serviço, tanto a soldadura por pontos como a camada adesiva contribuem para a resistência da junta. As uniões híbridas também melhoram a segurança, permitindo modos de falha mais benignos. Por exemplo, em estruturas de aeronaves é comum combinar rebiteagem e a ligação adesiva, pois caso uma destas técnicas de união falhe, a outra poderá ainda manter a estrutura coesa, evitando danos catastróficos.

8.7.4. Uso de reforços localizados

Uma outra técnica usada para modificar e melhorar o desempenho de juntas adesivas consiste no uso de reforços localizados, cuja presença permite otimizar a geometria da junta para determinadas condições de carregamento. A título de exemplo, podemos analisar o desempenho de uma junta em T, que na sua forma mais simples consiste apenas em dois elementos colados perpendicularmente entre si. Nesta forma básica, o momento gerado na camada adesiva por forças laterais muito elevado, pelo que a junta apenas é capaz de suportar cargas limitadas, mesmo em tração. No entanto, como mostra a Figura 8.22., com uso de reforços localizados é possível eliminar grande parte destas limitações, introduzindo novas camadas de adesivo com orientações mais adequadas para suportar as diversas cargas a que a junta poderá estar a sujeita.

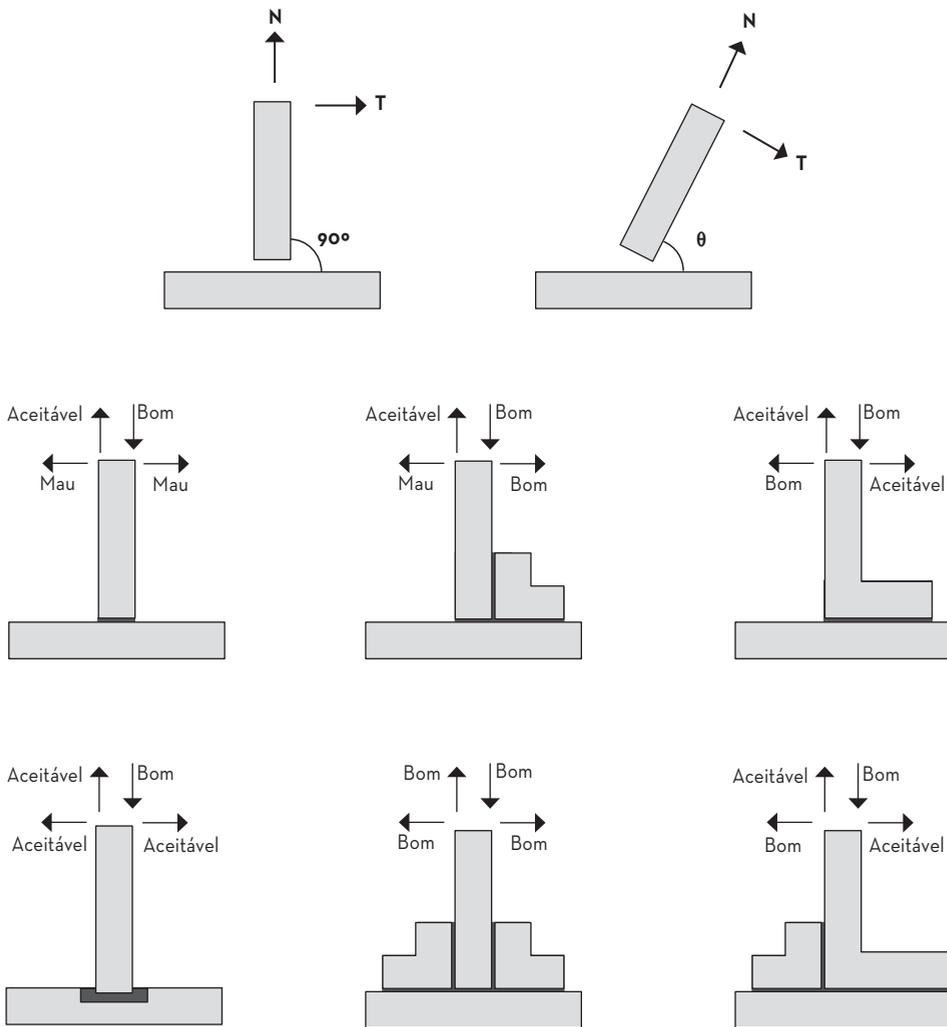


Figura 8.22. Exemplos de configurações de juntas em T.

DURABILIDADE 9

9. DURABILIDADE

As metodologias de projeto de junta são fundamentalmente orientadas para a determinação da resistência estática, ou seja, aquela conseguida imediatamente após o endurecimento do adesivo. No entanto, durante o serviço, as juntas adesivas encontram-se habitualmente expostas a condições ambientais severas, tais como elevados níveis de humidade e temperaturas extremas durante longos períodos de tempo. Em muitos outros casos as juntas encontram-se também sujeitas a cargas cíclicas de longa duração. Todas estas condições podem degradar o desempenho do adesivo e da junta. Neste caso, torna-se importante ter em conta este processo de degradação e as suas consequências, de forma a garantir que a junta não falhará em serviço. Um projetista de juntas adesivas deverá estar munido de dados experimentais e de modelos capazes de prever a resistência das juntas, permitindo assim a realização de estimativas da durabilidade da junta.

9.1. EFEITOS AMBIENTAIS

9.1.1. Envelhecimento por absorção de humidade

Os adesivos são materiais permeáveis, absorvendo água caso uma junta adesiva seja mantida num ambiente húmido durante um longo período de tempo. Sabe-se que o nível de água que está presente na camada adesiva aumenta com o tempo e que durante este processo de absorção, as moléculas de água presentes na camada adesiva ligar-se-ão com as cadeias poliméricas do adesivo ou ocuparão os espaços livres da estrutura polimérica do mesmo. Contudo, após um determinado período de tempo, a junta atingirá uma condição de saturação onde o adesivo já não será mais capaz de absorver mais água.

Devido à difusão da água, o adesivo irá sofrer expansão dimensional, plastificação e poderá ser também sujeito a um processo de hidrólise. A plastificação é um fenómeno

em que o adesivo se torna mais flexível pela presença de água entre as suas cadeias moleculares. Já a hidrólise consiste na degradação das cadeias poliméricas por efeito de uma reação química com a água ou com substâncias nela dissolvidas. Estes dois fenómenos são indesejáveis porque provocam uma degradação notória do desempenho da junta adesiva. O efeito da presença de água no comportamento à tração de um adesivo é mostrado de forma esquemática na Figura 9.1. É notório o aumento da ductilidade causado pela plastificação, seguido pelo processo de hidrólise.

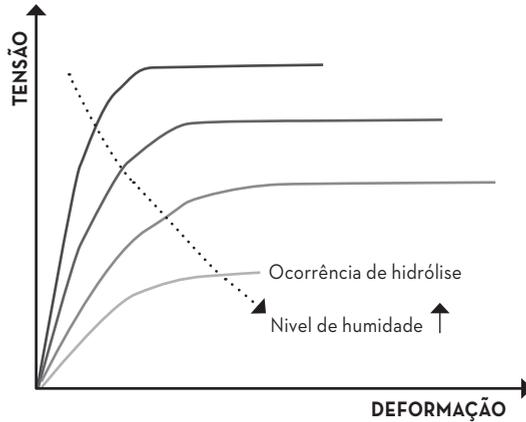


Figura 9.1. Efeito do nível de humidade no desempenho de um adesivo.

Para analisar a durabilidade de uma junta em ambientes húmidos, o coeficiente de difusão da água na camada adesiva deve ser calculado. Esta etapa é normalmente realizada com um conjunto de procedimentos experimentais suportado por modelos numéricos. A componente experimental desta atividade é realizada utilizando placas de adesivo imersas em água e pesadas regularmente. Ao registar o aumento de peso em função do tempo, podemos controlar o processo de absorção de água e determinar a taxa à qual ocorre, modelado através da lei de Fick, conforme representado na Figura 9.2.

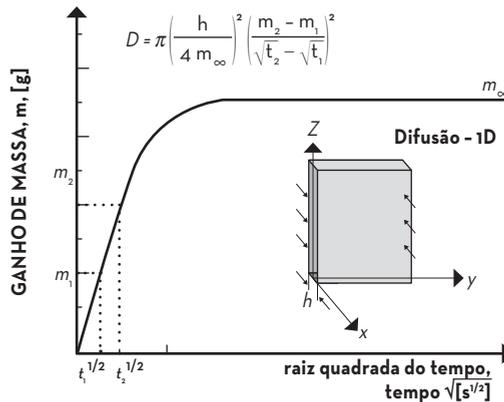


Figura 9.2. Processo de determinação do coeficiente de difusão de adesivo ajustando a equação de Fick a dados de ganho de massa experimentais.

9.1.2. Temperatura

A exposição a altas temperaturas afeta as propriedades dos adesivos, aumentando drasticamente a mobilidade das cadeias de polímeros. Adicionalmente, o volume dos adesivos e dos substratos é também alterado pela temperatura, muitas vezes de forma distinta, o que induz tensões e tensões residuais a temperaturas elevadas.

Note-se que em alguns casos uma curta exposição a altas temperaturas pode até aumentar a resistência da junta, promovendo um processo de pós-cura. No entanto, na maioria das aplicações, a durabilidade das juntas é significativamente reduzida pelo aumento da sua temperatura de serviço. A altas temperaturas, a rigidez e a resistência do adesivo diminuem e o alongamento da junta em caso de falha aumenta (Figura 9.3.). Embora a energia da fratura (função do alongamento e da força) possa permanecer quase constante para uma gama inicial de temperaturas, aumentos adicionais da temperatura (especificamente para temperaturas superiores à temperatura de transição vítrea do adesivo) levam a uma degradação severa da estrutura química e causarão inevitavelmente uma redução da energia da fratura.

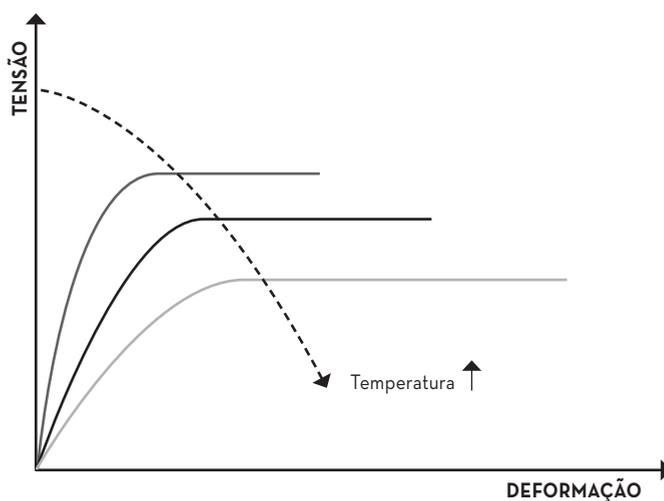


Figura 9.3. Efeito da temperatura de serviço no desempenho de um adesivo.

Ao conhecer as propriedades do adesivo em função das diferentes condições ambientais (principalmente a humidade e a temperatura) e ao definir as propriedades do adesivo em função das condições ambientais, torna-se possível estimar a durabilidade das estruturas coladas com precisão, utilizando ferramentas numéricas. Para o conseguir, as propriedades do material (tais como a rigidez, resistência e tenacidade) devem ser definidas em função da temperatura e do nível de envelhecimento num modelo de material adequado. Os resultados destas simulações ajudam os projetistas de juntas adesivas a obter uma estimativa da vida útil da junta adesiva.

9.2 CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO

Quando uma junta adesiva é submetida a uma carga cíclica, as propriedades mecânicas do adesivo (e do aderente) degradam-se ciclo a ciclo, o que eventualmente leva à falha da junta. A este fenómeno chama-se de rotura por fadiga. Na rotura por fadiga, uma junta falha a um nível de tensão muito inferior à sua própria resistência estática.

A Figura 9.4. mostra uma típica carga de fadiga sinusoidal habitualmente utilizada para a análise do comportamento à fadiga de juntas adesivas. Entre dois picos consecutivos encontramos um ciclo de carregamento completo. Para definir um ciclo de carga, devem ser determinados vários parâmetros mostrados na Figura 9.4. Conhecendo as cargas máximas e mínimas, pode-se definir a carga média (σ_m), o intervalo de carga ($\Delta\sigma$) e a amplitude de carga (σ_a).

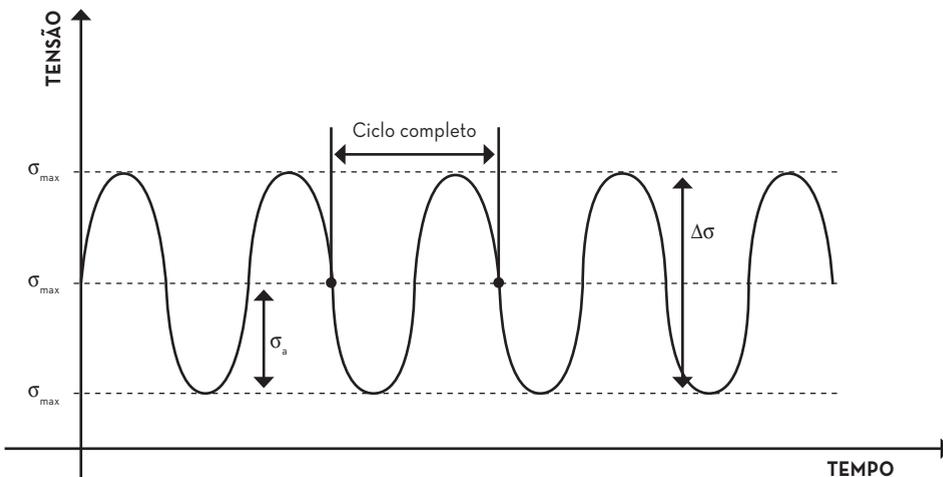


Figura 9.4. Carregamento cíclicos associados a um processo de fadiga.

A vida à fadiga de uma junta é função das condições de carga descritas acima e é também uma função das propriedades do adesivo. Os danos iniciam-se dentro da junta após um número específico de ciclos e, com cada ciclo consecutivo, propagam-se pela camada adesiva até que a junta finalmente falha. Consequentemente, o comportamento à fadiga de uma junta adesiva pode ser dividido em duas fases: a primeira correspondendo ao início do dano por fadiga, e a segunda à propagação do dano por fadiga.

Dependendo da condição de tensão e das propriedades do material, em alguns casos é a iniciação do dano que determina a durabilidade de uma junta à fadiga, uma vez que após esta condição a propagação do dano é extremamente rápida. Em contraste, existem algumas condições de carga e materiais onde a propagação de fendas de fadiga é muito lenta e como tal a vida útil total é principalmente passada na segunda fase, o que corresponde à fase de propagação da fenda de fadiga.

9.2.1. Iniciação de dano e curva S-N

Quando o número de ciclos necessário para propagação da fenda é muito curto em comparação com o número total de ciclos de fadiga suportado pela junta (como é o caso, por exemplo para adesivos frágeis), o número de ciclos necessários para a iniciação da fadiga é geralmente considerado como equivalente à vida total à fadiga das juntas. Para determinar esta vida total à fadiga a amostra é sujeita a cargas cíclicas até que ocorra a falha. O procedimento de teste é repetido diversas vezes sob diferentes níveis de carga, permitindo compreender o efeito do nível de carga (ou tensão) sobre a vida à fadiga. Para analisar a relação entre a carga aplicada e o número de ciclos suportados, o tempo de vida do provete (em ciclos de carregamento suportados) deve ser traçado em função a carga aplicada (tensão) num diagrama de escala logarítmica. Esta curva é chamada curva S-N (*Stress-Number of cycles*), conforme mostrado na Figura 9.5.

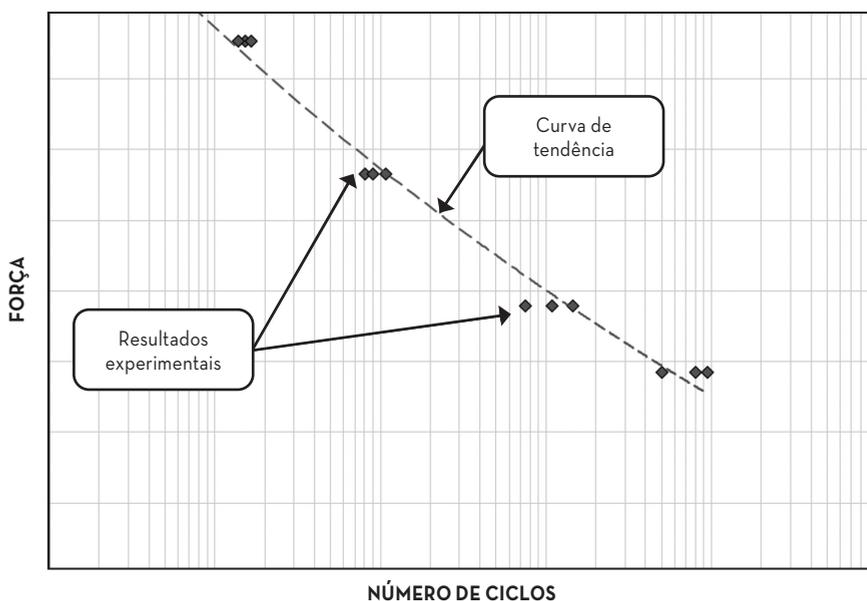


Figura 9.5. Curva S-N de um adesivo testado à fadiga.

Para analisar a vida total à fadiga de juntas adesivas, a curva S-N deve ser primeiro obtida experimentalmente. Para o conseguir, podem ser seguidas duas estratégias diferentes. A primeira estratégia consiste no método direto onde uma junta real é testada sob diferentes níveis de carga. Esta estratégia é recomendada para juntas que serão utilizadas em aplicações críticas. Não é normalmente necessário nenhum pós-processamento ou uma análise numérica adicional nesta estratégia. Os resultados são altamente fiáveis, uma vez que a junta real é testada em condições reais de carga muito próximas das de serviço.

No entanto, esta estratégia é extremamente dispendiosa e os resultados obtidos limitam-se à configuração testada e às condições de carga consideradas. Devido a estas limitações, uma segunda estratégia é normalmente preferida pelos projetistas. Na segunda estratégia,

conhecida como método indireto, geometrias de junta mais simples são testadas à fadiga sob diferentes níveis de carga e diferentes misturas de modos

Nos ensaios de fadiga deste tipo, as propriedades mecânicas dos materiais adesivos são degradadas ciclo a ciclo. No entanto, o processo de degradação pode ser acelerado se o adesivo for simultaneamente sujeito um ambiente agressivo. Por exemplo, a durabilidade de uma junta adesiva sujeita a uma combinação de cargas mecânicas cíclicas e envelhecimento hidrotérmico, será inferior ao de uma junta que apenas experimenta cargas cíclicas. Nesta condição, com o mesmo nível de carga, a vida total em fadiga diminui para condições de envelhecimento mais agressivas. Também a temperatura tem um efeito semelhantes sobre a vida à fadiga das juntas adesivas. Quanto mais alta for a temperatura, menor é a duração total da fadiga para a mesma carga de fadiga aplicada, conforme mostrado na Figura 9.6.

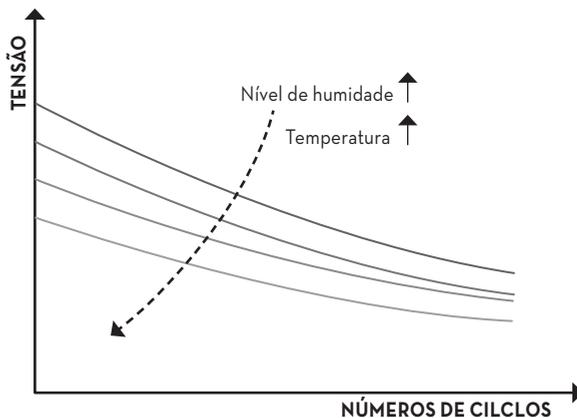


Figura 9.6. Efeito combinado da temperatura e umidade na durabilidade uma junta adesiva solicitada à fadiga.

9.2.2. Propagação de fenda e Lei de Paris

Como visto anteriormente, a propagação de fendas em condições de fadiga representa a segunda fase da vida à fadiga, onde a fenda já está iniciada e irá propagar-se devido às cargas cíclicas aplicadas. Embora na maioria das aplicações a vida inicial seja considerada como a vida à fadiga total das juntas, para grandes áreas de colagem e em aplicações mais avançadas a vida de propagação da fenda de fadiga é muitas vezes considerada separadamente na análise da durabilidade da fadiga das juntas adesivas.

Os testes de propagação de fendas de fadiga são os mesmos que os testes de mecânica da fratura já explicados no Capítulo 4. No entanto, em vez de uma carga quase-estática, são agora aplicadas cargas cíclicas às juntas. Os testes DCB, ENF e MMB são considerados para a análise do crescimento de fendas por fadiga em modo I, modo II e modo misto, respectivamente. Durante estes testes, a carga e o deslocamento correspondente para cada ciclo devem ser registados. Utilizando esta informação e empregando um método apropriado de redução de dados, obtém-se a energia da fratura para cada ciclo.

Para analisar o crescimento da fenda sob condições de fadiga, a taxa de propagação da fenda (da) é medida numa gama específica de ciclos de carga (dN). A razão da/dN é chamada de taxa de crescimento da fenda por fadiga. Por outro lado, a energia de fratura do adesivo também se altera de ciclo para ciclo. Para cada ciclo de carga é possível determinar um valor de G_{min} que é a energia de fratura mínima em cada ciclo e que corresponde à carga mínima aplicada e G_{max} que é a energia de fratura máxima em cada ciclo e que corresponde à carga máxima. A diferença entre G_{max} e G_{min} é chamada de $\Delta G = G_{max} - G_{min}$. Traçando a expressão da/dN em função de ΔG num diagrama $log-log$ obtém-se uma curva que é chamada de lei de Paris (Figura 9.7).

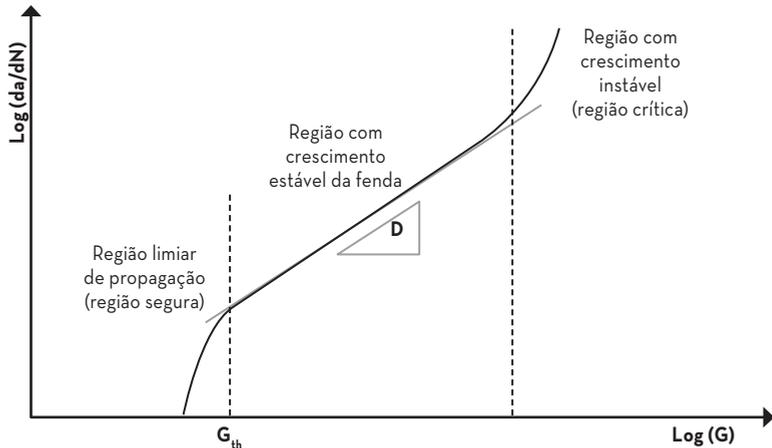


Figura 9.7. Lei de Paris e as três principais regiões de um processo de falha por fadiga.

A curva da lei de Paris tem três estágios diferentes. O primeiro estágio, mostrado na Figura 9.7, corresponde à parte da iniciação à fadiga. Nesta região, a propagação de fendas não é importante, sendo correspondente à vida de iniciação à fadiga que já discutimos anteriormente. Se a taxa de libertação de energia de fadiga (G) for inferior a um valor específico (chamado energia de limiar, G_{th}), então a propagação da fenda será quase nula. No entanto, a fadiga opera segundo um mecanismo cumulativo de danos. À medida que o material se danifica, o deslocamento aumenta para o mesmo nível da carga e, conseqüentemente, a energia de deformação em cada ciclo aumenta. Assim que a energia atinge o G_{th} , a fenda começa a propagar-se de forma irreversível. Estamos então perante a segunda fase da vida de fadiga, onde a fenda cresce de forma estável. Quando o comprimento da fenda atinge um valor crítico, ocorre uma propagação instável e rápida da fenda, que corresponde à terceira parte da curva da lei de Paris. O declive da curva da lei de Paris, m , na segunda fase do crescimento da fenda, é um dos parâmetros mais importantes na análise da vida útil da propagação de fenda num processo de fadiga de uma junta adesiva.

À semelhança da curva S-N, a curva da lei de Paris é também influenciada pelas condições de carga e ambientais. Isto significa que o declive da curva da lei de Paris (m) varia em função do modo de carregamento, da temperatura ambiente e da humidade. A Figura 9.8. mostra, de uma forma genérica, os efeitos destes fatores sobre a curva da lei de Paris de um adesivo.

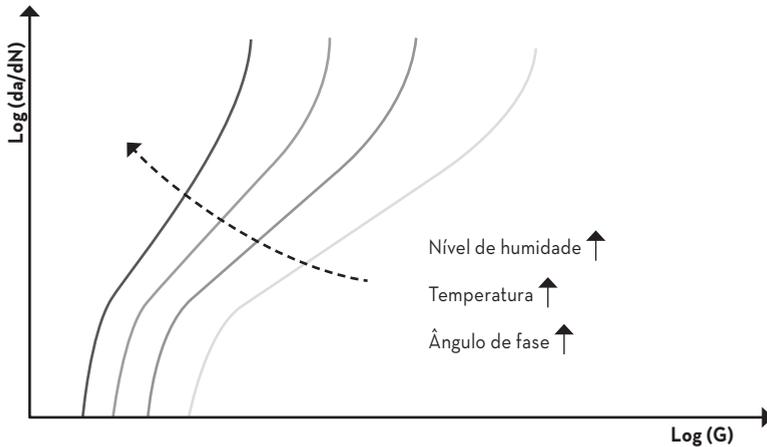


Figura 9.8. Influência combinada da temperatura, umidade e modo de solicitação no comportamento à fadiga de um adesivo.

9.3. FLUÊNCIA

A fluência é um fenômeno dependente do tempo, definido como a deformação permanente de um material sujeito a uma carga constante durante longos períodos de tempo. Embora a carga aplicada seja inferior à resistência estática da junta, o efeito prolongado da deformação por fluência pode ainda assim causar a ruptura da junta adesiva. Conseqüentemente, é crucial compreender se uma determinada junta adesiva é suscetível à falha por efeito de fluência.

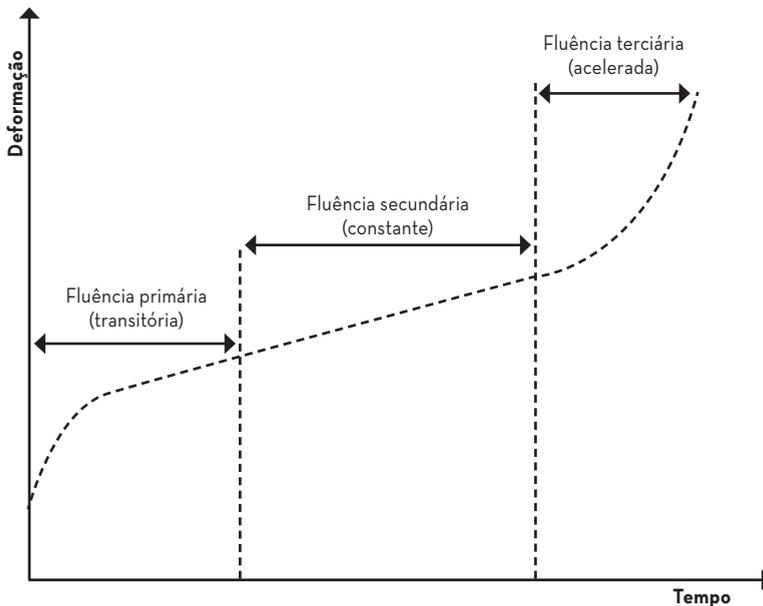


Figura 9.9. Curva de deformação por fluência e os seus três estágios principais.

A deformação por fluência tem três estágios diferentes, tal como se mostra na Figura 9.9. Numa primeira região, a taxa de fluência não é constante, variando com a passagem do tempo. Mais especificamente, a taxa de fluência diminui à medida que o tempo de fluência aumenta. Ao fim de um determinado período de tempo, a taxa de deformação atinge um valor estável, iniciando-se aí a segunda fase. Finalmente um novo estágio é eventualmente atingido, onde a taxa de deformação de fluência aumenta de uma forma rápida e instável com a passagem do tempo, progredindo rapidamente até à eventual falha da junta.

O nível de tensão e a temperatura de serviço são os dois parâmetros mais importantes que influenciam um processo de deformação por fluência. De uma forma geral, o aumento do nível de carga e da temperatura de serviço diminui a durabilidade dos adesivos sujeitos a condições de fluência. A Figura 9.10. mostra o efeito da temperatura na resposta à fluência de juntas adesivas de forma esquemática. Com o aumento da temperatura, diminui o tempo necessário para atingir a rotura por fluência. No entanto, o alongamento correspondente à fluência aumenta com a temperatura. Uma resposta similar é encontrada quando as cargas de fluência são aplicadas a amostras envelhecidas. Neste caso, o envelhecimento tipicamente aumenta o alongamento máximo verificado na falha, mas diminui a resistência da junta.

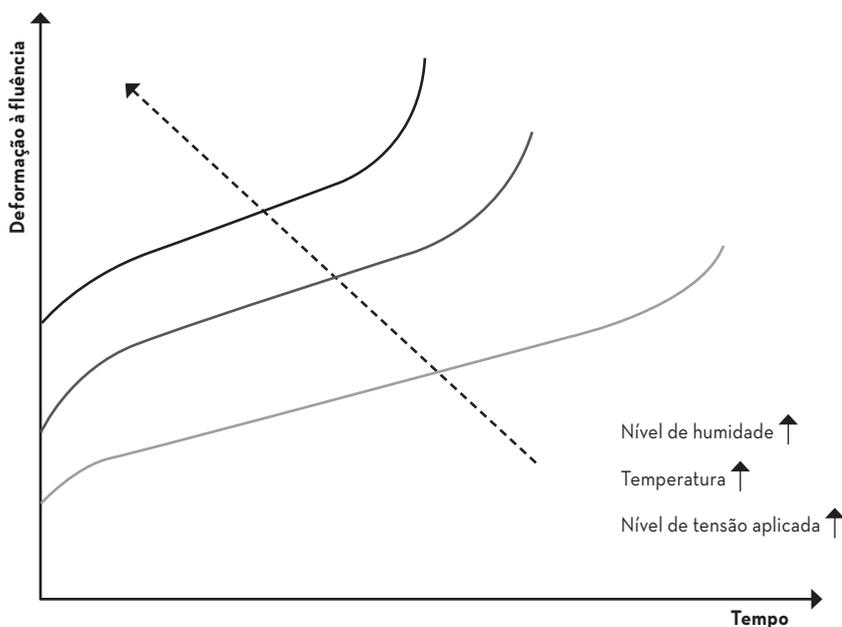


Figura 9.10. Influência combinada da temperatura, humidade e modo de solicação no comportamento à fluência de um adesivo.

LEITURAS RECOMENDADAS

ADAMS, R. D., COMYN, J., WAKE, W. C., e WAKE, W. C. (1997). *Structural adhesive joints in engineering*. Springer Science & Business Media.

ADAMS, R. D. (Ed.). (2005). *Adhesive bonding: science, technology and applications*. Elsevier.

DA SILVA, L. F. M., ÖCHSNER, A., & ADAMS, R. D. (Eds.). (2018). *Handbook of adhesion technology*. Springer Science & Business Media, 2ª edição.

DA SILVA, L. F. M., DILLARD, D. A., BLACKMAN, B., e Adams, R. D. (Eds.). (2012). *Testing adhesive joints: best practices*. John Wiley & Sons.

DA SILVA, L. F. M., de MAGALHÃES, A. G., e de Moura, M. F. S. (2007). *Juntas adesivas estruturais*. Publindústria.

DA SILVA, L. F. M., CARBAS, R. J. C. e MARQUES, E. A. S. (2017). *Problemas e trabalhos práticos de juntas adesivas estruturais*. Publindústria.

DILLARD, D. A. (Ed.). (2010). *Advances in structural adhesive bonding*. Elsevier.

KINLOCH, A. J. (2012). *Adhesion and adhesives: science and technology*. Springer Science & Business Media.

PACKHAM, D. E. (2003). *The mechanical theory of adhesion*. Handbook of Adhesive Technology. CRC Press

PETRIE, E. M. (2007). *Handbook of adhesives and sealants*. McGraw-Hill Education.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Componentes principais de uma junta adesiva.....	14
Figura 1.2.	Aeronaves usadas na Primeira Grande Guerra Mundial de construção em madeira colada.	15
Figura 1.3.	Comparação das distribuições de tensões obtidas com juntas soldadas, rebitadas e juntas adesivas.	16
Figura 1.4.	Comparação do desempenho à fadiga do material base, juntas rebitadas e juntas coladas.	16
Figura 1.5.	Cargas de arrancamento e clivagem e corte aplicadas a uma junta adesiva.	18
Figura 1.6.	Elementos de chassi de veículo combinando construção colada com outros métodos de ligação estrutural.	19
Figura 1.7.	Aplicações da tecnologia de ligação adesiva na estrutura de veículos de transporte público.	20
Figura 1.8.	Uso de adesivos em construção de aeronáutica e aeroespacial e pormenor de uma estrutura sandwich.	21
Figura 1.9.	Construção de barcos de recreio com recurso à ligação adesiva.	22
Figura 1.10.	Aplicação de ligações adesivas na construção civil. Colagem de revestimentos cerâmicos (esquerda). Montagem e vedação de painéis de vidro (centro). Ancoragem de elementos roscados em betão (direita).	22
Figura 1.11.	Processo tradicional de fabrico por costura (esquerda) e a aplicação de adesivo no fabrico de calçado (direita).	23
Figura 2.1.	Modos de falha possíveis numa junta adesiva.	27
Figura 2.2.	Energia de ligação das forças primárias e secundárias envolvidas no processo de adesão.	28
Figura 2.3.	Papel do adesivo no estado líquido no preenchimento dos espaços vazios entre substratos.	29
Figura 2.4.	Processo de molhagem de um adesivo no estado líquido e posterior solidificação.	29
Figura 2.5.	Gotas de água na superfície de uma folha.	30
Figura 2.6.	Equilíbrio entre ar e líquido na superfície de um líquido.	30
Figura 2.7.	Angulo de contacto de um líquido aplicado numa superfície e a equação de Young.	31
Figura 2.8.	Princípio de encravamento mecânico entre adesivo e substrato.	32
Figura 2.9.	Princípio de adsorção física (esquerda) e química (direita) entre adesivo e substrato.	33
Figura 3.1.	Camada fraca na superfície de um substrato.	38
Figura 3.2.	Influência de preparação superficial na resistência de uma junta adesiva.	38

Figura 3.3.	Influência do tipo de preparação superficial na durabilidade de uma junta adesiva.	39
Figura 3.4.	Limpeza manual de um substrato com recurso a um solvente (acetona).	41
Figura 3.5.	Processo de granalhagem de um substrato metálico.	42
Figura 3.6.	Anodização de um substrato de alumínio.	43
Figura 3.7.	Esquema representativo da estrutura criada durante o processo de anodização.	44
Figura 3.8.	Tratamento por plasma de um material compósito e o seu efeito no ângulo de contato.	45
Figura 4.1.	Processo de polimerização.	49
Figura 4.2.	Estruturas moleculares típicas de polímeros termoplásticos, elastómeros e termoendurecíveis.	50
Figura 4.3.	Mecanismo de reforço de um polímero reforçado com partículas de borracha.	51
Figura 4.4.	Exemplos das diferentes formas de adesivos.	52
Figura 4.5.	Algumas das principais características dos adesivos epóxicos.	54
Figura 4.6.	Algumas das principais características dos poliuretanos.	55
Figura 4.7.	Algumas das principais características dos adesivos acrílicos.	56
Figura 4.8.	Comparação do comportamento à tração de diferentes adesivos.	57
Figura 4.9.	Processo de seleção de um adesivo ou vedante.	58
Figura 4.10.	Comparação do desempenho mecânico de um adesivo epóxico rígido e de um adesivo híbrido resistente ao impacto.	58
Figura 4.11.	Propriedades extraídas de uma curva de tensão-deformação típica de um ensaio de tração.....	59
Figura 4.12.	Comparação entre o comportamento à tração e compressão de um adesivo estrutural.	60
Figura 4.13.	Geometria do provete TAST usado para ensaios ao corte (dimensões em mm).....	60
Figura 4.14.	Configurações de provetes do tipo DCB.....	61
Figura 4.15.	Representação esquemática da influência da temperatura no comportamento à tração de um adesivo estrutural.	62
Figura 4.16.	Representação esquemática da influência da humidade no comportamento à tração de um adesivo estrutural.	62
Figura 4.17.	Representação esquemática da influência da taxa de deformação no comportamento à tração de um adesivo estrutural.	63
Figura 5.1.	Etapas associadas à manufatura de uma junta adesiva.	67
Figura 5.2.	Relação entre viscosidade e tempo de armazenamento de um adesivo.	68
Figura 5.3.	Pistolas aplicadoras e respetivos cartuchos de adesivos (esquerda) e bicos misturadores (direita)....	70
Figura 5.4.	Processo de aplicação de um adesivo na forma líquida.....	71
Figura 5.5.	Processo de aplicação de um adesivo em pasta.	72
Figura 5.6.	Exemplos de diferentes cordões de adesivo com geometrias que facilitam a fuga de ar (aconselhadas, à direita) e as que tendem a aprisionar ar (não aconselhadas, à esquerda).	72
Figura 5.7.	Processo de aplicação de um adesivo em filme.	73
Figura 5.8.	Molde para construção de juntas de simples sobreposição e os seus principais componentes.....	74
Figura 5.9.	Sistema de fixação de uma estrutura colada usada na indústria automóvel.	74
Figura 5.10.	Uso de esferas de vidro para controlo de espessura.	75
Figura 5.11.	Uso de espaçadores para controlo simultâneo de espessura da camada adesiva e forma do filete..	75
Figura 5.12.	Método de aplicação de substratos por basculamento.	76
Figura 5.13.	Processo de aquecimento por intermédio de indução.	77
Figura 5.14.	Processo de aquecimento por intermédio de micro-ondas.	78
Figura 5.15.	Aquecimento localizado de reparações coladas com recurso simultâneo a uma manta de aquecimento e um saco de vácuo.	78

Figura 6.1.	Transição entre comportamento vítreo e borracha, com identificação da temperatura de transição vítrea através do pico de amortecimento ($\tan \delta$).....	82
Figura 6.2.	Teste de quebra de água. À esquerda: superfície com baixa energia superficial. À direita: superfície com alta energia superficial.....	83
Figura 6.3.	Marcadores para controlo da energia superficial e exemplo de linhas por eles geradas numa superfície polimérica. No exemplo mostrado a energia superficial está contida entre 44 e 30 mJ m ⁻²	84
Figura 6.4.	Sistema ótico de determinação de energia superficial baseado na medição de ângulo de contacto.....	84
Figura 6.5.	Sistema de termopar para medição por contato da temperatura (esquerda) e câmara de infravermelhos para medição da temperatura sem contato (direita).....	85
Figura 6.6.	Principais tipos de defeitos que podem surgir numa junta adesiva.....	86
Figura 6.7.	Teste de uma estrutura automóvel.....	87
Figura 6.8.	Exemplo de imagens obtidas com recurso a uma análise SEM da superfície de rotura mista de uma junta adesiva.....	88
Figura 6.9.	Defeitos em juntas adesivas visualmente detetáveis.....	88
Figura 6.10.	Teste de batimento para identificação de defeitos em juntas adesivas.....	89
Figura 6.11.	Ensaio ultrassónico para identificação de defeitos em juntas adesivas.....	90
Figura 6.12.	Ensaio de emissão acústica para identificação de defeitos em juntas adesivas.....	90
Figura 7.1.	Fichas de segurança típicas de adesivos.....	94
Figura 7.2.	Indicações típicas encontradas na embalagem de um produto químico.....	95
Figura 7.3.	Símbolos dos principais equipamentos de proteção e segurança.....	95
Figura 7.4.	Laboratório com sistema de extração adequado para processos de colagem.....	96
Figura 8.1.	Modos de carregamento típicos de juntas adesivas.....	101
Figura 8.2.	Configurações geométricas típicas de juntas adesivas.....	102
Figura 8.3.	Determinação da tensão de corte média atuante numa junta de simples sobreposição.....	105
Figura 8.4.	Deformação diferencial de uma junta adesiva determinada com recurso ao modelo de Volkersen e respetiva distribuição de tensão de corte.....	105
Figura 8.5.	Geometria e diagrama de corpo livre do adesivo e dos substratos usados para o modelo de Volkersen.....	106
Figura 8.6.	Momento fletor atuante numa junta de sobreposição simples previsto pelo modelo de Goland e Reissner e respetiva influência na distribuição de tensão de corte.....	108
Figura 8.7.	Demonstração da resistência de junta adicional conferida pela plastificação do adesivo, tal como previsto pelo modelo de Hart-Smith.....	109
Figura 8.8.	Demonstração da carga de rotura superior e deslocamento adicional previstos por critérios de rotura que contemplem plasticidade.....	110
Figura 8.9.	Processo de rotura de uma junta adesiva com aderentes metálicos sujeitos a plastificação.....	111
Figura 8.10.	Modelo de Adams para determinação da falha de uma junta adesiva.....	112
Figura 8.11.	Processo de rotura interlaminar de uma junta adesiva com aderente compósito.....	112
Figura 8.12.	Sumário das características de um modelo numérico de elementos finitos.....	113
Figura 8.13.	Evolução da força de rotura em função da espessura da camada adesiva para dois tipos de adesivos.....	114
Figura 8.14.	Evolução da força de rotura em função do comprimento de sobreposição para dois tipos de adesivos.....	115
Figura 8.15.	Evolução da força de rotura em função do comprimento de sobreposição para três tipos de substratos.....	116

Figura 8.16.	Evolução da força de rotação em função do comprimento de sobreposição para juntas com substratos compósitos e dois tipos diferentes de adesivos.	118
Figura 8.17.	Tensões residuais causadas pelo uso de aderentes com coeficientes de expansão térmica díspares.	119
Figura 8.18.	Influência da presença de um filete na distribuição da tensão de corte de uma junta de simples sobreposição.	119
Figura 8.19.	Exemplos de modificações de substratos para redução das tensões nas extremidades do comprimento de sobreposição.	120
Figura 8.20.	Conceito de uma junta adesiva mista.	120
Figura 8.21.	Junta adesiva híbrida (rebite + adesivo).	121
Figura 8.22.	Exemplos de configurações de juntas em T.	122
Figura 9.1.	Efeito do nível de humidade no desempenho de um adesivo.	126
Figura 9.2.	Processo de determinação do coeficiente de difusão de adesivo ajustando a equação de Fick a dados de ganho de massa experimentais.	126
Figura 9.3.	Efeito da temperatura de serviço no desempenho de um adesivo.	127
Figura 9.4.	Carregamento cíclicos associados a um processo de fadiga.	128
Figura 9.5.	Curva S-N de um adesivo testado à fadiga.	129
Figura 9.6.	Efeito combinado da temperatura e humidade na durabilidade uma junta adesiva solicitada à fadiga.	130
Figura 9.7.	Lei de Paris e as três principais regiões de um processo de falha por fadiga.	131
Figura 9.8.	Influência combinada da temperatura, humidade e modo de solicitação no comportamento à fadiga de um adesivo.	132
Figura 9.9.	Curva de deformação por fluência e os seus três estágios principais.	132
Figura 9.10.	Influência combinada da temperatura, humidade e modo de solicitação no comportamento à fluência de um adesivo.	133

APOIO



ADESIVOS ESTRUTURAIS SIKA

A Sika® apresenta uma gama diversificada de adesivos estruturais concebidos para substituir soldaduras, rebites e fixadores mecânicos, melhorando ao mesmo tempo a resistência e durabilidade da fixação.

Os adesivos estruturais Sika®

- Ajudam a diferenciar o seu produto com melhor qualidade e uma vida útil mais longa;
- Ajudam a reduzir o peso do seu produto;
- Ajudam a reduzir os custos de fabrico;
- Melhoram a estética geral do seu produto.



SAIBA MAIS
WWW.SIKA.PT

A CONSTRUIR CONFIANÇA





Quântica Editora – Conteúdos Especializados, Lda.
PORTO, 2021