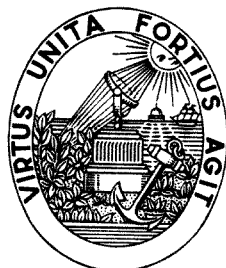


UNIVERSIDADE DO PORTO
FACULDADE DE ENGENHARIA

**CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES COLADAS COM
ADESIVOS ESTRUTURAIS**

LUÍS MANUEL BARBOSA SANTOS TEIXEIRA

PORTO, 2000

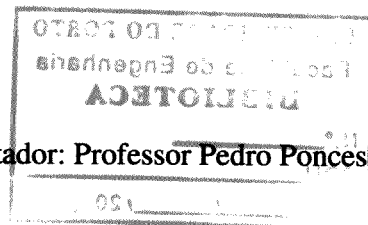


Luís Manuel Barbosa Santos Teixeira

**CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO
DE JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES COLADAS
COM ADESIVOS ESTRUTURAIS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
para obtenção do grau de Mestre em Manutenção Industrial

Orientador: Professor Pedro Ponces Camanho



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
Porto, 2000

***Aos meus Pais,
irmãos
e Débora***

AGRADECIMENTOS

Gostaria de aqui expressar o meu sincero agradecimento a várias pessoas e instituições que com a colaboração, conselhos, esclarecimentos e sugestões me ajudaram na realização desta dissertação.

Em primeiro lugar ao Professor Pedro Ponces Camanho, meu orientador, pela sua presença, disponibilidade, apoio e amizade que demonstrou durante a realização deste trabalho.

Ao Professor António Augusto Fernandes, meu co-orientador, por ter proposto a realização do trabalho no âmbito do programa *Praxis*.

Ao Engenheiro José Ferreira, pela colaboração no desenvolvimento de parte do trabalho experimental.

Agradeço à Engenheira Luisa Silva, pelo apoio na realização da parte numérica.

Ao Engenheiro Lucas Silva, pela ajuda prestada na utilização da máquina MTS durante os ensaios de fadiga.

Ao Engenheiro Paulo Nóvoa, pelo extraordinário apoio na realização dos ensaios estáticos.

Ao Engenheiro Delfim Monteiro, por me ter fornecido algumas informações, sugestões e ajudas para o trabalho.

A todos os colegas e Professores do Mestrado, pelo apoio demonstrado durante o curso, em especial ao Professor Luís Andrade Ferreira, pelo incentivo, amizade e atenção que me dispensou durante a realização do curso.

À minha família, em especial aos meus pais, pelo carinho, incentivo e todo o apoio financeiro.

Agradeço à Débora Katisa, pela sua presença, compreensão e por me ter motivado desde o início.

Ao Instituto de Engenharia Mecânica - IDMEC e à Fundação para a Ciência e Tecnologia, pelo apoio financeiro.

Ao INEGI-CEMACOM, por me ter facilitado as instalações e os equipamentos para a realização dos ensaios.

Ao Laboratório de Ensaios Tecnológicos - LET, pela disponibilização das instalações e dos equipamentos para a realização dos provetes.

Finalmente, a todos amigos e outras pessoas, que aqui não refiro, mas que de alguma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos, muito obrigado.

ABREVIATURAS

DGEBA	- Diglicidiléter de bisfenol A
DDA	- Dicianodiamida
MTS	- <i>Material Testing Sistem</i>
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i>
FEUP	- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
IDMEC	- Instituto de Engenharia Mecânica
DEMEGI	- Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
LET	- Laboratório de Ensaios Tecnológicos
LA	- Laboratório de Adesivos
CEFAD	- Unidade de Estudo de Comportamento à Fadiga
CEMACOM	- Unidade de Materiais Compósitos
LSS	- <i>Lap Shear Stress</i> (tensão de corte)
FCT	- Factor de Concentração de Tensões
HR	- Humidade Relativa

SIMBOLOGIAS

E	- Módulo de Elasticidade
Rm	- Tensão de Rotura
R _{p-0.2}	- Tensão limite Convencional de Proporcionalidade a 0.2%
A _m	- Extensão após a Rotura
L	- Largura do Provete
C	- Comprimento Total do Provete
A	- Área de Colagem
t	- Espessura do Substrato
t _{ad}	- Espessura do Adesivo
S	- Comprimento de Sobreposição
P	- Carga Aplicada
V	- Velocidade de Carregamento
R _z	- Rugosidade Total
W _c	- Trabalho de Coesão
W _a	- Trabalho de Adesão

S	- Coeficiente de Molhabilidade
T _g	- Temperatura de Transição Vítrea
M _o	- Momento Flector
K	- Factor do Momento Flector
S	- Níveis de Tensão
N	- Número de Ciclos até à Rotura
γ	- Tensão Superficial
γ_1	- Tensão Superficial da Substância 1
γ_2	- Tensão Superficial da Substância 2
γ_{12}	- Tensão Superficial Resultante da Interacção das substâncias 1 e 2
γ_{lv}	- Tensão Superficial do Líquido
γ_{sv}	- Tensão Superficial do Sólido
γ_c	- Tensão Superficial Crítica
θ	- Ângulo de Contacto
τ_{adm}	- Tensão de Corte Máxima Admissível
σ_{com}	- Tensão no Componente
σ_{xx}, σ_{yy}	- Tensões Normais
τ_c	- Tensão de Corte (Resistência ao Corte)
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	- Tensões Principais

σ_c	- Tensão de Cedência à Compressão
σ_t	- Tensão de Cedência à Tracção
σ_{equ}	- Tensão Equivalente
σ_{ij}	- Componentes das Tensões
δ_R	- Deslocamento até à Rotura
δ_x, δ_y	- Deslocamentos segundo a direcção x e y.

SUMÁRIO

A tecnologia de juntas adesivas está a tornar-se generalizada em muitas aplicações industriais. Actualmente, o uso de adesivos estruturais na colagem de metais é muito utilizado, nomeadamente na indústria aeronáutica, automóvel e construção civil. Desta forma, o uso de adesivos em ligações estruturais continua a ser um tema de investigação.

Um dos requisitos importantes das juntas coladas é que continue a suportar cargas estáticas e dinâmicas, em condições de serviços , durante o seu ciclo de vida. O seu comportamento perante condições ambientais adversas e diferentes acabamentoo superficiais do substrato constituem dois parâmetros importantes a ter em atenção.

Neste trabalho, *o Comportamento Mecânico de Juntas de Sobreposição Simples Coladas com Adesivos Estruturais*, num contexto de ligações entre componentes metálicos, é investigado. Para estudar os efeitos das condições de acabamento superficial e de envelhecimento, as juntas são submetidas a operações de lixagem com diferentes granulometria e posteriormente introduzidas numa câmara ambiental com temperatura e humidade constante durante o ciclo

Ensaio estáticos de tracção ao corte e ensaios dinâmicos de fadiga são utilizados para o estudo experimental. O tipo de fractura (coesiva, adesiva ou mista), para diferentes condições, é analisado.

Utilizando o método dos elementos finitos e modelos numéricos simplificados, é feita uma análise bidimensional das juntas adesivas. Os factores de concentração de tensão são comparados para diferentes geometrias e morfologias de rotura.

SOMMAIRE

La technologie des liaisons adhesives devient a généralisé dans en plusieurs applications industriels. Actuel, l'utilisation de adhesive structural pour joindre des métaux est très utilisée, nommement dans aéronautique, l'automobile et civile, donc, ils continuent à être un thème de recherche.

Un de la condition importante de les joints collés doit continuer à supporter les chargements statiques et dynamiques, dans des conditions de service, pendant son cycle de la vie. Son comportement souvent en conditions ambiantales agressive de temperature et humidité, et différentes préparations superficial, est des deux paramètres évidents importants pour avoir dans l'attention.

Dans ce travail, *le comportement mécanique du joint adhesive de recouvrement simple est étudié*. Pour etudier les conditions des préparations des surfaces et des états de vieillissement, les spécimens est soumis à l'exécution avec le papier sablé différent et plus tard présentés dans une chambre climatique avec la température et la humidité constants, pendant le cycle.

Essais static de cisaillement e les essais dynamique de fatigue sont utilisés pour l'étude expérimentale. La morphologie de rupture (cohésif, adhésif et cohesive/adhésif), pour différentes conditions, est également analysé.

Le méthode d'élément fini sont utilisées dans les analyses numériques bi-dimensionnelles, et les facteurs de concentration d'effort sont comparés pour la différente géométrie et morphologies de rupture.

ABSTRACT

The technology of adhesive joints is becoming generalized in a number of industries. Currently, the use of structural adhesive for joining metals is widely used, namely in the aeronautical, auto, civil and construction industries as well as in conventional manufacturing industry. Therefore, bonded joints continue to be a subject of research.

One of the important requirements of bonded joints is to continue to support static and dynamic loads, under service conditions, during its cycle of life. Its behavior to maintain satisfactory long-term performance, often in severe environmental conditions, under different surface preparations, is of obvious two parameters important to have in attention.

In this work, *the Mechanical Behavior of Adhesive Single Lap Bonded Joints*, into the context of joining metallic structures, is investigated. To determine the effects of surface preparation and aging conditions, the specimens are subjected to surface preparations with different types of sandpaper and later introduced in an climatic chamber with temperature and humidity constant during the cycle.

Lap-shear and fatigue tests are used for the experimental study. The type of fracture (cohesive, adhesive, or mixed), for different conditions, is also analyzed.

Using simplified numerical models explaining, the observed joint behaviour is presented. The finite element method is used, and the stress concentration factors, from the bidimensional numerical analyses, are compared for different geometry and type of fracture.

ÍNDICE

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
1 INTRODUÇÃO	2
1.1 OBJECTIVOS	2
1.2 RESUMO HISTÓRICO	6
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	8
2 ADESIVOS ESTRUTURAIS	10
2.1 GENERALIDADES	10
2.2 ADESIVOS DE EPÓXIDO	18
2.2.1 <i>Introdução</i>	18
2.2.2 <i>Tipos de Adesivos de Epóxidos</i>	20
2.2.3 <i>Síntese de Resina de Epóxido</i>	23
2.3 QUÍMICA DOS ADESIVOS DE EPÓXIDO	23
2.4 SISTEMA ADESIVO EPÓXIDO/DICIANODIAMIDA	26
3 COLAGEM	29
3.1 INTRODUÇÃO	29
3.2 TRABALHO DE COESÃO E TRABALHO DE ADESÃO	33
3.3 FACTORES DE RESISTÊNCIA DAS JUNTAS ADESIVAS	36
3.4 TIPOS DE LIGAÇÕES QUÍMICAS ADESIVAS	41
3.4.1 <i>Influência da Reologia do Adesivo de Epóxido na Adesão das Juntas</i>	43
3.5 TECNOLOGIA DE COLAGEM	44
3.5.1 <i>Técnicas de Tratamentos de Superfície</i>	46
3.5.2 <i>Métodos ou Sistemas de Aplicação dos Adesivos</i>	51
3.5.3 <i>Cura dos Adesivos</i>	55
4 DURABILIDADE DE JUNTAS EM CONDIÇÕES AMBIENTAIS VARIADAS	58
4.1 INFLUÊNCIA DA HUMIDADE E DA PRESENÇA DA ÁGUA	58
4.2 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA	62
5 CONCEPÇÃO DE JUNTAS ADESIVAS	63
5.1 CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES	68
5.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA	70
5.3 MÉTODOS ANALÍTICOS	73
6. PROJECTO DE JUNTAS ADESIVAS	81
6.1 JUNTAS SOBREPOSTAS	81
6.2 JUNTAS TOPO-A-TOPO	83
6.3 OUTROS TIPOS DE JUNTAS	84
7. COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS ADESIVAS	86
7.1 ENSAIOS MECÂNICOS	88
7.1.1 <i>Ensaio de Tracção</i>	88
7.1.2 <i>Ensaio de Fadiga</i>	90
7.1.3 <i>Ensaio de Impacto</i>	91
7.2 ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO	93

ESTUDO EXPERIMENTAL	94
8. ESTUDO EXPERIMENTAL	95
8.1 OBJECTIVOS	95
8.2 PROVETES	96
8.2.1 Adesivo e Material do Substrato	96
8.2.2 Geometria	96
8.3 ESTADO SUPERFICIAL DO SUBSTRATO	98
8.4 TRATAMENTO SUPERFICIAL	101
8.5 ENVELHECIMENTO DE PROVETES	102
8.6 ENSAIOS ESTÁTICOS	104
8.6.1 Descrição	104
8.6.2 Resultados	105
8.6.2.1 Provete não Envelhecidos	106
8.6.2.2 Efeito do Estado Superficial	111
8.6.2.3 Provete Envelhecidos	112
8.6.2.4 Efeito de Condição Ambiental	114
8.6.2.5 Morfologia de Rotura	115
8.6.3 Discussão dos Resultados	117
8.7 ENSAIOS DE FADIGA	120
8.7.1 Descrição	120
8.7.2 Parâmetros dos Ensaios	120
8.7.3 Análise Estatística de Resultados	120
8.7.3.1 Equações das Curvas S-N	121
8.7.3.2 Equações da relação entre τ_i/τ_R e número de ciclos até à rotura	122
8.7.4 Resultados	123
8.7.4.1 Número de ciclos até à rotura	124
8.7.4.2 Curvas SN	127
8.7.4.3 Relação entre τ_i/τ_R e número de ciclos até à rotura	128
8.7.4.4 Curvas da relação entre τ_i/τ_R e número de ciclos até à rotura	130
8.7.5 Discussão dos Resultados	131
SIMULAÇÃO NUMÉRICA	133
9. ESTUDO NUMÉRICO	134
9.1 DESCRIÇÃO	134
9.2 MALHA DE ELEMENTOS FINITOS	134
9.3. PROPRIEDADES DO ADESIVO E DO SUBSTRATO	135
9.4 CONDIÇÕES FRONTEIRAS	136
9.5 RESULTADOS	137
9.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	140
CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS	142
10. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	143
10.1 CONCLUSÕES	143
10.1.1 ENSAIOS ESTÁTICOS	143
10.1.2 ENSAIOS DINÂMICOS	145
10.1.3 ESTUDO NUMÉRICO	145
10.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	146
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147

ANEXOS	154
ANEXO A - MATERIAIS E SUAS PROPRIEDADES	155
A.1 SUBSTRATO	155
A.1.1 <i>Composição Química</i>	155
A.1.2 <i>Propriedades Mecânicas</i>	155
A.2 ADESIVO	155
A.2.1 <i>Propriedades Físicas</i>	156
A.2.2 <i>Propriedades Mecânicas</i>	157
A.2.3 <i>Aplicação do Adesivo</i>	157
A.3 PRODUTOS QUÍMICOS	157
ANEXO B - PROCEDIMENTOS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS ESTÁTICOS	158
B 1-MONTAGEM DA CÉLULA DE CARGA E COLOCAÇÃO DOS PROVETES	158
B 2- UTILIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO	158
B 3-AQUISIÇÃO DOS RESULTADOS	160
ANEXO C- PROCEDIMENTOS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DINÂMICOS	161
ANEXO D - SUPERFÍCIES DE ROTURA	164
D1. JUNTAS NÃO ENVELHECIDAS ENSAIADAS À TRACÇÃO POR CORTE	164
D 2. JUNTAS ENVELHECIDAS ENSAIADAS À TRACÇÃO POR CORTE	167
D 3. JUNTAS NÃO ENVELHECIDAS ENSAIADAS À FADIGA	168
D 4. JUNTAS ENVELHECIDAS ENSAIADAS À FADIGA	174
ANEXO E - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	177
E.1 EQUIPAMENTO	177
E.2 DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO	182

REVISÃO
BIBLIOGRÁFICA

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJECTIVOS

A utilização de adesivos em ligações estruturais têm conhecido ao longo dos tempos uma evolução bastante significativa, tanto a nível dos processos de ligação como nas tecnologias utilizadas.

De entre as diferentes tecnologias de ligações entre sólidos, como por exemplo, a soldadura, a rebitação, a aparafusagem e a colagem, é sem dúvida o último que tem despertado maior interesse nos investigadores.

A justificação para o crescente uso de uniões coladas utilizando adesivos estruturais reside no facto desta técnica ter as seguintes vantagens [1-3]:

- Garante uma fixação contínua, em vez de contactos em pontos determinados;
- É possível realizar juntas de ligações simples, resistentes e económicas;
- Obtenção de uma estrutura com uma mais uniforme distribuição de tensões e uma maior rigidez;
- Menores temperaturas de processamento, quando comparadas com a soldadura;
- Possibilidade de união de vários componentes entre si numa única operação;
- Fabricação de formas complexas;
- Obtenção de importantes reduções de custo de fabrico e de ligação (refere-se, a título de exemplo, que o uso de adesivos para *quadros de bicicleta* se traduz numa redução de cerca de 50% dos custos de fabrico)

Apesar deste grande número de vantagens, é preciso ter em atenção alguns inconvenientes que esta técnica apresenta, nomeadamente [3, 4]:

- A resistência à temperatura é relativamente fraca;
- Os tempos de endurecimento dos adesivos são relativamente longos;
- Para que a colagem seja eficaz torna-se necessário preparar as superfícies a colar;
- Se as peças não forem coladas com suficiente precisão, não é possível rectificar a união, após o endurecimento do adesivo.

A susceptibilidade da maior parte dos adesivos à degradação por um ou mais factores ambientais é bem conhecida. A temperatura, a humidade e a água são alguns parâmetros com influência na durabilidade das juntas coladas.

As juntas adesivas são utilizadas cada vez mais nas aplicações industriais. Torna-se então necessário, uma análise mais detalhada das estruturas, passando por uma escolha mais adequada da geometria das juntas para o tipo de ligação em causa. São utilizados, na prática, vários tipos de juntas, sendo aquelas mais comuns apresentados na figura 1.1. Na maioria destas juntas os substratos são sujeitos a carregamentos de tracção [5], como ilustra a figura.

A junta de sobreposição simples, representada na figura 1.1(a), é um dos tipos mais utilizados na indústria. Segundo uma classificação feita por Adams [6] para diferentes juntas carregadas em tracção, a junta de sobreposição simples têm uma boa relação entre a facilidade para suportar as cargas aplicadas e o seu custo. Em relação à facilidade para suportar cargas aplicadas, esta junta obtém uma classificação de 10 numa escala de 1 a 15 (a capacidade de carga é proporcional ao valor da escala). Por sua vez, no que se refere ao custo esse valor é de 2 numa escala de 8 (o custo é proporcional ao valor de escala). Apesar desta classificação ser vista com algumas reservas, uma vez que a qualidade e o custo das juntas variam com as características geométricas e com os tipos de materiais utilizados, ela justifica, até certo ponto, a elevada utilização deste tipo de juntas que apresentam custos reduzidos devido fundamentalmente à facilidade de execução e a um razoável comportamento mecânico [5]. Apresentam uma distribuição de tensões uniforme e a carga transfere-se de uma forma mais suave. Esses factores estão normalmente associados a um bom comportamento à fadiga.

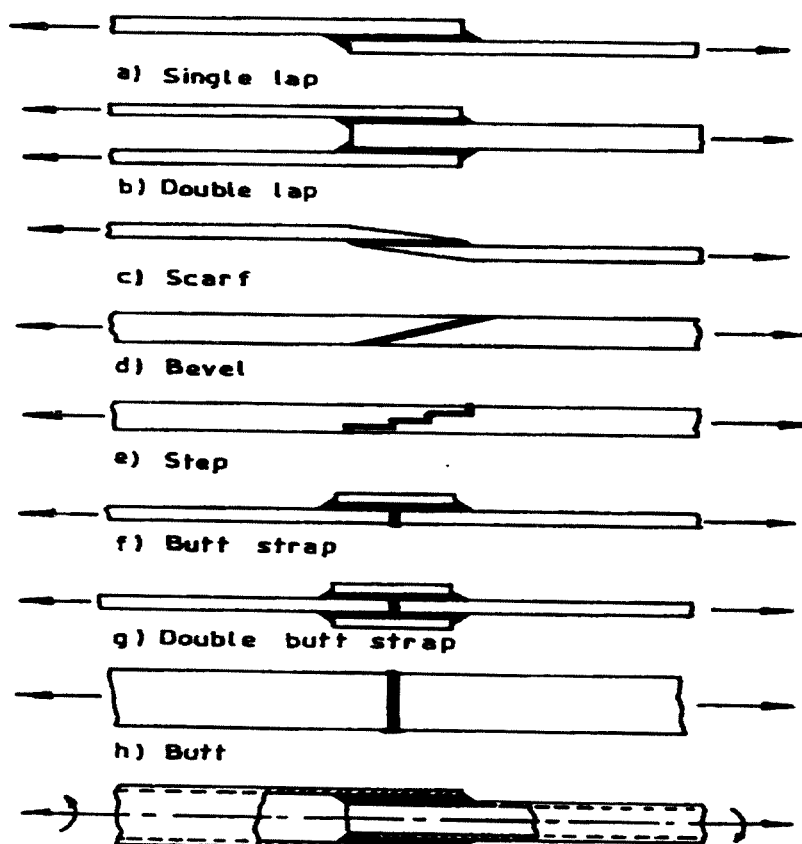


Figura 1.1 Algumas Geometrias de Juntas Adesivas [5, 7].

Hoje em dia, utiliza-se com grande confiança ligações coladas em variadas áreas, como por exemplo nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, levando a reduções significativa nos custos [3].

Os adesivos que estão na base da tecnologia contemporânea dos adesivos estruturais são os adesivos de epóxico devido às suas boas propriedades químicas e mecânicas. Algumas limitações dos adesivos de epóxico são a baixa na resistência a temperaturas elevadas e sob o efeito da humidade, o que pode levar à perda de adesão entre o adesivo e o substrato. Para além das boas propriedades que estes adesivos geralmente oferecem, destaca-se ainda a grande versatilidade na sua formulação, pois há muitas resinas e endurecedores. Estes adesivos

constituem a base dos adesivos estruturais desenvolvidos para a indústria aeronáutica e automóvel [1].

Com o número crescente de aplicações das juntas adesivas, torna-se necessário desenvolver modelos e metodologias para estimativa da durabilidade de juntas sujeitas a cargas estáticas e cíclicas e a diferentes condições ambientais. O comportamento a longo prazo das estruturas é da maior importância quando se pretende garantir normas de fiabilidade em serviço. Tanto do ponto de vista prático como económico, torna-se mais viável recorrer a ensaios laboratoriais de provetes e a modelos numéricos computacionais para testar e simular as mais diversas condições de serviço. Desta forma, a junta de sobreposição simples é uma das geometrias mais comuns e económica em ligações adesivas, e está associado um bom comportamento à fadiga. A simulação numérica utilizando método dos elementos finitos é muito utilizado na modelação de juntas coladas.

O objectivo do trabalho apresentado nesta dissertação é o de caracterizar o comportamento mecânico de juntas de sobreposição simples coladas, em alumínio, utilizando técnicas experimentais e simulação numérica.

O estudo experimental consiste na realização de ensaios de juntas coladas sujeitas a carregamentos estáticos e dinâmicos para diversas condições de acabamento superficial e de envelhecimento.

Pretende-se determinar a rugosidade mais indicada para o sistema adesivo/aderente analisado, a caracterização do comportamento das juntas sob o efeito da humidade e temperatura e sujeitas a solicitações estática e de fadiga e a caracterização da morfologia de rotura para as condições referidas.

Na modelação numérica, utilizando o métodos dos elementos finitos, faz-se uma abordagem a nível do factor de concentração de tensões, relacionando a morfologia de rotura com as tensões desenvolvidas na camada adesiva. Os resultados numéricos são relacionados com as observações experimentais no sentido de melhor compreendê-las. O factor de concentração de tensões na interface adesivo/aderente e a meio do adesivo é relacionado com o tipo de rotura e com a variação da espessura do adesivo.

1.2 RESUMO HISTÓRICO

A utilização de colagem como suporte de ligação de componentes remonta, aproximadamente, a 3000 A.C [8]. Desde muito cedo e durante muito milhares de anos era possível utilizar colas animais e vegetais para a colagem de materiais porosos, como o papel [3].

Os Egípcios, em 15 A.C, utilizavam colas à base de gelatina, caseína, albumina, ovo, grude, bálsamos e resinas extraídas de diferentes árvores, sendo a mais conhecida a utilização de *Gum Arabic* extraída da acácia [3].

Algumas das aplicações históricas dos adesivos são [3, 8]:

- A decoração de caixões egípcios em madeira (sarcófagos) era feita com pigmentos colados com gesso;
- Na Grécia, na ilha de Creta, era utilizada como aglutinante para o giz, ocre e pigmentos azuis de cobre com que procediam à pintura das paredes, uma pintura de gesso e água;
- O betume e a resina das árvores eram geralmente os produtos empregues na vedação dos barcos que navegavam no mediterrâneo, sendo os navios romanos calafetados com madeira de pinheiro, alcatrão e cera virgem.

Pode-se notar uma grande diversificação nas aplicações dos adesivos, como elemento aglutinante, de ligação e vedação.

Até o início do séc. XX, não se verificou grandes avanços na evolução dos adesivos, até à introdução da borracha e mais tarde dos adesivos sintéticos [2, 3].

Durante a 1ª guerra mundial, a cola de caseína foi a primeira a ser utilizada como adesivo estrutural na aeronáutica, na construção de estruturas em madeira e nas estruturas que apresentavam pouca resistência à humidade e à moldagem [2].

Por volta dos anos trinta, iniciou-se o estudo e desenvolvimento de novos adesivos baseados em resinas sintéticas e outros materiais com melhores propriedades e maior reprodutibilidade, o que

promoveu a utilização de adesivos em vasta escala, levando ao aparecimento da ciência dos adesivos [1, 2].

Na colagem, a primeira resina a ser usada foi a resina fenol-formaldeído que era utilizada no fabrico de juntas de madeira e contraplacados [2].

Mais tarde, devido à necessidade da existência de adesivos adequados à colagem de metais, principalmente na indústria aeronáutica, e dada a grande diversidade de tipos de ligação existentes, acrescido do problema da não soldabilidade das ligas de alumínio da série 2000, desenvolveram-se adesivos com borracha sintética [2,3]. A tabela 1.1 apresenta o desenvolvimento cronológico dos adesivos [2, 3].

Tabela 1.1 Desenvolvimento cronológico dos adesivos [2].

ANO	ADESIVO
1910	Fenol - Formaldeído
1930	Ureia - Formaldeído
1940	Nitrilo - Fenólico Vinilo - Fenólico Acrílico Poliuretana
1950	Epóxido Cianoacrilatos Anaeróbicos
1960	Poliimida Polibenzimidazol Poliquinoxalina
1970	Segunda geração de Acrílicos

Depois da introdução das resinas epóxido, deixou de ser necessário utilizar adesivos diferentes para cada tipo de material a unir.

Com exemplo de aplicações de adesivos industriais na indústria automóvel, destaca-se a produção do tejadilho e da carroçaria do *Rover 213/216* e do *Austin*, a técnica de colagem de painéis na reparação automóvel que foi desenvolvida pela *General Motors (Opel)* na Alemanha

[4]. Presentemente, é vulgarmente utilizada por outros fabricantes de automóveis, como por exemplo, a *Volvo* e a *Citröen*.

No último modelo da *Renault Space*, devido à melhor repartição das tensões, à diminuição de peso e à redução do número dos pontos de corrosão, encontramos mais de um milhão de peças coladas [1]. Nos jogos olímpicos de 1992, o ciclista Chris Boardman utilizou uma bicicleta que foi construído à base de plástico reforçado com fibra de carbono e adesivos estruturais. Em finais de 1995 foi lançado no mercado *LOTUS Elise* que possui um *chassis* totalmente colado.

É de salientar que apesar do grande avanço verificado, existem muitas dúvidas sobre o mecanismo de adesão, que é a base desta tecnologia, entendendo-se por adesão todo o fenómeno químico, físico ou físico-químico que mantêm unidas duas superfícies [2].

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é constituída por três partes: a primeira parte dedica-se à revisão bibliográfica, a segunda parte refere-se aos ensaios experimentais, e a última faz-se a simulação numérica utilizando modelos de elementos finitos.

A revisão bibliográfica (capítulo 1) começa com uma introdução à juntas adesivas, depois é feita um resumo histórico sobre a origem desta tecnologia e a sua evolução. A seguir apresentam-se os objectivos do trabalho e da estrutura do trabalho.

No capítulos 2 e 3, apresentam-se sumariamente os adesivos estruturais, dando especial atenção aos adesivos de epóxido, ao mecanismo de adesão e à tecnologia de colagem. Esse estudo visa aspectos relacionados com a natureza, a classificação, as propriedades, as aplicações e a química dos adesivos, os mecanismos de adesão, o trabalho de adesão e trabalho de coesão, os factores que afectam a resistência das juntas adesivas, os tipos de ligações químicas adesivas. São ainda apresentadas as técnicas de tratamentos de superfície, os métodos de aplicação de adesivos e os tipos de cura utilizadas no processamento de colagem.

O capítulo 4 dedica-se à análise da durabilidade de juntas em condições ambientais variadas de temperatura, humidade e presença de água.

O capítulo 5 apresenta os principais aspectos da concepção de juntas adesivas, nomeadamente os tipos de esforços que estão sujeitas, as diferentes geometrias utilizadas e uma abordagem a nível da concentração de tensões. São apresentados as técnicas de simulação numérica e métodos analíticos no âmbito da determinação das tensões nas juntas coladas.

O capítulo 6 dedica-se ao projecto das juntas adesivas, dando especial atenção às juntas sobrepostas. Refere-se ainda a critérios de escolha da geometria, do sistema adesivo, do carregamento e das condições de processamento, que devem ser respeitados de modo a garantir a segurança das juntas.

No capítulo 7 faz-se uma revisão sobre o comportamento mecânico das juntas adesivas onde são descritos os principais ensaios mecânicos e os ensaios de envelhecimento. Destaca-se os ensaios estáticos de tracção por corte, os ensaios dinâmicos de fadiga e os ensaios de envelhecimento que fazem parte da trabalho experimental.

A segunda parte (capítulo 8) dedica-se ao estudo experimental baseado nos ensaios mecânicos e de envelhecimento

O capítulo 8 dedica-se primeiro aos ensaios estáticos (tracção por corte) e depois aos dinâmicos (fadiga). É feita uma descrição sobre os procedimentos de ensaios, os equipamentos, os parâmetros de ensaios, a norma utilizada, a obtenção dos provetes. Descrevem-se os tipos de tratamentos de superfície e as condições ambientais dos ensaios, e apresentam-se os resultados em termos de curva carga-deslocamento para os ensaios estáticos, curvas SN para os ensaios de fadiga e fotografias da superfície de rotura. Discutem-se esses resultados, apresentando justificações para as observações.

A terceira parte do trabalho (capítulo 9), exemplifica-se a aplicação de modelos numéricos para simular as juntas adesivas. Faz-se a caracterização dos materiais utilizados para adesivo e substratos, a geometria e condições fronteiras, e as malhas para modelos de elementos finitos. O estudo a nível do factor de concentração de tensões explica o tipo de rotura nas juntas adesivas.

No capítulo 10 desta dissertação são apresentados as principais conclusões e perspectivas para futuros trabalhos.

2 ADESIVOS ESTRUTURAIS

2.1 GENERALIDADES

A produção dos adesivos é feita, na maioria dos casos, a partir de produtos de origem orgânica, provenientes de produtos naturais, de origem animal, vegetal ou mineral (fécula, caseína, goma, etc.) [3].

Com o desenvolvimento da química sintética, foi possível introduzir adesivos sintéticos produzidos de acordo com a utilização que lhes estava destinada, isto é, com propriedades adequadas para suportarem as solicitações de serviço [2].

A nível das aplicações dos adesivos na construção mecânica verifica-se que, à parte da utilização dos adesivos semi-orgânicos e inorgânicos empregues para altas temperaturas (normalmente superiores a 300°C), os adesivos à base de resinas e borrachas sintéticas são aqueles que mais interesse têm suscitado [1].

Os adesivos utilizados na construção mecânica fazem parte da família dos materiais poliméricos, sendo um Polímero uma longa cadeia de átomos ligados entre si por ligações covalentes. Como exemplo, pode referir-se o caso da molécula de uma amostra típica de Polietileno conter uma média de 50.000 átomos, apresentando um comprimento na ordem de $25.000\text{\AA}$ (10^{-10} m) [1,2,3].

A produção de um polímero efectua-se através da polimerização, em que as moléculas do monómero reagem quimicamente para formar cadeias lineares ou uma rede tridimensional de cadeias de polímeros. A principal característica destas cadeias é a ligação química ser forte e direccionada ao longo das cadeias, sendo estas ligadas lateralmente pelas fracas ligações de Van Der-Waals, ou ocasionalmente por ligações de hidrogénio [1, 3].

Os adesivos sintéticos resultam, portanto, de reacções de polimerização entre monómeros, que, dependendo da sua estrutura, reactividade e proporção na mistura, originam polímeros de cadeias macromoleculares lineares ou em rede tridimensional [1, 2].

Nestas reacções intervêm ainda outros componentes como agentes de cura (ou endurecedores), os catalisadores e os solventes que, após a reacção da cura, tornam o sistema resultante bastante complexo. Ainda é possível, para os mesmos parâmetros anteriores, variar as condições de reacção, temperatura, pressão e tempo de cura, o que leva à obtenção de sistemas com estruturas diferentes e que, consequentemente, exibem propriedades distintas. Assim, é possível obter uma grande gama de sistemas pelo que é muito difícil encontrar um modo de classificação que inclua todos os tipos adesivos. Geralmente são classificados de acordo com a sua origem, estrutura molecular, composição química, modo de apresentação e de aplicação, condições de cura, estabilidade, e se são ou não estruturais [1,2,3].

Uma classificação simples, e que engloba toda a variedade de adesivos existentes, será efectuar a sua separação em grupos que apresentam propriedades semelhantes, propriedades estas intrinsecamente ligadas às características da estrutura molecular do material, podendo-se classificar os adesivos segundo as três famílias dos materiais poliméricos [1,3]:

- **Resinas Termoplásticas:** acrílicas, celulósicas, vinílicas, poliamidas, etc;
- **Resinas Termoendurecíveis:** fenólicas, epóxido, poliéster, poliimida, etc;
- **Elastómeros:** poliuretanos, nitrilos, policloroprenos, silicones, etc.

Segundo Esteves [3], estes materiais diferem entre si na rigidez e fragilidade, na resistência mecânica e térmica e na resistência à acção dos agentes químicos (tabela 2.1).

Tabela 2.1 Diferentes classes de materiais poliméricos e suas propriedades [3].

MATERIAL	Flexibilidade (Resiliência)	Resistência Mecânica	Resistência Térmica	Resistência a Agentes Químicos
Resinas Termoendurecíveis	má	boa	boa	boa
Resinas Termoplásticas	média	medíocre	medíocre	boa
Elastómeros	muito boa	má	variável	medíocre

Nesta classificação, as resinas termoplásticas são polímeros lineares ou ramificados que podem ser fundidos pela adição de calor, podendo ser moldados e remoldados usando técnicas convencionais, permitindo uma fácil deposição nas juntas a serem coladas. Pode-se considerar dois grupos diferentes de resinas termoplásticas: os materiais cristalinos que cristalizam ao arrefecer, e os materiais amorfos que não cristalizam ao arrefecer e que são, normalmente, usados como polímeros vítreos. Essa capacidade para cristalizar depende de vários factores, tais como o grau de ramificação e a regularidade das moléculas. Contudo as resinas termoplásticas são invariavelmente semi-cristalinas, pois não cristalizam rapidamente quando arrefecidas a partir da fusão [2, 3].

As resinas termoendurecíveis são polímeros largamente reticulados, possuindo normalmente uma grande rigidez após a sua polimerização. São constituídas por uma densa rede molecular tridimensional com um grau de reticulação bastante grande e, quando sujeitas à aplicação de calor numa forma excessiva, há uma degradação em vez da sua fusão.

Os elastómeros, dependendo da sua composição, podem ser materiais termoplásticos como podem ser materiais termoenduríveis. Apresentam propriedades elastoméricas, isto é, podem ser estendidas sob a acção de forças elevadas e recuperam rapidamente as suas dimensões iniciais quando a força é retirada. Estas propriedades estão relacionadas com a estrutura molecular do polímero que consiste numa rede macromolecular e levemente reticulada, permitindo o deslizamento das moléculas umas em relação às outras quando o polímero é sujeito a

deformações, sendo o fluxo de deslizamento permanentemente impedido pela reticulação da rede, fazendo com que as moléculas recuperem a sua posição inicial quando é retirada a força aplicada. A presença de reticulantes nos elastômeros impossibilitam a sua fusão devido à adição de calor após a reticulação do elastômero, sendo conduzido à sua degradação quando se efectua um excessivo aquecimento.

Assim, a diferença de comportamentos dos adesivos (materiais poliméricos), em função da temperaturas, tem origem no tipo de estrutura molecular, condicionando ou não a sua capacidade de movimentação das cadeias de moléculas entre si, condicionando assim o seu comportamento [3]. Na figura 2.1 são apresentados os tipos de estruturas moleculares dos adesivos referidos anteriormente.

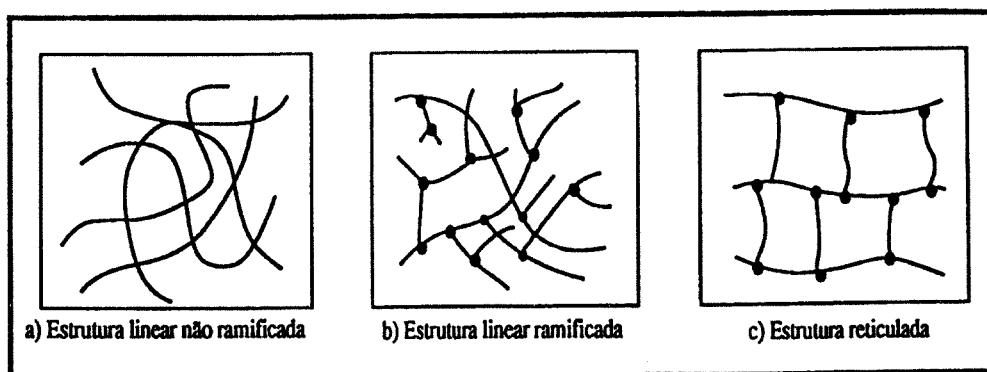


Figura 2.1 Estrutura moleculares dos adesivos (Polímeros) [3].

Cada uma das famílias de adesivos, apresenta características bem diferentes em relação as outras, apresentando pontos fracos e fortes nas suas propriedades. No caso dos termoendurecíveis, podemos referir como pontos fracos a fragilidade em relação aos termoplásticos, e no caso dos elastômeros a resistência mecânica fortemente afectada pelo calor.

Na maior parte dos casos, os adesivos são compostos por misturas de resinas de mais do que uma das família apresentadas. Estes têm normalmente formulações complexas, onde podemos encontrar, habitualmente, uma resina de base modificada por uma outra qualidade de resina, ou por um elastômero, recorrendo-se também, para realçar algumas propriedades de maior

interesse, à utilização de aditivos tais como, plastificantes, estabilizantes, antioxidantes, anti-UV e inibidores de fogo [3].

Pelo facto dos adesivos serem, na sua generalidade, constituídos por misturas de resinas de mais do que uma das famílias de polímeros, deixa de ter interesse considerar essa classificação.

Desta forma, Esteves [3] sugere outras classificações:

- **Segundo a sua Natureza:**

1. **Naturais:** amido, fécula, dextrina, asfalto, proteínas animal e vegetal, borracha natural, e goma-laca.
2. **Semi-sintéticos:** nitrato de celulose e outras celulosas, poliamidas derivadas de ácido dimero e óleo de castor baseados em poliuretano.

3. **Sintéticos:**

a) Tipo-Vinil (polímeros de adição formados por uma resina e um elastómero): acetato de polivinilo, álcool de polivinilo, acrílicos, poliéster insaturado, butadieno-acrilonitrilo, butadieno-estireno, neopreno, borracha de butil e poliiso-butileno.

b) Polímeros formados por mecanismos de condensação ou de adição: epóxido, poliuretanos, borracha de polisulfido e produtos de reacção de formaldeído com fenol, resolcinol, ureia e melamina.

- **Segundo o Modo de Endurecimento:**

1. **Reacção Química**
2. **Evaporação de um Solvente**
3. **Arrefecimento após Fusão:** pode ser feita também uma organização em dois grupos diferentes tendo em conta o tempo necessário para se processar o seu processo de cura:

3.1 - Adesivos cujo processo de cura se efectua em pouco tempo (alguns segundo a poucos minutos): Cianocrilato, anaeróbicos, acrílicos na sua generalidade, termofusíveis (*hot melt*).

3.2 - Adesivos cujo processo de cura leva algum tempo (alguns minutos a várias horas): Fenólicos, epóxidos, poliuretano, silicone e filmes de adesivos.

- **Segundo a sua Apresentação:**

1. **Líquido de um componente com ou sem solvente;**
2. **Líquido de vários componentes com ou sem solvente;**
3. **Emulsões;**
4. **Pastoso (gel) de um componente com ou sem solvente;**
5. **Pastoso (gel) de vários componentes com ou sem solvente;**
6. **Sólido (barra, filme, pó).**

Quanto a utilização na indústria de construção mecânica, é necessário dividir os adesivos em dois grandes grupos , em função das suas propriedades e aplicações [1-3]:

- **Adesivos Estruturais**
- **Adesivos Não Estruturais**

Adesivos Estruturais são os adesivos capazes de suportarem a transmissão de esforços de grandeza considerável. Estes adesivos são utilizados na realização de colagens em que há a necessidade de assegurar a transmissão de esforços de uma peça para outra. Nestas ligações o adesivo pode apresentar uma resistência equivalente aos materiais constituintes da estrutura a ser colada, sendo o adesivo uma das partes integrantes da estrutura. Estes são normalmente

fabricados com base em resinas termoendurecíveis modificadas por resinas termoplásticas ou elástomeros.

São cinco as grandes famílias de adesivos estruturais, nomeadamente os anaeróbicos, os acrílicos reactivos, os epóxidos, os cianoacrilatos e os poliuretanos [1, 2]. Na tabela 2.2 apresentam-se as principais características e aplicações de cada uma das famílias.

Tabela 2.2 Tipos de Adesivos Estruturais, suas Propriedades e Aplicações [1, 2,3].

TIPO DE ADESIVO	CONSTITUIÇÃO	ENDURECIMENTO	CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS POSITIVAS	CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS NEGATIVAS	APLICAÇÕES
Epóxido	Resina e Endurecedor	Dependendo do endurecedor, solidifica com rapidez à temperatura ambiente ou exige aquecimento	Resistência às condições atmosféricas; Resistência à deformação plástica; Resistência ao choque	Rigidez	Indústria aeroespacial (união de peças de alumínio e estas com peças de plástico)
Anaeróbicos	Resina acrílica	Solidifica espontaneamente na ausência de ar	Maior ou menor força de ligação conforme se deseja	As peças têm de sofrer manutenção	Travar roscas de porcas e outras peças, em motores e máquinas
Acrílicos reactivos	Dois elementos (enchimento e iniciador/endurecedor)	Endurecimento a frio	Resistência às condições ambientais; Resistência ao choque; Resistência a temperaturas elevadas	Tem de se aplicar os dois elementos em separado	Automação (união de peças de plástico, etc.)
Cianoacrilatos	Tipo especial de um adesivo acrílico	Endurecem com grande rapidez na presença da humidade	Resistência ao choque; Fácil manipulação quando estão líquidos	Mau para o preenchimento de lacunas; Pouca resistência ao calor; Mau comportamento em ambientes húmidos pela sua rapidez em endurecer-se	Indústria electrónica (montagem de peças pequenas) Medicina
Adesivos de poliuretano	De um elemento	Endurecem mediante absorção de humidade. O seu endurecimento acelera-se na presença de calor	Flexíveis e elásticos após a cura; Resistentes ao choque; Podem diluir-se para aplicação em grandes superfícies	Mau comportamento em ambientes húmidos devido à rapidez de endurecimento	Automação (fixação de pára-brisas e janelas)
Adesivos de poliuretano	De dois elementos	Endurecem mais rapidamente na ausência de humidade ou calor	Boa resistência ao choque; Flexíveis e elásticos		Automação (painéis de comando)
Colas reactivas a quente		Comportamento idêntico ao das colas convencionais aplicadas a quente e, por vezes, reagem com a humidade ambiente, endurecendo	Estáveis mesmo a altas temperaturas (180°C); Grande força de coesão	Ligeiramente tóxicos	Móveis, peças de automóvel, caixas de televisão, etc.

Na indústria de construção mecânica, os adesivos epóxicos são os mais utilizados na colagem estrutural de componentes, apresentando o melhor desempenho, sendo os adesivos epóxicos-fenólicos e os fenólicos-nítrilos aqueles que apresentam uma maior duração quando sujeitos a ambiente húmidos ou bastantes corrosivos.

Adesivos não Estruturais são aqueles cujas características e propriedades não permitam a sua utilização com finalidades estruturais, sendo utilizados na indústria de construção mecânica na resposta a outros tipos de solicitações, podendo alguns deles suportar valores relativamente baixos de carga. São incluídos neste grupo os adesivos inorgânicos, que são especialmente desenvolvidos para serem aplicados em colagem que necessitem de suportar temperaturas superiores a 300°C, sendo utilizados na indústria de construção mecânica na resposta a outros tipos de solicitações, podendo alguns deles suportar valores relativamente baixos de carga [2].

Pode-se agrupar esses adesivos nas diferentes categorias seguintes:

- **Adesivos à base de Borrachas Sintéticas:** Adesivos de silicone, policloropreno e nitrilo, polisulfido.
- **Adesivos de Poliester;**
- **Adesivos Termofusíveis:** *Hot Melt*, Plastisol.
- **Adesivos Inorgânicos.**

É feita na tabela 2.3 a apresentação dos diferentes adesivos estruturais e não estruturais, a indicação dos tipos de aderentes que podem ser utilizados, assim como as principais aplicações.

Tabela 2.3 Adesivos, Tipos de Aderentes e suas Aplicações [3].

TIPO	ADESIVOS	ADERENTES	APLICAÇÕES
Naturais	Amido, Dextrina,	Papel, Cortiça,	Aplicações
	Colas de Peixe,	Têxteis, Madeira,	domésticas.
	Bálsamo do Canadá,	alguns plásticos e	embalagem.
	etc.	metais.	
Termoplásticos	Derivados da Celulose,	Metais, Madeira, Pele,	Ligações sujeitas a
	Acetato de polivinilo,	Têxteis e papel.	cargas baixas.
	Alcool de polivinilo,		
	EVA, Acrílicos,		
	Poliétileno,		
	Polipropileno,		
	Poliâmidas.		
Termoendurecíveis	Ureia e Melamina,	Metais, Madeira,	Ligações estruturais
	Formaldeídos,	Cerâmicos e vidro.	sujeitas a níveis
	Poliésteres, Epóxidos,		significativos de
	Fenólicos.		tensões em metal ou
			madeira.
Elastômeros	Borracha natural,	Plásticos, Borrachas,	Juntas flexíveis
	Borracha sintética,	Tecidos e Pele.	sujeitas a cargas
	Poliuretano,		baixas.
	Policloropreno,		
	Butadieno-Estireno,		
	Nitrilo.		
Adesivos de dois Polímeros	Fenólicos-Nitrilo,	Metais, cerâmicos,	Estruturas sujeitas a
	Fenólicos-Neopreno,	vidro e resinas	tensões elevadas e
	Fenólicos-Vinílicos,	termoendurecíveis.	condições ambientais
	Epóxido-Poliâmida,		de serviço
	Epóxido-Polisulfido,		desfavoráveis.
	Epóxido-Fenólico,		
	Epóxido-Poliuretano,		
	Epóxido-Silicone,		
	Epóxido-Nitrilo		

2.2 ADESIVOS DE EPÓXIDO

2.2.1 Introdução

Os adesivos epóxicos são os mais utilizados na tecnologia da colagem devido às suas óptimas propriedades mecânicas.

Foram Preiswerk e Gauss [9], em 1944, os primeiros a reconhecer essas propriedades dos adesivos que assentou fundamentalmente no facto de terem sido os primeiros a fazer aplicação directa no local da colagem e por demonstrarem possuir uma grande versatilidade química. Mas, a

principal razão do sucesso está intimamente relacionado com as excelentes propriedades que os adesivos apresentam, designadamente [1, 10]:

- Boa resistência mecânica (resistência à tracção ou de corte na ordem dos 20-30 MPa);
- Excelente dureza e resistência ou inércia química (resistentes a óleos, solventes, etc.);
- Excelente durabilidade
- Excelente aderência sobre os metais e outros substratos;
- Possibilidade de cura rápida ou lenta numa grande gama de temperaturas;
- Ausência de água ou de outros produtos voláteis durante a reacção de cura;
- Baixo grau de encolhimento durante a cura e boas propriedades de molhabilidade sobre o aderente (grau de espalhamento).

Foi graças a essas propriedades que foi possível, pela primeira vez, obter juntas adesivas com um baixo nível de tensões residuais, boa coesão, integridade estrutural, e excelente adesão a qualquer tipo de substrato (por exemplo, permitiam a ligação metal-vidro sem problemas de adesão de superfícies irregulares e sem necessidade de aplicar qualquer pressão durante a cura).

Hoje em dia, existe uma grande variedade de adesivos, diferenciando nos pré-polímeros de epóxidos, nos aditivos e nos agentes de cura que são utilizados na polimerização. Este desenvolvimento de muitos e diversificados sistemas de adesivos de base epóxido, foi fruto da grande evolução que houve na tecnologia dos adesivos. Existem assim, umas dezenas de conversões de pré-polímeros numa rede reticulada e, igualmente, há também muitos pré-polímeros que contém o peculiar grupo oxirano ou epóxido, anel de três membros [1].

Torna-se então possível, para uma mesma formulação, variar a razão resina-epóxido/agente de cura e por conseguinte, com implicações directas ao nível de reticulação e regidez do sistema. Essa variação nas propriedades que se pode obter, depende da formulação do sistema, justificando por isso o largo espectro de aplicações estruturais dos adesivos epóxido. Por

exemplo, o sistema nylon-epóxico produz juntas muito resistentes a solicitações mecânicas de corte e tração, as resinas de epóxico fenólico modificadas produzem adesivos bastante resistentes à temperatura, etc.

A nível de aplicações, os adesivos de epóxico têm grande campo de aplicação, sendo menos usados nas ligações plástico-metal, e com maior expressão na indústria de equipamento militar e aeroespacial.

2.2.2 Tipos de Adesivos de Epóxidos

Na indústria de construção mecânica actual, os adesivos à base de resinas de epóxico ocupam um lugar de destaque, em virtude da sua alta resistência, da sua fácil aplicação, e dado que podem ser empregues na ligação de quase todos os materiais utilizados na construção mecânica.

Esses adesivos são comercializados sob a forma de um só componente ou de vários componentes (dois geralmente) [1,3]:

- Um só componente (resina e endurecedor no mesmo componente): líquidos, pastoso (gel), pós, barras, filmes, e pastilhas.
- Dois ou mais componentes (resina e endurecedor): pastoso (gel) ou líquidos.

Utilizando um só componente, o processo de cura efectua-se a quente utilizando temperaturas a partir de 120°C, enquanto que utilizando adesivos com dois componentes a cura pode ser processada para temperaturas superiores a 5°C. O processo de cura destes adesivos necessita apenas de um simples posicionamento das peças a serem coladas, não havendo necessidade de aplicar pressão [1, 3].

Os adesivos de um só componente apresentam uma boa resistência mecânica e uma duração superior. As propriedades mecânicas dos adesivos de 2 ou mais componentes dependem do tipo de endurecedor utilizado (anidrido ácido, poliamida, amina alifática, amina aromática, etc.). Um caso particular é a utilização dos endurecedores de poliamida para a obtenção de um bom comportamento para temperaturas baixas, na ordem de -200°C. A resistência destes adesivos não

é normalmente afectada a temperaturas inferiores a 80°C, sendo algumas resinas comercializadas para serem usadas a temperaturas de serviço que rondam os 150°C [3].

É possível modificar as propriedades destes adesivos mediante a adição de outras resinas (poliamida, fenólicas, polisulfido, etc.) ou de elastómeros (silicone, poliuretano, nitrilo, etc.).

Assim, considera-se os seguintes tipos de adesivos [1]:

- **Epóxido-Fenólico:** A fase fenólica garante uma grande estabilidade e resistência ao corte a temperaturas elevadas, aproximadamente 200°C. No entanto, têm resistências ao arrancamento e à clivagem inferiores às dos outros adesivos de epóxidos. Comercialmente, apresentam-se sob a forma de fitas que sob acção de pressão podem ser curadas a temperaturas de 170°C.
- **Epóxido-Polisulfido:** Apresentam uma grande versatilidade e são aplicados, especialmente, para ligar materiais com características térmicas diferentes (coeficientes de dilatação térmica diferentes). Oferecem uma certa resistência ao meio ambiente e são adequados para aplicações sujeitas a vibrações e choques.
- **Epóxido-Poliamida:** A resina desempenha função de agente flexibilizante e de endurecedor e o seu doseamento deverá ser tal que aumente a razão poliamida/epóxido para ser mais flexível. O processo de cura demora entre 12 a 16 horas, sendo o processo lento e à temperatura ambiente. Neste grupo, temos os adesivos comercialmente conhecidos por adesivos *epóxido - nylon*. São fornecidos na forma de filmes suportados ou não por um tecido de fibra de vidro e foram especialmente concebidos para a indústria aeronáutica devido sobretudo à sua boa resistência ao arrancamento.
- **Epóxido-Nitrilo:** Constituídos por uma resina epóxido modificada por um copolímero de nitrilobutadieno do tipo do *B.F. Googrich's Hycar*. São adesivos com uma boa resistência ao arrancamento e comercialmente aparecem sob a forma de filmes e podem ser utilizados entre -55 a 120°C, encontrando uma grande aplicação na construção e manutenção de aviões comerciais a jacto.

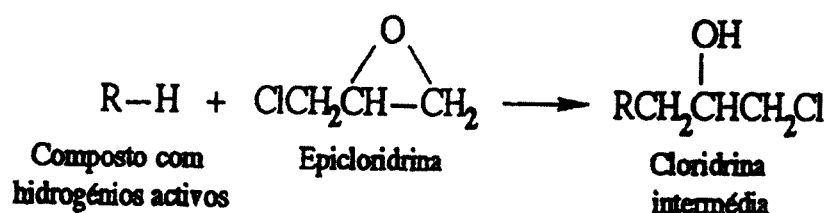
Na tabela 2.4 é apresentado, resumidamente, os diferentes tipos de adesivos estruturais e suas respectivas propriedades.

Tabela 2.4 Adesivos estruturais e suas propriedades.

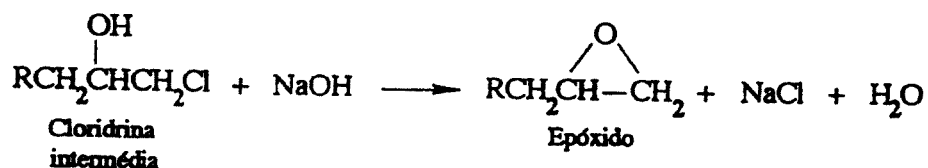
Tipos de Adesivos	Apresentação	Resistência ao corte (MPa)	Temperatura Máxima de Utilização em contínuo[°C]	Resistência Fluência	Resistência ao arrancamento	Resistência a Choques	Resistência a Solventes
Fenólico - Venílico	Líquido monocomponente Líquido + Pó Filme	17 a 35	100 a 130	boa	média	boa	mediocre
Fenólico - Nitrilo	Líquido monocomponente Filme	15 a 30	140 a 170	boa	média	boa	boa
Anaeróbicos (acrílicos)	Líquido monocomponente	10 a 40	120 a 150	média	boa	boa	média
Cianoacrilatos	Líquido monocomponente	10 a 35					
Poliuretano	Líquido de dois componentes	8 a 15	90	boa	média	boa	boa
Poliimida	Filme						
Epóxido	Diversa	15 a 45	80 a 150	mediocre	boa	má	boa
Epóxido - Poliimida	Líquido de dois componentes	15 a 25	80	boa	mediocre	boa	mediocre
Epóxido - Polissulfido	Líquido de dois componentes	15 a 25	80	boa	mediocre	boa	boa
Epóxido - Fenólico	Líquido monocomponente Filme	20	200 a 250	mediocre	boa	má	boa
Epóxido - Nitrilo	Filme	10 a 46	100 a 120	média	boa	boa	boa

2.2.3 Síntese de Resina de Epóxido

As propriedades dos adesivos, em relação à resina base, dependem muito da sua síntese. No caso dos adesivos de epóxido, estes são feitas à base das resinas de epóxido que se obtêm a partir da reacção entre a epicloridrina e um composto que possua hidrogénio activos segundo a equação [1,2,3,11]:



A fase seguinte consiste na desalogenação por acção duma fase, formando-se o epóxido:



Em função do grupo R, teremos as diferentes estruturas de resina de epóxido, alifáticas e aromáticas e, consequentemente, de adesivos de epóxido.

2.3 QUÍMICA DOS ADESIVOS DE EPÓXIDO

Na composição química dos adesivos de epóxido, para além das resinas de epóxido, entram uma grande variedade de agentes de cura e de modificadores que não contêm grupos de epóxido [1,12].

Na maioria dos casos, os adesivos de epóxido baseiam-se na epicloridrina e no diglicidiléter de bisfenol - A (DGEBA), pré-polímero difuncional [1, 13]. Na figura 2.2 é apresentada a sua fórmula de estrutura.

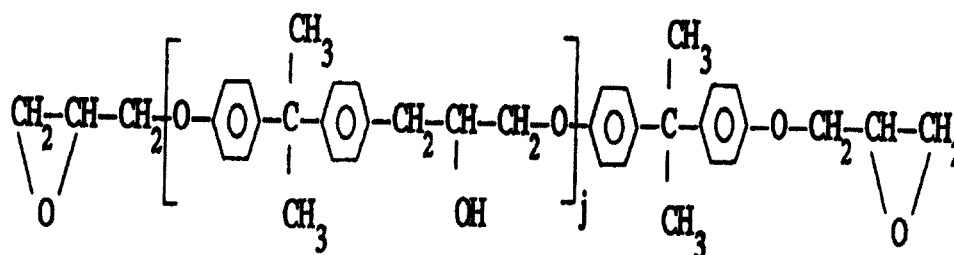


Figura 2.2 Fórmula química do diglicidiléter de bisfenol -A (DGEBA) [1,12,13].

Também, outros pré-polímeros são utilizados como são os casos do fenil-glicidiléter (PGE), o metil-glicidiléter (MGE), ambos monofuncionais, o tetraglicidil derivado da metileno-anilina (TGMDA), tetrafuncional e o triglicidil derivado do p-amino fenol (TGAP), trifuncional [1].

Os agentes de cura mais utilizados são as aminas aromáticas e alifáticas, a melamina e a decianodiamida (DDA), a qual é muito utilizada para colar juntas metálicas. A sua fórmula química está indicada na figura 2.3

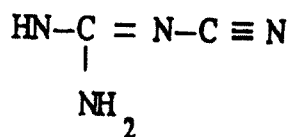


Figura 2.3 Fórmula química da decianodiamida (DDA) [1].

A obtenção do polímero está associado a reacção entre os pré-polímeros e os agentes de cura, que conduzem naturalmente a reticulações diferentes e, consequentemente, a diferentes propriedades. A reacção entre o pré-polímero (DGEBA) e o agente de cura (DDA) é representado na figura 2.4.

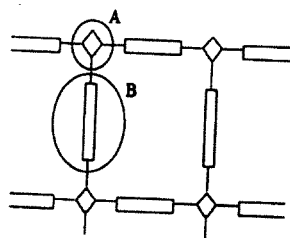


Figura 2.4 Esquema da reticulação resultante de reacção entre a DDA (A) e a DGEBA (B) [2].

Existem determinadas situações em que é preciso incorporar substâncias modificadoras para melhorar as propriedades das resinas epóxi, nomeadamente, as que são a base da DGEBA. Devido à sua fragilidade e, recorre-se a reforçantes de suporte, que podem ser em tecidos ou não, aumentando assim a resistência mecânica das resinas [1]. Na indústria aeronáutica, onde são muito usados os adesivos de alta performance, utilizam suportes de fibras de vidro, carbono e nylon.

Alguns autores [14] salientam a elevada resistência ao corte e especialmente ao arrancamento, à temperaturas ambiente e da ordem dos 120°C, obtidas em juntas sobrepostas efectuadas com adesivos de epóxi contendo nylon, mas com o inconveniente do nylon introduzir humidade por ser um material hidrófilo, levando a limitações na utilização prática. Devido às suas propriedades, estes adesivos foram essencialmente desenvolvidos para utilização em aviões e aplicações que exigem elevadas resistências ao arrancamento.

2.4 SISTEMA ADESIVO EPÓXIDO/DICIANODIAMIDA

A dicianodiamida, DDA, é muito utilizada como agente de cura de resinas de epóxido, apresentando um ponto de fusão elevado, na ordem dos 207°C, sendo solúvel em água, álcoois, dimetilformamida e dimetilsulfóxido, mas relativamente insolúvel em solventes menos polares, incluindo as resinas de epóxido, impedindo por vezes a obtenção de uma boa homogeneização do adesivo [2].

Apesar de ser um dos objectivos de estudos de vários autores, não existe acordo relativamente a um mecanismo reaccional geral na reacção da DDA com pré-polímeros de epóxidos. Propõem-se diferentes possibilidades para o mecanismo de reacção e diferentes estruturas para os produtos de reacção.

Saunders et al. e Zahir [15,16] realizaram um importante estudo com o mesmo sistema, constituído pelo pré-polímero fenil-glicidiléter (PGE), o agente de cura DDA e o catalisador benzildimetilamina (BDMA). No que se refere às reacções do grupo nitrilo da DDA, as conclusões que ambos chegaram são bastante diferentes.

Para Saunders [15] (ver figura 2.5), os grupos epóxido reagem com os grupos amina (-NH₂) e imina (ligação dupla C=N) da DDA formando α-hidroxi-N-alquilcianoguanidinas, formando-se também uma pequena quantidade de poliéter (-C-O-C-).

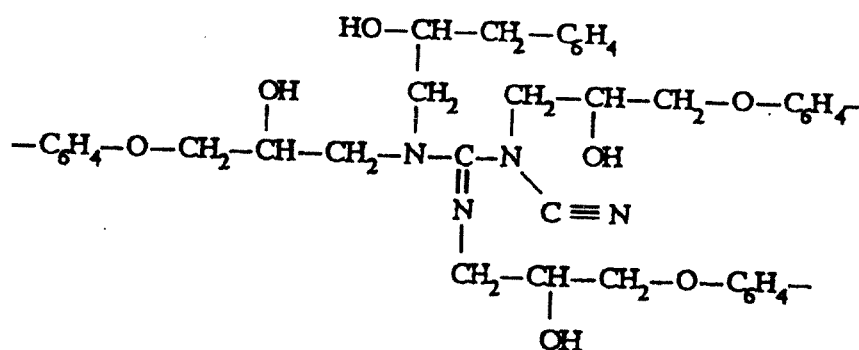


Figura 2.5 Estrutura das α-hidroxi-N-alquilcianoguanidinas sugeridas por Saunders como o primeiro produto da reacção entre os grupos de amina e imina com os epóxidos.

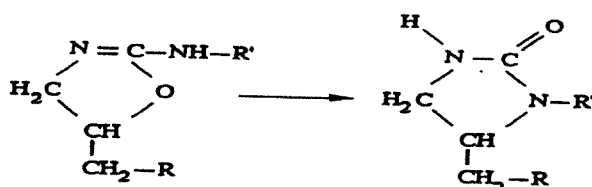


Figura 2.7 Arranjo intramolecular das guanilureias sugeridas por Zahir et al. [16].

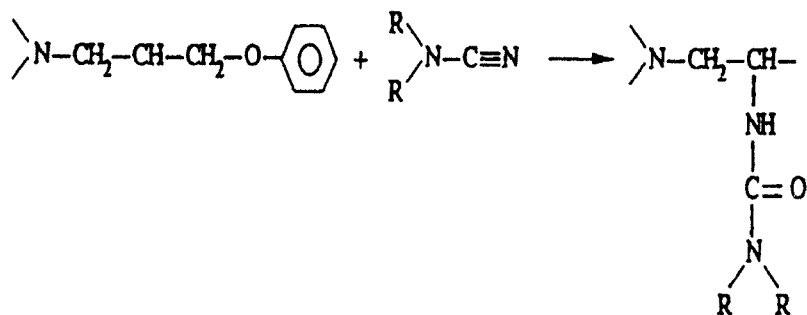


Figura 2.8 Arranjo intermolecular das guanilureias sugeridas por Zahir et al. [16].

3 COLAGEM

3.1 INTRODUÇÃO

Quando se forma uma interface entre o adesivo e o substrato geram-se através dela forças cuja natureza e amplitude têm de assegurar uma forte ligação durante toda a vida útil da ligação. Esse fenómeno interfacial, denominado adesão, no qual estão envolvidas forças químicas e físicas, não pode ser explicado por uma única teoria.

A compreensão da teoria da adesão exige o conhecimento do papel da absorção química e da difusão; do ponto de vista químico, o fenómeno de adesão resulta da actuação de diferentes forças na interface aderente/adesivo [17].

Estas forças podem ser polares e não polares, como as forças de Van der Waals (absorção química) e as ligações de hidrogénio (atração polar muito forte) ou ainda iónicas, covalentes ou de coordenação (absorção química) [17]. É apresentado na tabela 3.1 os diferentes tipos de ligações conhecidas, com as respectivas energias de rotura e as distâncias de interacção das forças de ligação [1, 12, 17].

Tabela 3.1 Tipo de ligações interatómicas e intermoleculares [18].

TIPOS DE LIGAÇÕES	ENERGIAS em Kcal/mole	DISTÂNCIA em Å (1Å=10 ⁻¹⁰ m)
Ligações interatómicas ou primárias Iónica Covalente } ligações químicas Metálica	140 a 250 15 a 170 27 a 85	1 a 2
Ligações intermoleculares ou secundárias Hidrogénio Dispersão } ligações do tipo Orientação } Van der Waals Indução	até 15 até 10 até 5 até 0,5	3 4 a 5 3 a 4 4 a 5

Com o objectivo de explicar o mecanismo de adesão desenvolveram-se, ao longo do tempo, algumas teorias. Habitualmente, são consideradas diversas teorias para explicar o mecanismo de adesão [1, 12, 17, 19, 20]. A figura 3.1 ilustra os mecanismos predominante de adesão.

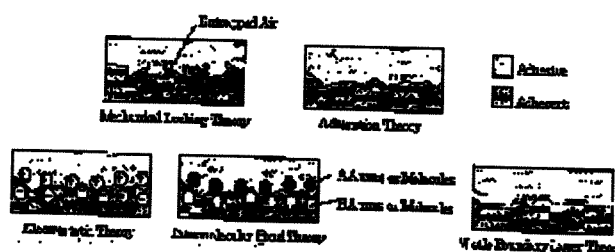


Figura 3.1 Mecanismos dominantes de adesão [19].

A teoria da absorção defende que as interações químicas e físicas são as principais forças de atracção. O adesivo no estado líquido, fixa-se sobre a superfície sólida do aderente devido às forças intermoleculares que provêm de interações entre os dipolos das moléculas do aderente e do adesivo.

A teoria mecânica, por sua vez, baseia-se no facto do adesivo preencher as microcavidades da superfície ou infiltrar nos poros, se estes existirem. Na superfície ocorre ancoragem mecânica do adesivo. A verificação de que se pode obter uma boa adesão entre superfícies mais ou menos lisas não confere grande universalidade a esta teoria. Contudo, quando a superfície do substrato é tratada de forma a obter uma determinada topografia, a ancoragem mecânica da superfície melhora. A maior adesão verificada atribui-se, geralmente, a outros factores como a remoção das camadas superficiais indesejáveis e ao aumento de rugosidade que permite uma maior área de contacto.

A teoria eléctrica/electrónica explica esse mecanismo em termos do efeito electrostático na interface. Na interface existe uma dupla camada eléctrica, comparado a um condensador, no qual as armaduras são as duas camadas eléctricas formada pelo contacto dos dois substratos. A adesão resulta das forças de atracção desenvolvidas entre as duas armaduras. Experiências conduzidas em contactos do tipo metal e semiconductor parecem confirmar esta teoria. Porém, há quem defenda que qualquer dupla camada que se possa formar na interface não contribui significativamente para a adesão.

A teoria da difusão propõe como explicação uma interpenetração molecular na interface do adesivo e do aderente. As moléculas encontram-se ligadas por meio mecânico e por forças intermoleculares. Esse mecanismo de difusão acontece se o substrato e o adesivo forem ambos polímeros, mutuamente solúveis, e as suas cadeias macromoleculares possuírem grande mobilidade. Em interfaces entre polímeros e metais não se considera a ocorrência deste mecanismo.

A teoria da polaridade considera que quando o adesivo e o aderente são ambos polares e não polares as juntas obtidas apresentam boas propriedades.

A teoria da camada limite pressupõe a existência na interface de uma camada limite finita composta por moléculas absorvidas que são diferentes na sua constituição das moléculas constituintes do adesivo e do aderente.

A figura 3.2 representa esquematicamente a camada limite, onde inclui a camada superficial do aderente. A fase A corresponde à fase do polímero absorvida, cuja espessura pode ir de 1 a 600 Å. A fase B corresponde à fase limite do aderente que possui a mesma rugosidade que a superfície metálica e inclui a camada de óxidos, espécies absorvidas, impurezas, etc. A rugosidade da superfície influencia a sua espessura.

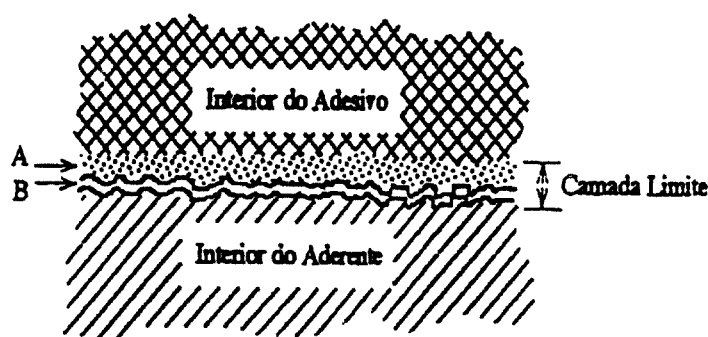


Figura 3.2 Camada limite na interface polímero/metal de uma junta colada [12].

O comportamento de adesão permite definir três estados interfaciais, dependentes do grau de ligação superficial existente, e que contribuem para caracterizar o tipo de fractura que ocorre numa junta. Uma zona adesiva (condição de falha limite), uma zona de transição (mista/coesiva) e uma zona coesiva [18].

É possível definir dois mecanismos dominante de fractura para as juntas adesivas que são a fractura coesiva e a adesiva. A fractura adesiva é a fractura interfacial entre o adesivo e um dos aderentes e a fractura coesiva é a fractura interna do adesivo ou, raramente, de um dos aderentes. A diferença é ilustrada na figura 3.3 Geralmente a falha da junta não é completamente coesiva nem completamente adesiva, por conseguinte essa fractura é dada pela percentagem da fractura coesiva e fractura adesiva, denominada fractura mista ou adesiva/coesiva [19].

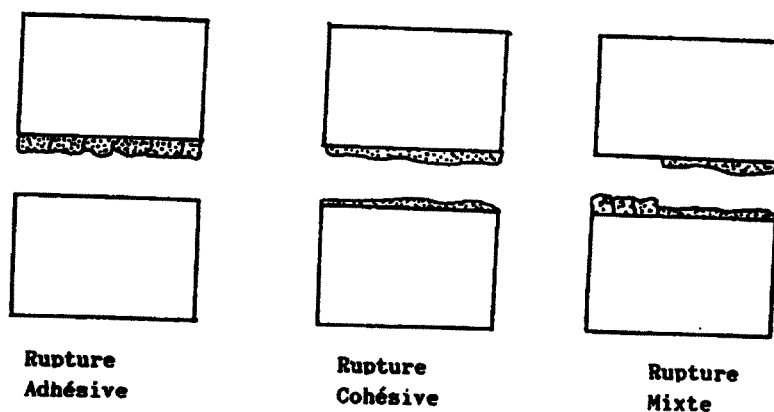


Figura 3.3 Morfologia de rotura de juntas coladas [17].

3.2 TRABALHO DE COESÃO E TRABALHO DE ADESÃO

Uma das condições a verificar quando se estabeleça uma ligação adesiva é que o adesivo, que deve ser líquido no momento da aplicação, molhe o substrato, isto é, que se espalhe espontaneamente sobre ele [1].

Entre o adesivo e o substrato há uma interface que deve ser considerada, sendo esta uma região de contacto entre duas substâncias diferentes [21]. Considerando a situação da figura 3.4(a), onde uma única substância é dividida em duas partes, o trabalho de coesão, por unidade de área, necessário para a clivagem das substâncias, desprezando a dissipação de energia, deverá ser igual à quantidade de energia necessária para formar as duas novas superfícies, como mostra a equação (3.1):

$$W_c = 2\gamma \quad (3.1)$$

onde W_c é o trabalho de coesão e γ é a tensão superficial [1,21]. A outra situação, representada na figura 3.4(b), onde as duas substâncias diferentes estão em contacto, sem interacções ao longo da interface, o trabalho de adesão é dado pela equação (3.2):

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (3.2)$$

e se verificar interacções temos,

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (3.3)$$

em que γ_1 e γ_2 são as tensões superficiais das duas substâncias e γ_{12} é a tensão resultante das suas interacções [1,21].

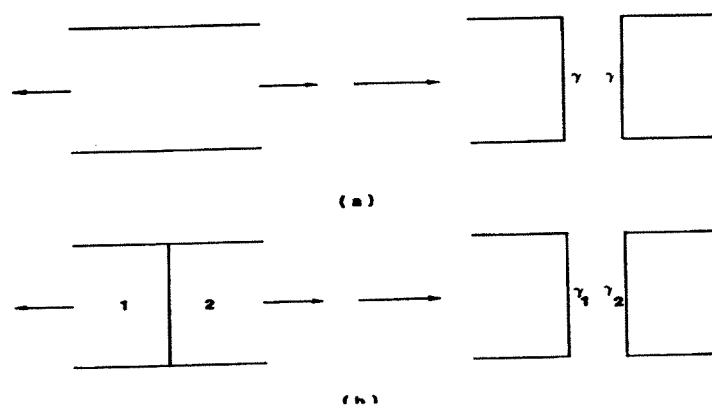


Figura 3.4 Diagrama que mostra a definição do trabalho de coesão e do trabalho de adesão [21].

Uma gota líquida sobre uma superfície é sujeita a um conjunto de forças, como se representa na figura 3.5, em que θ é o ângulo de contacto, γ_{lv} e γ_{sv} são as tensões superficiais do líquido e do sólido em equilíbrio com a atmosfera envolvente e γ_{sl} é a tensão resultante das interacções entre o líquido e o sólido [1].

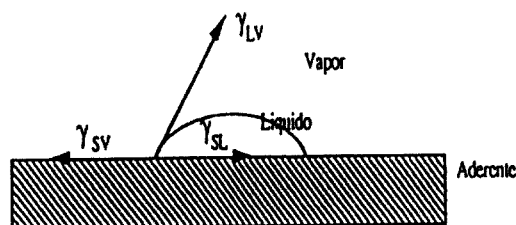


Figura 3.5 Sistema de forças numa gota líquida sobre um sólido [1,22].

O diagrama também mostra o ângulo de contacto θ e a tensão superficial que aparece na equação de Young (equação (3.4)).

A equação de Young descreve o balanço das forças e é dado por:

$$\gamma_{lv} \cos \theta = \gamma_{sv} - \gamma_{sl} \quad (3.4)$$

O trabalho de adesão W_a é dado por:

$$W_a = \gamma_{lv} + \gamma_{sv} - \gamma_{sl} \quad (3.5)$$

e, finalmente, conjugando as equações (3.4) e (3.5), temos a equação de Young-Dupre:

$$W_a = \gamma_{lv} (1 + \cos\theta) \quad (3.6)$$

Esta equação mostra que o trabalho de adesão W_a é proporcional à tensão superficial do líquido e a $\cos\theta$, que nunca é nulo, na medida em que todos os líquidos têm tensão superficial, e é máximo quando $\theta = 0^\circ$, sendo então igual ao trabalho de coesão do líquido.

Define-se coeficiente de molhabilidade, S , como sendo a diferença entre o trabalho de adesão W_a e o trabalho de coesão W_c [21]:

$$S = W_a - W_c \quad (3.7)$$

$$S = \gamma_{lv} + \gamma_{sv} - \gamma_{sl} - 2\gamma_{lv} \quad (3.8)$$

$$S = \gamma_{sv} - \gamma_{lv} - \gamma_{sl} \quad (3.9)$$

Para um líquido se espalhar sobre um sólido é necessário que esse coeficiente seja positivo, isto é, que o trabalho de adesão seja superior ao de coesão sobre o sólido.

A figura 3.6 representa a relação entre uma gota líquida sobre uma superfície e a adesão no sólido. Segundo um estudo publicado por Friend [19], ângulo de contacto da gota pequeno indica boa molhagem e que o adesivo é o mais indicado.

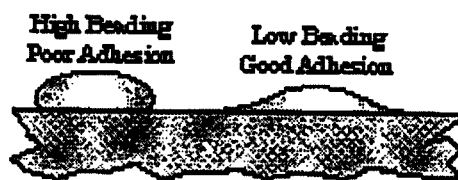


Figura 3.6 Relação entre o adesivo líquido e a adesão [19].

Segundo Hortshorn [21], a molhagem está relacionado com a tensão superficial crítica, γ_c , definida como o limite superior da tensão superficial do líquido para se espalhar espontaneamente sobre um determinado sólido, e a molhagem só se verifica quando $\gamma_{lv} < \gamma_c$.

A presença de gorduras, ceras e outras impurezas como finas camadas de óxidos sobre o substrato faz baixar a tensão superficial da superfície exposta ao adesivo, por conseguinte devem ser eliminadas antes de proceder à colagem [1].

No capítulo 8 é retratado o tipo de tratamento superficial utilizado, antes da operação de colagem, com o objectivo de melhorar a resistência das juntas, nomeadamente a operação de lixagem para eliminar a camada de óxido e o desgorduramento das chapas.

3.3 FACTORES DE RESISTÊNCIA DAS JUNTAS ADESIVAS

Uma junta colada é formada pelos aderentes e pelo adesivo, unidos através de uma ligação adesiva, ligação esta condicionada por diversos factores que afectam a sua resistência, como são, as características mecânicas dos aderentes e do adesivo, a geometria da junta, o tratamento superficial, as condições ambientais e as solicitações externas [1, 2, 3].

A relação entre esses factores e a resistência da junta é esquematizada na figura 3.7.

Um dos factores mais importantes no funcionamento das juntas é a espessura da camada adesiva, principalmente quando se trata de adesivos de alta performance. Existe uma espessura óptima que é preciso considerar. Por isso, convém não aumentar muito a espessura porque corremos o risco de introduzir defeitos, nomeadamente o caso de bolhas de ar. No entanto, se a espessura for muito pequena a resistência decresce rapidamente [10]. Na figura 3.8 esquematiza-se a variação da espessura da camada adesiva com a tensão de corte na junta.

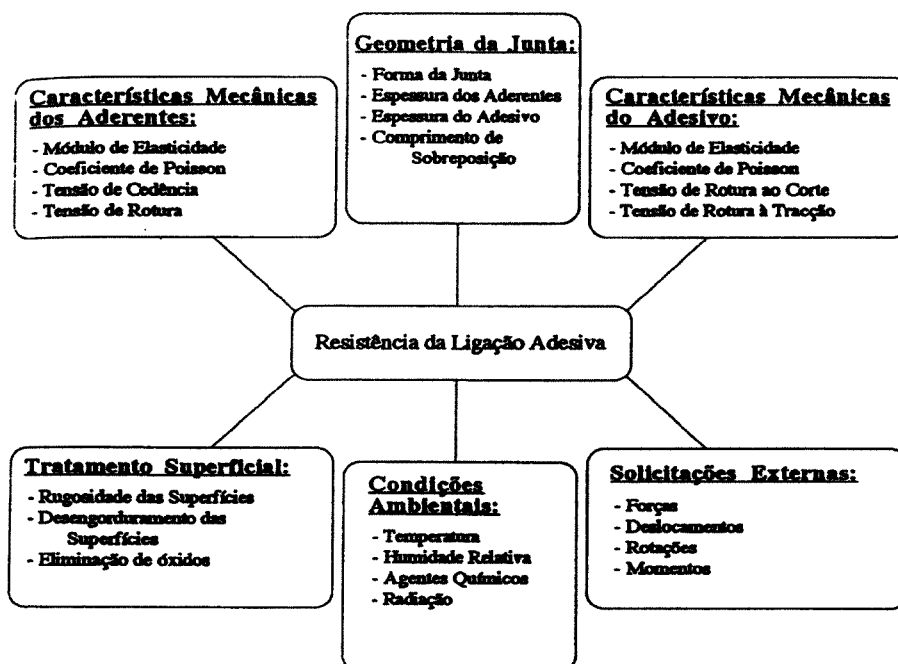


Figura 3.7 Principais factores que afectam a resistência da junta colada [2].

R cisaillement

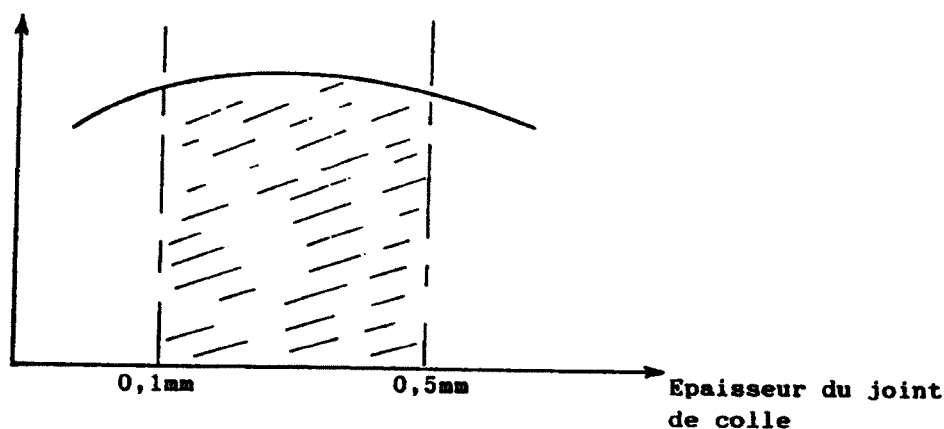


Figura 3.8 Curva da variação da espessura da camada adesiva com a tensão de corte na junta [10].

A espessura recomendada para ter o melhor compromisso entre a resistência máxima e a ausência de defeitos deve ser da ordem de 0.2 a 0.3 mm [1,4,10].

Outro parâmetro importante é o comprimento de sobreposição, e este não deve ser grande por causa das elevadas tensões que se verifica nas extremidades. É melhor ter uma junta mais larga do que comprida para uma mesma área de sobreposição. Esse comportamento encontra-se representado na figura 3.9.

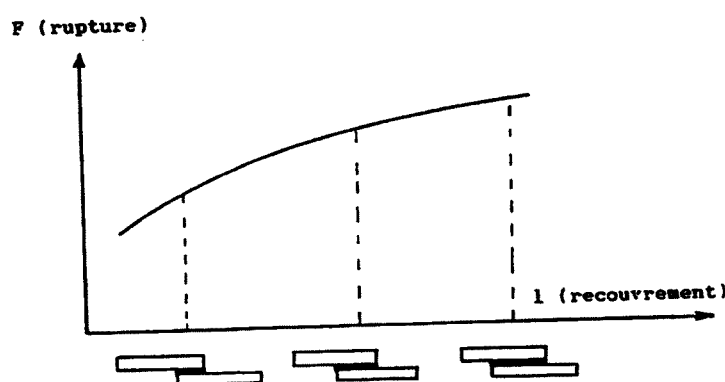


Figura 3.9 Variação da carga de rotura com o comprimento de sobreposição [10].

A rugosidade é outro parâmetro com influência na resistência das juntas coladas. Ela favorece um aumento da área de contacto entre os dois materiais e um aumento das ligações de interface [10]. Pode-se constatar na figura 3.10 que existe uma rugosidade óptima para a qual a resistência da junta é máxima.

Quando a superfície é muito lisa ou muito rugosa a colagem pode ser defeituosa. Se o substrato for muito liso, o adesivo não encontra nenhum ponto de ancoragem e adere dificilmente, e, se for muito rugoso, não ha penetração total do adesivo nas cavidades. Também elevada rugosidade aumenta a concentração de tensões e, consequentemente, diminui a resistência da junta.

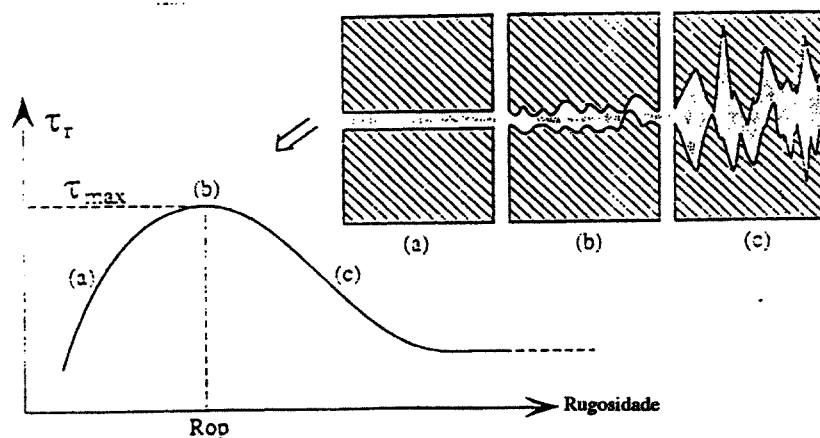


Figura 3.10 Variação da tensão de corte com a rugosidade superficial [10].

Com base num estudo de Pinto et al [24], é possível observar a influência das condições ambientais no comportamento à fadiga das juntas coladas (figura 3.11). Constata-se que o envelhecimento das influencia de modo diferente a resistência das juntas, isto é, num caso o envelhecimento melhora o comportamento à fadiga e no outro o efeito é contrário.

Os adesivos estruturais apresentam um comportamento visco-elástico na presença da temperatura elevadas, isto é, a ductilidade aumenta com o aumento da temperatura. Desta forma, o envelhecimento de juntas em ambientes de temperaturas e humidades relativas controladas superiores ao meio ambiente, poderá melhorar certas características das ligações adesivas.

A espessura do substrato tem influência na resistência ao corte da junta, conforme se representa na figura 3.12. Dependendo do tipo de junta, inicialmente a resistência ao corte aumenta com o aumento da espessura do material base, e a partir de um determinado valor, a tensão de corte mantém-se praticamente constante [10].

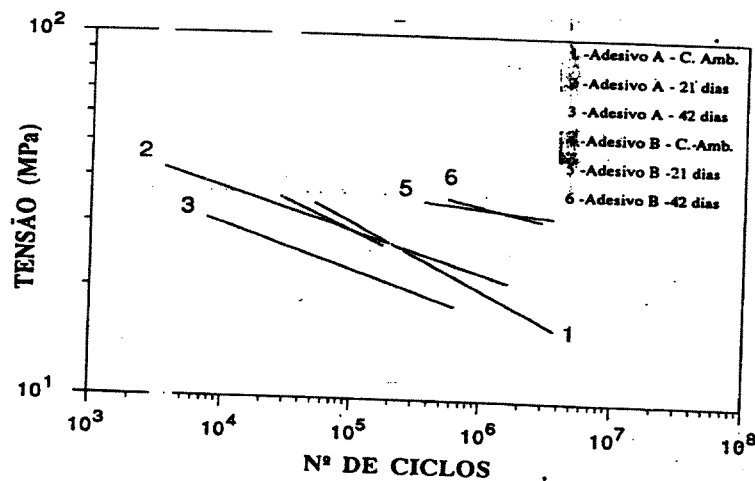


Figura 3.11 Comparação do comportamento à fadiga de dois adesivos [24].

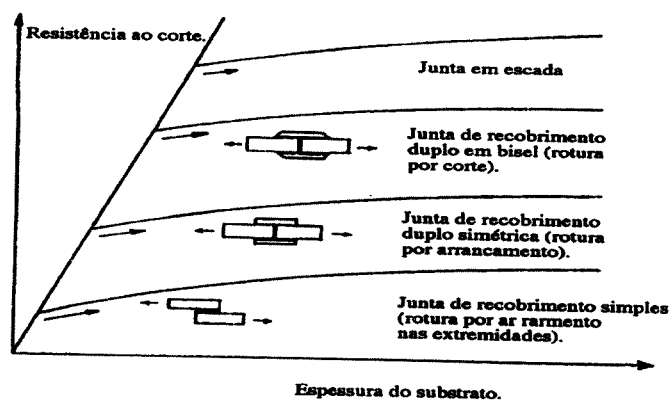


Figura 3.12 Variação da tensão de corte com a espessura do substrato para diferentes tipos de juntas [9].

Verifica-se assim que o projecto da junta influencia a sua resistência e como tal, devem observar-se os seguintes requisitos [17]:

- Maximizar a área de colagem da junta;

- As tensões aplicadas devem operar na direcção de máxima tensão ao corte;
- Minimizar a concentração de tensões, particularmente nos bordos da junta;
- adoptar uma camada de adesiva uniforme, mista e contínua.

Além das propriedades do adesivo e do substrato, no *projecto* da junta é preciso ter em conta os aspectos económicos [21].

3.4 TIPOS DE LIGAÇÕES QUÍMICAS ADESIVAS

Um factor que influencia a adesão é a proximidade dos corpos a colar. A adesão será boa se a distância intermolecular entre as moléculas do adesivo e do aderente for da ordem de grandeza de alguns angströms (menor ou igual a 5 Å) [3]. Dependendo dessa proximidade, temos o estabelecimento de ligações interatómicas (ou primárias) ou de ligações intermoleculares (ou secundárias), sendo as primeiras mais sólidas e resistentes. Nas ligações interatómicas inclem-se as ligações covalentes, iónicas e metálicas, e nas intermoleculares as ligações de hidrogénio e de Van der Waals [2].

As forças de ligação primárias e secundárias tornam-se rapidamente desprezáveis quando a distância entre os *pontos activos* (zonas onde se produzem forças de ligação) passa a ser superior a 5Å, conforme pode ser observado na figura 3.13. Quer isto dizer que para a obtenção de uma boa colagem é necessário proceder a aproximação o mais perto possível dos *pontos activos do adesivo* aos *pontos activos da superfície do aderente* [1,3].

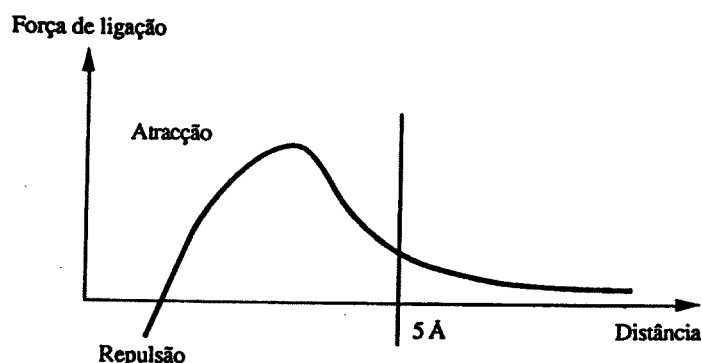


Figura 3.13 Variação das forças de ligação em função das distâncias interatômicas e intermoleculares [3].

Quando a proximidade entre os corpos não permite o estabelecimento de nenhuma daquelas ligações, diz-se que a adesão é mecânica, isto é, resultante da ancoragem entre o adesivo e o aderente.

Outro factor importante no estabelecimento das ligações referidas é o tipo de grupos funcionais presentes, quer no adesivo quer no aderente. É por intermédio desse grupos que as ligações se estabelecem e, consoante a sua natureza, podemos ter a formação de ligações metálicas, de hidrogénio e até covalentes. Na tabela 3.2 mostra-se alguns dos grupos funcionais mais comuns em adesivos e as ligações que se estabelecem quando o aderente é um metal.

A tecnologia de colagem de juntas metálicas envolve uma preparação que implica [17]:

- A criação de pontos activos sobre a superfície do aderente compatíveis com os pontos activos do adesivo;
- A aproximação do maior número de pares de pontos activos de adesivo e do aderente, criando o maior número de pontos de ligação possíveis;
- Garantia de solidez dos pontos de ligação obtidos.

Tabela 3.2 Grupos funcionais mais comuns em adesivos e as ligações que se estabelecem com uma superfície metálica [3].

TIPO DE GRUPO	TIPO DE LIGAÇÃO SOBRE UM METAL
Hidróxido $R-OH$	$R-OH \cdots O-Metal$ $R-OH \cdots O-Metal$ Ligação de Hidrogênio
Carboxílico $R-C(=O)OH$	$R-C(=O)OH \cdots O-Metal$ $R-C(=O)OH \cdots O-Metal$ $R-C(=O)OH \cdots O-Metal$ Ligação de Hidrogênio
Amido $R-C(=O)N-R$	$R-C(=O)N-R \cdots O-Metal$ $R-C(=O)N-R \cdots O-Metal$ $R-C(=O)N-R \cdots O-Metal$ Ligação de Hidrogênio
Isocianato $R-N=C=O$	$R-N=C=O \cdots O-Metal$ $R-N=C=O \cdots O-Metal$ Ligação Química
Epóxido $R_1R_2C_1OC_2R_3R_4$	$R_1R_2C_1OC_2R_3R_4 \cdots O-Metal$ $R_1R_2C_1OC_2R_3R_4 \cdots O-Metal$ Ligação Química $R_1R_2C_1OC_2R_3R_4 \cdots O-Metal$ $R_1R_2C_1OC_2R_3R_4 \cdots O-Metal$ Ligação de Hidrogênio

3.4.1 Influência da Reologia do Adesivo de Epóxido na Adesão das Juntas

A resistência das juntas adesivas é controlada pela tenacidade da ligação superficial, pela resistência coesiva do adesivo ou do aderente e pelo grau de deformação que o material sofre durante a rotura da junta. Por isso, a resistência reológica, dependendo das estruturas, é muito importante na determinação das resistências da junta colada. Quando a resistência coesiva do material adesivo aumenta no sentido, estado líquido - estado da borracha - estado da transição -

estado vítreo, a resistência da junta também aumenta [2]. De notar que a maioria dos adesivos de epóxico classificam-se vítreos por possuírem uma temperatura de transição vítrea T_g , mais elevada que a temperatura ambiente. Alguns sistemas modificados com borrachas ou com poliamidas podem ser considerados como pertencentes à zona de transição porque a sua temperatura de transição vítrea ocorre perto ou à temperatura ambiente.

No caso de juntas que trabalham ao corte ou à tracção, devem utilizar-se adesivos vítreos por estes apresentarem elevada resistência a essas solicitações e fraca resistência à clivagem e ao arrancamento. Quando sujeitos a estas últimas solicitações, aqueles adesivos sofrem uma grande descontinuidade de tensões que induz à abertura de uma fenda a partir da qual se inicia a propagação de fractura frágil até à rotura [11].

Os adesivos de tipo borracha deformam-se elasticamente antes da rotura ocorrer permitindo uma maior distribuição de tensões ao longo da colagem durante o processo de arrancamento. Se o estado superficial for o correcto, a resistência do adesivo ao arrancamento será tanto maior quanto mais borracha existir no adesivo.

Os sistemas adesivos termoplásticos não-cristalinos, acima da sua temperatura de transição vítrea T_g (estado tipo borracha) formam juntas de baixas resistência porque, nesse estado, o adesivo é coesivamente fraco. No entanto, a baixas temperaturas, ao aproximar da T_g , a resistência da junta aumenta e é máxima para temperaturas muito próximas da T_g . Na zona vítrea a resistência da junta depende da tenacidade do material: se o adesivo for frágil no estado vítreo a resistência diminui. Em resinas reticuladas, como é o caso dos epóxidos, não há quase nenhuma perda de resistência da junta imediatamente após T_g [12]. Dado que os adesivos de epóxico são materiais vítreos, rígidos e resistentes, são muito utilizados em juntas topo-a-topo e de sobreposição, resistindo às solicitações de tracção e de corte. Quando sujeitos ao esforço de arrancamento os adesivos de epóxidos são modificados com borracha, por serem mais flexíveis.

3.5 TECNOLOGIA DE COLAGEM

O processamento de colagem envolve diferentes etapas, as quais devem ser controladas de forma a obter-se juntas coladas com um comportamento estrutural adequado.

Geralmente, esta tecnologia desenvolve-se em três etapas. A primeira etapa consiste numa preparação adequada da superfície de colagem, de modo a retirar *corpos estranhos* (a água, os óxidos, as gorduras, as poeiras, etc.), fixos à superfície do aderente, eliminando obstáculos à aproximação dos corpos a serem ligados [1]. A aplicação cuidada do adesivo sobre a superfície do aderente de modo a evitar a presença de bolhas de ar constitui a 2ª etapa. A última etapa trata-se da cura do adesivo a temperatura ambiental ou numa estufa.

A superfície metálica deve sofrer um tratamento superficial antes da aplicação do adesivo, de modo a assegurar, posteriormente, uma boa aderência do adesivo [25].

O tratamento superficial dos aços depende do estado da superfície. Quando o meio é muito seco, a superfície de um aço ordinário ou de uma liga é formada por diferentes óxidos. Quando a superfície está num meio húmido as moléculas de água penetram nos poros, e começa então, o processo de ferrugem, constituída pelos seguintes elementos: Magnetite, Goetite, Lepidocrocite, conforme ilustrado na figura 3.14.

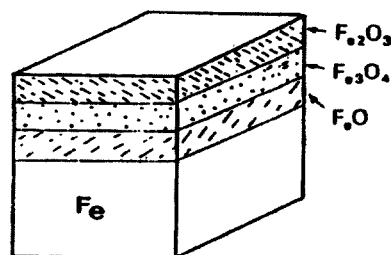


Figura 3.14 Formação dos óxidos e hidróxidos à superfície do aço [10,17].

3.5.1 Técnicas de Tratamentos de Superfície

De uma forma geral, existem três tipos de tratamentos de superfície: os mecânicos, os químicos e os energéticos ou de radiação [26].

Cada um destes tipos inclui diferentes técnicas ou métodos de tratamento, como se pode ver na tabela 3.3.

Tabela 3.3 Tipos de tratamentos de superfície [26].

MECÂNICOS	QUÍMICOS	ENERGÉTICOS
<i>Via Seca:</i> - Projecção de Alumina - "Cryoblast" - Arrancamento de filme* - Abrasão com SiC <i>Via Úmida:</i> - "Sodablast" * Técnica específica de Materiais Compósitos	Limpeza base solvente Lavagem base detergente Ataque ácido Anodização Aplicação de Primário	Plasma Descarga de Corona Chama Laser de Excímeros

Os óxidos e hidróxidos, sendo de pouca aderência e de fraca coerência, poderão ser eliminados por meio de tratamentos de diversos tipos [26]:

a) Tratamentos Mecânicos

A abrasão mecânica é a técnica de tratamento de superfícies mais frequentemente utilizada, sendo aplicável a quase todos os materiais.

Esta técnica remove as camadas frágeis e altera a topografia do aderente, aumentando assim a área de colagem em termos de microescala [26]. Adicionalmente, considera-se que este tipo de tratamento melhora as características de molhabilidade do aderente, isto é, aumenta a capacidade do adesivo *molhar* o substrato, dada as alterações superficiais provocadas.

A técnica de abrasão mecânica, mais simples, normalmente empregue é a utilização de panos/lixas de carboneto de silício para o polimento/desbaste [26]. Este processamento pode ou não ser efectuado a um solvente adequado. A qualidade obtida com tal tratamento depende da granulometria do pano utilizado, bem como se é efectuado manual ou mecanicamente.

A técnica de projecção de abrasivos, mais vulgarmente conhecida por grenalhagem, é uma outra forma de abrasão mecânica e inclui as técnicas de projecção de alumina, *Cryoblast* e *Sodoblast*, sendo estas últimas frequentemente utilizadas na preparação de substratos em materiais compósitos. A técnica *Cryoblast* utiliza esferas de grafite e é menos agressiva que a projecção por alumina. A técnica *Sodoblast* utiliza uma suspensão de bicarbonato de sódio em água, e foi inicialmente usada na indústria aeronáutica na preparação de substratos por pintura. A grande desvantagem é a possibilidade de aumentar o teor em água no componente, o que, no caso dos compósitos, requer uma operação de secagem antes da colagem [26].

As principais variáveis associadas à projecção de *grenalha* são o diâmetro/granulometria do abrasivo usado, pressão de projecção, tempo de exposição, ângulo de projecção e distância entre o bico de projecção e o aderente a tratar [26].

O tratamento por arrancamento de filme é aplicado em tratamentos de superfícies de materiais compósitos previamente à cura. É usada uma pré-forma para cobrir a superfície externa do compósito no qual a matriz do compósito irá penetrar durante o processo de cura, tornando-se esta pré-forma parte do laminado. Quando o laminado é sujeito a colagem esta pré-forma é arrancada produzindo fractura na resina entre a pré-forma e a primeira camada do laminado, produzindo uma superfície limpa e rugosa onde o adesivo poderá ser aplicado. A morfologia da superfície obtida depende da natureza da pré-forma, bem como do tipo de tecido (fibra) utilizado no compósito.

b) Tratamentos Químicos

Existem diferentes tipos de tratamentos químicos para a limpeza e preparação dos aderentes para o processo de colagem. Esta diversidade varia desde uma simples limpeza com um solvente, à aplicação de tratamentos electroquímicos ou até à aplicação de um primário.

Os aderentes são frequentemente contaminados com gorduras e óleos diversos. Um método efectivo de limpeza de substratos cerâmicos, vidros e metais é o projectado *Desengorduramento por Vapor de Solvente* [1]. Nesta técnica, é colocado um solvente numa câmara, o qual é aquecido até a ebulição. Este condensa no aderente, que se encontra frio, dissolvendo os óleos e gorduras existentes, obtendo-se uma superfície bastante limpa.

Alternativamente, e caso a dimensão o permita, o aderente pode ser imerso em banho com solvente e sujeito à acção de ultra-sons. A limpeza com solvente na sua forma mais simples pode ser efectuada utilizando apenas um pano adequado embebido em solvente para limpeza manual do aderente. A limpeza deve ser efectuada numa só direcção e o pano deve ser mudado frequentemente.

A anodização tem sido muito investigada e desenvolvida na indústria aeroespacial como tratamento de superfícies para ligas de alumínio e titânio. Esta técnica é praticada depois de o aderente ter sido atacado quimicamente. O objectivo da anodização é depositar no aderente uma camada porosa de óxido formada após o ataque químico. Esta camada permite que o adesivo (ou o primário) penetre nos poros facilmente, de forma a produzir uma ligação resistente. A anodização é uma espécie de electrólise onde o aderente é o ânodo, sendo o ácido fosfórico, por exemplo, um electrólito típico. Um eléctrodo inerte é usado como cátodo. Uma das grandes desvantagens deste tipo de tratamento deve-se ao facto de ser um processo demorado à existência de muitas variáveis tais como a voltagem aplicada, tempo de anodização, temperatura e concentração de electrólito, que devem ser cuidadosamente controladas.

O uso de primários é principalmente aplicado a superfícies metálicas e cerâmicas. Actua como um intermediário, o qual tem a capacidade de aderir facilmente ao aderente e ao adesivo. Alguns adesivos possuem uma viscosidade elevada e por isso não fluem com facilidade na colagem, e o

primário actua como o solvente do adesivo, permitindo assim que este molhe facilmente o substrato.

Os primários mais comuns consistem em silicones cuja fórmula geral é $R(CH_2)_n SiX_3$, onde R é um grupo orgânico funcional, o qual é seleccionado de acordo com a sua reactividade com um dado adesivo, X é um grupo hidrolizado no silicone o qual pode formar uma ligação com o aderente e o valor n varia entre 0 e n+3. Os primários tem sido usados com bons resultados em ligas de alumínio e de titânio, cobre, aços e sílica.

c) Tratamentos Energéticos ou por Radiação

Os tratamentos de superfície onde se faz o uso de fontes de radiação, mais utilizados são os projectados descarga de corona, plasma, chama e laser de excímeros. Todos estes procedimentos produzem uma variação na textura da superfície do aderente, resultante da interacção da radiação com a superfície (figura 3.15).

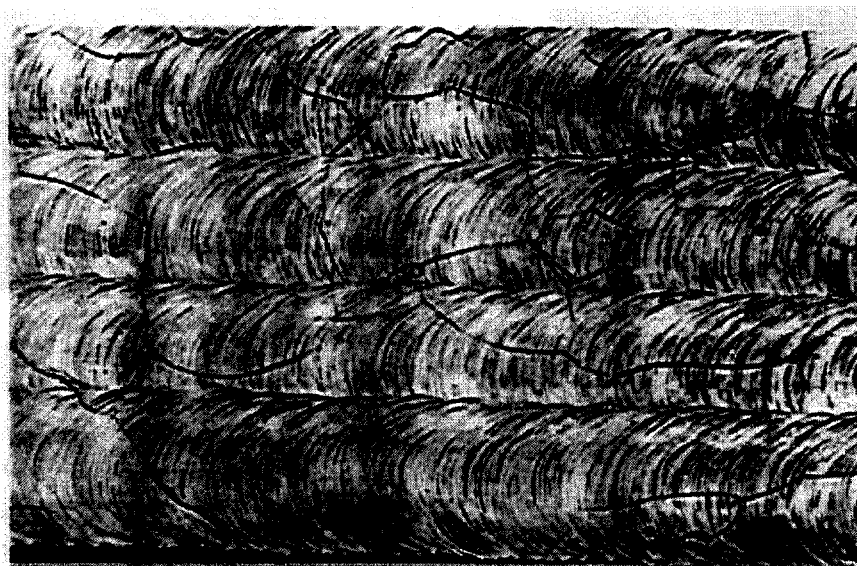


Figura 3.15 Tratamento de superfície onde se fez o uso de fontes de radiação. Produzem uma variação na textura da superfície aderente [26].

O plasma não é mais do que um gás ionizado, que consiste numa mistura de átomos, moléculas, electrões, iões e radicais livres e que é produzido pela aplicação de uma voltagem elevada entre

dois eléctrodos, numa câmara de baixa pressão. Pode ser obtido a partir de árgon, amónia, oxigénio ou azoto.

Vulgarmente são usados gases inertes na limpeza dos aderentes e os possíveis efeitos nos aderentes são:

- **Limpeza da superfície** - As espécies ionizadas podem ter capacidades energética para deslocarem certos contaminantes da superfície;
- **Degradação ou Ablação** - O plasma pode provocar degradação na superfície de materiais poliméricos e conduzir a remoção de resíduos da superfície;
- **Ligações cruzadas** - Criação de ligações cruzadas na superfície evitando a formação de filmes frágeis na interface;
- **Oxidação** - O plasma pode conduzir à criação de grupos carbonilos resultantes da oxidação da superfície do aderente. Isto pode promover a capacidade de molhabilidade do aderente pelo adesivo;
- **Polimerização e formação de filmes na superfície do aderente** - O plasma pode resultar numa polimerização dos constituintes do gás, formando, desta forma, um filme fino na superfície do aderente. Isto pode alterar as características da superfície do aderente podendo torná-la mais receptiva ao adesivo.

Quando o plasma é criado na presença de ar atmosférico, é designado de *corona*. Quanto aos efeitos que uma descarga de corona pode produzir na superfície do aderente, são em tudo semelhantes aos acima descritos. É particularmente aplicado a filmes finos de polímeros e laminados de compósitos.

Os tratamentos de superfície com chama produzem uma oxidação no aderente, produzindo grupos polares tais como -COOH, C=O, -OH, -NO₂, -NO₃ e NH₂. Este tratamento aumenta consideravelmente a adesão e foi aplicado com muitos bons resultados a compósitos do tipo fibra de carbono/PEEK e fibra de vidro/polipropileno [26]. As suas principais variáveis são o

tipo de gás, taxa gás/ar (oxigénio), o fluxo da mistura, o tempo de exposição e a distância entre a chama e o aderente.

Os lasers de excímeros têm sido usados para a produção de uma larga banda de radiação ultravioleta. Quando aderentes poliméricos são expostos a este tipo de radiação, o material absorve a radiação ultravioleta até uma espessura de $1\mu\text{m}$, provocando uma rápida cisão das ligações, e o material dissociado é então ejectado a elevada velocidade, dissipando o calor que eventualmente se possa ter formado. As variáveis deste processo incluem a densidade de energia, o comprimento de onda e o número de pulsos utilizados.

Deve ser salientada a importância dos tratamentos de superfície na tecnologia de ligação por adesivos, sua selecção e ter consciência dos benefícios associados à prática de tratamentos adequados, destacando-se os seguintes:

- Melhoramento do desempenho das juntas;
- Melhoramento da durabilidade da junta, em particular quando sujeita a ambiente agressivos;
- Aumento da vida de serviço do componente;
- Possibilidade de promover a ligação de aderentes por natureza *não coláveis*.

3.5.2 Métodos ou Sistemas de Aplicação dos Adesivos

A segunda etapa consiste na aplicação cuidada do adesivo sobre a superfície do substrato de modo a evitar a presença de bolhas de ar; o adesivo deverá apresentar uma boa fluidez e uma tensão superficial menor que a do aderente, o que se verifica sempre no caso de colagem de metais, que têm tensões superficiais da ordem de 500 a 600 ergs/cm², sendo a dos adesivos normalmente inferior a 50 ergs/cm² [17].

A selecção do método de aplicação de adesivos encontra-se intimamente ligada ao tipo de peça a ligar nomeadamente à sua dimensão e forma. O volume de produção e respectiva taxa determina, da mesma forma, a técnica mais adequada a utilizar na aplicação de um determinado adesivo. A

forma em que o adesivo se encontra quando da sua aplicação, pode ser considerada o critério de selecção secundário a ter em conta [26].

Como o desempenho de um adesivo depende não só do produto utilizado, mas também do modo como é aplicado, e partindo do pressuposto de que:

- O adesivo foi bem escolhido;
- A optimização geométrica e mecânica da junta também foi conseguida;
- Os tratamentos de superfície foram bem executados.

Resta ao utilizador, utilizando o adesivo, executar a colagem convenientemente.

De uma forma geral, os principais sistemas de aplicação podem ser classificados da seguinte forma: manuais, semi-automáticos e automáticos [26].

De acordo com a forma em que se apresenta o adesivo, diferentes métodos são recomendados para a sua aplicação, independentemente do sistema envolvido.

a) Adesivos sob forma líquida

Dos principais métodos de aplicação na forma líquida incluem-se os seguintes: aplicação com escova, escoamento, spray, rolo, sistema de guilhotina, sistema de *matriz*, sistemas de compressão e aplicação manual directa da embalagem.

A aplicação com escova é o método mais adequado para formas complexas ou para áreas limitadas de colagem sem uso de máscaras (ou áreas cobertas de forma a evitar a aplicação do adesivo), onde se verificam baixas taxas de aplicação e onde não é feito o controlo da espessura do adesivo.

A aplicação por escoamento é a mais adequada para superfícies planas onde se faz uso de um bico ou pistola permitindo uma distribuição mais uniforme do filme de adesivo.

A aplicação através de *spray* é aconselhável para grandes áreas com contornos graduais evitando o aparecimento de excedentes devido à baixa consistência desta forma de adesivo. As taxas de aplicação são normalmente elevadas e a espessura de filme de adesivo aplicado pode ser razoavelmente controlada. Contudo, existem problemas relacionados com higiene e segurança associados a esta técnica.

A aplicação com rolo utiliza adesivos fluídos enquanto que a aplicação com o sistema de *guilhotina* destina-se a adesivos mais espessos. Ambas as técnicas são adequadas a superfícies de maior dimensão e planas, sabendo que o sistema *guilhotina* permite um controlo excelente da espessura do filme aplicado através da distância da lâmina à peça.

O sistema de aplicação onde se faz uso de uma matriz consiste no preenchimento de porosidades com uma determinada matriz específica num écran, e geralmente é associada um aplicador sob a forma de bisnaga (figura 3.16). As superfícies largas podem ser cobertas através do escoamento do adesivo na superfície, com ou sem máscaras. As áreas do aderente ou substrato que não devem ser coladas não possuem qualquer porosidades de forma a que o adesivo não entre em contacto com ele.

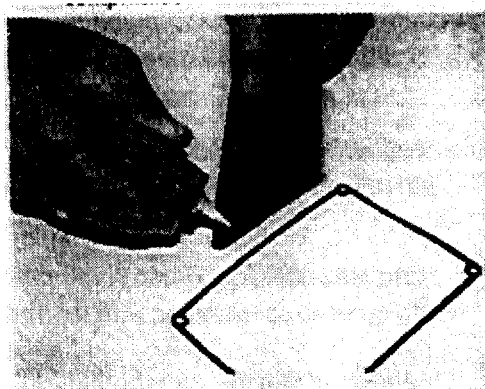


Figura 3.16 Aplicação manual: Bisnaga e espátula [26].

b) Adesivos sob a forma de pó

Quando os adesivos se encontram sob a forma de pó podem ser aplicados através da sua deposição em superfícies pré-aquecidas ou por mergulho das superfícies pré-aquecidas no próprio pó. Ambos os métodos asseguram uma cobertura uniforme. É possível aplicar adesivos termoplásticos através da sua fusão numa pasta ou líquido e proceder à aplicação adequada à nova forma do adesivo assumida.

c) Adesivos sob a forma de filme

Os adesivos sob a forma de filme são os mais fáceis de aplicar. Permitem um óptimo controlo de espessura, apresentando procedimentos de limpeza de superfície simplificados, um manuseamento em segurança e uma redução de desperdícios. Estes filmes podem ser aplicados com ou sem suporte/aplicador. São preferencialmente adequados a superfícies planas ou partes com curvaturas simples ou graduais. Superfícies com contornos severos ou complexos podem promover o aparecimento de vincos e má adesão quando se aplica fitas deste tipo.

d) Adesivos sólidos - Fusíveis

Finalmente, os adesivos sob a forma sólida, designados de *hot-melt*, são aplicados através de sistemas de aquecimento adequados, fazendo uso de bicos ou pistolas de aplicação (figura 3.17).

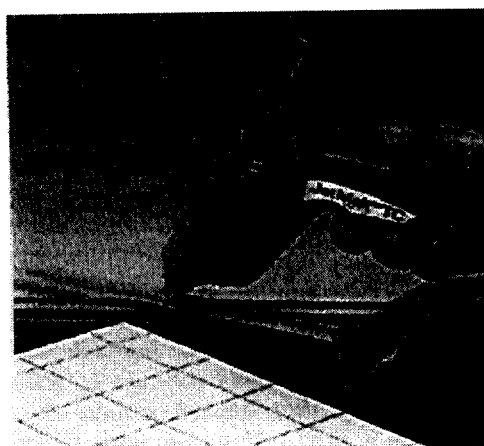


Figura 3.17 Aplicação utilizando pistola: aplicação de *hot-melts* [26].

3.5.3 Cura dos Adesivos

A última etapa consiste na cura do adesivo, onde o adesivo vai endurecer e estabelecer fortes ligações com a superfícies a unir. Para que ocorra um contacto íntimo interfacial, o adesivo deve encontrar-se no estado líquido com baixa viscosidade, e para que a junta cumpra os seus objectivos, esta terá de ser rígida e resistente.

A cura dos adesivos líquidos pode ser efectuada por vários processos [1]:

- **Endurecimento por remoção do solvente ou do meio dispersante** - Os adesivos já se encontram polimerizados, mas estão dissolvidos ou dispersos num meio orgânico ou em água;
- **Arrefecimento** - Os termoplásticos fundem quando aquecidos e, quando são arrefecidos, solidificam ;
- **Reacção química** - É feita quando a polimerização se dá no próprio local.

Os adesivos que já se encontram devidamente polimerizados, não têm que sujeitar a estes processos.

Os adesivos de epóxido são, como já referido anteriormente, os mais usados, devido às suas boas propriedades.

A reacção de endurecimento tem como consequência que as cadeias moleculares originem uma rede tridimensional, cuja massa e viscosidade via aumentando até se formar uma rede infinita. Atinge-se assim o ponto de gelificação, o polímero deixa de fluir e solidifica. A gama de temperaturas a que se dá a gelificação, influencia muitas das características importantes da ligação final resultante. A temperatura de cura, assim como as proporções de resina e de endurecedor, são condicionados pelas características dos produtos a utilizar [17].

Os adesivos de epóxido solidificam à temperatura ambiente, sendo necessário procurar o melhor compromisso temperatura-tempo. Uma aceleração da velocidade de reticulação (por exemplo, a cura durante uma hora a 60°C) poderá, em alguns adesivos, favorecer as propriedades de adesão [10].

Na formulação industrial dos adesivos encontram-se determinados aditivos (plasticizantes, anti-oxidantes, anti-sedimentantes, catalisadores, etc.) que influenciam as características químicas dos adesivos e as propriedades mecânicas da junta.

É desejável obter uma ligação adesiva uniforme e fina com uma espessura compreendida entre 0.005 a 0.5mm. São utilizados três métodos básicos para controlar a espessura do adesivo:

- **Calços mecânicos ou espaçadores** - Os calços são geralmente de metal e são removidos da estrutura após cura enquanto que os espaçadores podem ser integrados na estrutura colada;
- **Filme de adesivo** - Estes filmes tornam-se bastante viscosos durante o ciclo de cura de forma a evitar que o adesivo escorra entre as juntas;
- **Reforços** - Uma vez que permanecem sempre sólidos permitem manter o espaçamento requerido.

A aplicação de pressão é sempre necessária no processamento de colagem, de forma a manter os substratos ligados até que o adesivo se encontre curado. Os principais sistemas de pressurização são:

- **Prensas pneumáticas ou hidráulicas** - Prensas mecânicas habitualmente com pratos aquecidos (figura 3.18);
- **Autoclaves e sacos de vácuo** - No primeiro sistema é aplicada uma pressão isostática na presença de ar ou gás inerte, e nos sacos de vácuo aplicam uma pressão que pode variar até à atmosfera, permitindo a eliminação de bolhas/vazios criadas durante a cura na interface colada (figura 3.19).

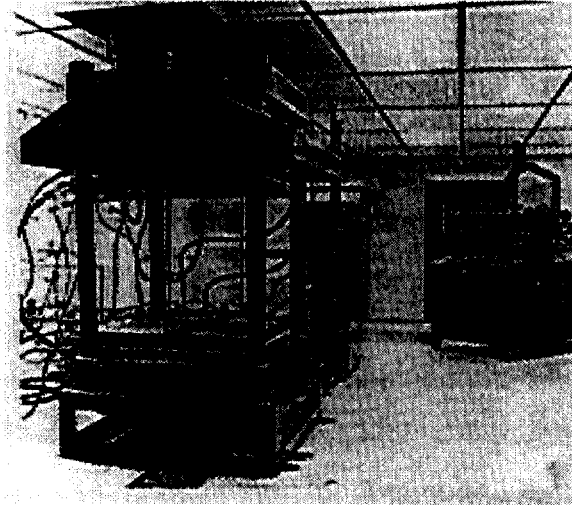


Figura 3.18 Prensa mecânica [26].

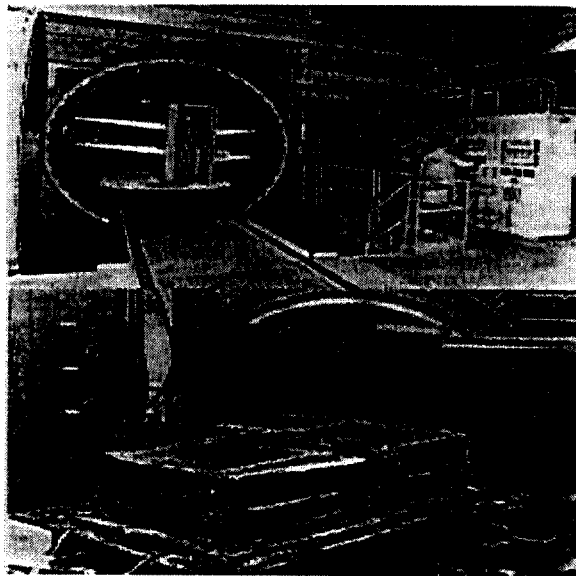


Figura 3.19 Autoclave e sistema de saco de vácuo [26].

4 DURABILIDADE DE JUNTAS EM CONDIÇÕES AMBIENTAIS VARIADAS

A estimativa da durabilidade de juntas coladas quando sujeitas simultaneamente a cargas e ambientes adversos é da maior importância. No caso particular dos epóxidos, a exposição a ambientes húmidos e temperaturas relativamente elevadas conduz à redução das suas propriedades físicas e mecânicas devido à formação de microcavidades e ao efeito plasticizante da humidade [27,28].

4.1 INFLUÊNCIA DA HUMIDADE E DA PRESENÇA DA ÁGUA

Ao longo dos últimos anos surgiram diversas publicações sobre a influência da humidade nas juntas adesivas [11, 12, 25, 27-35].

Na presença da água, a resistência química das juntas diminui significativamente, não existindo, no entanto, uma teoria geral que justifique o seu modo de actuação na deterioração da junta. Segundo Schmidt et al. [25], essa deterioração estará relacionada com a quebra de ligações de hidrogénio, existente entre o metal e o adesivo, na camada limite. Para esses autores as juntas não completamente curadas não apresentam uma diminuição tão drástica de adesão, como acontece nas juntas completamente curadas. Tendo em conta essa última justificação, de que a causa é devida às ligações de hidrogénio, cai-se numa contradição.

Surgiu então a hipótese de que a acção da água poderá envolver a quebra de ligações covalentes que se tenham formado durante o processo de cura [32], confirmada depois por Kwei [36]. Após ter realizado testes de recuperação das juntas, colocando-as em ambientes secos onde era possível voltarem a formar-se ligações de hidrogénio, verificou que a resistência das juntas não foi completamente recuperada [36]. Tais pressupostos implicam a hidrólise de determinadas ligações covalentes da estrutura epóxida. Não há confirmação ainda sobre onde ocorre essa hidrólise, no entanto, para Kwei, a maior probabilidade recai sobre a hidrólise das ligações C-N formadas pela reacção entre os grupos epóxido e os grupos amina aromáticos.

Para Johncock et al. [37], a água plastifica as resinas de epóxido resultantes numa diminuição da sua Tg, devido à diminuição da reticulação do adesivo quando sujeitos a esses ambientes.

A presença da humidade provoca elevados níveis de porosidade, permitindo o agrupamento de grupos de moléculas de água, que vão actuar como plasticizantes e como indicadores de fendas na estrutura do adesivo, fazendo destruir a sua integridade física e mecânica [32].

Dellolis et al. [38] e Kerr et al. [39,40] defendem que ocorre migração das moléculas de água na interface metal/adesivo, onde se absorvem preferencialmente devido a aí poderem existir mais grupos funcionais por reagir ou parcialmente reagidos, provocando o deslocamento do adesivo dessa superfície. A perda da resistência é então interpretada em termos da quebra de ligações de hidrogénio naquela região.

Segundo Falconer et al. [41], o aumento da concentração de moléculas de água na camada limite é o responsável pelo aumento da concentração de tensões nas juntas, quando expostas a ambientes húmidos, sendo este o factor responsável pela rotura das juntas.

Em relação à absorção de água em epóxidos reticulados com aminas, Bellenger et al. [42] consideram duas aproximações distintas: a primeira aproximação *volúmica*, que despreza a existência de interacções específicas entre a água e locais hidrofílicos da rede. Propõe antes que a concentração de equilíbrio de água é principalmente governada pelo volume livre disponível ou que as moléculas de água ocupam essencialmente microcavidades ou outros defeitos morfológicos que podem oferecer caminhos preferenciais para a sua difusão. A segunda aproximação *de interacção* que sugere que as moléculas não estão aleatoriamente distribuídas na rede, nem concentradas nos defeitos morfológicos, mas ligadas por fortes ligações de hidrogénio a alguns locais hidrofílicos, principalmente hidróxilos ou aminas.

No entanto, pode haver interdependência no que toca a contribuição dessas duas aproximações. Na aproximação *volúmica*, o comportamento do sistema água/epóxido é principalmente controlado pelo estado físico do polímero, enquanto que na aproximação *de interacção* é a estrutura química que representa o papel principal.

No que se refere à morfologia de rotura observada em situações de ambientes húmidos, todos os autores parecem defender a teoria de que a rotura é adesiva, apesar de Bikerman [43] defender ser impossível obter uma rotura perfeitamente adesiva.

Sob condições secas, segundo Schmidt [25], a falha dos sistemas metal/polímero ocorre geralmente coesivamente no interior do adesivo. Mas, se a junta for exposta à água durante muito tempo, dá-se uma rotura na interface entre o metal e o polímero, isto é, uma rotura adesiva. Este autor conclui que a água reduz a resistência da interface adesivo/metal, na medida em que, associado à mudança do tipo de rotura com as condições ambientais, se verificou uma diminuição da resistência adesiva. A água pode entrar na junta, ou por difusão através da matriz de epóxico, ou transportada ao longo da interface metal/adesivo.

Para explicar este fenómeno, têm sido propostos vários mecanismos, não existindo nenhum que isoladamente explique o comportamento observado. De entre eles, dois são resumidamente descritos [2]:

- Deslocamento do epóxico pela água: Em condições húmidas a água chega invariavelmente à região interfacial formando ligações de hidrogénio com a superfície metálica, após romper as ligações existentes entre o metal e o epóxico. O resultado é o deslocamento do adesivo de epóxico da superfície do metal e a formação de uma fraca camada de água na interface reduzindo a resistência do sistema. À superfície aparece uma molécula contendo um átomo de hidrogénio e um átomo de oxigénio electronegativo, como mostra a figura 4.1. A superfície apresenta-se fortemente polarizada e vai interagir com os grupos polares X da resina de Epóxico, como ilustra a figura 4.2.
- A água pode reduzir a resistência da camada oxidada do metal hidratando-a, podendo também diminuir a resistência da junta. Esta hidratação é prejudicial porque os hidratos resultantes, exibem geralmente má adesão, actuando como uma camada fraca.

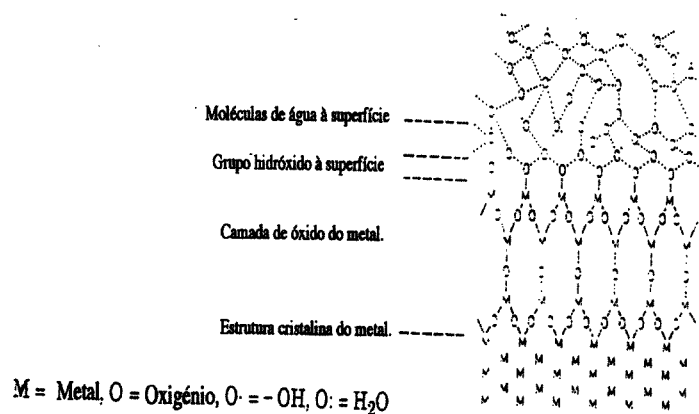


Figura 4.1 Representação esquemática da camada superficial (de óxidos) à superfície do metal [23].

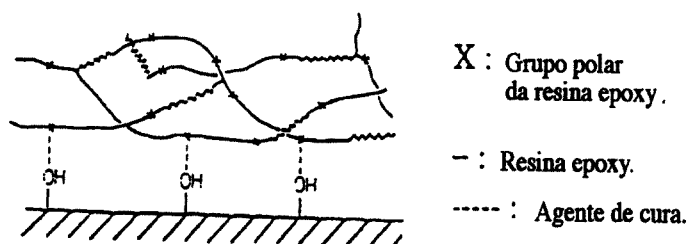


Figura 4.2 Representação esquemática da interação entre a resina de epóxi e o metal [23].

4.2 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

O processo de degradação é acelerado, se o ambiente húmido, no qual a junta adesiva está inserida, se encontrar a temperaturas moderadamente elevadas. Alguns estudos [27, 28,38,41] sobre a influência simultânea da humidade e da temperatura, confirmaram essa aceleração do processo. A temperatura acelera a permeação das moléculas de água junto à camada limite superficial [41].

Outros autores [12, 43, 44] indicam dois factores responsáveis pela durabilidade das juntas a temperaturas elevadas: a estabilidade térmica do adesivo no seu interior e a estabilidade térmica do adesivo na camada limite.

5 CONCEPÇÃO DE JUNTAS ADESIVAS

É essencial que as juntas sejam projectadas de modo a que os esforços sejam dirigidos ao longo das direcções onde o adesivo apresenta maior resistência.

Se a colagem for utilizada como um processo alternativo, por exemplo, à soldadura, tornar-se-á necessário efectuar algumas alterações no projecto da estrutura.

As tensões nominais mais importantes a que uma junta colada são submetidas são as tensões de corte, de tracção, de arrancamento e de clivagem (figura 5.1). Esses esforços referidos baseiam-se no seguinte [2]:

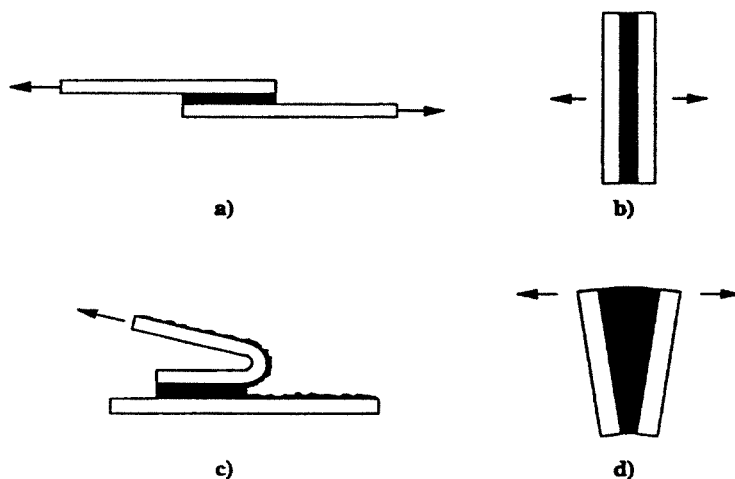


Figura 5.1 Tipos de solicitações nas juntas coladas [2].

- Corte: A tensão é paralela ao plano da junta, uniforme através de toda a zona colada. Deste modo toda a área colada resiste ao mesmo tempo à solicitação. É uma junta que, por ser económica e resistente à rotura, é muito utilizada (figura 5.1(a)).

- **Tracção:** Na solicitação à tracção as forças são perpendiculares ao plano da junta e estão, por isso, uniformemente distribuídas ao longo da área de colagem (figura 5.1(b)). Deste modo todas as partes da junta se encontram sob a mesma tensão. É necessário que os aderentes sejam espessos de modo a não sofrerem grandes alterações quando sujeitos à carga.
- **Arrancamento:** Para este tipo de tensão existir é necessário que pelo menos um dos aderentes seja flexível (figura 5.1(c)). Essa tensão induz o aparecimento de uma elevada tensão na zona limite da junta e, a não ser que a junta seja larga ou a carga pequena, origina a rotura. Este tipo de concepção de junta deve ser evitada sempre que possível.
- **Clivagem:** Resulta da excentricidade da carga de tracção em relação ao eixo da junta. Ao contrário dos outros casos, a tensão está concentrada num extremo da junta (figura 5.1(d)). É necessária uma área de colagem bastante grande para acomodar esta carga, o que torna a junta menos económica.

Na prática, uma estrutura colada tem muitas vezes de suportar uma combinação destas solicitações. Por exemplo, no caso das juntas de sobreposição verifica-se, em alguns casos, a distorção dos aderentes durante o carregamento por introdução de tensões secundárias (figura 5.2). A justificação para esse comportamento deve-se ao não-alinhamento da junta em relação ao eixo de simetria [2]. Primeiro, sob solicitação moderada, ocorre a distorção da junta porque esta tende a mover-se numa direcção normal à carga. Nessa altura, é introduzida tensão de clivagem. Ao ser aplicada a carga máxima, ocorre uma clara dobragem do material nas extremidades da ligação. São então introduzidas tensões de arrancamento. Estas tensões de arrancamento e de clivagem, são designadas de tensões secundárias, porque resultaram da distorção do material quando sujeito inicialmente a um esforço de corte.

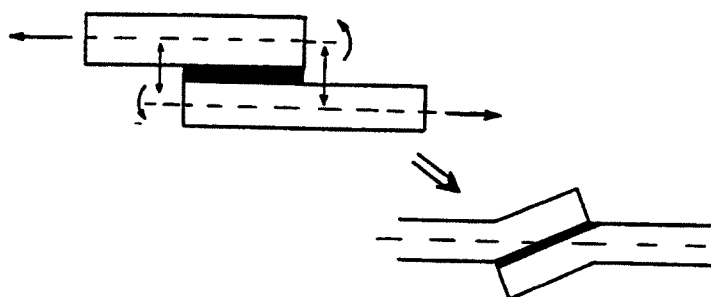


Figura 5.2 Distorção causada pela carga aplicada [10].

Para resolver essa situação, na concepção da junta, é preciso garantir o alinhamento da junta com a carga aplicada quer utilizando aderentes mais rígidos junto à zona de colagem de modo a minimizar a clivagem, ou ainda, flexibilizando as extremidades da colagem de modo a minimizar o arrancamento.

Na prática, utilizam-se algumas formas de sobreposição e de topo-a-topo (figura 5.3).

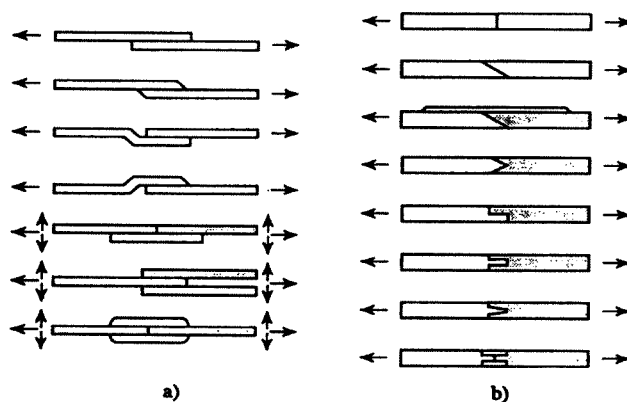


Figura 5.3 Juntas adesivas e respectivas solicitações para as quais foram concebidas [2].

Além da determinação da forma da junta, a concepção envolve as fases de selecção do adesivo e do dimensionamento da junta [44].

A selecção do adesivo, função do tipo de materiais a ligar, implica o conhecimento de comportamento mecânico do adesivo curado (figura 5.4) bem como o modo como se comporta perante condições ambientais e ainda a percentagem de propriedades que retém num determinado período de tempo [45].

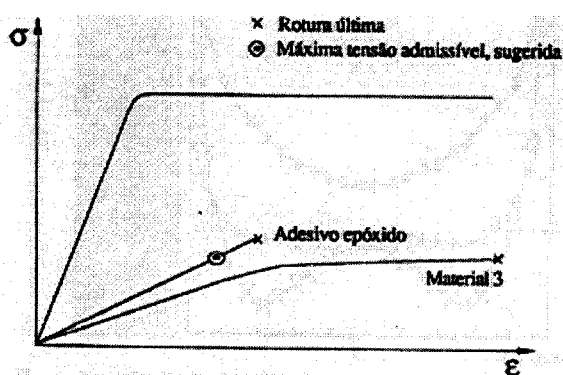


Figura 5.4 Relação σ/ϵ típicas para alguns materiais usados na construção de juntas adesivas [45].

O dimensionamento seria fácil se se dividisse a carga (corrigida com um factor de segurança) que a junta tem de suportar pelo valor da resistência ao corte do adesivo, o que daria a área de colagem requerida. Dividindo a área pela largura teríamos o comprimento de sobreposição. Tal não é possível, dado que acima de um certo comprimento de sobreposição não há aumento da resistência ao corte. Por outro lado, o aumento de espessura do adesivo não introduz necessariamente o aumento de resistência ao corte ou arrancamento do adesivo (ver figura 3.8).

Pode-se então estabelecer critérios de dimensionamento em relação à ruptura no adesivo ou no componente. Para que se ocorra a ruptura no adesivo podemos dimensionar de acordo com os três critérios [46]:

- A área da junta deve ser tal que:

$$\tau_{adm} > P / (L * S) \quad (5.1)$$

em que τ_{adm} é a tensão de corte máxima admissível no adesivo, L a largura da junta, S o comprimento de sobreposição e P a carga aplicada.

- O adesivo tem suficiente ductilidade para absorver a deformação máxima paralela ao plano do adesivo (ver figura 5.4).

Para a rotura se dar nos componentes, pode-se usar o critério que, para uma dada carga aplicada P, a tensão máxima admissível no componente não deve exceder o valor dado pela equação (5.2) [44].

$$\sigma_{com} = (P/Lt)(1+3(t+t_{ad})(C-S)/tC) \quad (5.2)$$

onde P é a carga aplicada, t a espessura dos aderentes, t_{ad} a espessura do adesivo, L a largura dos aderentes, S o comprimento de sobreposição, C o comprimento total e σ_{com} a tensão no componente.

Hoje dia, é muito utilizado a técnica de elementos finitos para a determinação da distribuição de tensões ao longo da zona de ligação. Na figura 5.5, é apresentado os resultados em termos de distribuição de tensões, e foi determinado usando elementos finitos quadrangulares de oito nós, isoparamétricos e quadráticos da família de *Serendipity*.

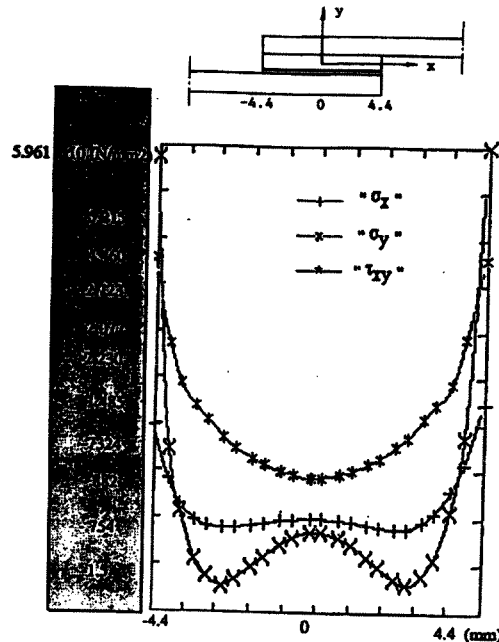


Figura 5.5 Variação das tensões σ_x , σ_y e τ_{xy} na interface, ao longo do comprimento de sobreposição [45].

5.1 CONCENTRAÇÃO DE TENSÕES

Um parâmetro com muita importância na resistência das juntas adesivas é a concentrações de tensões na junta durante o carregamento. Tanto o nível como a distribuição de concentrações das tensões variam com a diferença de rigidez entre o adesivo e o aderente, aumentando com essa diferença, variando também com a geometria da junta que está a ser solicitada.

Na figura 5.6 estão representadas análises de distribuição de tensões mecânicas desenvolvidas nas juntas coladas [12,30]. As configurações das juntas topo-a-topo (figura 5.6(a)), e de sobreposição (figura 5.6(b)) são as mais adequadas a aplicações estruturais de elevada resistência para as quais prevalecem as tensões de tração e de corte. Quando pretendemos aumentar a resistência da junta de sobreposição, devemos aumentar a largura dos aderentes e não o comprimento de sobreposição [14]. Segundo Shields [14], uma correlação entre a resistência ao corte *versus* a relação entre o comprimento de sobreposição

e a espessura do aderente (S/t) poderá expressar a diminuição da tensão de rotura com a sobreposição de colagem.

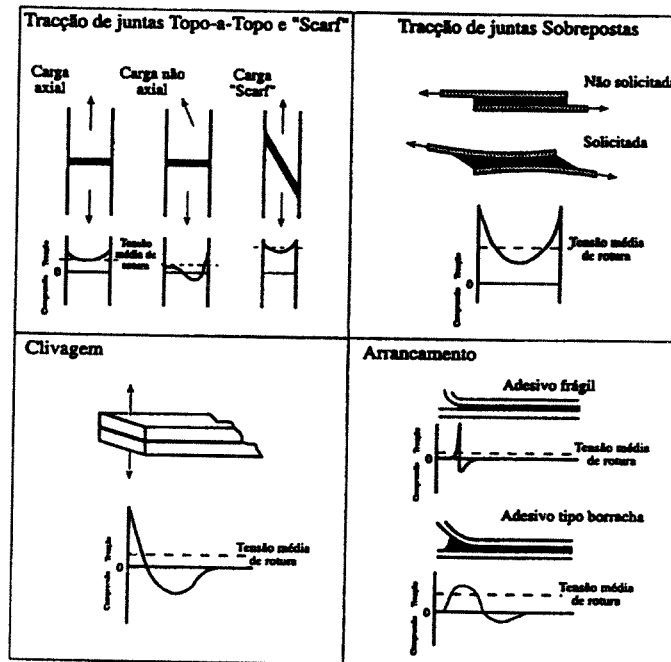


Figura 5.6 Distribuição de tensões para os diferentes tipos de geometrias de juntas [2].

Guess et al. [48] nos seus estudos experimentais e numéricos verificou que as juntas falham essencialmente devido à concentração de tensões de arrancamento em vez de tensões de corte e a sua resistência é controlada pela interface adesivo/aderente, resultando a ocorrência de rotura adesiva nas extremidades da colagem e de rotura coesiva no interior do adesivo.

Fargette et al. [35] estudaram uma geometria da junta do tipo entalhe, designada por *tenon-mortaise*, que evidenciou bons resultados em relação à concentração de tensões. Esta geometria possui um eixo de simetria longitudinal que limita, durante o ensaio de tracção simples, o desenvolvimento de flexões *parasitas*, permitindo uma melhor distribuição e valores inferiores das tensões, em relação às juntas de sobreposição. É preciso salientar que estes resultados estão de acordo com o facto da rotura se iniciar nas zonas limite de colagem devidas às tensões de arrancamento e de corte nessas zonas.

Alguns estudos experimentais mostraram a ocorrência de rotura adesiva, isto é, na camada limite do adesivo, por ser a zona onde se verifica a maior descontinuidade nas propriedades mecânicas e a maior concentrações de tensões.

O uso de adesivos muito elásticos podem reduzir bastante o nível de tensões [12,34], pois esses materiais tendem a relaxar e suavizar as tensões na zona de ligação adesiva. A introdução de defeitos no material adesivo (como numa esponja), que aumenta a deformação do adesivo durante a solicitação, é outra técnica de distribuir as tensões na zona adesiva.

5.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Com a acessibilidade dos meios de cálculo cada vez mais poderosos a preços cada vez mais reduzidos, passou a haver um maior interesse na utilização dessa ferramenta na investigação de juntas adesivas. A sua utilização no estudo deste tipo de ligação mecânica iniciou-se há cerca de trinta anos, passado mais de dez anos após a sua introdução como instrumento de análises estruturais [5].

A grande vantagem desta técnica relativamente a métodos analíticos é que não necessita de simplificações excessivas na análise de juntas adesivas. A indisponibilidade de meios computacionais suficiente ou o custo da análise, podem implicar a utilização de hipóteses simplificativas [5].

Os resultados numéricos permitem explicar a morfologia de rotura nas juntas em função da concentração de tensões, segundo Correia [2]. No seu estudo, considera que a rotura adesiva resulta da actuação das tensões de arrancamento na interface adesivo/substrato (tensões normais e/ou paralelas à superfície de colagem), e que a rotura coesiva resulta da actuação das tensões de corte no meio do adesivo.

As análises pelo elemento finitos podem dividir-se em análises lineares e análises não lineares onde se incluem não-linearidades geométricas e materiais.

Diversos autores [49-51] publicaram obras sobre este assunto, sendo o artigo de Wooley e Carver [48], publicado em 1971, um dos primeiros trabalhos conhecidos relacionados com a utilização do método dos elementos finitos no estudo de juntas coladas [5]. Estes autores

fizeram análises lineares em juntas de sobreposição simples utilizando elementos quadriláteros de deformação constante, e o problema foi tratado considerando um estado plano de tensão. Utilizaram-se duas camadas de elementos para simular o adesivo, sendo assim possível estudar a variação de tensões ao longo da sua espessura.

Guess et al. [53] fizeram análises semelhantes às de Wooley e Carver [52], em que utilizaram uma malha mais refinada, o que permitiu identificar significativos gradientes de tensões ao longo da espessura do adesivo.

A utilização de elementos triangulares de deformação constante para um estado plano de tensão foi feito por Adams e Peppiat [54]. Consideraram, neste estudo, que o adesivo fazia um ângulo recto com o substrato ou com uma inclinação de 45° , com o objectivo de estudar a distribuição das tensões de corte no adesivo. Na figura 5.7 representa-se as distribuições de tensões de corte no adesivo para diferentes geometrias analisadas. As linhas a traço interrompido, fora da zona de sobreposição, evidenciam uma zona adicional de transferência de carga. É notória nesta figura o decréscimo da tensão da corte máxima com o aumento do tamanho da região de adesivo exterior à zona de sobreposição.

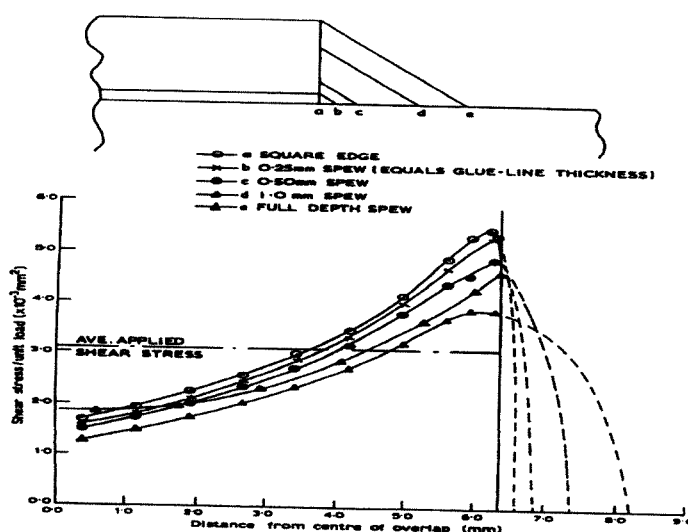


Figura 5.7 Distribuição de tensões de corte na camada do adesivo [7].

Com o objectivo de modelar a camada de adesivo, vários autores desenvolveram elementos finitos especiais, como é o caso de Barker e Hatt [55] que desenvolveram um elemento de quatro nós para análises bidimensionais de juntas de sobreposição e juntas em chanfro, que se comporta como uma mola que trabalha à tracção e ao corte e cuja regidez depende da espessura do adesivo.

Rao et al. [56] desenvolveram um elemento isoparamétrico de seis nós com características semelhantes às do elemento apresentado por Barker e Hatt [55], em que as tensões normais longitudinais são consideradas nulas.

No que refere às análise não-lineares, Cooper e Sawyer [57] foram os primeiros a estudar o efeito da não-linearidade. Nas suas análises bidimensionais com elementos quadrangulares e estado plano de deformação, incluíram o efeito não-linear geométrico, relacionado com a rotação da junta, considerando os materiais linear elásticos.

Adams et al. [58] apresentaram um estudo sobre as juntas de sobreposição dupla, onde os substratos são considerados elásticos e não é contemplada a não-linearidade geométrica. Para esses autores, o comportamento de cedência de muitos materiais poliméricos, onde incluem as resinas de epóxidos, depende das componentes hidrostática e de desvio das tensões. Uma consequência deste fenómeno é a diferença entre as tensões de cedência em tracção e compressão uniaxiais. Este comportamento foi incluindo nesta análise considerando um critério de cedência parabolóide da forma

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 2(|\sigma_c| - \sigma_t)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = 2|\sigma_c|\sigma_t \quad (5.2)$$

em que σ_1 , σ_2 e σ_3 são as tensões principais e σ_c e σ_t são, respectivamente, as tensões de cedência à compressão e à tracção. Este critério de cedência foi proposto por Raghava et al. [59] e foi demonstrado, por esses autores, aplicar-se a vários materiais poliméricos amorfos para uma vasta gama de estados de tensão. Quando $|\sigma_c| = \sigma_t$, o critério reduz-se ao critério de Von Mises. Como conclusões deste estudo, destaca-se a necessidade de considerar o modelo elasto-plástico do adesivo para se conseguir obter uma boa previsão da carga de

rotura das juntas. Permitiu ainda concluir, em trabalhos posteriores que, no caso de adesivos dúcteis, o aumento de carga aplicada à junta origina a plastificação do adesivo nas zonas de concentração de tensões e uma consequente redistribuição das tensões ao longo da zona de sobreposição, consequentemente uma maior uniformização das tensões ao longo da zona de sobreposição e uma maior resistência da junta.

As características consideradas importantes na modelação de juntas adesivas de sobreposição simples são [5]:

- Variação das tensões ao longo da espessura do adesivo;
- Não-linearidade geométrica devido à rotação da junta;
- Não-linearidade material dos substratos e do adesivo;
- Análise tridimensional (a utilização de modelos bidimensionais, normalmente considerando um estado plano de deformação, é uma das simplificações habituais);
- Continuidade das tensões nas interfaces aderente-adesivo.

5.3 MÉTODOS ANALÍTICOS

Na modelação de juntas adesivas, apesar de serem quase sempre impraticáveis na solução de problemas com geometrias e condições fronteiras complexas, são também utilizados os métodos analíticos. No entanto, uma solução analítica tem a vantagem de permitir fazer estudos paramétricos com elevada eficiência, considerando variações de geometria e de propriedades dos materiais [5].

Alguns autores [60, 61] mostraram a existência de singularidades na ligação entre materiais diferentes. A figura 5.8 mostra o conceito de singularidades de tensões para o caso de juntas de sobreposição simples. Na vizinhança do ponto de singularidade, isto é, para $r \rightarrow 0$

$$\sigma_{ij} \propto 1/(r)^\alpha \quad (5.3)$$

em que σ_{ij} são as tensões, r é a distância a partir do ponto singular e α é um número real positivo ($0 < \alpha < 1$) que representa a ordem da singularidade. Este parâmetro depende da geometria local e das propriedades dos materiais mas é independente da geometria global e do carregamento.

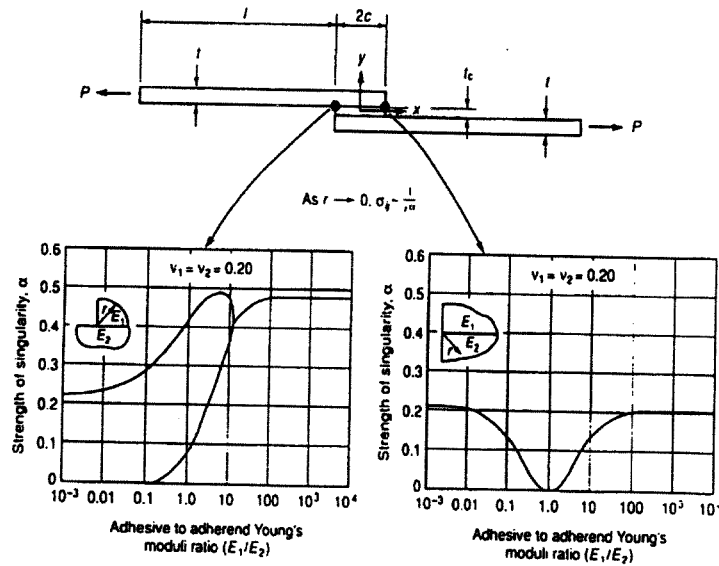


Figura 5.8 Singularidade das tensões nos cantos das interfaces da junta de sobreposição simples [5].

Algumas soluções descritas na literatura, relacionado com as juntas de sobreposição simples, são apresentados, resumidamente, e divididos em análises lineares e não-lineares [5].

A análise simplificada linear considera que os substratos são rígidos e que a deformação do adesivo só acontece por corte, porque, na maioria das juntas coladas, o módulo de elasticidade dos substratos é maior do que do adesivo. A deformação de uma junta de sobreposição simples considerando os substratos rígidos, representa-se na figura 5.9.

A tensão de corte no adesivo é dada por uma equação, semelhante ao verificado por Findlater [46] (ver equação (5.1)).

A tensão tractiva no substrato decresce linearmente de A para B até se anular.

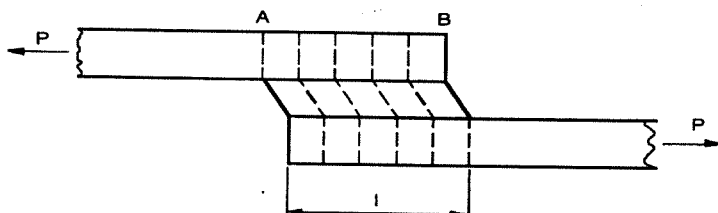


Figura 5.9 Representação esquemática da deformação da junta de sobreposição simples considerando os substratos rígidos [5].

Para Volkersen [62], os substratos deformam-se apenas em tracção e o adesivo deforma-se em corte (figura 5.10). A tensão tractiva no substrato é máxima no ponto A e decresce até se anular no ponto B. Consequentemente, a deformação é maior em A do que em B e sofre um decréscimo ao longo do comprimento l .

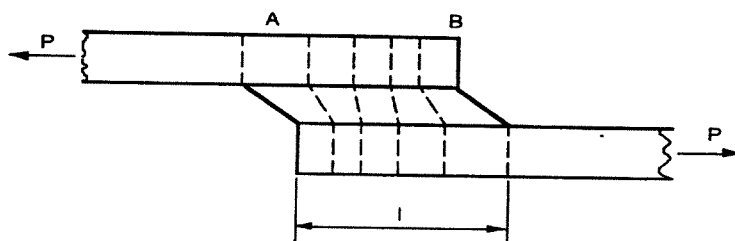


Figura 5.10 Representação esquemática da deformação da junta de sobreposição simples na análise de Volkersen [5].

Na figura 5.11(a) esquematiza-se a zona de sobreposição de uma junta não deformada e na figura 5.11(b) é representado um elemento dx da junta deformada segundo Volkersen [62].

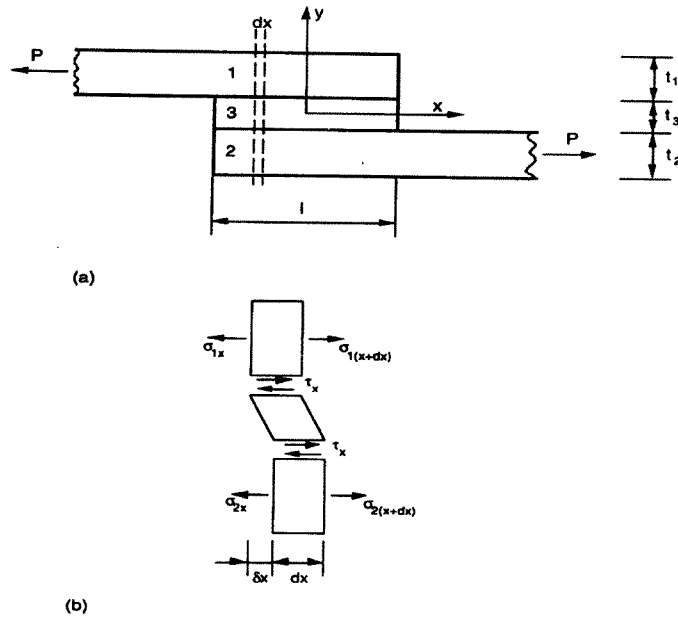


Figura 5.11 Junta de sobreposição simples não deformada (a); Elemento dx da junta deformada segundo Volkersen [5].

O efeito de flexão devido ao desalinhamento das forças foi proposto, pela primeira vez, na análise de Goland e Reissner [63] (ver figura 5.12). Utilizaram um factor para relacionar o momento flector no substrato e na extremidade da zona de sobreposição M_0 com a carga aplicada P . Considerando os dois substratos com a mesma espessura t ($t = t_1 = t_2$) e desprezando a espessura do adesivo, a relação é dada por

$$M_0 = KPt/2 \quad (5.4)$$

Se a carga aplicada na junta for muito pequena, não há rotação da junta e a linha de acção da carga passa perto da extremidade dos substratos, como ilustrado na figura 5.12(a). Se a carga aumentar, a zona de sobreposição roda, a linha de acção da força aproxima-se do plano médio dos substratos, reduzindo assim o valor do momento flector M_0 , conforme mostra a figura 5.12(b).

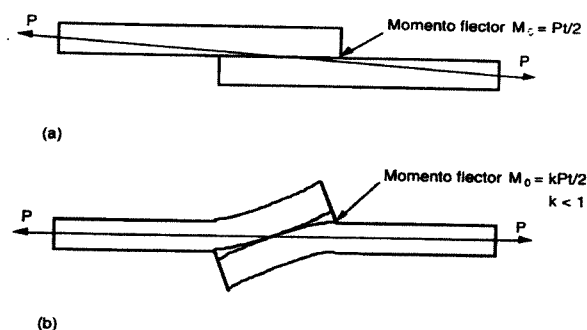


Figura 5.12 Deformação de flexão numa junta de sobreposição simples. a) junta não deformada; b) junta deformada [5].

Depois de muita discussão, onde apontaram alguns erros à solução apresentada por Goland e Reissner e propuseram correcções para a distribuição de tensões normais σ_{yy} , em 1989, Carpenter [64], no seu artigo, demonstra que as soluções apresentadas por esses autores estão correctas, apesar de ter encontrado erros em algumas equações do artigo original.

A distribuição de tensões de corte e normais no adesivo, em apenas metade da zona de sobreposição, segundo as soluções de Volkersen [62] e Goland e Reissner [63], para uma junta de alumínio e adesivo de epóxico são apresentadas nas figuras 5.13 e 5.14, respectivamente. Foram utilizadas três valores de carga aplicada correspondente ao factor de momento flector k de 0.97, 0.55 e 0.32. Constatou-se a diminuição das tensões máximas normalizadas com o aumento da carga aplicada (ou diminuição do factor k). Para $k=0.97$, (carga aplicada muito baixa), a tensão de corte, segundo Goland e Reissner, aproxima-se da solução de Volkersen.

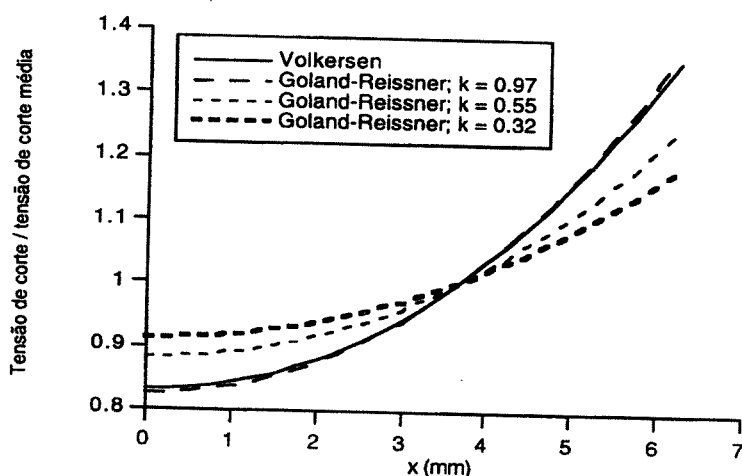


Figura 5.13 Distribuições de tensões de corte segundo os modelos de Volkersen e Goland e Reissner.

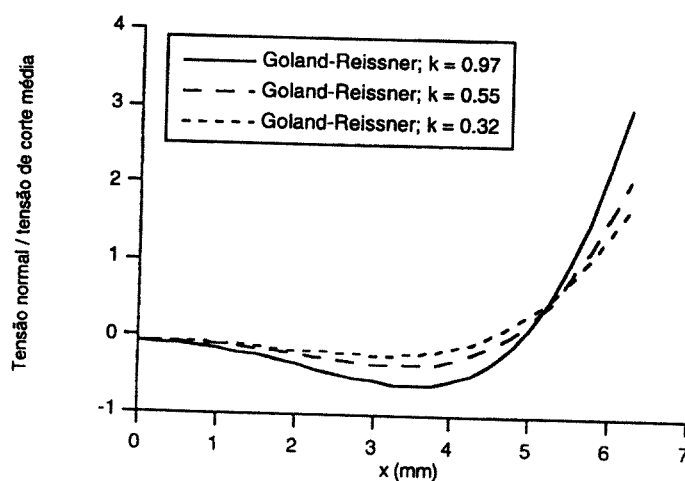


Figura 5.14 Distribuições de tensões normais segundo os modelos de Volkersen e Goland e Reissner.

Todos os autores referidos anteriormente, fizeram um estudo considerando como hipótese um estado plano de tensão, isto é, não consideraram as tensões na direcção da largura da junta. Este problema relacionado com as tensões transversais na direcção da largura da junta é tratado no trabalho de Adams e Peppiat [65]. Segundo estes autores, existem tensões de corte

no adesivo e tensões normais nos substratos, a actuar perpendicularmente à direcção de aplicação da carga, que resultam de deformações devidas ao efeito de Poisson nos substratos (figura 5.15).

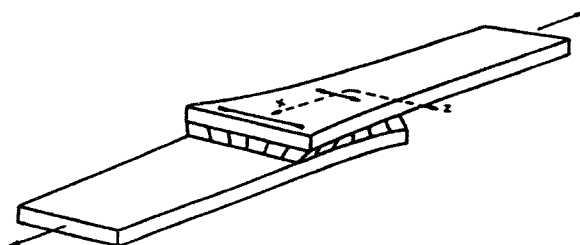


Figura 5.15 Efeito de Poisson na deformação na junta de sobreposição simples [7].

Na prática o adesivo impede a contracção completa do substrato, provocando o aparecimento de tensões laterais tractivas num substrato e tensões laterais compressivas no outro substrato, não existindo tensões laterais a meio do comprimento no caso da junta ser simétrica.

Os métodos analíticos apresentados, anteriormente, consideram a linearidade na análise de juntas adesivas. Convém salientar a importância de se considerar a não-linearidade na análise dessas juntas, na medida em que, muitos dos adesivos utilizados, como é caso do adesivo de epóxico modificados com borrachas, apresentam uma elevada ductilidade. A utilização desses adesivos pressupõe que se compreenda o comportamento da junta quando as tensões do adesivo ultrapassam a zona elástica [5]. Também, a possibilidade de os substratos plastificarem devido ao facto dos adesivos actuais serem bastantes resistentes, constitui uma hipótese. Se os substratos plastificarem, a zona de sobreposição rodará mais facilmente devido às cargas aplicadas não-colineares. Isto conduz a uma maior diminuição do factor k de Goland e Reissner do que aquela que aconteceria caso os substratos se mantivessem elásticos, com a consequente redução das tensões. A rotação da zona de sobreposição introduz uma não-linearidade geométrica.

Hart-Smith [66] apresentou um modelo, que é uma evolução das análises de Volkersen e Goland e Reissner, onde o adesivo é considerado elástico/perfeitamente plástico, como

ilustra a curva tensão de corte/deformação apresentada na figura 5.16. A energia de deformação no caso de juntas de sobreposição dupla, segundo o autor, é a única variável significativa a afectar a resistência da junta. Esse modelo não considera o efeito das tensões normais σ_{yy} no adesivo [67].

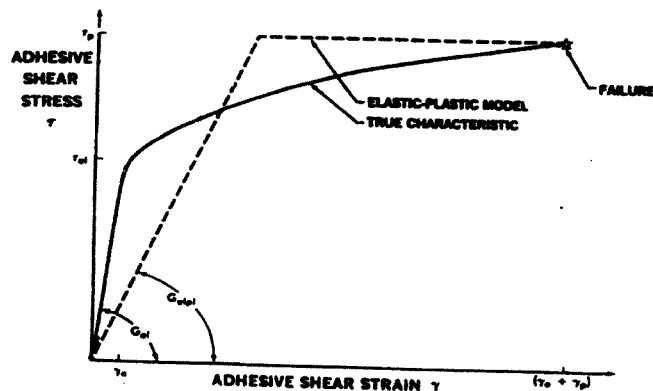


Figura 5.16 Curvas tensão de corte *versus* distorção para o adesivo [7].

Grant [68] da British Aerospace, na sua análise, despreza a flexão dos substratos e o adesivo é modelado de acordo com a figura 5.17.

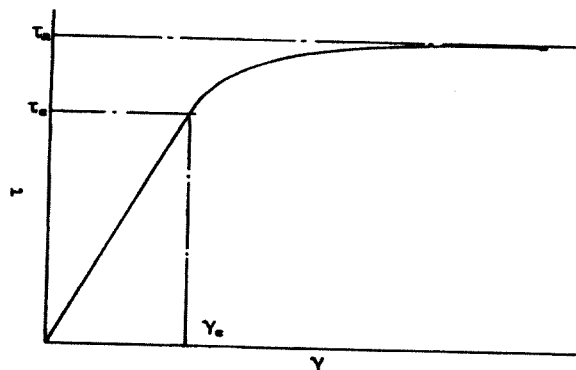


Figura 5.17 Curvas tensão de corte *versus* distorção para o adesivo [7].

Adams e Mallick [69] apresentaram uma solução mais recente que inclui o comportamento elasto-plástico do adesivo. Os efeitos de flexão, corte e tracção são incluídos no modelo.

6. PROJECTO DE JUNTAS ADESIVAS

O projecto, para uma aplicação em específica, inclui a escolha da geometria da junta, o sistema adesivo, o carregamento e as condições de processamento. A escolha da geometria da junta depende de cada aplicação. Existem diferentes geometrias, e cada uma delas tem maior ou menor resistência em aplicações particulares.

Existem critérios que devem ser respeitados e que garantem a segurança das juntas são, nomeadamente [1].

- Maximizar a área de colagem da junta;
- Permitir que as tensões aplicadas operem na direcção de máxima resistência;
- Minimizar a concentração de tensões, particularmente nos bordos da junta;
- Preferir solicitações de corte e evitar solicitações de arrancamento;
- Escolher uma camada de adesiva que seja uniforme, fina e contínua

6.1 JUNTAS SOBREPOSTAS

De entre as juntas sobrepostas, a que tem mais aplicação prática e de mais simples execução é a de sobreposição simples.

Para esta geometria, é na zona dos bordos da junta que ocorre a maior concentração de tensões. Quer isto dizer, que a tensão média é mais baixa do que a tensão nos bordos da junta, e essa distribuição não uniforme das tensões ao longo da camada adesiva, faz com que a rotura ocorra, normalmente, para cargas de valor inferior aos níveis capazes de suportar pelo adesivo [1].

Quando se pretende melhorar a performance das juntas torna-se necessário aumentar a sua resistência. Essa resistência é linearmente proporcional à largura da colagem. Também, esse aumento pode ser feito aumentando o comprimento de sobreposição, apesar deste aumento não ser linear dado que os bordos da junta suportam uma alta percentagem da carga [1]. As

tensões nos bordos diminuem e provocam um pequeno incremento da resistência quando se aumenta o comprimento de sobreposição.

A espessura do substrato, que garante a segurança da junta, é outro parâmetro com influência na resistência das juntas. Se aumentar essa espessura a resistência também aumenta.

O factor de junta, definido como a raiz quadrada da espessura do substrato dividida pelo comprimento de sobreposição, foi introduzido por De Bruine [70]. Pequenas sobreposições ou elevados factores de junta, quer dizer que a resistência à rotura da junta tem um valor próximo da do adesivo. A espessura do substrato e o comprimento de sobreposição são os dois parâmetros de controle da resistência da junta.

O comportamento das juntas sobrepostas podem ser melhoradas com recurso a variações na sobreposição. A situação de junta de dupla sobreposição está esquematizada na figura 6.1.

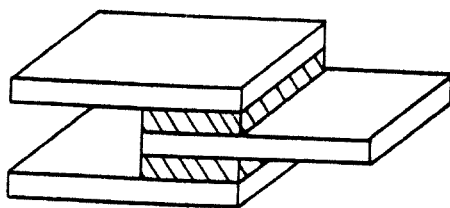


Figura 6.1 Junta de dupla sobreposição [1].

Ainda, é possível reduzir a concentração de tensões na junta, produzindo uma maior resistência e segurança da ligação adesiva, se otimizar o projecto das juntas, modificando as suas sobreposições. As juntas optimizadas estão representadas na figura 6.2.

A junta de sobreposição chanfrada (figura 6.2(a)) proporciona uma maior uniformidade na distribuição das tensões, reduzindo assim a concentração de tensões.

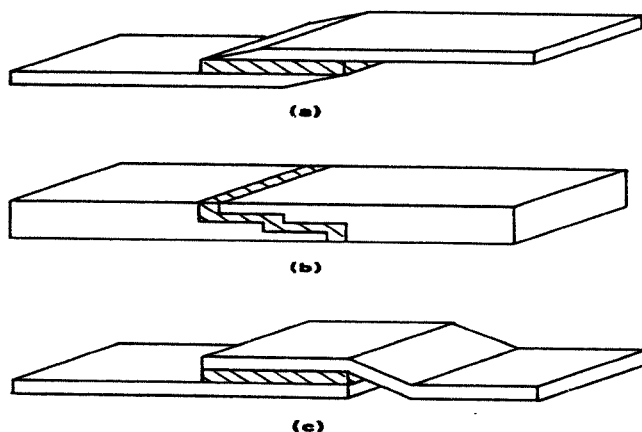


Figura 6.2 Junta de sobreposição chanfrada (a); de sobreposição tipo entalhe longitudinal (b); de sobreposição tipo substrato dobrado e alinhado (c) [21].

6.2 JUNTAS TOPO-A-TOPO

Em termos práticos, esta geometria não é muito usada, apesar da sua simplicidade. A área de contacto entre o adesivo e o substrato é pequena e é determinada pela área da secção recta dos substratos. A resistência aumenta com a área de colagem. Ainda nestas juntas, o carregamento pode produzir tanto tensões de tracção como de arrancamento e pequenas tensões de corte que ocorrem quando o módulo de elasticidade do adesivo é menor do que o do aderente, devido à contracção lateral do adesivo. Por esses motivos apontados, quando carregadas em tracção, essas juntas podem fracturar para valores mínimos da carga. Se for carregada doutra forma, é preciso considerar tensões adicionais. É o caso do exemplo da junta representada na figura 6.3, carregada de um modo semelhante a uma junta encastrada (tipo Cantiliver). As tensões de arrancamento no ponto A podem causar fractura, até mesmo a baixas cargas. As tensões não são uniformes, a não ser que o módulo de elasticidade do substrato seja igual ao do adesivo e, consequentemente, o projecto baseado em tensões médias é incorrecto.

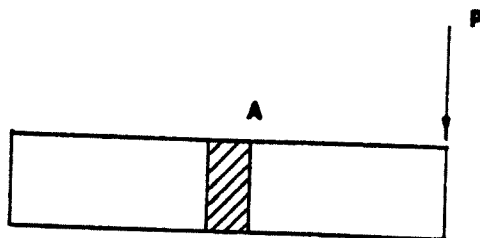


Figura 6.3 Exemplo de uma solicitação inadequada, numa junta topo-a-topo [21].

6.3 OUTROS TIPOS DE JUNTAS

A junta em bisel, representada na figura 6.4, é considerada a mais eficiente. Esta geometria elimina a excentricidade do carregamento e produz uma distribuição uniforme das tensões ao longo de toda área de colagem.

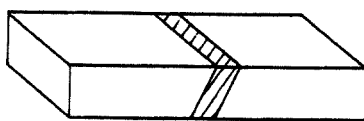


Figura 6.4 Junta em Bisel [21].

As juntas, que são combinações de projectos representadas na figura 6.5, proporcionam um alto nível de performance, mas as operações de preparação, processamento e colagem, durante a fabricação são mais complexas

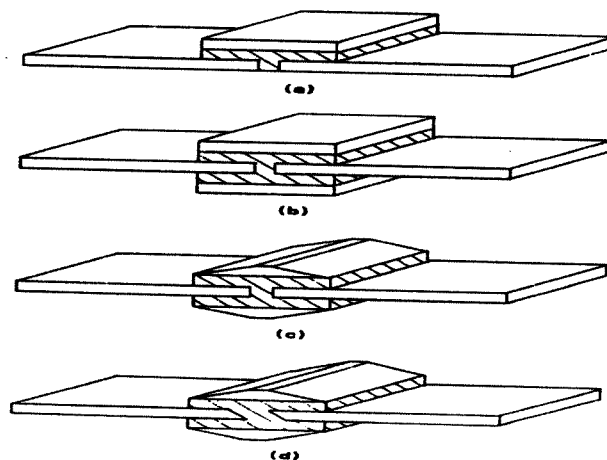


Figura 6.5 Junta de recrobimento simples (a); Junta de recrobimento duplo (b); Junta de recrobimento duplo chanfrada (c); Junta de recrobimento duplo, em bisel, chanfrada (d); [21].

No projecto das juntas adesivo, envolvendo a geometria e as propriedades do adesivo e do substrato, não se deve apenas preocupar-se com a performance das juntas, mas também outros factores com por exemplo, os factores económicos (equipamento, processamento e custos da laboração) [21].

7. COMPORTAMENTO MECÂNICO DE JUNTAS ADESIVAS

A utilização de adesivos estruturais como método de ligação permanente implica a existência de metodologias de ensaio que permitam obter dados relativos sobre o comportamento a longo prazo. Como foi referido no ponto 5, as juntas estão sujeitas a diferentes tipos de solicitações, divididos em quatro tipos característicos: corte, tracção, arrancamento ou clivagem (ver figura 5.1). Desta forma, torna-se necessário conhecer o comportamento dessas juntas quando sujeitos a estes diferentes tipos de carregamentos [3].

Os ensaios mecânicos podem ser utilizados na caracterização das juntas coladas, onde se destacam os ensaios de corte em provetes de sobreposição simples, os ensaios de arrancamento, e os ensaios destinados a medir a aderência, como é o caso de flexão em três pontos. A aderência representa a força necessária para romper as forças de adesão e assim separar o adesivo e o substrato. Se a rotura for adesiva, a força medida representa uma medida da aderência. Se a fenda se propagar através do adesivo, a rotura é coesiva e a força medida representa a resistência à rotura da junta adesiva [17].

A resistência mecânica oferecida pelos adesivos para suportar estes estados de tensão, é bastante inferior à oferecida pelos metais, sendo que no caso dos aços de construção a tensão de dimensionamento à tracção varia desde a valores da ordem de 200 MPa até 500 MPa , enquanto que os adesivos com melhores desempenho podem suportar tensões de corte da ordem dos 40 a 50 MPa.

Os ensaios, em geral, constituem uma avaliação das propriedades, quer sejam físicas, químicas, mecânicas, térmicas ou outras.

Para a determinação do comportamento do material, quando solicitado por alguns tipos de cargas, o material, na forma de provetes, é solicitado em máquinas de ensaios mecânicos. Estes ensaios, que são destrutivos, podem ser agrupados em:

- Curta duração: Ensaio de tracção, corte, arrancamento, clivagem e impacto;

- Média duração: Ensaios de fadiga e de relaxação de tensões;
- Longa duração: Ensaios de fluência.

Estes ensaios fornecem valores de propriedades típicas, onde se incluem o módulo de elasticidade, o módulo de regidez, a tensão de cedência, a tensão de rotura, o alongamento, e o coeficiente de Poisson. Essas propriedades dependem do modo de carregamento, tais como, tracção, compressão, corte, ou flexão.

Nos ensaios de média e longo duração são normalmente utilizados como parâmetros para terminar os respectivos ensaios, valores de 10^4 horas e 10^7 ciclos para os ensaios de fluência e de fadiga, respectivamente, sendo utilizados na maioria dos casos provetes em que o adesivo é solicitado ao corte [3].

Na tabela 7.1 é apresentado como se efectua o cálculo dos valores de resistência medidos para os diferentes tipos de ensaios de juntas adesivas.

Tabela 7.1 Cálculo de resistência de juntas adesivas.

TIPO DE ENSAIO	VALOR DA RESISTÊNCIA MEDIDO
Tracção	Sr - Carga de ruptura/Superfície de colagem de rotura
Corte	t - Carga de rotura/Superfície de colagem da junta
Arrancamento	Pr - Carga de rotura/Largura do provete
Clivagem	Qr = Carga de rotura/Largura do provete
Impacto	Wr = Energia absorvida/Superfície de colagem da junta

A avaliação de um adesivo pelos vários métodos de ensaios também pode ajudar a conhecer o procedimento quanto ao *projecto* da junta, usando um adesivo em particular. Contudo, é difícil transpor os resultados experimentais obtidos em juntas adesivas para as condições reais, na medida em que muitas desses ensaios não simulam as condições reais da geometria da junta, das condições ambientais e das tensões aplicadas [21]. Por isso, para simular as condições mais próximas de serviço, é preciso utilizar outras técnicas.

Os ensaios estáticos de tracção, corte e arrancamento são os mais utilizados. Para simular as condições atmosféricas (temperatura, humidade, ou outras) são utilizados ensaios de envelhecimento.

A utilização de aparelhos de ultra-sons é um exemplo de ensaios não destrutivos, em que a frequência da ressonância na união colada (ou o amortecimento na camada do adesivo) é medida possibilitando tirar conclusões quanto à resistência da junta colada [4].

Os ensaios mecânicos de tracção por corte e os dinâmicos de fadiga, assim como os ensaios de envelhecimento, que fazem parte do trabalho experimental, serão apresentados em seguida. É também feita uma breve referência aos ensaios mecânicos de impacto.

7.1 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos são técnicas experimentais utilizadas na determinação do comportamento do material, quando solicitado por diversos tipos de carregamentos (tracção, compressão, corte ou flexão). Os ensaios sobre juntas adesivas envolvem toda a ligação, isto é, os substratos, a geometria de junta, a interface, a camada primária, a preparação superficial, o tempo de cura e o próprio adesivo [1].

7.1.1 Ensaios de Tracção

Neste tipo de ensaios, as cargas são aplicadas perpendicularmente à camada do adesivo (figura 7.1). Podem ser agrupados nos ensaios estáticos, porque são feitos a taxas constantes de carregamento e, normalmente, ao longo de pequenos períodos de tempo (isto é, minutos). Quanto ao valor da resistência, é dada pela equação (7.1) que representa a relação entre a carga máxima aplicada ao provete, P_c , e área da secção recta de colagem A [21].

$$\sigma_c = P_c / A \quad (7.1)$$

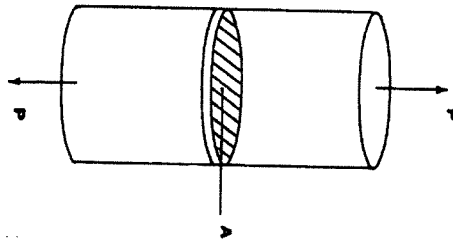


Figura 7.1 Carga de tracção numa junta topo-a-topo [21].

Quanto à morfologia de rotura recomenda-se que seja registada a percentagem de fractura coesiva e adesiva. Se a fractura se verificar nos substratos, os resultados devem ser rejeitados porque, tais casos não constituem ensaios de materiais adesivos. Como exemplos de ensaios de tracção, temos os casos de ensaios de tracção por corte em juntas de sobreposição.

Seguidamente, é feita uma breve descrição do ensaio de tracção por corte em juntas de sobreposição coladas, sendo um dos ensaios que faz parte do trabalho experimental.

Ensaio de Corte: Os ensaios de corte mais conhecido é efectuado em juntas de sobreposição simples, com base na norma *ASTM D1002-72*, para os substratos metálicos [21]. A amostra é constituída por dois substratos metálicos de espessura e comprimento de sobreposição aproximadamente 1,7 mm e 12,7mm, respectivamente. A amostra normalizada é representada na figura 7.2.

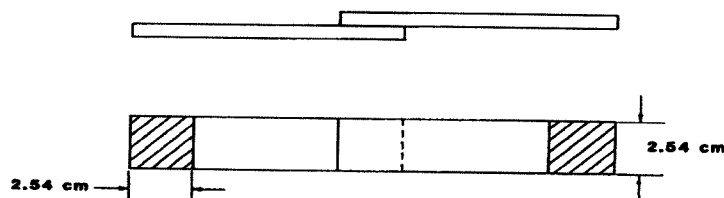


Figura 7.2 Amostra normalizada de juntas de sobreposição simples para os ensaios de tracção por corte [21].

A tensão de corte crítica é dada pela razão entre a carga de rotura e a área de colagem.

Este ensaio é muito utilizado para comparar a resistência ao corte de diferentes adesivos. Se a espessura do substrato for diferente da atrás referida, o máximo comprimento é dado pela equação 7.2.

$$L = \sigma_y * b / \tau \quad (7.2)$$

onde L é o comprimento de sobreposição em polegadas, σ_y é a tensão de cedência do metal em psi, b é a espessura do metal em polegadas e τ igual a 150% da tensão de corte média da junta adesiva em psi. Este cálculo só é necessário se a tensão de cedência do metal não puder ser obtida antes da rotura da junta adesiva [17].

A velocidade de carregamento é de 1200 a 1400 libras por polegada quadrada da área sobreposta e por minuto até à rotura.

Os resultados são apresentados em função de curvas de equilíbrio tensão/deformação (ou força/deslocamento).

7.1.2 Ensaio de Fadiga

Os ensaios de fadiga fazem parte do grupo dos ensaios dinâmicos, de longa duração, e são feitos considerando a aplicação de tensões cíclicas. A norma *ASTM D3166-73* descreve a tensão de fadiga no carregamento de provetes ao corte sobrepostas. Quanto à geometria dos provetes (ver figura 7.3), há poucas modificações em relação aos provetes destinados aos ensaios de corte. São utilizados calços, nos dois extremos dos provetes, para evitar o desalinhamento depois do carregamento. Uma máquina de ensaio de tracção ou outro dispositivo fixo de carregamento é usado para aplicar um carregamento sinusoidal, a uma frequência de 1800 ciclos por minuto [21].

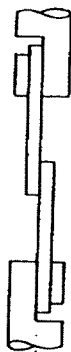


Figura 7.3 Amostra normalizada de juntas de sobreposição simples para os ensaios de fadiga ao corte [21].

O ensaio de fadiga mede o número de ciclos até a ruptura final, para um nível de carregamento específico. Devem ser ensaiados, no mínimo, 25 provetes para cinco níveis de cargas diferentes e dez mil ciclos. O máximo nível de carga deve ser aproximadamente 50% da tensão ao corte do adesivo. O resultado é apresentado em termos de um gráfico de resistência à fadiga (níveis de tensão - S) função do logaritmo do número de ciclos ($\log N$) [21].

7.1.3 Ensaios de Impacto

Quando são utilizadas as juntas adesivas em estruturas sujeitas a solicitações de impacto (como exemplo os veículos em situação de acidente) é preciso garantir uma grande absorção de energia numa distância curta e uma pequena deformação. Os ensaios de impacto são utilizados para a caracterização mecânica de juntas adesivas solicitadas por carregamento dinâmicos de impacto. Contrariamente à longa duração dos ensaios de fadiga, estes ensaios ocorrem em segundos.

Os ensaios que são utilizados no estudo das juntas adesivas são principalmente ensaios de corte com um pêndulo ou ensaio de peso em queda livre. As amostras, como representado na figura 7.4, podem ser feitas de metal (ou outros materiais), como os aderentes, e em forma de bloco como descrito na norma *ASTM D950-82*.

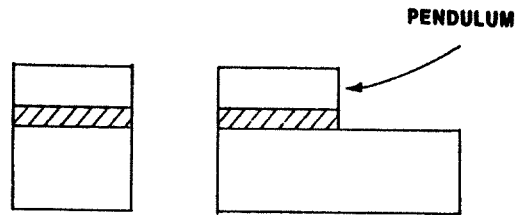


Figura 7.4 Amostra para ensaio de impacto [21].

O ensaio de impacto mais importante em juntas coladas pode ser feito numa máquina tipo *Rosand*, usando um dispositivo apropriado, sendo possível fazer o registo das curvas força - deslocamento [17]. As amostras têm a forma e dimensões indicadas na figura 7.5. No ensaio de impacto com cunha, *impact wedge method*, a separação ou arrancamento dos substratos é feita por uma cunha que se desloca a alta velocidade. Para causar impacto em materiais de alta *performance* é utilizada a cunha simétrica (figura 7.6). A largura da amostra deve ser de preferência na ordem dos 20 mm e a espessura do adesivo de 0,3mm.

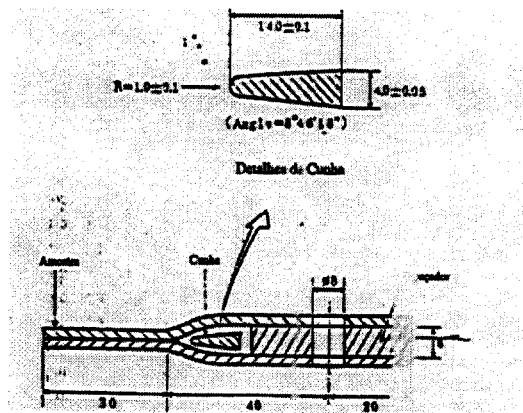


Figura 7.5 Amostra a usar para ensaio de impacto por cunha simétrica [17].

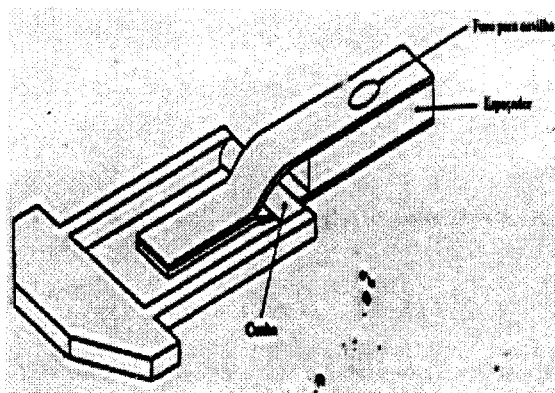


Figura 7.6 Dispositivo em cunha simétrica para ensaio de impacto [17].

7.2 ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO

Os ensaios de envelhecimento consistem em submeter os provetes a uma atmosfera representativa das condições reais de serviço. Na maioria dos casos, os tempos reais são demasiadamente longos, por isso, torna-se necessário recorrer a ensaios acelerados em câmaras climáticas (humidade, temperaturas, pressão), com ciclos que são previamente programados. Depois, o provete é submetido ao ensaio mecânico.

Os aparelhos que poderão ser utilizados são [17]:

- Estufa controlada a 23 ± 2 °C;
- Estufa que permita obter 25 a 100% de humidade relativa (HR);
- Estufa que permite variações de temperatura desde -40 a 200.

Os ensaios poderão ter durações até 1000 horas. As escalas mais usadas em juntas coladas de aço com adesivo de epóxico (ou de outros materiais, como por exemplo o alumínio) são 3 e 6 semanas. É preciso ter em atenção que os ensaios de envelhecimento são, geralmente, mais agressivos do que as condições reais. Desta forma, é necessário ter muita prudência quanto à sua generalização [10].

ESTUDO
EXPERIMENTAL

8. ESTUDO EXPERIMENTAL

8.1 OBJECTIVOS

No trabalho experimental apresenta-se a caracterização do comportamento mecânico de juntas de sobreposição simples em alumínio unidas utilizando adesivos estruturais.

Este estudo dedica-se à análise da durabilidade dessas juntas quando sujeitas a carregamentos estáticos e dinâmicos. Pretende-se também estudar a influência do acabamento superficial e do envelhecimento, dois parâmetros importantes na resistência em serviço de juntas coladas.

As fases de preparação, execução e condicionamento dos provetes decorreram-se nas instalações do Laboratório de Ensaios Tecnológicos - LET, FEUP.

Os ensaios estáticos (tracção por corte) e dinâmicos (fadiga) realizaram-se no INEGI, tendo sido os primeiros realizados na Máquina *INSTRON* existente no CEMACOM, e os restantes realizados na *MTS*, no CEFAD.

Os resultados obtidos nos ensaios estáticos são:

- Os valores de tensão de corte (LSS - *Lap Shear Stress*);
- Os valores de deslocamentos até à rotura;
- As respectivas curvas carga - deslocamento;
- Variação da tensão de rotura e do deslocamento até à rotura com o acabamento superficial, medido pelo parâmetro rugosidade, e com as condições ambientais, definidas pela temperatura, humidade e tempo de exposição na câmara ambiental;
- Análise da morfologia de rotura

Em relação aos ensaios de fadiga, são apresentadas as curvas SN para as diferentes condições de ensaio, e as curvas da relação entre os níveis de tensão aplicada com a tensão de rotura obtida nos ensaios estáticos função do número de ciclos até à rotura. Os resultados obtidos são relacionados com os parâmetros acabamento superficial e condições ambientais.

8.2 PROVETES

Seguindo a metodologia anteriormente adoptada num projecto de características idênticas [71], e dado que o adesivo utilizado neste projecto é uma evolução do anteriormente usado, decidiu-se realizar, para os ensaios estáticos, séries de 5 provetes, e para os ensaios de fadiga, séries de 3 provetes, para cada condição.

8.2.1. Adesivo e Material do Substrato

O material que constitui o substrato dos provetes é a liga de alumínio 6016 (*registration number* 6016 / CH).

O adesivo utilizado para a realização destes provetes é o *TEROKAL 5046 A/B*, produzido pela *TEROSON*. Este adesivo, a base de resina epóxido, é composto por 2 componentes, designados por *Componente A* e *Componente B*, que ao serem misturados dão origem ao adesivo pronto a aplicar.

As propriedades mecânicas do adesivo e do material utilizado com substrato são apresentadas no anexo A.

8.2.2 Geometria

Com o objectivo de avaliar a influência do estado de superfície e do envelhecimento, realizaram-se séries de 20 e de 10 provetes do tipo *single lap joint*, de acordo com a norma *ASTM 1002 – 72* [72]. A figura 8.1 representa esquematicamente a geometria dos provetes, e as dimensões características estão indicadas no tabela 8.1.

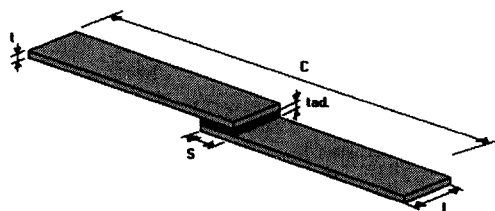


Figura 8.1 Representação esquemática dos provetes para ensaios estáticos.

Tabela 8.1 Dimensões nominais dos provetes de juntas coladas realizados.

Largura do provete, L [mm]	Comprimento total do provete, C [mm]	Espessura do substrato (Al 6016), t [mm]	Espessura nominal do adesivo (TEROKAL 5046 A/B), t_{ad} [mm]	Comprimento de sobreposição, S [mm]
25	177.5	1.15	0.250	12.5

Para os ensaios de fadiga, adoptaram-se 3 níveis de tensões e 3 níveis de rugosidade. Desta forma, realizaram-se séries de 27 e de 18 provetes para estudar a influência da rugosidade e do envelhecimento, respectivamente.

A geometria dos provetes utilizadas nos ensaios de fadiga está representada na figura 8.2. Estes provetes foram realizados de acordo com a norma *EN ISO 9664* [73], e são iguais aos anteriores (figura 8.1), com excepção dos dois furos nos extremos para adaptar às amarras.

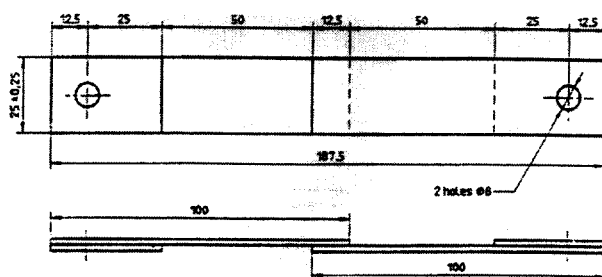


Figura 8.2 Representação esquemática dos provetes para ensaios dinâmicos.

8.3 ESTADO SUPERFICIAL DO SUBSTRATO

Depois de uma primeira operação de lixagem com o objectivo de eliminar as rebarbas originadas nas operações de corte com guilhotina, seguiu-se a lixagem da zona de colagem. Para os ensaios estáticos foram adoptados os quatros níveis diferentes de granulometria, enquanto que para os de fadiga, os três últimos níveis:

- Nível 1: As partes a unir foram coladas sem se efectuar nenhuma operação que tenha alterado o seu estado superficial, ou seja, foi colado no seu estado de fornecimento;
- Nível 2: As partes a unir foram sujeitas a uma operação de lixagem manual com lixa de granulometria P240;
- Nível 3: As partes a unir foram sujeitas a uma operação de lixagem manual com lixa de granulometria P400;
- Nível 4: As partes a unir foram sujeitas a uma operação de lixagem manual com lixa de granulometria P600.

Devido ao facto da lixagem ser efectuada manualmente, não se pode garantir uma repetibilidade tal que permita assegurar que a rugosidade possui um valor constante para todas as chapas nas mesmas condições. No entanto houve o cuidado de efectuar a lixagem sempre com a mesma direcção, perpendicular à direcção da solicitação do provete.

As superfícies foram também caracterizadas quantitativamente, através da medição da sua rugosidade. Utilizou-se o rugosímetro *Hommeltester Turbo-Datwin*, disponível no LET, FEUP. Só foram feitas medições para os provetes que não sofreram qualquer tipo de envelhecimento. Para os outros, admitiu-se a mesma rugosidade. Os valores medidos para as quatro condições de acabamento superficial são apresentados nas tabelas 8.2 a 8.5.

Tabela 8.2 Rugosidade para os provetes AAA.

Statistic					
N = 10	Xbar	MAX	MIN	RANGE	STAND
RmD	3.9000	6.4000	2.6000	3.8000	1.0232
RzD	2.9860	4.1600	2.3000	1.8600	0.5605
Ra	0.5600	0.8000	0.4200	0.3800	0.1293

Tabela 8.3 Rugosidade para os provetes BAA.

Statistic					
N = 10	Xbar	MAX	MIN	RANGE	STAND
RmD	7.3410	11.1400	5.0600	6.0800	1.9917
RzD	5.5580	6.9000	4.5200	2.3800	0.7304
Ra	0.7760	0.9600	0.6400	0.3200	0.0942

Statistic					
N = 10	Xbar	MAX	MIN	RANGE	STAND
RmD	5.1980	7.1400	3.3000	3.8400	1.2807
RzD	3.8680	5.4800	3.0000	2.4800	0.8528
Ra	0.5080	0.7200	0.4000	0.3200	0.1003

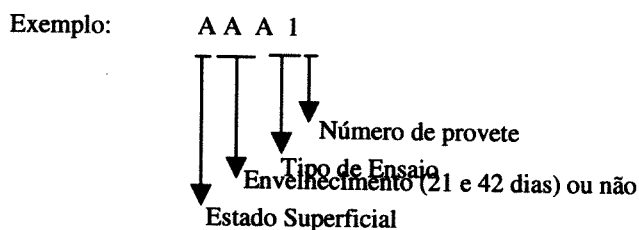
Tabela 8.4 Rugosidade para os provetes CAA.

Tabela 8.5 Rugosidade para os provetes DAA.

Statistic					
N = 12	Xbar	MAX	MIN	RANGE	STAND
RmD	7.0775	11.5200	4.8400	6.6800	1.7005
RzD	5.2783	6.0400	4.4600	1.5800	0.5673
Ra	0.7050	0.8200	0.6000	0.2200	0.0840

A rugosidade para cada provete de cada série foi obtido através da média aritmética dos dois valores lidos com o rugosímetro, correspondente às duas chapas (cima e baixo). Quanto à média para cada série, o software que acompanha o equipamento apresenta os valores dos vários parâmetros estatísticos, incluindo a rugosidade total, Rz

Antes da colagem, os provetes foram referenciados. A seguir apresenta-se o exemplo da referência adoptada neste trabalho.



Nos provetes realizados para os testes de fadiga aparece ainda associada ao número de provete, a referência para os três níveis de tensões adoptados.

Exemplo: A A B 1 (ou 1' ou 1''), em que o 1' representa o 2º nível e 1'' o 3º nível de tensão.

8.4 TRATAMENTO SUPERFICIAL

As amostras para os provetes que não sofreram envelhecimento, depois da operação de lixagem, foram previamente referenciadas com um marcador à prova de água, tendo-se de seguida processado o tratamento das superfícies.

A *TEROSON* indica nas suas recomendações técnicas [74] o uso de um desengordurante, o *RIDOLENE 1402*, o qual permite retirar toda sujidade e gordura existente nas chapas de alumínio. Os passos fundamentais foram:

Preparação do *RIDOLENE 1402*

O *RIDOLENE 1402* é um pó que se dissolve em água ficando de imediato pronto a usar.

As instruções para a preparação de 1 litro de *RIDOLENE* são as seguintes:

- Aquecer água desionizada (40 °C aproximadamente);
- Adicionar 20 gramas de *RIDOLENE*;



- Agitar até completa dissolução do pó.
- Desengorduramento das chapas de alumínio

As chapas de alumínio, já cortadas e furadas (no caso dos ensaios de fadiga) nas dimensões finais, foram imersas na solução de ridolene durante um período não inferior a 10 minutos. Seguidamente, lavou-se cada uma das chapas de alumínio com água, em abundância, de modo a eliminar todo o ridolene existente bem como algumas partículas de contaminação que ainda se encontravam agarradas às mesmas. Finalmente secaram-se as chapas, sendo estas imediatamente acondicionadas numa caixa fechada para posterior utilização.

As chapas foram posteriormente retiradas e, após secagem, fizeram-se as colagens. A operação foi realizada de acordo com a descrição feita no anexo E.

Em relação ao processo de cura, utilizou-se apenas um tipo de cura, com base na informação técnica fornecida pela *TEROSON* [74].

Trata-se de uma cura à temperatura ambiente durante um período não inferior a 3 dias. Os provetes foram retirados dos dispositivos de fixação após as primeiras 6 horas de cura.

8.5 ENVELHECIMENTO DE PROVETES

Depois das operações anteriores (lixagem, desengorduramento e colagem dos provetes), as duas séries de 5 provetes para os ensaios estáticos (DBA e DCA) e as duas séries de 9 provetes para os ensaios de fadiga (DBB e DCB) foram submetidas a 2 tipos de envelhecimento: ciclos climáticos numa câmara ambiental, durante 21 e 42 dias, simulando as condições adversas de serviço das juntas.

Pretendeu-se com esta simulação, estudar a influência dos factores climáticos (temperatura e humidade) no comportamento de juntas coladas.

Em relação ao ciclo climático, a 1ª série de 5 e de 9 provetes (DBA e DBB) permaneceram na câmara ambiental durante 500 horas (21 dias), enquanto a 2ª série (DCA e DCB) durante

1000 horas (42 dias), para uma temperatura e humidade constante de 50°C e 50%, respectivamente.

Utilizou-se a câmara de simulação ambiental da *WEISS*, modelo *500 SB/+10 IV/40 DU*, existente no Laboratório de Adesivos (LA), FEUP.

Para este estudo, os outros parâmetros permaneceram constantes, sendo o estado superficial utilizado, o estado (D), isto é, os provetes foram sujeitos a operação de lixagem com lixa de granulometria P600 (D).

Depois de retirados da câmara, os provetes foram ensaiados estaticamente e dinamicamente em máquinas *INSTRON* e *MTS*, respectivamente.

8.6 ENSAIOS ESTÁTICOS

8.6.1 Descrição

Para a determinação da tensão de rotura e do registo das respectivas curvas carga - deslocamento, os provetes foram ensaiados numa máquina *INSTRON*, em ambiente laboratorial.

Os parâmetros dos ensaios (área de amarração, velocidade de carregamento) foram estabelecidos de acordo com a norma *ASTM D 1002-72* [72].

- Comprimento de Amarração dos Provetes: $L = 25.4\text{mm}$ (obtida através de dois pares de maxilas).
- Velocidade de Carregamento: $V = 1.3\text{mm/min}$

Para a aquisição dos resultados utilizou-se um PC ligado à placa de aquisição de dados (carga e deslocamento) *INSTRON*.

Os valores são apresentados em função da carga de rotura, sendo os valores da tensão de corte (*Lap Shear Stress* - LSS) calculados com base na expressão (8.1):

$$\tau = \frac{\text{carga}}{\text{Área}}, \quad \text{em que:} \quad (8.1)$$

Carga [N] : carga de rotura

Área [mm^2] = $L * S$: área de colagem

L [mm]: largura do provete

S [mm]: comprimento de sobreposição

8.6.2 Resultados

Os valores da tensão de corte (LSS) e dos deslocamentos médios, registados nos ensaios de tracção estáticos (por corte), destinados a estudar a influência do estado superficial (medido pelo parâmetro rugosidade) no comportamento das juntas que não sofreram qualquer tipo de envelhecimento, estão apresentados nas tabelas 8.6 a 8.9.

As curvas carga-deslocamento encontram-se apresentadas nas figuras 8.3 a 8.6. Na figura 8.7, apresenta-se o comportamento típico para cada série de provetes não envelhecidos.

A variação da carga de rotura e do deslocamento até a rotura com o estado superficial estão representadas nas figuras 8.8 e 8.9, respectivamente, assim como na tabela 8.10

A tabela 8.11 e a figura 8.10 apresentam os resultados para a série de provetes envelhecidos a 21 dias, enquanto que a tabela 8.12 e a figura 8.11 apresentam os valores obtidos para os provetes envelhecidos a 42 dias.

A tabela 8.13 e a figura 8.12 apresentam a variação da resistência das juntas, medida pela tensão de corte (LSS) e pelo deslocamento médio até à rotura, com as condições ambientais (ciclo de temperatura/humidade), a que os provetes foram sujeitos.

A figura 8.13 mostra a morfologia de rotura, exclusivamente adesiva, para o caso dos provetes BAA (lixados com P240 e ensaiados estaticamente sem envelhecimento), e a figura 8.14 apresenta a morfologia do tipo mista que se verificou nos provetes CAA (lixados com P400 e ensaiados estaticamente sem envelhecimento), com excepção do provete 1 onde a rotura ocorreu na interface adesivo/aderente. A morfologia de rotura do tipo adesiva/mista para as duas séries de provetes envelhecidos, DBA e DCA, são apresentados nas figuras 8.15 e 8.16, respectivamente.

No anexo D apresentam-se as figuras da morfologia de rotura para os restantes provetes ensaiados.

8.6.2.1 Provete não Envelhecidos

Tensão de Rotura

Tabela 8.6 Provete AAA colados com TEROKAL 5046, no estado de fornecimento (A), sem envelhecimento (A), submetidos a ensaios estáticos (A).

Referência do Provete	Espessura Medida do Adesivo [mm]	Rugosidade Total, Rz [μm]	Tensão de Rotura [MPa]	Tipo de Rotura	Comentário
AAA1	0,300	3,74	8,88	adesiva	rejeitado
AAA2	0,270	2,82	8,41	adesiva	
AAA3	0,250	2,69	*	*	
AAA4	0,260	2,96	14,04	adesiva	
AAA5	0,248	2,72	14,18	adesiva	
Média	0,266	2,98	11,38		

Tabela 8.7 Provete BAA colados com TEROKAL 5046, lixagem com P240 (B), sem envelhecimento (A), submetidos a ensaios estáticos (A).

Referência do Provete	Espessura Medida do Adesivo [mm]	Rugosidade Total, Rz [μm]	Tensão de Rotura [MPa]	Tipo de Rotura	Comentário
BAA1	0,240	5,67	10,43	adesiva	
BAA2	0,235	6,25	11,97	adesiva	
BAA3	0,260	5,53	11,35	adesiva	
BAA4	0,250	5,73	11,88	adesiva	
BAA5	0,230	4,61	9,73	adesiva	
Média	0,243	5,56	11,07		

Tabela 8.8 Provete CAA colados com TEROKAL 5046, Lixagem com P400 (C), sem envelhecimento (A), submetidos a ensaios estáticos (A).

Referência do Provete	Espessura Medida do Adesivo [mm]	Rugosidade Total, Rz[μm]	Tensão de Rotura [MPa]	Tipo de Rotura	Comentário
CAA1	0,300	5,89	13,87	adesiva mista mista mista mista	
CAA2	0,300	5,23	14,16		
CAA3	0,300	5,16	14,11		
CAA4	0,220	5,28	12,30		
CAA5	0,240	4,72	15,14		
Média	0,272	5,28	13,91		

Tabela 8.9 Provete DAA colados com TEROKAL 5046, lixagem com P600 (D), sem envelhecimento (A), submetidos a ensaios estáticos (A).

Referência do Provete	Espessura Medida do Adesivo [mm]	Rugosidade Total, Rz[μm]	Tensão de Rotura [MPa]	Tipo de Rotura	Comentário
DAA1	0,260	4,66	14,79	adesiva mista mista mista mista	
DAA2	0,280	3,72	15,85		
DAA3	0,300	3,34	14,28		
DAA4	0,230	4,60	15,03		
DAA5	0,290	3,02	14,69		
Média	0,272	3,86	14,93		

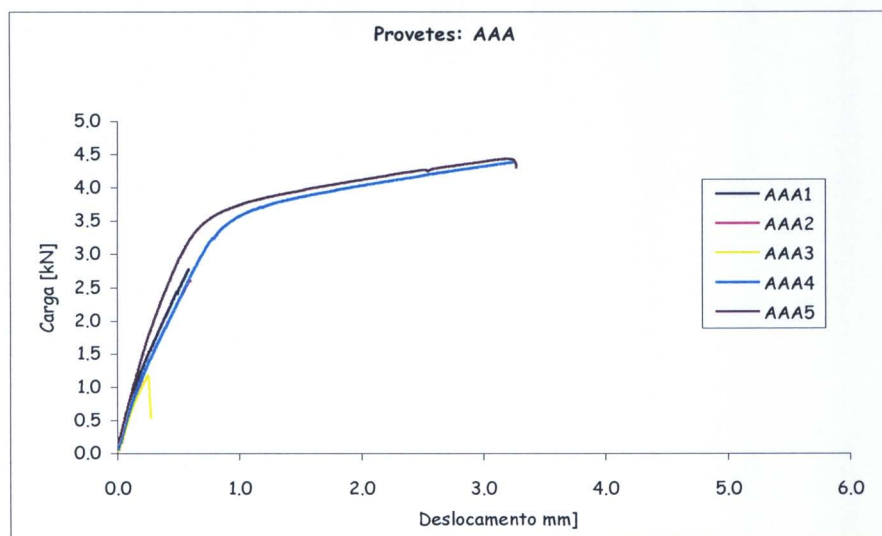
Curva Força – Deslocamento

Figura 8.3 Curvas Força - Deslocamento para provetes AAA colados com TEROKAL 5046, no estado de fornecimento (A), sem envelhecimento (A), submetidos a ensaios estáticos (A).

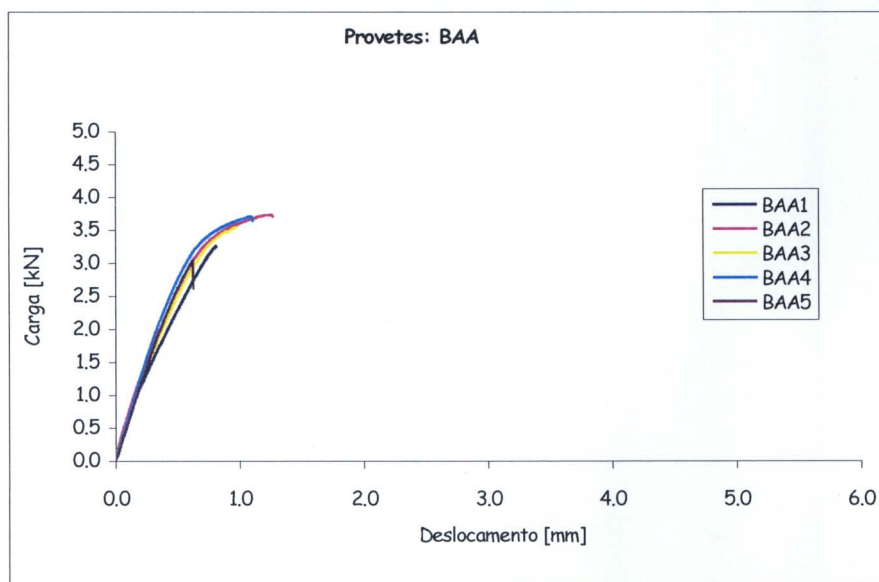


Figura 8.4 Curvas Força - Deslocamento para provetes BAA colados com TEROKAL 5046, com lixagem P240 (B), sem envelhecimento (A), submetidos a ensaios estáticos (A).

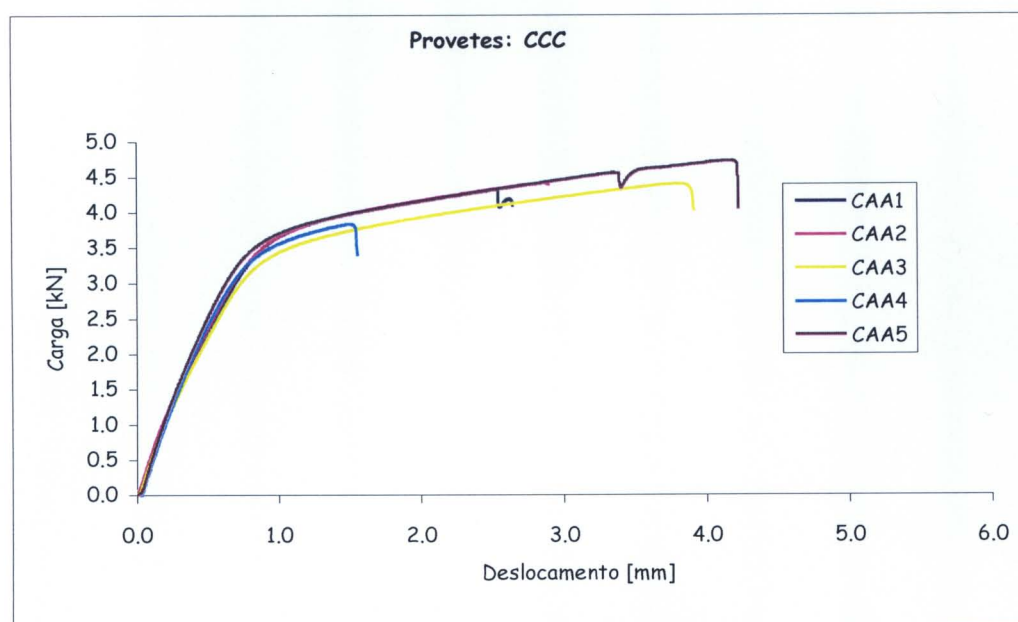


Figura 8.5 Curvas Força - Deslocamento para provetes CAA colados com TEROKAL 5046, com lixagem P400 (C), sem envelhecimento (A), submetidos a ensaios estáticos (A).

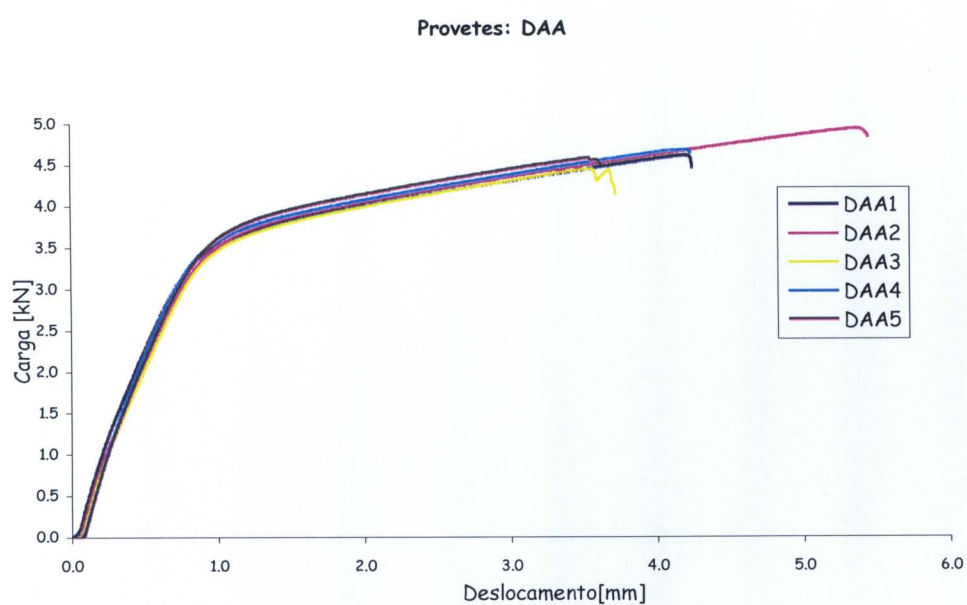


Figura 8.6 Curvas Força - Deslocamento para provetes DAA colados com TEROKAL 5046, com lixagem P600 (D), sem envelhecimento (A), submetidos a ensaios estáticos (A).

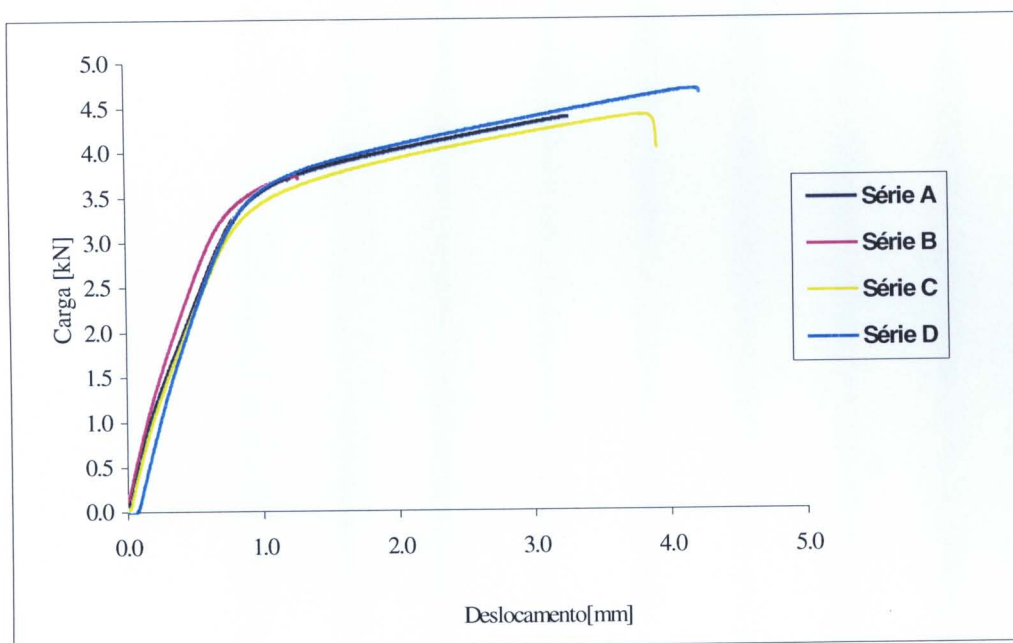


Figura 8.7 Curvas Força - Deslocamento para as quatro séries de provetes (A,B,C e D) colados com TEROKAL 5046, sem envelhecimento (A), submetidos a ensaios estáticos (A).

8.6.2.2 Efeito do Estado Superficial

Tabela 8.10 Valores da rugosidade medida nas chapas (cima e baixo) função da tensão de rotura média obtida nos ensaios estáticos.

Estado Superficial	Rugosidade Total [μm]	Tensão de Rotura Média [MPa]	Deslocamento até à Rotura médio [mm]
Não Lixado	2,98	11,38	1,93
Lixagem c/ P600	3,86	14,93	4,25
Lixagem c/ P400	5,28	13,91	3,04
Lixagem c/ P240	5,56	11,07	0,96

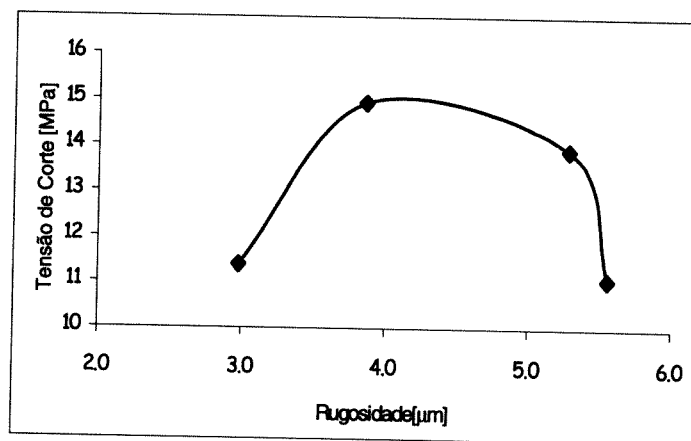


Figura 8.8 Variação da tensão de corte com a rugosidade

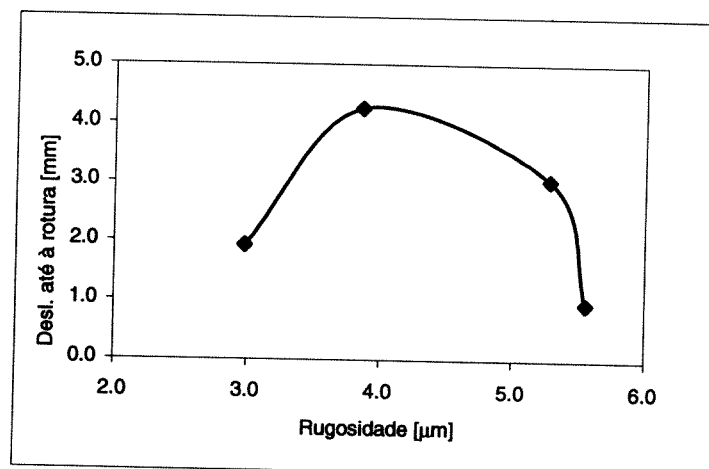


Figura 8.9 Variação do deslocamento até à rotura com a rugosidade

8.6.2.3 Provete Envelhecidos

Tensão de Rotura

Tabela 8.11 Lap shear test para provetes DBA colados com TEROKAL 5046, lixagem com P600(D), envelhecidos a 21 dias(B), submetidos a ensaios estáticos(A).

Referência do Provete	Espessura Medida do Adesivo [mm]	Tensão de Rotura [MPa]	Tipo de Rotura	Comentário
DBA1	0,290	13,41	adesiva adesiva mista mista mista	
DBA2	0,300	12,86		
DBA3	0,240	15,42		
DBA4	0,280	13,79		
DBA5	0,245	15,65		
Média	1,38	14,23		

Tabela 8.12 Lap shear test para provetes DCA colados com TEROKAL 5046, lixagem com P600(D), envelhecidos a 42 dias(C), submetidos a ensaios estáticos(A).

Referência do Provete	Espessura Medida do Adesivo [mm]	Tensão de Rotura [MPa]	Tipo de Rotura	Comentário
DCA1	0,310	10,98	adesiva mista mista mista adesiva	
DCA2	0,250	16,38		
DCA3	0,275	13,31		
DCA4	0,260	14,48		
DCA5	0,240	14,37		
Média	1,38	13,90		

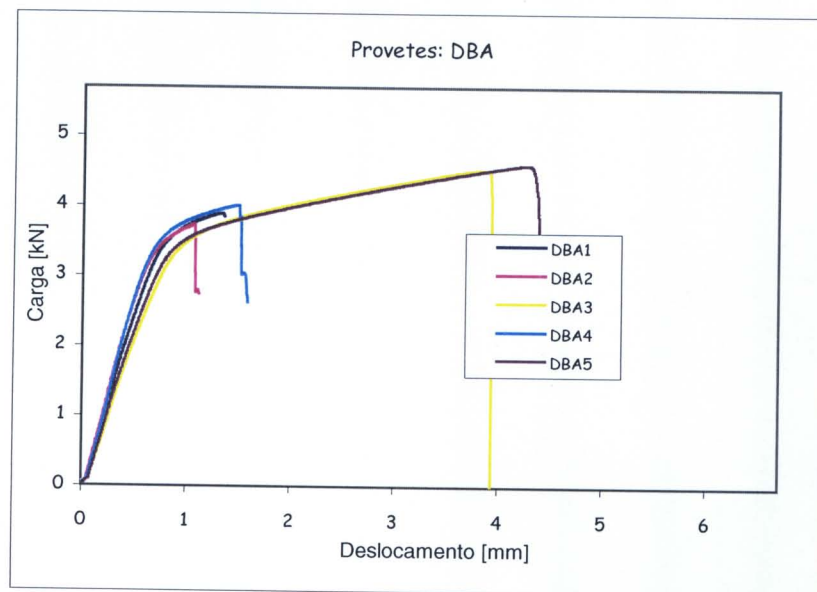
Curva Força - Deslocamento

Figura 8.10 Curvas Força - Deslocamento para provetes DBA colados com TEROKAL 5046, Lixagem com P600 (D), envelhecidos a 21 dias (B), submetidos a ensaios estáticos (A).

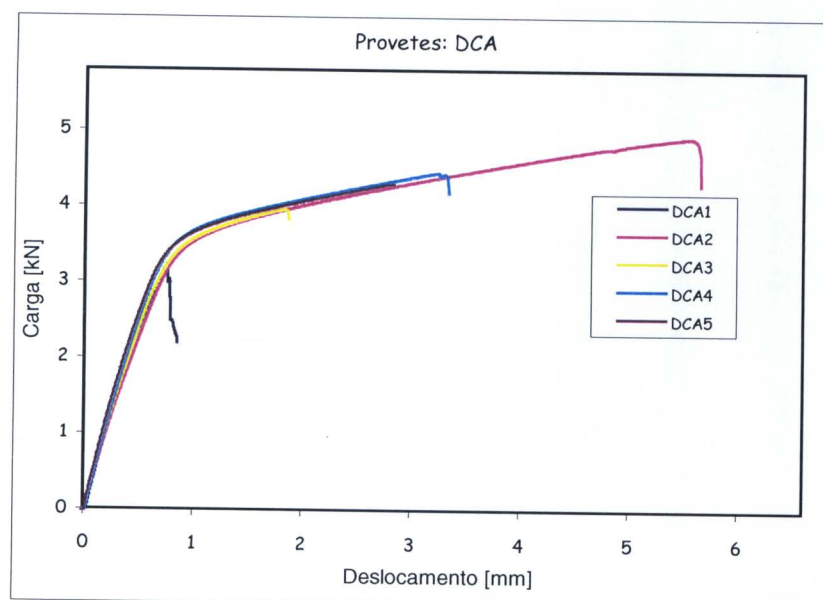


Figura 8.11 Curvas Força - Deslocamento para provetes DCA colados com TEROKAL 5046, Lixagem com P600 (D), envelhecidos a 42 dias (C), submetidos a ensaios estáticos (A).

8.6.2.4 Efeito de Condição Ambiental

Tabela 8.13 função da tensão rotura média obtida nos ensaios estáticos para as condições ambientais

Condição Ambiental	Tensão de Rotura Média [MPa]	Deslocamento até à Rotura média [mm]
Sem Envelhecimento	14,93	4,25
Env. a 21 dias	14,23	2,78
Env. a 42 dias	13,90	3,31

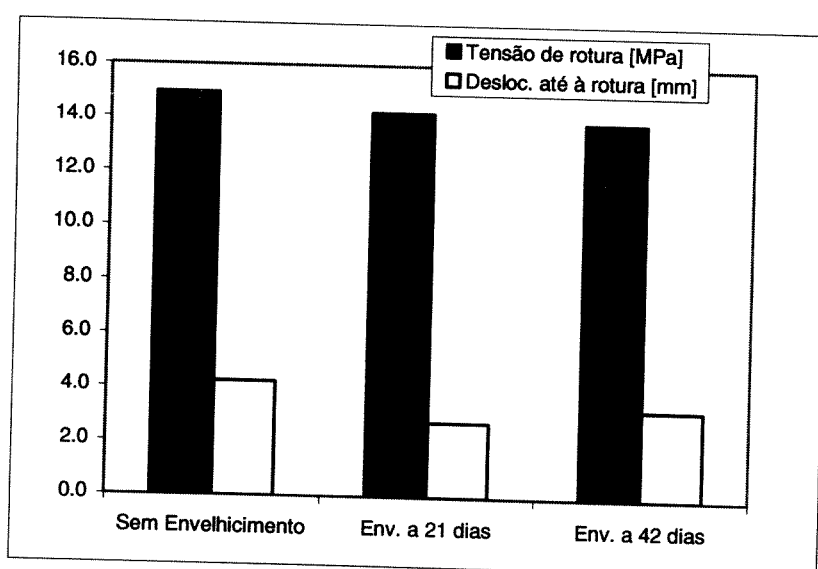


Figura 8.12 Variação da tensão de rotura e do deslocamento até à com condição ambiental.

8.6.2.5 Morfologia de Rotura

Sem Envelhecimento

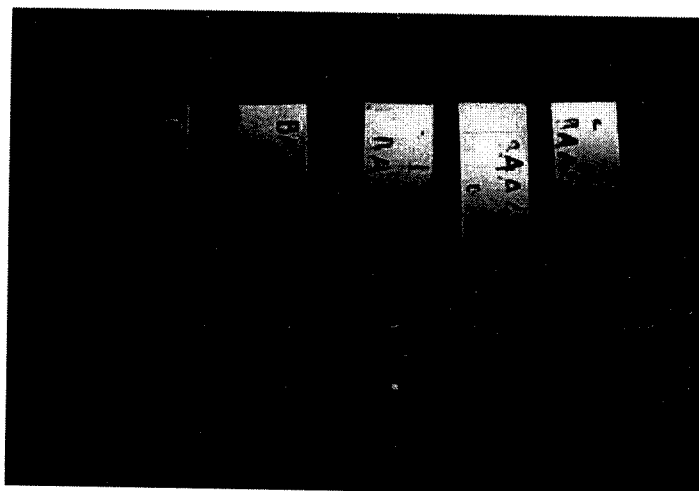


Figura 8.13. Superfície de rotura para os provetes BAA, lixados com P240 (B), sem envelhecimento (A) e submetidos a ensaios estáticos (A).

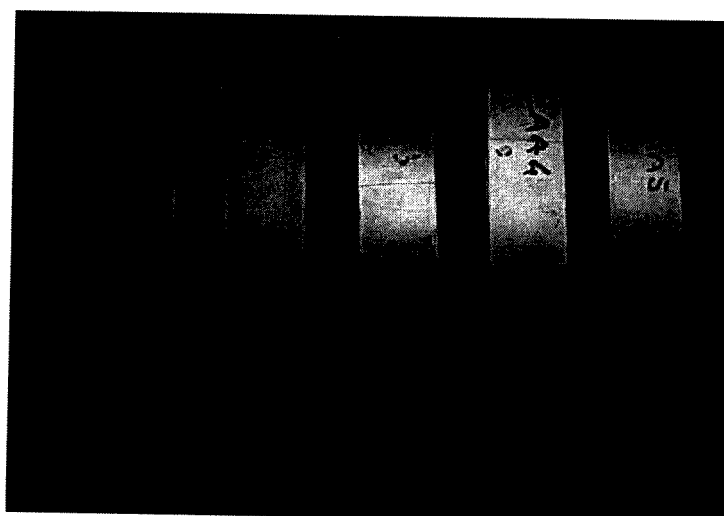


Figura 8.14. Superfície de rotura para os provetes CAA, lixados com P400 (C), sem envelhecimento (A) e submetidos a ensaios estáticos (A).

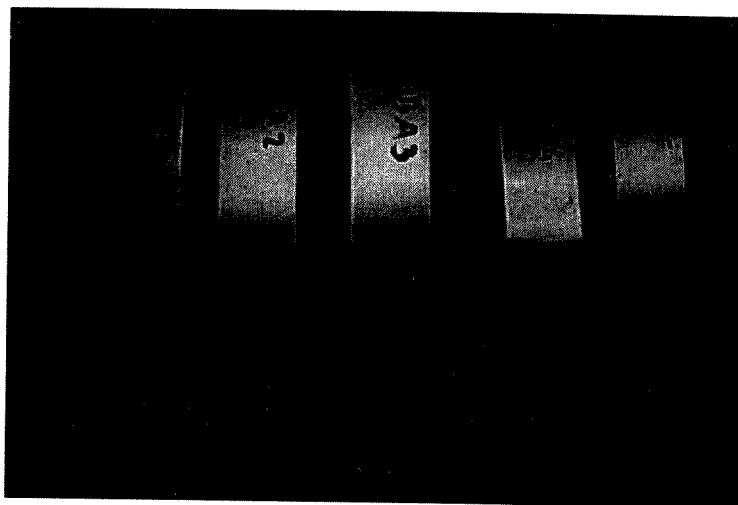
Com Envelhecimento

Figura 8.15. Superfície de rotura para os provetes DBA, lixados com P600 (D), envelhecidos a 21 dias (B) e submetidos a ensaios estáticos (A).

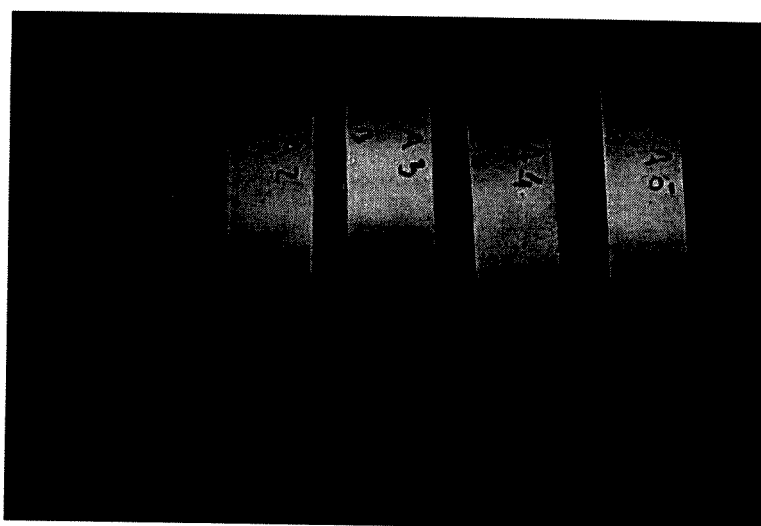


Figura 8.16. Superfície de rotura para os provetes DCA, lixados com P600 (D), envelhecidos a 42 dias (C), submetidos a ensaios estáticos (A).

8.6.3 Discussão dos Resultados

Analisando as tabelas 8.6 a 8.9, as figuras 8.3 a 8.6 para cada série de provetes e a figura 8.7 para as quatro séries, observa-se que a resistência ao corte é influenciada pelo acabamento superficial. A operação de lixagem que os provetes sofreram, além de eliminar a camada de óxido que prejudica uma boa aderência do adesivo no substrato, provoca uma determinada rugosidade na superfície do substrato.

Na figura 8.8 e 8.9 são apresentados, respectivamente, a variação da tensão de corte e deslocamento até à rotura com a rugosidade. Analisando estes gráficos, é possível dividi-los em três partes: a primeira corresponde à zona de baixa rugosidade e baixa tensão de corte (pequenos deslocamentos), a segunda corresponde à rugosidade ótima (para os valores ensaiados), na qual temos a máxima resistência (deslocamento máximo), e finalmente a terceira zona onde há um decréscimo na resistência apesar do aumento da rugosidade.

A menor resistência das juntas na presença de superfícies lisas ou muito rugosas acontece porque, enquanto no primeiro caso o adesivo não encontra nenhum ponto de ancoragem e consequentemente adere dificilmente ao substrato, quando este encontra uma superfície excessivamente rugosa não há uma penetração suficiente nas cavidades.

No capítulo 3 da revisão bibliográfica faz-se referência à relação da rugosidade com a tensão de corte (ver figura 3.10). Nessa curva existe uma rugosidade ótima para a qual a resistência é máxima. No trabalho experimental, os resultados foram idênticos, isto é, existe uma rugosidade ótima para a qual a tensão de corte atinge o seu valor máximo. O nível de rugosidade ótima para os provetes ensaiados é de $3.86 \mu\text{m}$.

Em relação à tensão de rotura obtida nos ensaios, para provetes curados à temperatura ambiente, os valores médios situaram-se entre 11-15 MPa, inferiores aos valores esperados. Segundo a informação técnica da *TEROSON*, o valor da tensão de rotura ao corte situa-se entre 16-20 MPa, para provetes curados à temperatura ambiente. Essa diferença de valores poderá ser devido:

- Espessura do adesivo ser diferente da espessura nominal recomendada pelo fabricante. É de notar que os maiores valores de resistência, foram obtidos nos provetes com espessura próxima da espessura nominal;
- Outra possível causa é a contaminação da superfície de colagem que é sempre difícil de controlar, apesar da verificação constante de todos os componentes do dispositivo de colagem, principalmente das borrachas e dos restos de adesivos.

A caracterização da superfície de rotura é feita com base na descrição feita no ponto 3.2 (ver figura 3.3). Neste estudo, a rotura foi essencialmente do tipo adesiva, para os provetes em que as chapas não sofreram qualquer tipo de lixagem ($R_z=2.98 \mu\text{m}$) e os que sofreram lixagem com granulometria P240 ($R_z=5.56 \mu\text{m}$). Os provetes lixados com P400 ($R_z=5.28 \mu\text{m}$) sofreram rotura do tipo mista, com excepção do provete CAA1, onde a rotura é adesiva. No caso dos provetes lixados com P600 ($R_z=3.86 \mu\text{m}$), a rotura foi quase exclusivamente mista, também com excepção do provete DAA1, em que se verificou a rotura na zona de interface. Apesar de se verificar rotura do tipo adesiva em dois provetes das séries CAA e DAA, podemos considerar morfologia mista nessas duas séries, admitindo má preparação superficial desses dois provetes. Esses provetes apresentam rugosidade muito superior à rugosidade considerada óptima. A morfologia da rotura adesiva significa que tem que existir um certo cuidado na preparação das superfícies (limpeza/desengorduramento) para não deixar no substrato *corpos estranhos* que dificultem a boa aderência do adesivo e, consequentemente, promovam uma fraca ligação na interface fazendo com que a rotura ocorra nesta zona.

Com base nas curvas carga-deslocamento, o adesivo *TEROKAL 5046 A/B* apresenta, de uma forma geral, um comportamento dúctil, sendo mais fácil controlar a rotura das juntas. Na figura 8.7, é possível constatar que quando o substrato sofre uma lixagem com lixa de granulometria P240 (série B), correspondendo uma rugosidade média de $5.56 \mu\text{m}$, a rotura ocorre para pequenos deslocamentos. É de notar a relação entre este tipo de comportamento e a morfologia exclusivamente adesiva para os provetes ensaiados nessas condições.

Em relação aos provetes envelhecidos, e tendo em conta os resultados apresentados anteriormente para os provetes não envelhecidos e preparados com a lixa P600 (D) (figura 8.6 e tabela 8.9), é possível constatar que o envelhecimento, para os valores de temperatura e humidade utilizados, influencia a resistência ao corte das juntas. Há um decréscimo da tensão de rotura (LSS) com o aumento de horas (ou dias) do ciclo de envelhecimento. Quanto ao deslocamento até à rotura, essa variação é menos significativa.

As possíveis justificações para a diminuição da resistência ao corte das juntas são:

- Formação das ligações de hidrogénio na interface de colagem entre a superfície metálica (substrato) e as moléculas de água, em detrimento das ligações anteriormente existentes entre o adesivo e o substrato. Há uma “deslocação” do adesivo da superfície metálica o que provoca uma diminuição da resistência.
- Possível oxidação da superfície dos aderentes devido a presença da água na interface.
- Como os provetes foram sujeitos a ambientes húmidos e simultaneamente a temperaturas moderadamente elevadas, essa degradação foi acelerada. A temperatura acelera a permeação das moléculas de água.

Com o envelhecimento, a rotura é do tipo mista, com excepção dos provetes 1 e 2 da série DBA (figura 8.15) e os provetes 1 e 5 da série DCA (figura 8.16) que apresentaram rotura do tipo adesiva. Quer isto dizer que a rotura não é completamente adesiva em ambientes húmidos, como é referido no capítulo 4 por Schmidt [25], mas sim, trata-se de uma rotura adesiva e mista. A meio da colagem (ou comprimento de sobreposição), a rotura dá-se no interior do adesivo (coesiva), e nas extremidades acontece na interface adesivo/substrato (rotura adesiva). Desta forma, e com base na figura 3.3, a rotura é denominada de mista.

Essas observações estão de acordo com a ideia defendida por Bikerman [43] no capítulo 4, em que, segundo ele, é difícil obter uma rotura perfeitamente adesiva em ambientes húmidos.

Observando as curvas carga-deslocamento, constata-se que o adesivo, mesmo depois da exposição na câmara ambiental, apresenta um comportamento dúctil.

8.7 ENSAIOS DE FADIGA

8.7.1 Descrição

Os ensaios foram realizados de acordo com a norma *EN ISO 9664* [73], sendo utilizada uma máquina de ensaios servohidráulica *MTS*.

Para a entrada dos dados, saída dos resultados, protecção do equipamento e definição do fim de cada ensaio, o sistema dispõe de um *software* de fácil utilização com um osciloscópio incorporado para fazer a monitorização dos ensaios e ajustar os ganhos proporcional, integral e derivativo mais adequados para cada tipo de ensaio.

8.7.2 Parâmetros dos Ensaio

Foram adoptados três níveis de tensão máxima (6.7, 6.5 e 5.5 MPa) que correspondem, respectivamente, a 45, 43 e 37 % da tensão de rotura do adesivo obtida anteriormente no ensaio de tracção ao corte. Os ensaios realizaram-se à tensão média constante (ou razão de tensão variável) de 3.5 MPa, a uma frequência de 5 Hz, em ambiente laboratorial.

8.7.3 Análise Estatística de Resultados

A metodologia de análise que foi seguida para o tratamento dos resultados experimentais obtidos nos ensaios de fadiga teve como base a especificação da *ASTM E 739 – 80* [75].

A regressão linear, que é a linha (recta numa escala log-log) ajustada aos pontos correspondentes às diversas observações, é definida considerando [76]:

$$\log N = X$$

N - Duração ou vida do provete

$$\log S = Y$$

Y - Tensão de corte máxima aplicada

Assim, a curva S-N, para um dado grupo de resultados de fadiga, é dado pela equação (8.2):

$$\log S = a + b * \log N \quad (8.2)$$

em que a e b são constante a determinar.

Os intervalos de confiança são definidos por hipérboles mas podem ser expressos por duas linhas rectas, paralelas à curva S-N e tangentes às hipérboles.

8.7.3.1 Equações das Curvas S-N

As equações das curvas S-N para as cinco condições (três de rugosidade e duas de envelhecimento) são:

a) Acabamento Superficial

- Provetes BAA, lixados com lixa P240 (alta rugosidade)

$$\log S = 1.721 - 0.200 * \log N$$

- Provetes BAA, lixados com lixa P400 (média rugosidade)

$$\log S = 1.370 - 0.119 * \log N$$

- Provetes BAA, lixados com lixa P600 (baixa rugosidade)

$$\log S = 1.335 - 0.115 * \log N$$

b) Com Envelhecimento

- Envelhecimento em ciclo climático durante 21 dias

$$\log S = 1.260 - 0.098 \cdot \log N$$

- Envelhecimento em ciclo climático durante 42 dias

$$\log S = 1.192 - 0.079 \cdot \log N$$

8.7.3.2 Equações da relação entre τ_i/τ_R e número de ciclos até à rotura**a) Acabamento Superficial**

- Provetes BAA, lixados com lixa P240 (alta rugosidade)

$$\log S = 0.75 - 0.22 \cdot \log N$$

- Provetes BAA, lixados com lixa P400 (média rugosidade)

$$\log S = 0.22 - 0.12 \cdot \log N$$

- Provetes BAA, lixados com lixa P600 (baixa rugosidade)

$$\log S = 0.07 - 0.10 \cdot \log N$$

b) Com Envelhecimento

- Envelhecimento em ciclo climático durante 21 dias

$$\log S = 0.02 - 0.08 \cdot \log N$$

- Envelhecimento em ciclo climático durante 42 dias

$$\log S = 0.35 - 0.14 \cdot \log N$$

8.7.4 Resultados

O número de ciclos até à rotura e o tipo de rotura que se verificou para os provetes ensaiados à fadiga sem envelhecimento são apresentados nas tabelas 8.14 a 8.16. As tabelas 8.17 e 8.18 apresentam os resultados obtidos para os DCB (lixados com P600) ensaiados à fadiga e envelhecidos a 21 e 42 dias, respectivamente.

Nas figuras 8.17 e 8.18 encontram-se ilustrados os resultados dos ensaios de fadiga, sendo apresentada a comparação das curvas SN para os três níveis de rugosidade e três níveis de envelhecimento.

As tabelas 8.19 a 8.23 e as figuras 8.19 e 8.20 referem-se a dados relativos à % dos três níveis tensão de corte máxima aplicada em relação à tensão de rotura função do número de ciclos até a rotura obtidos nos ensaios estáticos para cada condição de acabamento superficial e de envelhecimento.

8.7.4.1 Número de ciclos até à rotura

Provetes não envelhecidos

Tabela 8.14 Provetes BAB, lixados com P240, sem envelhecimento e submetidos a ensaios de fadiga.

Referência do provete	Número de ciclos	Tipo de rotura	Comentário
BAB1	25950	mista	
BAB2	42720	mista	
BAB3	15565	mista	
BAB1'	27756	adesiva	
BAB2'	32287	adesiva	
BAB3'	42240	adesiva	
BAB1''	*	*	rejeitado
BAB2''	63626	adesiva	
BAB3''	76983	adesiva	

Tabela 8.15 Provetes CAB, lixados com P400, sem envelhecimento e submetidos a ensaios de fadiga.

Referência do provete	Número de ciclos	Tipo de rotura	Comentário
CAB1	29507	mista	
CAB2	23025	mista	
CAB3	27935	mista	
CAB1'	53120	mista	
CAB2'	57406	mista	
CAB3'	51919	mista	
CAB1''	125048	mista	
CAB2''	137586	mista	
CAB3''	127765	mista	

Tabela 8.16 Provetes DAB, lixados com P600, sem envelhecimento e submetidos a ensaios de fadiga.

Referência do provete	Número de ciclos	Tipo de rorura	Comentário
DAB1	12420	mista	
DAB2	11760	adesiva	
DAB3	13335	mista	
DAB1'	26680	adesiva	
DAB2'	23156	adesiva	
DAB3'	32398	mista	
DAB1''	80225	adesiva	
DAB2''	95515	adesiva	
DAB3''	86575	adesiva	

Com envelhecimento

Tabela 8.17 Provetes DAB, lixados com P600, envelhecidos a 21 dias e submetidos a ensaios de fadiga.

Referência do provete	Número de ciclos	Tipo de rorura	Comentário
DBB1	13173	adesiva	
DBB2	15255	adesiva	
DBB3	*	*	rejeitado
DBB1'	42356	adesiva	
DBB2'	45952	adesiva	
DBB3'	65705	adesiva	
DBB1''	125075	adesiva	
DBB2''	154105	adesiva	
DBB3''	110175	adesiva	

Tabela 8.18 Provetes DAB, lixados com P600, envelhecidos a 42 dias e submetidos a ensaios de fadiga.

Referência do provete	Número de ciclos	Tipo de rorura	Comentário
DCB1	18195	adesiva	
DCB2	18365	adesiva	
DCB3	19618	adesiva	
DCB1	*	*	rejeitado
DCB2'	79777	adesiva	
DCB3'	78589	adesiva	
DCB1''	239235	adesiva	
DCB2''	271076	mista	
DCB3''	257236	mista	

8.7.4.2 Curvas SN

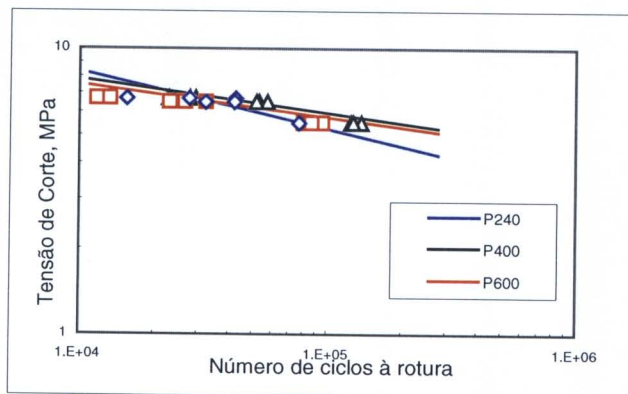


Figura 8.17 Comparação das curvas SN para os provetes colados com TEROKAL 5046, considerando os três níveis de rugosidade e submetidos a ensaios de fadiga.

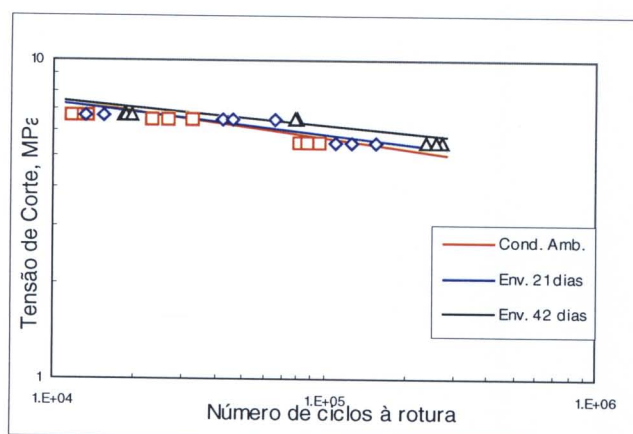


Figura 8.18 Comparação das curvas SN para os provetes colados com TEROKAL 5046, Lixagem com P600(D), sujeitas a três condições de envelhecimento, submetidos a ensaios de fadiga.

8.7.4.3 Relação entre τ_i/τ_R e número de ciclos até à rotura

Sem envelhecimento

Tabela 8.19 Variação % carga de rotura com N, para provetes lixados com P240 (B) não envelhecidos

Nível i	$\tau_{\text{máx}}$ (MPa)	$\tau_{\text{máx}}/\text{LSS}$ (%)	Nº ciclos médio N.
1	6.7	0.61	28078
2	6.5	0.59	34094
3	5.5	0.50	70305

Tabela 8.20 Variação % carga de rotura com N, para provetes lixados com P400 (C) não envelhecidos.

Nível i	τ_{mi} (MPa)	$\tau_{\text{mi}}/\text{LSS}$ (%)	Nº ciclos méd.
1	6.7	0.48	28822
2	6.5	0.47	54148
3	5.5	0.40	130133

Tabela 8.21 Variação % carga de rotura com N, para provetes lixados com P600 (D) não envelhecidos.

Nível i	τ_{mi} (MPa)	$\tau_{\text{mi}}/\text{LSS}$ (%)	Nº ciclos méd.
1	6.7	0.45	12505
2	6.5	0.44	27411
3	5.5	0.37	87438

Com envelhecimento

Tabela 8.22 Variação % carga de rotura com N, para provetes lixados com P600 (D) envelhecidos a 42 dias.

Nível i	$\tau_{mi}(\text{MPa})$	τ_{mi}/LSS (%)	Nº ciclos méd.
1	6.7	0.47	14214
2	6.5	0.46	51338
3	5.5	0.39	129785

Tabela 8.23 Variação % carga de rotura com N, para provetes lixados com P600 (D) envelhecidos a 42 dias.

Nível i	$\tau_{mi}(\text{MPa})$	τ_{mi}/LSS (%)	Nº ciclos méd.
1	6.7	0.48	18726
2	6.5	0.47	79183
3	5.5	0.40	255849

8.7.4.4 Curvas da relação entre τ_i/τ_R e número de ciclos até à rotura

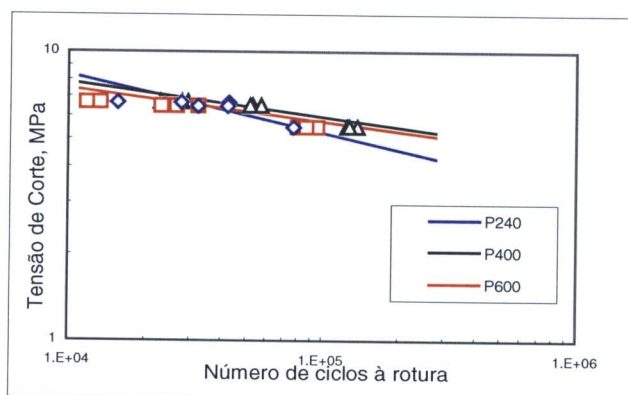


Figura 8.19 Curvas % de carga de rotura-Nº ciclos para os provetes colados com TEROKAL 5046, considerando as três condições de rugosidade e submetidos a ensaios de fadiga.

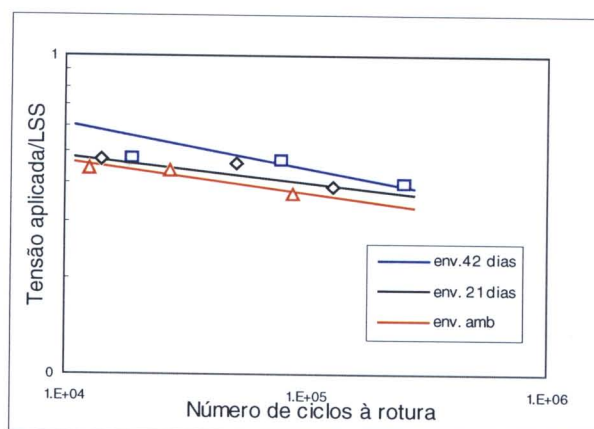


Figura 8.20 Curvas % de carga de rotura -Nº ciclos para os provetes colados com TEROKAL 5046, Lixados com P600(D), sujeitas a três condições de envelhecimento, submetidos a ensaios de fadiga.

8.7.5 Discussão dos Resultados

Da análise das curvas SN verifica-se que o comportamento à fadiga das juntas adesivas ensaiadas é influenciado tanto pelo acabamento superficial como pelo envelhecimento.

A influência do acabamento superficial, para valores de tensão elevada ou baixo número de ciclos, não é muito significativo. Para um número elevado de ciclos (aproximadamente $N=10^5$) há um aumento de resistência à fadiga com a rugosidade até um certo valor a partir do qual a mesma diminui. Para número de ciclos $N=10^5$, quando passamos dos provetes lixados com lixa P600 (rugosidade mínima) para os provetes P400 (rugosidade média) há um incremento de 4% na tensão máxima aplicada, e se considerar a rugosidade máxima para provetes lixados com P240, a resistência decresce cerca de 12% em relação aos provetes P400.

A diminuição de resistência para elevados valores de rugosidade foi também verificada nos ensaios de fadiga, e a justificação poderá ser o facto do mecanismo de adesão ser deficiente para elevada rugosidade porque não há penetração suficiente do adesivo enquanto que para baixa rugosidade o adesivo depara com dificuldades de aderência. Por outro lado, elevadas rugosidades poderão provocar o aparecimento de zonas com elevados factores de concentração de tensões no substrato que são determinantes para o comportamento à fadiga da junta.

As juntas, depois de envelhecidas, apresentam melhores desempenho, ao contrário dos ensaiados estaticamente. Para número de ciclos $N=10^5$, e para o caso das juntas que sofreram um envelhecimento durante 21 dias na câmara ambiental, a resistência melhora 3% em relação as não envelhecidas. Passados mais 21 dias (ciclos de 42 dias) esse aumento é de 6%, o que equivale um acréscimo total de 9% na resistência à fadiga.

No capítulo 3, faz-se referência à influência das condições ambientais, onde salienta-se o comportamento visco-elástico de adesivos estruturais. Os adesivos quando submetidos a ambientes de altas temperaturas dá-se a plasticização, tornando-se mais dúctil [58]. Esse aumento de ductilidade traduz-se no aumento da resistência da junta e poderá ser a justificação para o aumento da resistência das juntas envelhecidas em ambientes de

temperaturas e humidade relativa elevada. Por outro lado, a plasticização do adesivo nas zonas de elevadas concentrações de tensões redistribui as tensões, podendo levar a um aumento da resistência das juntas

De acordo com a informação do fabricante, a resistência é maior quando a cura é feita na estufa. Na realização das juntas, a cura foi realizada à temperatura ambiente. Para os ensaios de envelhecimento, os provetes foram introduzidos numa câmara ambiental, com temperatura superior à temperatura ambiental. Esse envelhecimento poderá ter influenciado o processo de cura, podendo também justificar o melhor desempenho das juntas envelhecidas quando submetidas a solicitação cíclicas.

Em relação à morfologia de rotura verificada, é adesiva/mista para os provetes BAB e DAB, e completamente mista para os provetes CAB. No caso dos provetes DAB, para o mesmo nível de tensão, a morfologia do tipo mista está associada a números de ciclos mais elevados. Com o envelhecimento a rotura foi quase exclusivamente adesiva com excepção dos provetes 2 e 3 da série DCB”, onde a rotura foi mista. O número de ciclo até à rotura é mais elevado para esses dois provetes.

***SIMULAÇÃO
NUMÉRICA***

9. ESTUDO NUMÉRICO

9.1 DESCRIÇÃO

No estudo numérico recorre-se ao método dos elementos finitos para a determinação e análise da distribuição e intensidade das tensões mecânicas desenvolvidas em juntas de sobreposição simples, utilizando modelos bidimensionais, quando sujeitas a uma solicitação nominal de corte, numa das extremidades, igual ao deslocamento na rotura médio.

O que se pretende é compreender alguns resultados obtidos experimentalmente, nomeadamente a variação da tensão de corte com a espessura do adesivo e a relação da distribuição de tensões ao longo da camada adesiva com o tipo de rotura.

O programa de elementos finitos utilizado para o cálculo foi o *ANSYS*, disponível no laboratório de computação - FEUP.

O cálculo foi efectuado para as condições de estado plano de deformação (análise bidimensional) e no domínio elástico, e tanto o adesivo como o substrato foram considerados isotrópicos.

9.2 MALHA DE ELEMENTOS FINITOS

Para definição da malha foram escolhidos os elementos *PLANE 82* de 8 nós e com 2 graus de liberdade *PLANE 82*, segundo as direcções dos eixos *x* e *y*.

O pormenor da malha de elementos finitos está representada na figura 9.1.

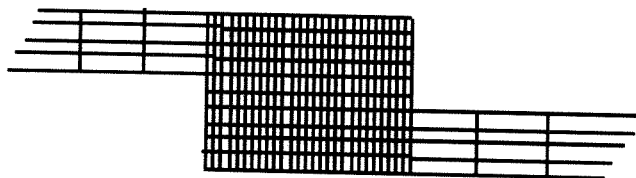


Figura 9.1 Malha de elementos finitos.

A malha é composta por 620 elementos: ao longo da espessura camada adesiva são utilizados 2 elementos, enquanto que ao longo da espessura dos substratos são utilizados 4 elementos.

Nesta análise não foram consideradas na definição das malhas as cunhas que foram utilizadas nos ensaios de experimentais para garantir o alinhamento da carga aplicada.

9.3. PROPRIEDADES DO ADESIVO E DO SUBSTRATO

Na realização das juntas utilizaram-se dois materiais que são frequentemente aplicados neste tipo de ligação. Trata-se do adesivo de epóxico e substrato em alumínio.

As propriedades mecânicas do alumínio utilizado como substrato e do adesivo de epóxico são apresentados na tabela 9.1.

Tabela 9.1 Propriedades do adesivo e do substrato

Adesivo		Substrato	
E (MPa)	ν	E (MPa)	ν
437	0.38	74788	0.3

As propriedades do alumínio são descritos no catálogo do material e, em relação ao adesivo, utilizou-se as mesmas propriedades de um adesivo idêntico (*Terokal 5045*), que foi utilizado

no estudo de Gonçalves (5). No referido estudo, os provetes planos com espessura de 1 mm, realizados de acordo com a norma ISO R527, foram ensaiados numa máquina JJ Instruments - T30K, para temperatura de 20 ° C e 72% de H.R, a uma velocidade de 1 mm/min.

Convém salientar de que existe uma certa controvérsia relativamente à determinação das propriedades dos adesivos, na medida em que, ensaios com provetes espessos não parecem condizer a propriedades semelhantes às determinadas com filmes finos [5].

9.4 CONDIÇÕES FRONTEIRAS

As condições fronteiras foram impostas, com base nas condições reais de ensaios estáticos, nos nós das extremidades das juntas. Na figura 9.2, representa-se a geometria e condições fronteiras do modelo. Nos nós da extremidade A foi imposto um deslocamento nulo na direcção x, na extremidade B um deslocamento equivalente ao deslocamento médio de rotura de 4 mm, e ao longo dos nós das linhas C, D, E e F um deslocamento nulo na direcção y. As tensões a considerar, quando aplicado esse deslocamento, são as tensões normais σ_x e σ_y , e tensões de corte τ_{xy} .

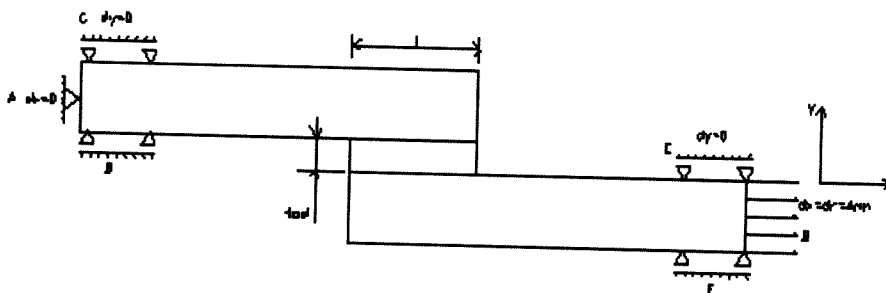


Figura 9.2 Geometria e condições fronteiras.

9.5 RESULTADOS

Os resultados são apresentados em função do factor de concentração de tensões (FCT) no adesivo, calculado pelo quociente entre a tensão obtida no modelo numérico e a tensão nominal obtida nos ensaios mecânicos para a situação de rotura. Esses resultados permitem explicar o comportamento das juntas coladas e a morfologia de rotura na zona adesiva.

Nos gráficos das figuras 9.3 e 9.4 apresentam-se as distribuições de tensões na zona de interface adesivo/aderente ($y=0$), ao longo do comprimento de sobreposição, obtidas pelo modelo numérico. Na figura 9.3 é representada graficamente as distribuições de tensões normais σ_{xx} , tensões de corte τ_{xy} e tensões equivalentes de Von Mises, σ_{eq} , e na figura 9.4 compara-se a distribuição de tensões equivalentes, utilizando o factor de concentração de tensões, para três espessuras de camada de adesivo diferentes (200, 250 e 300 μm).

No ponto 5.2 faz-se referência à relação que existe entre as tensões e o tipo de rotura. As roturas do tipo adesiva resultam da actuação de tensões de arrancamento na interface adesivo/substrato (tensões normais e/ou paralelas à superfície de colagem), e as roturas coesivas resultam da actuação de tensões de corte no meio do adesivo [53]. Não se considera o comportamento viscoelástico do adesivo, sendo o estudo feito em regime linear-elástico.

É notório que na extremidade de colagem ($l=12,5\text{mm}$) há uma forte concentração de tensões equivalentes σ_{eq} e de tensões normais σ_{xx} (tensões de arrancamento), o que poderá explicar essa forte tendência para a ocorrência de roturas adesivas nesses locais, de acordo com o efeito verificado nos ensaios experimentais. As tensões equivalentes e as tensões normais apresentam os valores mínimos no meio de colagem, atingindo valor nulo no caso das tensões normais. É também nessa zona que as tensões de corte atingem os seus mínimos. Esse facto explica a morfologia do tipo mista no meio de colagem, a adesiva nos extremos e, consequentemente, uma rotura mista em toda a zona de interface.

Quando se compara a variação das tensões equivalentes com a espessura da camada adesiva, é evidente o aumento significativo do FCT com a diminuição da espessura da camada adesiva na extremidade da colagem. A meio da colagem, essa diferença é menos

significativa, onde as três geometrias apresentam comportamento quase idênticos com inversão da tendência entre as geometrias de espessura $t_{ad}=200\ \mu\text{m}$ e $t_{ad}=250\ \mu\text{m}$, enquanto a de maior espessura ($t_{ad}=300\ \mu\text{m}$) continua a apresentar o menor FCT.

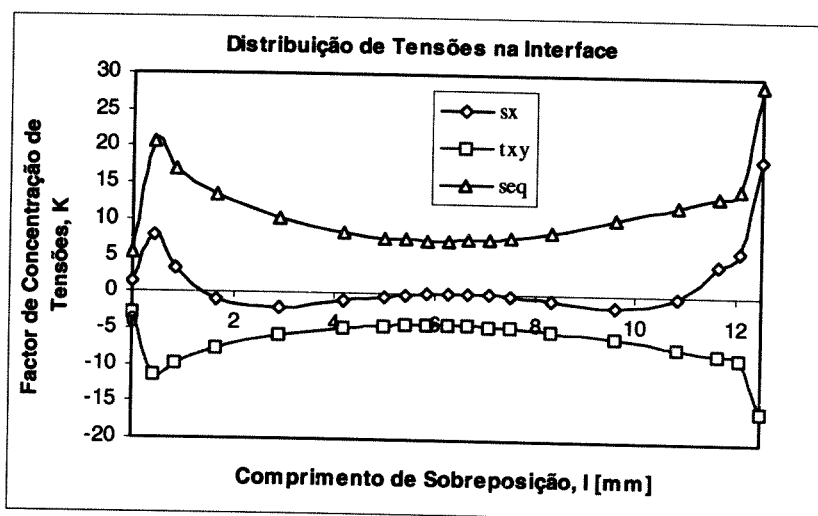


Figura 9.3 Distribuição de Tensões Normais (σ_x), Tensões de Corte (τ_{xy}) e Tensões Equivalentes (σ_{eq}).

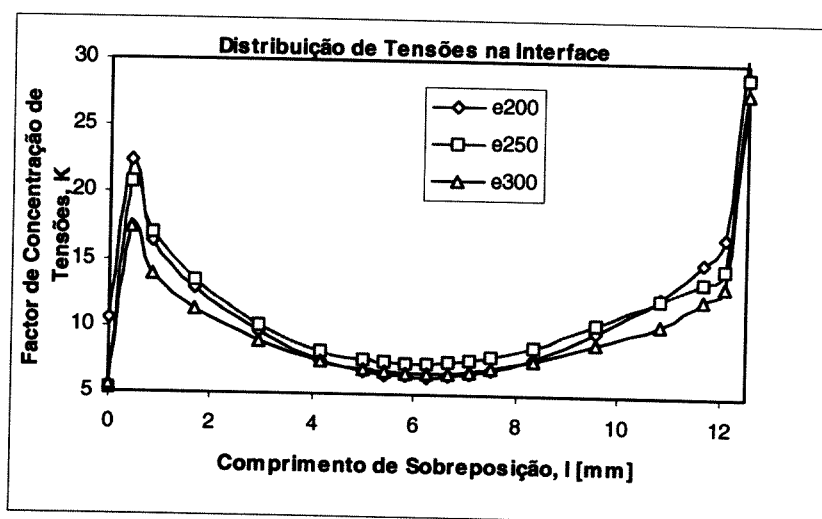


Figura 9.4 Variação das Tensões Equivalentes (σ_{eq}), na zona de interface, com a espessura do adesivo.

Para se perceber melhor o que se passa no meio do adesivo ($y=tad/2$), apresentam-se, na figura 9.5, os resultados obtidos em termos de distribuição de tensões equivalentes, para as três geometrias (três espessuras diferentes) consideradas.

A variação do FCT com a espessura da camada adesiva, nessa zona, é semelhante ao que se verifica na zona de interface, isto é, nas duas extremidades ($l=0$ e $l=12.5$) o FCT aumenta com a diminuição da espessura, e no meio ($l=l/2$), a geometria com espessura do adesivo de $tad=250\text{ }\mu\text{m}$ é a que apresenta valores maiores em vez de ser a de espessura menor $tad=200\text{ }\mu\text{m}$.

A distribuição de tensões equivalentes no meio do adesivo ($y=tad/2$) é simétrica, o que não se verifica na zona de interface ($y=0$). É necessário salientar que a distribuição de tensões ao longo da interface ($y=0$) é idêntico à distribuição ao longo da outra interface ($y=tad$). Verificou-se, na maioria das observações feitas aos provetes ensaiados experimentalmente, que as superfícies de rotura das duas faces dos substratos colados eram simétricas, facto este que poderá estar relacionado com a distribuição de tensões simétrica ao longo da camada adesiva.

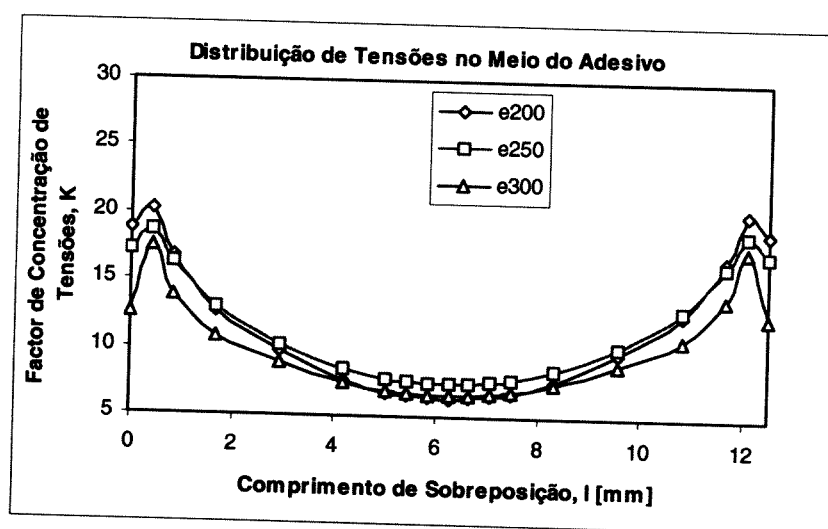


Figura 9.5 Variação das Tensões Equivalentes (σ_{eq}), no meio do adesivo, com a espessura do adesivo.

9.6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir das distribuições de tensões ao longo do comprimento de sobreposição para as zonas de interface e meio de adesivo, foi possível constatar que é nas extremidades onde o FCT é máximo. Comparando os valores máximos de FCT, com base na distribuição de tensões equivalentes, para a zona de interface com os valores para a zona do meio de adesivo, verifica-se que na zona de interface esses valores são maiores. No caso da geometria de espessura $t_{ad}=250\mu\text{m}$, o máximo verificado no meio da colagem corresponde a 65% do verificado na zona de interface, enquanto que para a geometria de espessura $t_{ad}=200\mu\text{m}$, essa relação é de 63%.

Essa diferença a nível de concentração de tensões explica a tendência para ocorrer rotura na zona de interface em vez de ser no meio do adesivo, de acordo com os resultados obtidos experimentais.

No que se refere as distribuições das tensões normais σ_{xx} , tensões de corte τ_{xy} e tensões equivalentes σ_{eq} e da relação entre elas, e tendo em consideração o FCT máximo na extremidade da colagem, verifica-se que as tensões normais σ_{xx} e principalmente as tensões equivalentes σ_{eq} apresentam valores superiores às tensões de corte τ_{xy} . As tensões normais σ_{xx} , no meio de adesivo, tornam-se tensões compressivas. Estas observações estão de acordo com os estudos de Correia [3] e de Guess e al. [53]. A comparação com resultados publicados nesses estudos anteriores é feita em termos qualitativos porque os adesivos utilizados nos diferentes estudos apresentam pequenas diferenças nas suas propriedades mecânicas.

Constatou-se também que o factor de concentração de tensões apresenta o seu máximo para a situação de mínima espessura. No entanto, e com base nos métodos analíticos mencionados no ponto 5.3, verifica-se que há um efeito de flexão nas juntas devido ao desalinhamento das forças. O momento flector depende da espessura do adesivo e do substrato. Quando essas espessuras aumentam, o momento flector também aumenta. Esse aumento traduz-se numa diminuição das resistências das juntas para espessuras elevadas.

Analisando os resultados dos modelos numéricos verifica-se que o factor de concentração de tensões máximo diminui com o aumento da espessura do adesivo. No entanto, o aumento da espessura do adesivo provoca um aumento no momento flector e nas tensões secundárias de arrancamento e de clivagem. Este efeito só poderá ser tido em conta utilizando um modelo numérico incluindo uma análise não - linear geométrica. Isto indica que existe um valor óptimo para a espessura do adesivo, como referido no ponto 3.3 e representado na figura 3.8.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

10. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

10.1 CONCLUSÕES

10.1.1 ENSAIOS ESTÁTICOS

Relativamente ao comportamento das juntas de sobreposição simples, coladas com adesivo TEROKAL 5046 A/B, submetidas a ensaios de tracção (por corte) estáticos, sem sofrer qualquer tipo de envelhecimento:

- O tratamento superficial (limpeza/desengorduramento) tem influência positiva no comportamento das juntas coladas. A lixagem além de eliminar a camada de óxido, induz rugosidade à superfície de colagem. Quando a superfície é desengordurada, antes da colagem, a sua resistência aumenta;
- O acabamento superficial, medida pelo parâmetro rugosidade, tem um papel preponderante no comportamento das juntas. A resistência ao corte melhora com o aumento da rugosidade, até um certo valor óptimo, a partir da qual esta diminui com o aumento da rugosidade. Isto quer dizer, que existe uma rugosidade óptima para que a resistência da junta seja máxima. Em relação ao deslocamento até à rotura, o comportamento é idêntico;
- O valor óptimo de rugosidade para as juntas ensaiadas é de 3.86 μm .
- A juntas com maiores valores de tensão de corte são as que apresentaram espessuras próximas da espessura nominal;
- Há um valor óptimo de espessura do adesivo, aproximadamente igual à espessura nominal recomendada.
- A morfologia de rotura ocorrida foi essencialmente do tipo adesiva para baixos valores de deslocamento até à rotura, com foi o caso dos provetes da série BAA. No caso de grandes

deslocamentos a morfologia foi essencialmente adesiva/mista para os provetes da série CAA, e mista para os da série DAA;

- Os provetes que sofreram rotura mista, correspondendo à rugosidade óptima, são os que apresentaram maior resistência;
- A operação de lixagem manual melhorou adesão e, conseqüentemente, provocou em certos provetes rotura do tipo mista;
- O adesivo *TEROKAL 5046 A/B* apresenta um comportamento dúctil, o que nos dá garantias em termos de controle da rotura de juntas.

Em juntas, envelhecidas a 21 e 42 dias, solicitadas estaticamente:

- O envelhecimento influencia negativamente o comportamento das juntas sob solicitações estáticas. Há um decréscimo da tensão de corte de 5% e de 7% quando exposto na câmara ambiental durante 21 e 42 dias respectivamente, em relação à condição de não envelhecimento ou estado fornecimento;
- O adesivo apresenta um comportamento dúctil após o ciclo de envelhecimento;
- A morfologia de rotura é do tipo adesiva/mista.

Em conclusão, pode-se dizer que este adesivo apresentou bom desempenho, sendo possível melhorá-lo com recurso a um tratamento superficial mais rigoroso, evitar, ao máximo, a contaminação superficial durante a colagem, tentar obter o acabamento superficial mais adequado para o substrato e ser rigoroso na obtenção da espessura do adesivo. Também é aconselhável uma cura em estufa que, além de permitir um fácil controle e de garantir a repetibilidade das condições ambientais poderá levar a maiores tensões de rotura. Perante condições adversas de temperatura e humidade há uma degradação da resistência ao corte das juntas ao longo do tempo.

10.1.2 ENSAIOS DINÂMICOS

Em relação ao comportamento à fadiga:

- O tratamento superficial adequado melhora o desempenho de juntas coladas;
- A vida à fadiga aumenta com o aumento da rugosidade, até um certo valor, a partir da qual diminui;
- A resistência à fadiga é influenciada positivamente pelo envelhecimento;
- A morfologia de rotura é do tipo adesiva e mista, e com envelhecimento, a rotura é quase exclusivamente adesiva.

10.1.3 ESTUDO NUMÉRICO

Do estudo numérico efectuado, as principais conclusões que se pode tirar são:

- A análise numérica, permite explicar a morfologia de rotura das juntas, através da análise da concentração de tensões ao longo da camada adesiva.
- Há uma elevada concentração das tensões de arrancamento na extremidade da junta, o que justifica a morfologia de rotura adesiva nessa zona das juntas ensaiadas.
- A rotura coesiva que se verifica no meio da colagem é explicada pela diminuição das tensões normais de arrancamento.
- A meio do adesivo, a distribuição de tensões é simétrica nas duas extremidades.
- O factor de concentração de tensões máximo, que se verifica nas extremidade, aumenta significativamente com a diminuição da espessura da camada do adesivo. Este efeito não é tão acentuado a meio da colagem

10.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Seria importante para completar esse estudo a utilização da técnica de análise experimental de tensões baseado no efeito termoelástico, utilizando o sistema SPATE, que permite determinar a distribuição de tensões numa área, detectar e monitorizar as fendas de fadiga.

O estudo do comportamento de diferentes tipos de geometrias de juntas pela técnica dos elementos finitos é também outro assunto com motivos de interesse. Poder-se-á recorrer ao programa ABAQUS utilizando modelos tridimensional, e seria interessante considerar a influência do angulo de filete e da temperatura. Uma possível forma para quantificar o efeito destes parâmetros seria a utilização do *Virtual Crack Closure Technique* para determinar taxas de libertação de energia.

Recomenda-se a realização de ensaios de impacto e de fluência, e o processo de cura numa estufa com controlo de temperatura.

Seria interessante, para compreender melhor o efeito da temperatura e da humidade no comportamento à fadiga de juntas, a determinação experimental da relação entre a velocidade de propagação da fenda de fadiga (da/dN) e a amplitude da factor de intensidade de tensões no ciclo de carga (ΔK).

E finalmente, teria interesse efectuar um estudo dos mecanismos de degradação de propriedades com a temperatura e humidade, o que permitiria um melhor conhecimento da influência desses parâmetros na durabilidade das juntas adesivas.

REFERÊNCIAS
BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Monteiro, D. F., *Análise do Comportamento à Fractura de Juntas de Aços de Juntas efectuadas com Adesivos Estruturais*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1995.
2. Correia, A.C.M., *Estudo Químico e Envelhecimento Higrotérmico de um Adesivo Epóxico. Comportamento Mecânico de Juntas Coladas*, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, 1993.
3. Esteves, J.L., *Estudo do Comportamento de Adesivos Estruturais*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1990.
4. Moreira, A. P., *Colagem - A Inovação na União de Peças*, Tecnometal, Nº61, Março/Abril 1989.
5. Gonçalves, J. P .M, *Contribuições para a Análise Numérica e Experimental do Comportamento de Juntas de Sobreposição Simples*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2000.
6. Adams, R. D., *The Project of Adhesively – Bonded Lap Joints*, em: Mechanical Behaviour of adhesive Joints, General Lectures, Pluralis, pp. 3-19, 1997.
7. Adams, R. D.; Comyn, J.; Wake, W. C., *Structural Adhesive Joints in Engineering*, Chapman & Hall, London, 1997.
8. Schimdel - Bidinelli, E. A., *Pratique du Collage Industrial*, TEC & DOC - Lavoisier, 1992.
9. Preiswerk, E., *Technica*, 4 e 5, 247, 1965.
10. Couvrat, P., *Le Collage Structural Moderne* , TEC&DOC - Lavoisier, 1992.

11. Mark H. F., Gaylord N. G. Bikales N. M., *Encycloppedia of Polymer Science and Technology*, vol. 1, Interscience Publishers, John Wiley & Sons, Inc.-New York.
12. May A. C., *Epoxy Resin – Chemistry and technology*, 2ª ed, Marcel Dekker, Inc, Cap. 7 Epoxy Resin Adhesives, Armand F. Lewis.
13. Kinloch, A.J., *Structural Adhesives*, Applied Science Publishers LTD, 1986.
14. Shields J., *Adhesives Handbook*, Butterworths, London, 1971.
15. Saunders, T. F., Levy M. F., Serino, J. F., J. Polym. Sci..Part A-1, 5, 1967.
16. Zahir, S. A, *Proceedings of 3th International Conference in Organic Coatings Science and Technology*, Julho 14-18, Atenas, 745, 1980.
17. Monteiro D. F., Oliveira F. F., Fernandes A. A., *Resistência ao Impacto de Juntas de Aço ao Carbono Coladas com Adesivos Estruturais–Parte I– Factores de Resistência das Juntas*, Ingenium, Série, Nº 16, Págs 62-68, Fev. 1997.
18. Bikerman J. J., *Science of Adhesives Joints*, 2ª ed. Academic Press. N.Y, 1968.
19. Friend, J., *Bonding Suggestions for the Piezoelectric Motor Sistem*, University of Missouri-Rolla, May 1995.
20. Ancenay, H., Benazet, D., *Action Prospective Collage*, Etude nº1.3 N. 27.2, CENFIM.
21. Hartshorn, S. R., *Structural Adhesives - Chemistry and technology*, Plenum Press, New York, 1986.
22. Lopes, D., *Caracterização Química e Mecânica de um adesivo epóxico comercial*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1992.
23. Keisler C., *Etude de la Resistance à Impact d'Assemblages Collés - Influence des étates de surface*, These de Docteur, Universite de Bordeaux, 1992.

-
24. Pinto R., Oliveira F., Marques A. T., Fernandes A. A., *Comportamento à Fadiga de Juntas Coladas de uma liga de Alumínio*, Brite/Euram Project N° 4079, INEGI.
 25. Schmidt R., G., Belle J. P., *Adv. Polym.Sci.*, 75, 33, 1985.
 26. Pinto M., *O Processamento de Colagem- 1ª parte*, Tecnologia Qualidade, ISQ, série III, n° 23, 3º trim., 1996.
 27. Apicella A., Nicolais L., *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.*, 20, 138-144, 1981.
 28. Pogany G. A., *Polymer*, 17 (8), 1976.
 29. Rider D. K., *Prod. Eng.*, 35 (75), Junho, 1964.
 30. Sneddon I. N., *Adhesives*, D. D. Eley ed., Oxford University Press, London, pp. 207, 1961.
 31. Imanaka M., Kishimono W., *Zairyo* 1986/6 vol.35, n°393, pp. 623-8 (tradução francesa), IRSID TJ8804, Fevereiro, 1988.
 32. Ennis B. C., Pearce P. J., Morris C. E. M., *j. appl. polym. Sci.*, 37, 15, 1989.
 33. Halioui M., Gonçalves F., Lieurade H. P., Cassir O., Bonnard A., Rimlinger L., RE 9306 - IRSID, Junho, 1989.
 34. Vincent G. G., *Adhesive Age*, 10 (8), 38, 1967.
 35. Fargette B., Gilibert Y., Rimlinger L., *Mec. Ind. et Mat.*, 46 (1) 16, 1993.
 36. Kwei K., *J. Appl. Polym. Sci.*, 10, 1647, 1966.
 37. Johncock P., Tudgey G. F., Br., *Plym., J.*, 13 (3), 1983.
 38. Delollis, N. J., Montoya O., *J. Appl. Polym. Sci.*, 11, 983-989, 1967.
 39. Kerr C., Orman S., Br. *Polym. J.*, 1970, 2 (3), 97-103, 1970.
 40. Kerr C., MacDonald N. C., Orman S., Br. *Polym. J.*, 1970, 2 (1), 1970.
-

-
41. Falconer D.J., MacDonald N. C., Walkes P., Chem. Ind. London, 86, 1230, 1964.
 42. Bellenger V., Morel E., Verdu J., J. Mat. Sci., 23, 4244, 1988.
 43. Olson W. Z., Lulling R. M., *Shear Strength of Adhesive in Stainless Steel and Aluminum Lap Joints*, ASD-TR 61-497, 1647, 1966.
 44. Black J. M., Blomquist R. F., Ind. Eng. Chem., 50, 918, 1958.
 45. Marques, A.T., Esteves, J.L.S., *Adesivos Estruturais - Reflexão Sobre a sua Utilização*, Tecnometal, N°68, Maio/Junho, 1990.
 46. Findlater, DA *Preliminary Project Approach for Adhesively Bonded*, vol. 7, nº3, 1987.
 47. Findlater, *Dnew Clues to Glues in Action*, PERA - Internal Report.
 48. Guess, T. R.; Allred, R. E.; Gerstle, F. P. Jr., *Journal of Testing and Evaluation*, 5 (3), pp. 84-93, 1977.
 49. Bathe, K. J., *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1996.
 50. Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L., *The Finite element Method: Solid and Fluid Mechanics; Dynamics and Non-Linearity*, McGraw-Hill, London, 1994.
 51. Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L., *The Finite element Method: Basic Formulation and Linear Problems*, McGraw-Hill, London, 1994.
 52. Cook, R. D.; Malkus, D. S.; Plesha, M. E., *Stress Concentration Factors for Bonded Lap Joints*, Jornal of Aircraft, vol. 8, pp. 817-820, 1971.
 53. Guess, T. R.; Allred, R. E.; Gerstle, F. P., *Comparison of Lap Shear Test Specimens*, Journal of Testing and Evaluation, vol. 5, pp. 84-93, 1977.
 54. Adams, R. D.; Peppiat, N. A, *Stress Analysis of Adhesive-Bonded Lap Joints*, Journal of Strain Analysis, vol. 9, pp. 185-196, 1974.
-

-
55. Barker, R. M.; Hatt, F., *Analysis of Bonded Joints in Vehicular Structures*, AIAA Journal, vol. 11, pp. 1650-1654, 1973.
 56. Rao, B. N.; Rao, V. K.; Yadagiri, S., *Analysis of Composite Bonded Joints*, Fibre Science and Technology, vol. 17, pp. 77-90, 1982.
 57. Cooper, P. A.; Sawyer, J. W., *A Critical Examination of Stress in an Elastic Single Lap Joint*, TP-1507, NASA, 1979.
 58. Adams, R. D.; Coppendale, J.; Peppiat, N. A., *Failure Analysis of Aluminuim-Aluminuim Bonded Joints*, em: Adhesion 2, K. W. Allen, ed., Applied Science Publishers, London, pp. 105-120, 1978.
 59. Raghava, R. S.; Cadell, R. M.; Yeh, G. S., *Macroscopic Yield Behaviour of Polymers*, Journal of Material Science, vol. 8, pp. 225-232, 1973.
 60. Bogy, D. B., *Edge Boded Dissimilar Orthogonal Elastic Wedges under Normal and Shear Loading*, Journal of Applied Mechanicis, vol. 35, pp.460-466, 1968.
 61. Bogy, D. B., *Two Edge-Boded Elastic Wedges od Different Materials and Wedge Angles under Surface Tractionis*, Journal of Applied Mechanicis, vol. 38, pp.377, 1971.
 62. Volkersen, O., *Die Nietkraftoerteilung in Zubeanspruchten Nietverbindungen Mit Konstanten Loschonquerschnitten*, Luftfahrtforschung, vol. 15, pp. 41-47, 1938.
 63. Goland, M.; Reissner, E., *The Stresses in Cemented Joints*, Journal of Applied Mechanics, vol. 66, pp. A17-A27, 1944.
 64. Carpenter, W. C., *Goland and Reissner were correct*, Journal of Strain Analysis, vol. 24, pp. 185-187, 1989.
 65. Adams, R. D.; Peppiat, N. A., *Effect of Poisson's ratio Strains in Adherentson on Stress of an Idealized Lap Joint*, Journal of Strain Analysis, vol. 8, pp. 1134-139, 1973.
-

-
66. Hart-Smith, L. J., *Analysis and Projecto of Advanced Composite Bonded Joints*, CR 2218, NASA, 1974.
 67. Hart-Smith, L. J., *Adhesive Bonde Double-Lap Joints*, CR112235, NASA, 1973.
 68. Grant, P., *Analysis of Adhesive Stress in Bonded Joints*, IPC Science and Technology Press Ltd, 1978.
 69. Adams, R. D.; Mallick, V., *A Method for the Stress Analysis of Lap Joints*, Journal of Adhesion, vol. 38, 1992.
 70. De Bruyne, N. A, *Fundamentals of Adhesion*, In Proceedings of Conference on Bonded Aircraft Structures, 1957.
 71. Projecto *BRITE/EURAM* n° 4079, *Long Life PSV Study*, 1996.
 72. ASTM D1002 – 72, *Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*, 1983.
 73. EN ISO 9664, *Test methods for Fatigue Properties of Structural Adhesives in Tensile Shear*, 1993.
 73. TEROSON, *Terokal 5046/ Edition 1- Technical Data Sheet*, Fevereiro, 1997.
 74. ASTM E739 – 80, *Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (ϵ -N) Fatigue Test*.
 75. Moura Branco, C., Fernandes A. A., Tavares e Castro, P. M. S., *Fadiga de Estruturas Soldadas*, Fundação Calouste Gulbenkian, 1ª edição, pp. 885-881, 1986.

ANEXOS

ANEXO A - MATERIAIS E SUAS PROPRIEDADES**A.1 SUBSTRATO**

O material que constitui o substrato dos provetes é a liga de alumínio 6016 (*registration number* 6016 / CH).

A.1.1 Composição Química

A composição química desta liga é a seguinte:

Tabela A.1 Composição química da liga de alumínio 6016, % massica. Key to aluminium alloys, 4th edition, Aluminium Verlag.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Impurezas	
1.0-1.5	0.50	0.20	0.20	0.25-0.6	0.10	-	0.20	0.15	cada	total
									0.05	0.15

A.1.2 Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas estão indicadas no tabela 2.

Tabela A.2 Principais propriedades mecânicas da liga de alumínio 6016

Módulo de Young, E MPa	Tensão de Rotura, Rm MPa	Tensão de Cedência, Rp-0,2 MPa	Extensão Após Rotura, Am %
74788	227	127	21,5

A.2 ADESIVO

O adesivo utilizado para a realização destes provetes é o *TEROKAL 5046 A/B*, produzido pela *TEROSON*. Este produto encontra-se ainda numa fase de desenvolvimento, pelo que são de admitir possíveis alterações na sua composição e propriedades.

Este adesivo, a base de resina epóxico, é composto por 2 componentes, designados por “*Componente A*” e “*Componente B*”, que ao serem misturados dão origem ao adesivo pronto a aplicar.

Este produto é utilizado principalmente para a união de metais, de entre os quais se destaca o alumínio e o aço. São de referir dois pormenores de importância vital para a obtenção do desempenho máximo das uniões obtidas:

- As partes a unir devem ser projectadas de tal forma que os esforços a que sujeita a ligação sejam esforços de tracção ou esforços cortantes. Este tipo de união nunca deve ser sujeito a forças de arrancamento (designadas por *pell forces*);
- A configuração da junta mais adequada é a designada por *simple overlap joint*.

A.2.1 Propriedades Físicas

Tabela A.3 Propriedades do adesivo pronto a aplicar (após mistura dos dois componentes, A e B)

Cor	Mistura (Componente A + Componente B)
Odor	castanho
Massa volúmica a 20° C	depois de curado não tem cheiro
Pot life	1.20 g/cm ³
Quantidade de mistura	100 g
Temperatura	20 ° C
Solidificação	100 %
Tempo de cura	
Resistência mínima	6 horas a 20 °C
Resistência final	30 minutos a 100 °C

A.2.2 Propriedades Mecânicas

Tabela A.4 Propriedades mecânicas do adesivo.

Tensão de Corte a 23 °C (no substrato de alumínio) segundo DIN EN 1465	
Cura a temperatura ambiente	16-20 MPa
Cura a alta temperatura	> 20 MPa

A.2.3 Aplicação do Adesivo

Os dois componentes são aplicados com uma pistola que foi adaptada especificamente para as bisnagas duplas que contem em cada compartimento o componente A e o componente B. A mistura faz-se através da passagem dos dois componentes por um misturador estático.

A *TEROSON*, na sua informação técnica, faz as seguintes recomendações:

- adesivo deve ser aplicado preferencialmente logo após a sua mistura;
- adesivo deve ser aplicado apenas numa das faces, possuindo uma espessura de 0.250 mm;
- É recomendado não usar os dos dois primeiros centímetros de adesivo dado que a sua mistura pode não ter sido perfeita.

A.3 PRODUTOS QUÍMICOS

- Adesivo *TEROKAL 5046 A/B*;
- Ridolene 1402;
- Água desionizada.

ANEXO B - PROCEDIMENTOS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS ESTÁTICOS

Os procedimentos para a realização dos ensaios estáticos de tracção por corte foram os seguintes:

B 1-MONTAGEM DA CÉLULA DE CARGA E COLOCAÇÃO DOS PROVETES

- Montar a célula de carga (100 kN) à parte superior da máquina usando pinos (usar o aperto com regulação do momento torsor máximo de 50 N.m);
- Ligar o adaptador à célula de carga utilizando um pino e depois uma rosca;
- Ligar a amarra superior ao adaptador através de um pino;
- Colocar na base inferior a peça que vai garantir a excentricidade;
- Acoplar a amarra inferior à base fixa recorrendo a um pino e uma rosca.
- Depois de apertar a rosca, além da possibilidade que temos de apertar os provetes com as amarras, estes podem rodar assim como movimentar de uma forma ascendente e descendente.

B 2- UTILIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO

- Ligar a máquina *INSTRON*;
- Ligar o PC;
- Fazer *Global Reset*;
- Fazer *Load Call* (para verificar a célula de carga instalada);
- Carregar no ENTER;
- Posicionar;

- Fazer *Global Reset*;
- Seleccionar P1;
- Test Sample;
- Enter Test Type: T) ensile;
- Enter Test Method Number: 98 (Lap Shear Test);
- Ligar Placa: IEEE;
- Enter to start data acquisition ou Esc to cancel;
- O ensaio termina quando dá-se a rotura do provete: Pressionar o STOP.
- Para fazer novo ensaio: Stop-Return-RTN;
- Voltar ao menu principal: ESC;
- Para criar ficheiro de dados: (f) - save raw data? (Y)

Utilities - Display raw data

Filename, ASCii (1), All (A)

Directoria onde o ficheiro é gravado: \ mt.

B 3-AQUISIÇÃO DOS RESULTADOS

A máquina dispõe de um *software* para a aquisição dos dados que são tratados posteriormente. Depois de chamar o programa (C:\ menu) é preciso fazer o seguinte (parâmetros do ensaio):

- Chamar o programa: C:\ menu
- Opção 1: Instron Series IX;
- Oper: Luís (nome do operador);
- Specimen type: ISO;
- With: 2,5mm; Thickness: 1.3mm; Spec. Gauge Len. : 150 mm,
- Sample rate: 5pts/min; Xread Speed: 1,3 mm/min;
- Enter to start the data acquisition: Data acquisition in process (mensagem que aparece);
- Obtenção dos resultados em termos de:
 - a) Gráfico Load (lb) versus Deslocam (in);
 - b) Tabela : máxima carga e máximo deslocamento.

Como os resultados vêm nas unidades Libra (lb) e Inches (in) é preciso convertê-los em kN e mm. Depois faz-se um tratamento dos resultados utilizando o programa EXCEL.

ANEXO C- PROCEDIMENTOS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DINÂMICOS

Para a realização dos ensaios de fadiga, depois de ligar o PC, a alimentação do equipamento e a placa de interface, são necessários:

C 1-Procedimentos

- Fixar o provete na amarra utilizando um torno e aperto com controlo de pressão;
- Colocar o conjunto provete/amarra e ajustar o mesmo no adaptador inferior utilizando pino;
- Clicar no menu *Home* para ir para a posição que permite a afixação do outro pino (previamente definido);
- Afixar o pino superior;
- Definir os parâmetros de ensaio (Valor médio de carga, amplitude média, frequência)
- Menu *COUNT* e fazer *On* para N ciclos: Por exemplo 10^6 ciclos;
- Definir os limites máximos e mínimos de segurança: Adjust - Input Signals - Hydraulic Off;
- No *Function Generator* fazer *RUN*: Primeiro faz o *ramping* e depois o *running*.
- Em caso de anomalias premir *STOP* ou botão de emergência vermelha;
- Registrar o número de ciclos, N.
- Se estiver compreendido entre 10^4 e 10^6 , o valor é aceite.

C 2-Utilização do Software**a) Iniciar**

- Carregar no Test Star
- Username e password:mts
- Directoria de trabalho: Fil - open - C:\TS2 - IDMEC – nome (máx. 8 caractéres)-Tcc,
- No menu: Function - Adjust (para detecção de erros que possam ocorrer durante os ensaios, por exemplo:underpeak error - detecção de um erro de pico),

b)Introdução dos dados do problema

- Clicar no *Function Generator* (sempre depois de abrir o *Test Star*);
- Define - command,
- Control Channel: Axial;
- Control mode: length SG (controlo deslocamento) ou Force SG (controlo de força) que foi o caso;
- Units: mm;
- Waveshape (tipo de onda): sine
- Waveshape order: Normal (ou inverted);
- Count (menu option): se ON o ensaio acaba para o número de ciclo considerado;
- Home (menu option): depois de cada ensaio vai para a posição inicial

Nota: Para que os resultados estejam correctos é indispensável ajustar os PIDF antes de iniciar os ensaios, e para isso é necessário:

- Colocar um provete na máquina;
- Utilizar uma frequência de 1 Hz (60 cpm), onda quadrada e tensão (ou carga).
- Limites: *Hdraulics Off*;

Ajustar P (proporcional), I (integrativo) e D (derivativo). Não mexer no F (ver o manual do equipamento);

- No menu *Amplitude/Mean Control: OFF*.

Sempre que mudar o tipo de provete (rigidez) e parâmetros de uma forma significativa torna-se necessário fazer de novo o ajuste.

ANEXO D - SUPERFÍCIES DE ROTURA

Em anexo apresentam-se as superfícies de rotura para os provetes ensaiados estaticamente e dinamicamente.

D1. Juntas não envelhecidas ensaiadas à tracção por corte:

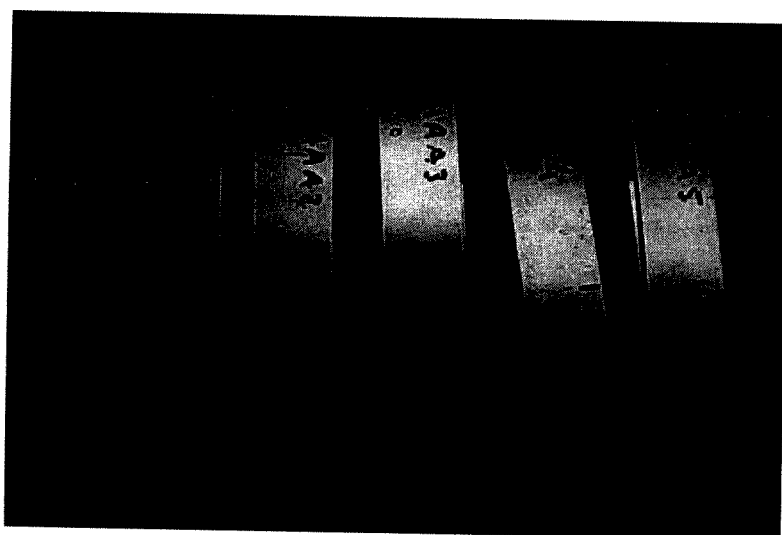


Figura D 1. Superfície de rotura para os provetes AAA: Estado de fornecimento (A), sem envelhecimento (A), submetidos a ensaios estáticos (A).

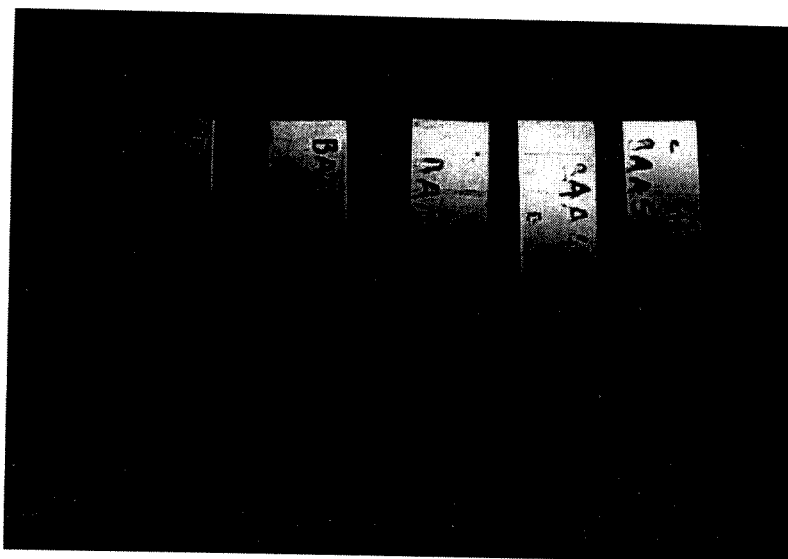


Figura D 2. Superfície de rotura para os provetes BAA: lixados com P240 (B), sem envelhecimento (A), submetidos a ensaios estáticos (A).

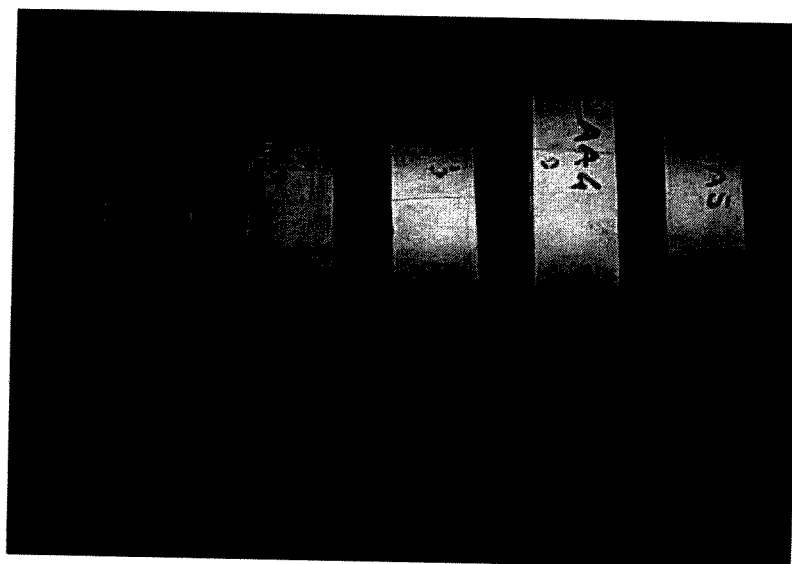


Figura D 3. Superfície de rotura para os provetes CAA: lixados com P400 (C), sem envelhecimento (A), submetidos a ensaios estáticos (A).

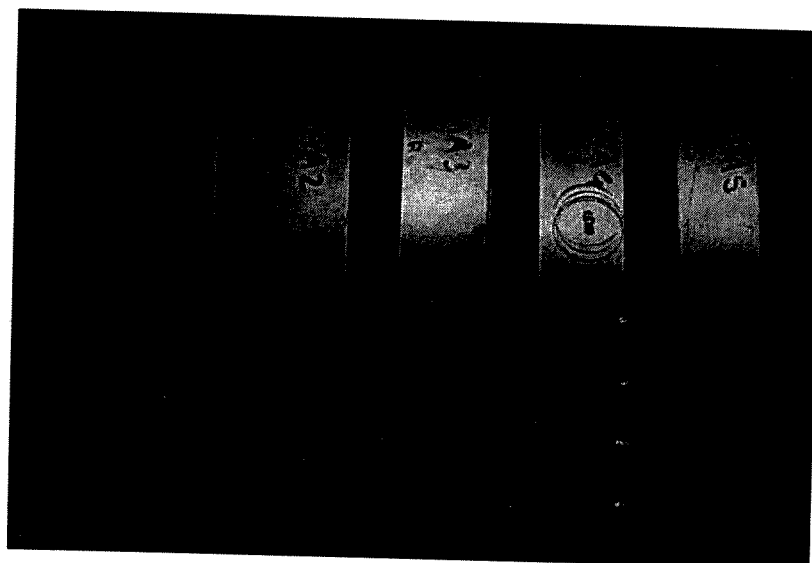


Figura D 4. Superfície de rotura para os provetes DAA: lixados com P600 (D), sem envelhecimento (A), submetidos a ensaios estáticos (A).

D 2. Juntas envelhecidas ensaiadas à tracção por corte:

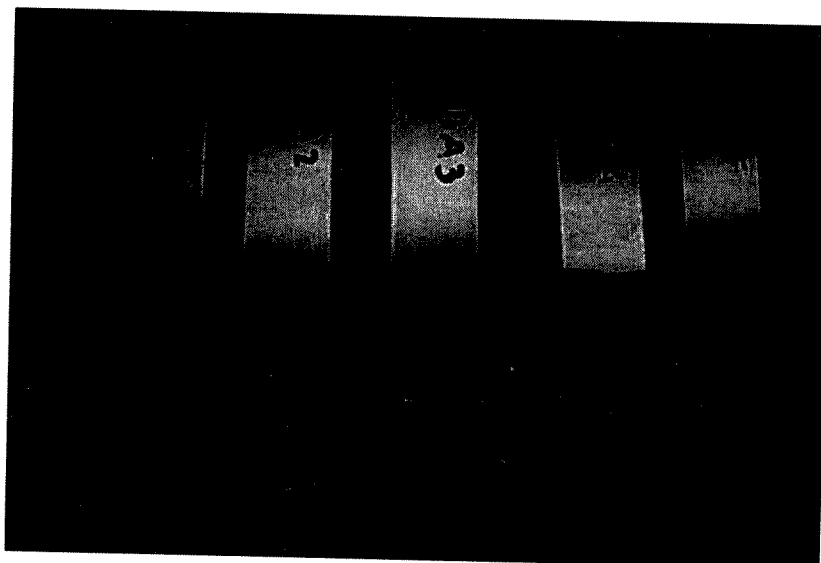


Figura D 5. Superfície de rotura para os provetes DBA: lixados com P600 (D), envelhecidos a 21 dias (B), submetidos a ensaios estáticos (A).

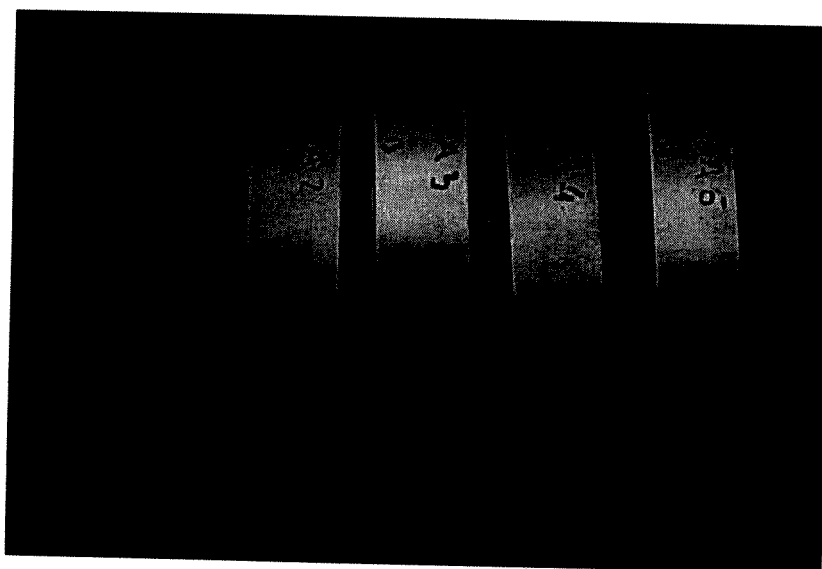


Figura D 6. Superfície de rotura para os provetes DCA: lixados com P600 (D), envelhecidos a 42 dias (C), submetidos a ensaios estáticos (A).

D 3. Juntas não envelhecidas ensaiadas à fadiga:

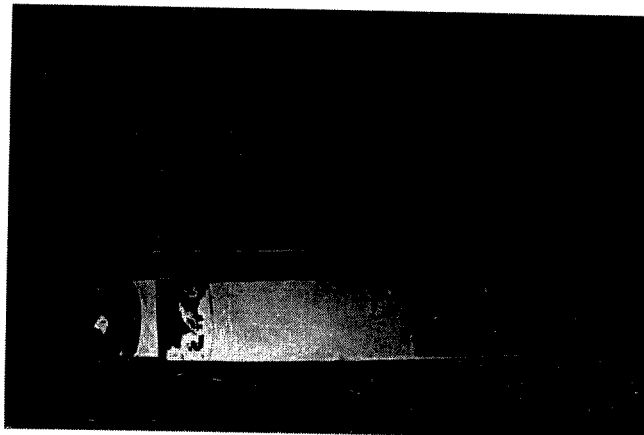


Figura D 7. Superfície de rotura para os provetes BAB: lixados com P240 (B), não envelhecidos (A), submetidos a ensaios dinâmicos (B).



Figura D 8. Superfície de rotura para os provetes BAB': lixados com P240 (B), não envelhecidos (A), submetidos a ensaios dinâmicos (B).

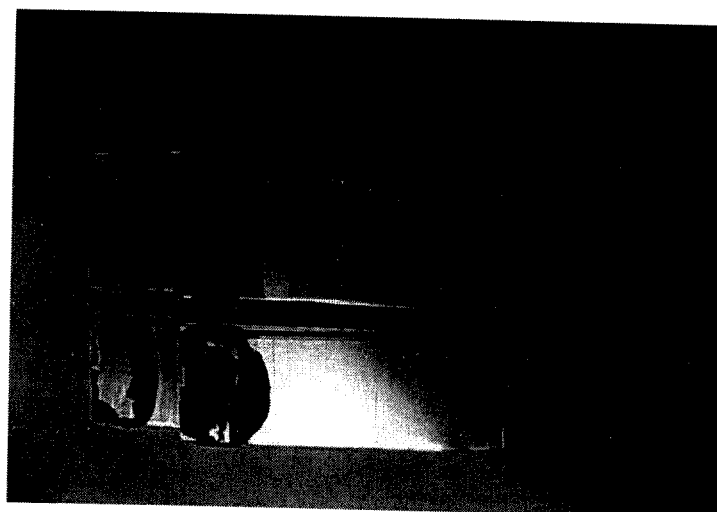


Figura D 9. Superfície de rotura para os provetes BAB': lixados com P240 (B), não envelhecidos (A), submetidos a ensaios dinâmicos (B).

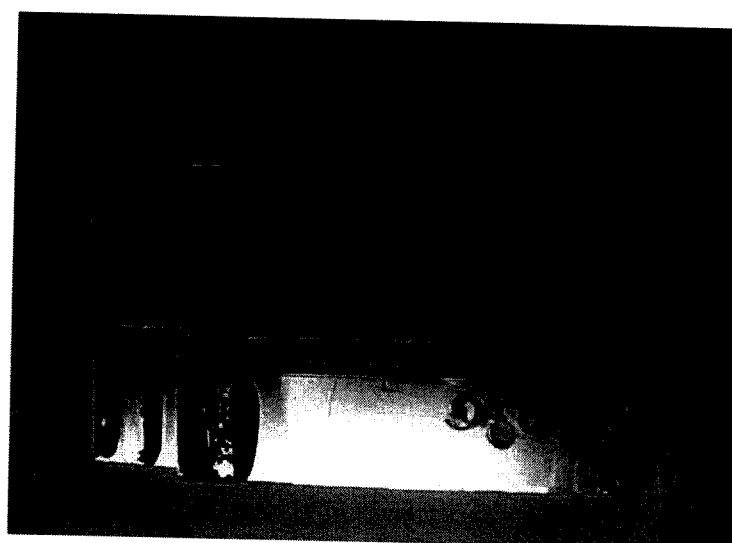


Figura D 10. Superfície de rotura para os provetes CAB: lixados com P400 (C), não envelhecidos (A), submetidos a ensaios dinâmicos (B).

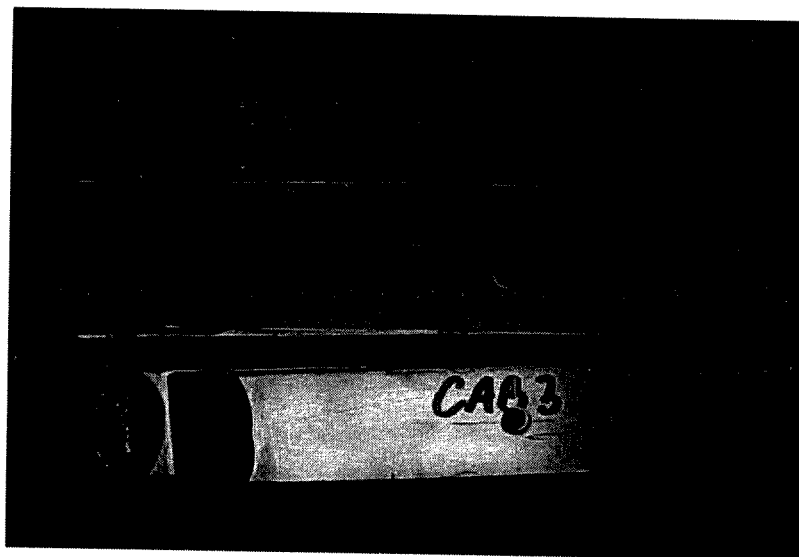


Figura D11. Superfície de rotura para os provetes CAB': lixados com P400 (C), não envelhecidos (A), submetidos a ensaios dinâmicos (B).

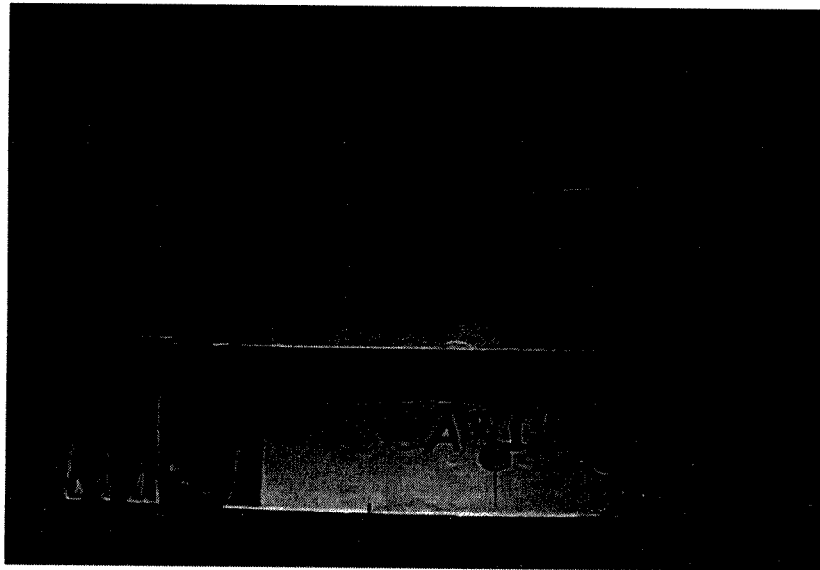


Figura D 12. Superfície de rotura para os provetes CAB: lixados com P400 (C), não envelhecidos (A), submetidos a ensaios dinâmicos (B).

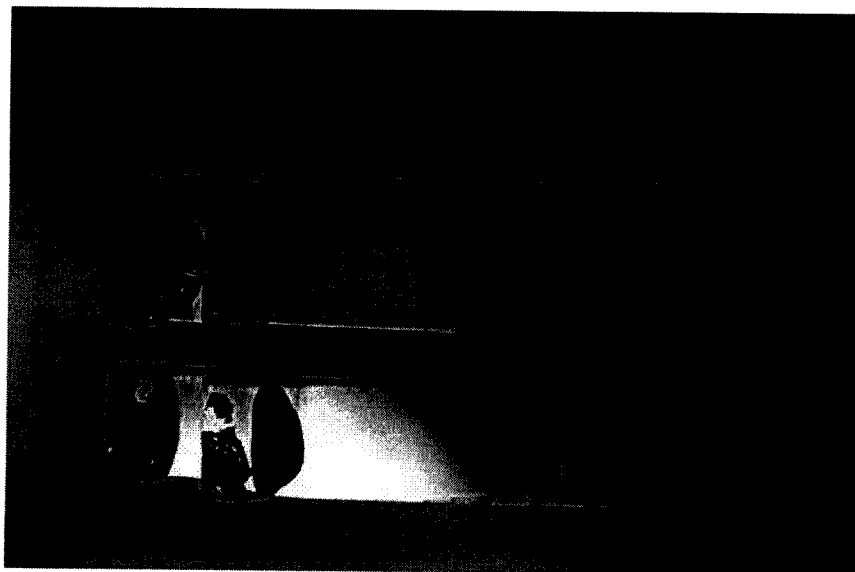


Figura D 13. Superfície de rotura para os provetes DAB: lixados com P600 (D), não envelhecidos (A), submetidos a ensaios dinâmicos (B).

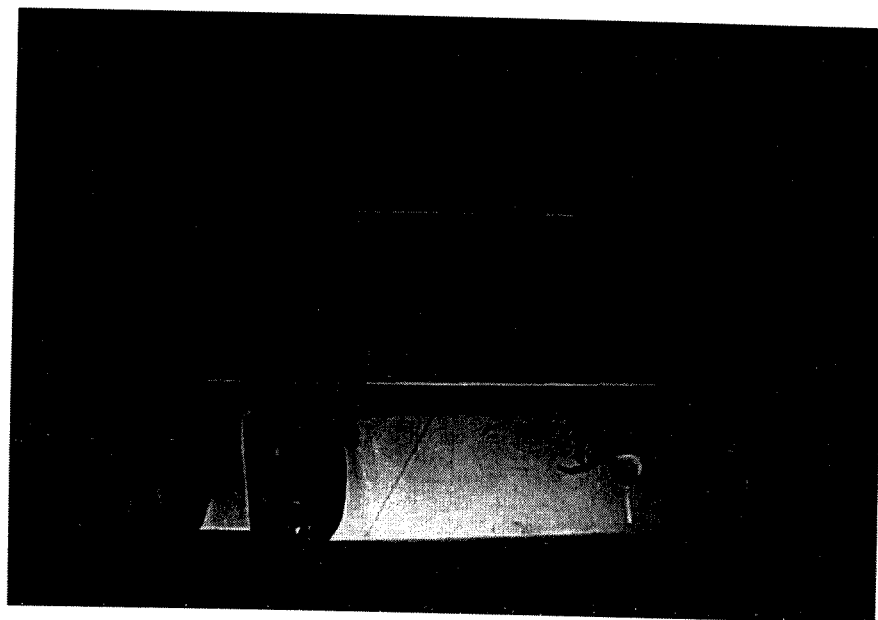


Figura D14. Superfície de rotura para os provetes DAB': lixados com P600 (D), não envelhecidos (A), submetidos a ensaios dinâmicos (B).

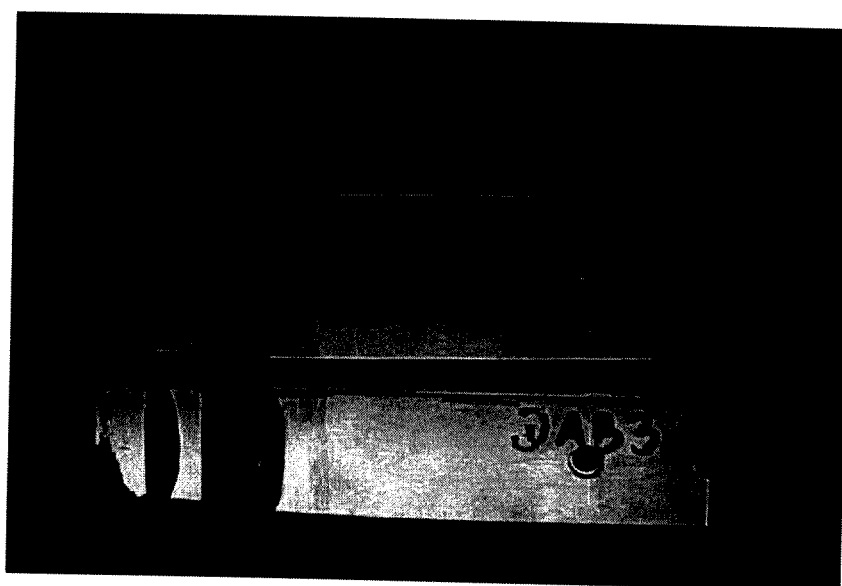


Figura D 15. Superfície de rotura para os provetes DAB'': lixados com P600 (D), não envelhecidos (A), submetidos a ensaios dinâmicos (B).

D 4. Juntas envelhecidas ensaiadas à fadiga:

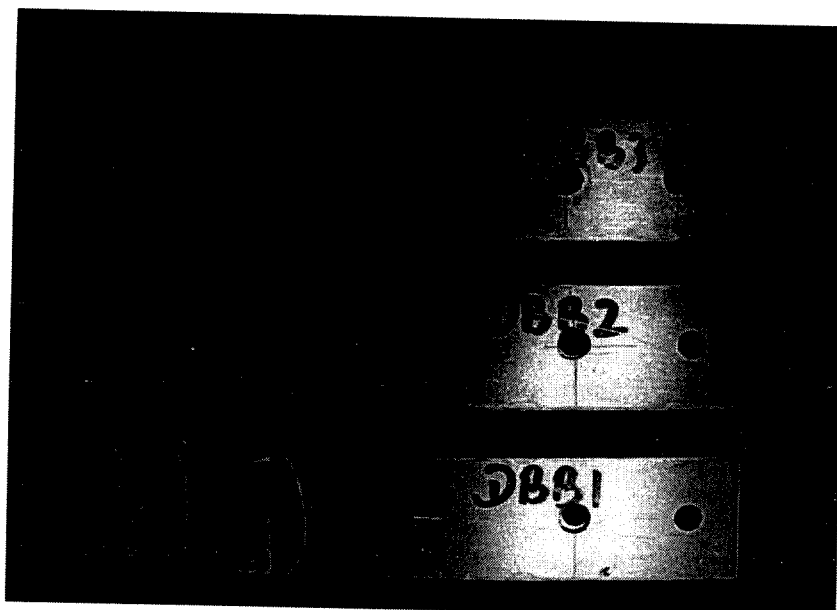


Figura D 16. Superfície de rotura para os provetes DBB: lixados com P600 (D), envelhecidos a 21 dias (B), submetidos a ensaios dinâmicos (B).

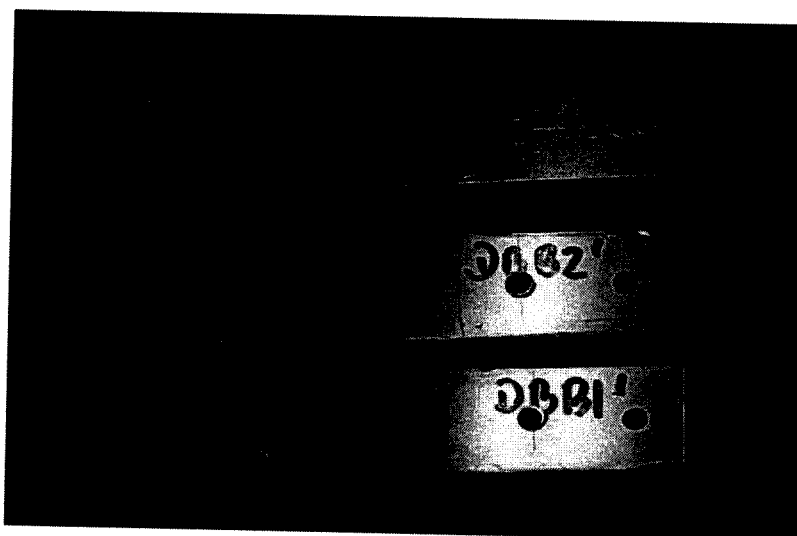


Figura D 17. Superfície de rotura para os provetes DBB': lixados com P600 (D), envelhecidos a 21 dias (B), submetidos a ensaios dinâmicos (B).

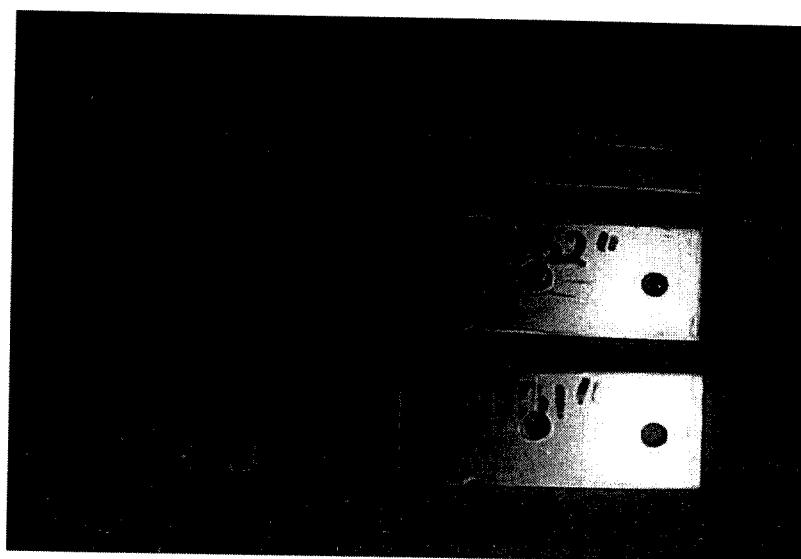


Figura D 18. Superfície de rotura para os provetes DBB: lixados com P600 (D), envelhecidos a 21 dias (B), submetidos a ensaios dinâmicos (B).



Figura D 19. Superfície de rotura para os provetes DCB: lixados com P600 (D), envelhecidos a 42 dias (C), submetidos a ensaios dinâmicos (B).

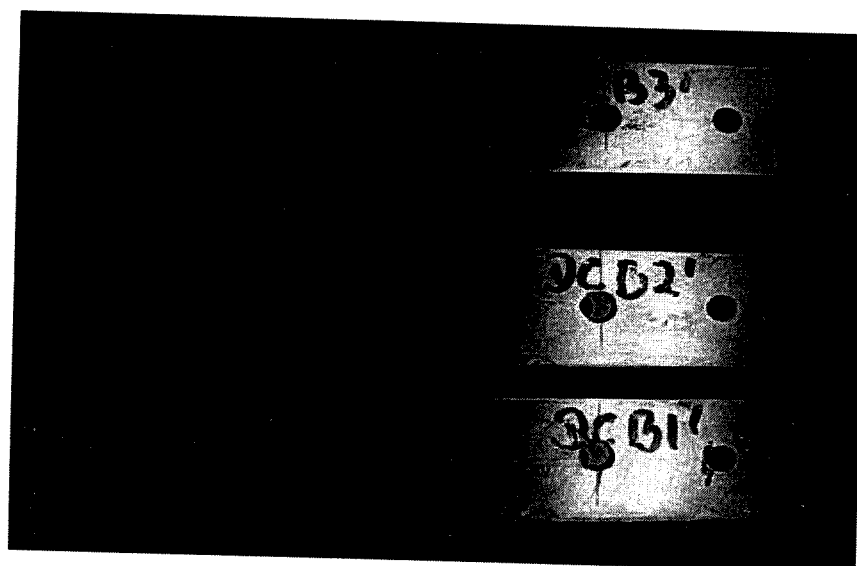


Figura D 20. Superfície de rotura para os provetes DCB': lixados com P600 (D), envelhecidos a 42 dias (C), submetidos a ensaios dinâmicos (B).

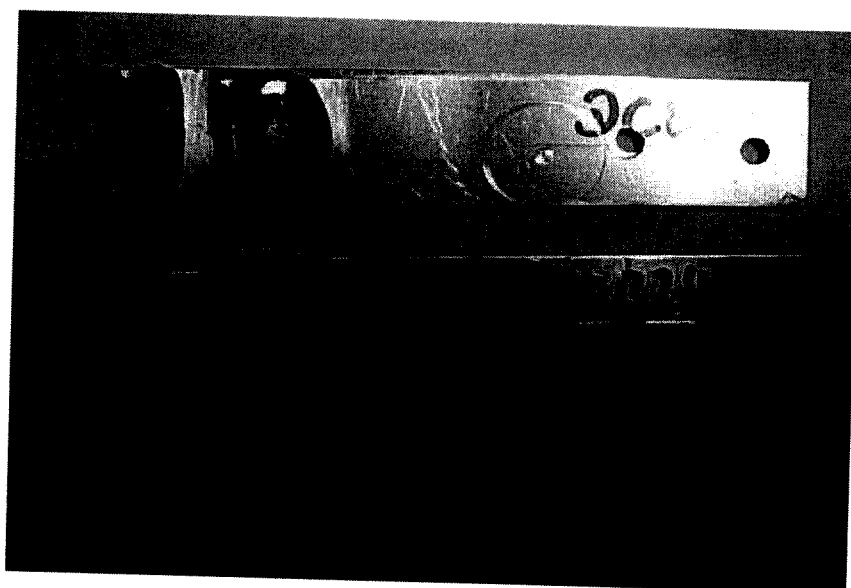


Figura D 21. Superfície de rotura para os provetes DCB'': lixados com P600 (D), envelhecidos a 42 dias (C), submetidos a ensaios dinâmicos (B).

ANEXO E - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

E.1 EQUIPAMENTO

- Máquina de ensaios estáticos, *INSTRON*, modelo 4208, secção de materiais compósitos - Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial – INEGI (Figura E.1);
- Máquina de ensaios dinâmicos, MTS, Unidade de Estudo do Comportamento à Fadiga - CEFAD, INEGI (Figura E.3);
- Dispositivo de colagem (Figura E.5);
- Furadora, CEFAD, INEGI;
- Bancada de colagem; Disco eléctrico; Tina de aço inox; Pinça,etc-Laboratório de Adesivos LA, FEUP;
- Balança de precisão *GOBOS*, modelo 501, LA, FEUP (Figura E.6);
- Rugosímetro, Laboratório de Metalografia - LM, FEUP;
- Pistola e misturador estático;
- Câmara de simulação ambiental da *WEISS*, modelo 500 SB/+10 IV/40 DU, LA, FEUP (Figura E.7).

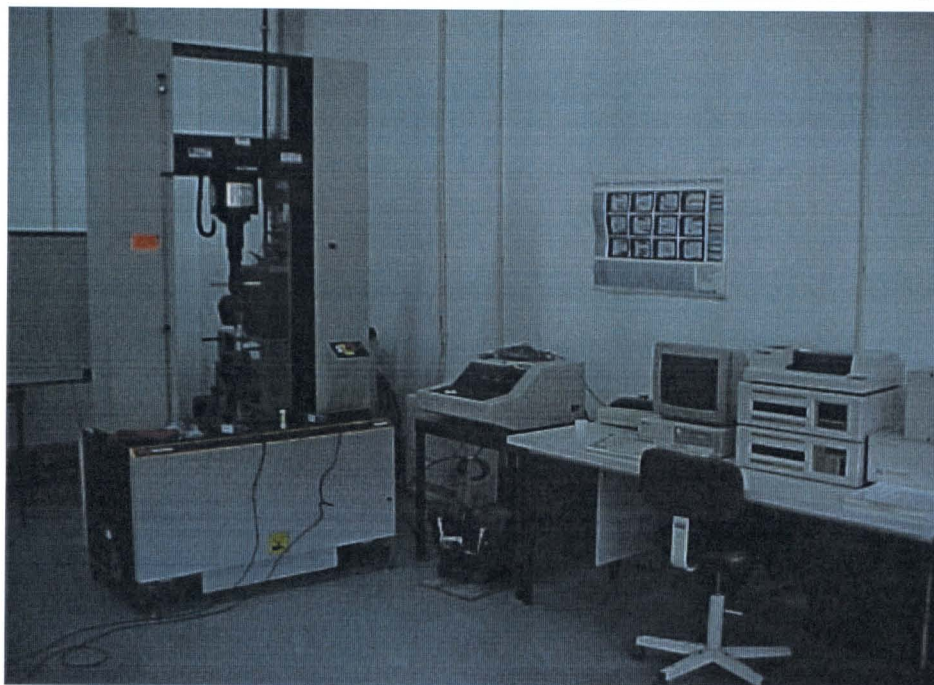


Figura E.1 Máquina Instron para ensaios estáticos

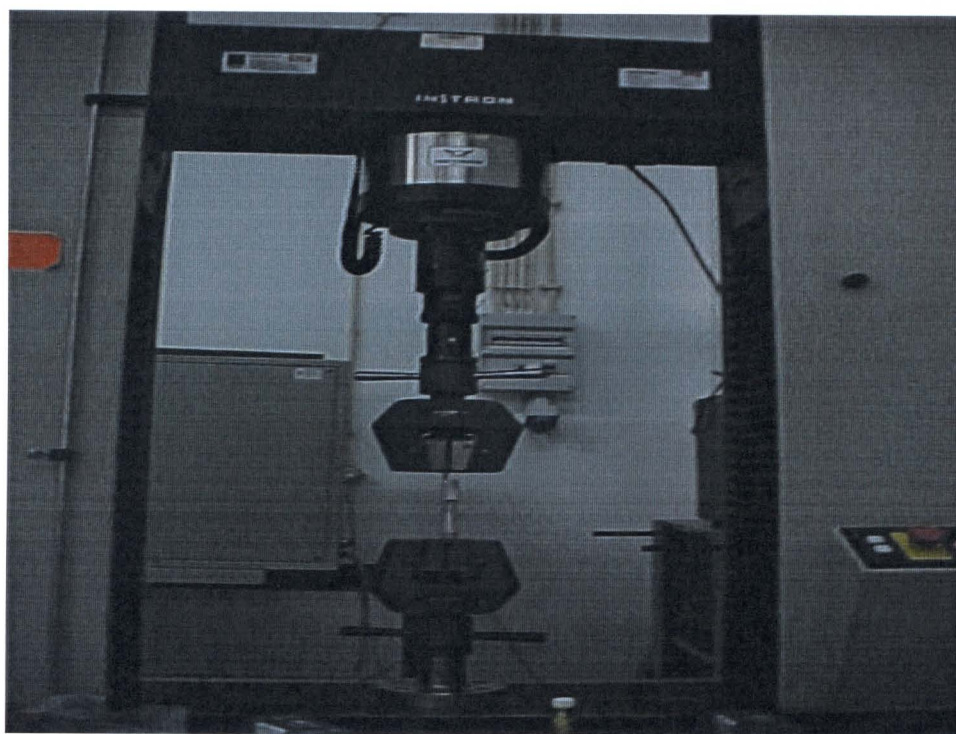


Figura E.2 Pormenor da amarra utilizada na Máquina Instron



Figura E.3 Pormenor da amarra e do provete na máquina MTS

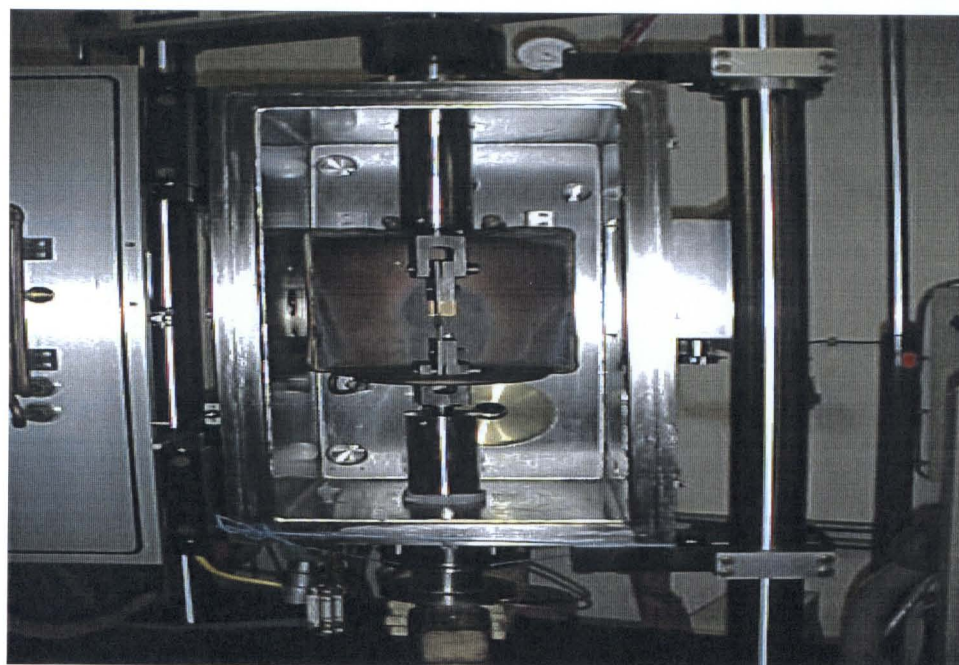


Figura E.4 Pormenor do provete e da amarra na MTS

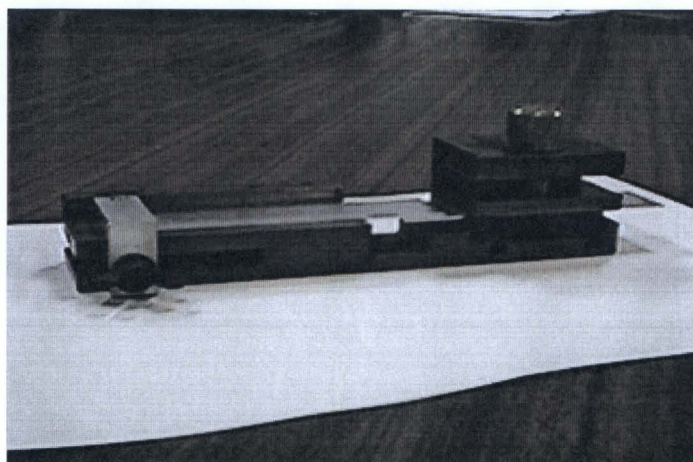


Figura E.5 Dispositivo de colagem para a realização dos provetes.

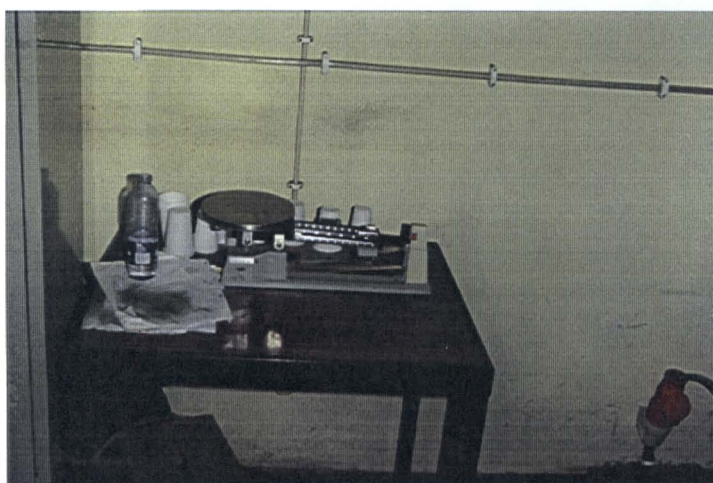


Figura E.6 Balança de precisão *GOBOS*.

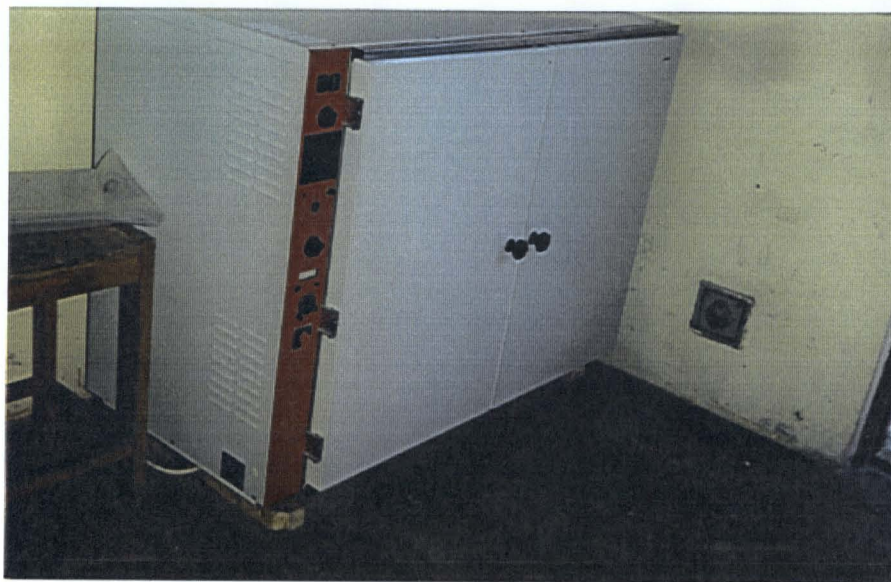


Figura E.7 Câmara de simulação ambiental da WEISS.

E.2 DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO

A espessura do adesivo é ajustada através da utilização de um dispositivo de fixação (Figura E.5) especificamente concebido para este fim.

Este dispositivo consiste basicamente numa base fixa onde vai ser colocada uma das partes a unir, e de um sistema de regulação da distância correspondente a espessura do adesivo pretendida, onde se vai encontrar a outra parte a unir.

Assim, o primeiro passo consiste em regular a espessura pretendida para o adesivo. Para tal recorreu-se ao uso de um comparador, o qual é previamente colocado a zero sobre a superfície fixa do dispositivo. Seguidamente faz-se com que o comparador registre uma distancia de -0.250 mm sobre a base fixa, distância que corresponde com a espessura de adesivo pretendida e finalmente, após deslocar o dispositivo sobre o plano de referência onde se encontra o comparador por forma a que a ponta do comparador esteja apoiada sobre a chapa de alumínio que se encontra apoiada na parte móvel do dispositivo, e aperta-se o fuso do registo até que o comparador indique uma distância zero.

O comprimento de sobreposição, mais frequentemente designada por *overlap*, é então ajustada colocando a outra chapa sobre a superfície fixa, fazendo com que esta fique com a sobreposição pretendida. Finalmente faz-se o aperto de um batente o qual assegura que quando a chapa se encontrar encostada ao mesmo, a distância de sobreposição é a anteriormente registada.

Para obter o provete pretendido, basta adicionar o adesivo sobre a chapa que se encontra fixa à parte móvel do dispositivo e seguidamente colocar a outra chapa sobre a parte fixa do mesmo dispositivo, exercendo alguma pressão, de modo a que a chapa fique encostada à superfície fixa. Passados 30 segundos pode-se colocar um peso sobre a chapa por forma a assegurar que a espessura do adesivo não se vai alterar ao longo do processo de cura.

