



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Departamento de Engenharia Electromecânica

Comportamento Mecânico de Juntas Coladas em Serviço

Jorge Ricardo Lima Soares

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis

Covilhã, Junho de 2015

À minha família.

Agradecimentos

Ao longo desta etapa, foram várias as pessoas que prestaram o seu apoio, imprescindível para a realização deste trabalho, às quais expresso o meu agradecimento:

- Ao Professor Paulo Nobre Balbis dos Reis, orientador científico, por todo o apoio prestado, pela sua excelente dedicação e disponibilidade e pela sua partilha de conhecimentos que permitiram o meu crescimento académico.
- Aos elementos do laboratório de Construções Mecânicas do Dep. de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra.
- À Universidade da Beira Interior pela disponibilização dos laboratórios.
- À Empresa Frulact, onde exerço actividade profissional, pela disponibilidade permitida para terminar esta etapa académica.
- Aos meus amigos pelo apoio e companheirismo.
- Ao meu amigo e colega Paulo Santos por toda a colaboração.
- À minha irmã, Catarina, pelo apoio incondicional, pela partilha nos bons e maus momentos e por todos os conselhos.
- Aos meus pais, Abílio e Amélia, por toda a motivação, auxílio e espírito de sacrifício. Por me tornarem quem sou. Obrigado por não me terem deixado desistir.
- À minha esposa Soraia, por todo o encorajamento e incentivo, pela paciência nos momentos mais difíceis, por todo o carinho e suporte emocional. Obrigado pelo sacrifício e por toda a compreensão.

Resumo

Ao longo dos últimos anos as juntas coladas têm aumentado significativamente o seu campo de aplicação. Apesar de tudo, a resposta ao impacto não tem sido alvo de tanto estudo como o do carregamento estático. Neste contexto, revela-se do maior interesse a compreensão dos mecanismos de falha em ambos os casos. O presente trabalho pretende, assim, estudar a resistência estática e a resistência ao impacto transversal de juntas coladas sobrepostas simples com diferentes aderentes (aço/aço, aço/compósito e compósito/compósito). O efeito da humidade na resistência estática e no impacto também é avaliado através de água destilada (à temperatura ambiente e a 40 °C) e água do mar (à temperatura ambiente), considerando diferentes tempos de imersão (1, 2, 4 e 8 semanas). Verificou-se que as juntas coladas com aderentes em aço mostraram-se mais sensíveis ao meio ambiente estudado e ao tempo de exposição. Relativamente às juntas coladas com aderentes em materiais compósitos, a água (destilada ou salgada) mostrou um efeito marginal. No entanto, o efeito higrotérmico foi marcante na resistência à tração em todas as juntas independentemente dos aderentes envolvidos. Finalmente, a imersão nas soluções estudadas apresentaram um efeito na resistência ao impacto muito semelhante ao observado nos ensaios de tração, mas com uma maior severidade, independentemente dos mecanismos de dano serem semelhantes aos observados nos ensaios de tração para todas as juntas coladas estudadas.

Palavras-chave

Juntas coladas; Resistência estática; Resistência ao impacto transversal; Meio ambiente.

Abstract

Over the last years, adhesive joints have significantly increased their applications. However, the impact response has received limited attention compared to quasi-static loading. In this context, it is very important to understand their failure mechanisms in both cases. Therefore, the main goal of the present work is to study the tensile strength and the transverse impact strength of single lap joints with different adherends (steel/steel, steel/composite and composite/composite). The moisture effect on the tensile and impact strength will be also studied and, for this purpose, distilled water (at room temperature and at 40 °C) and sea water (at room temperature) will be used with different exposure time (1, 2, 4 e 8 weeks). It was possible to conclude that the adhesive joints with steel adherends are very sensitive to the environment and exposure time. Relatively to the adhesive joints with composite adherends, the water showed a marginal effect. However, a marked hygrothermal effect was observed for all joints. Finally, the moisture presents a similar effect on the impact strength, but much more severe than that observed in tensile tests, independently of the damages mechanisms are similar to those observed for the tensile tests.

Keywords

Adhesive joints; Tensile strength; Transverse impact strength; Environment.

Índice

Introdução	1
1 - Enquadramento Teórico	3
1.1 - Introdução	3
1.2 - Juntas coladas sobrepostas simples	5
1.3 - Critérios de ruína	8
1.4 - Impacto transversal em juntas coladas	9
2 - Materiais, Equipamento e Procedimento Experimental	11
2.1 - Introdução	11
2.2 - Materiais	11
2.3 - Provetes	13
2.4 - Equipamentos	13
2.5 - Procedimento Experimental	14
3 - Análise e Discussão de Resultados	16
3.1 - Introdução	16
3.2 - Análise e Discussão de Resultados	16
4 - Conclusões Finais e Recomendações para Trabalhos Futuros	28
4.1 - Conclusões Gerais	28
4.2 - Recomendações para Trabalhos Futuros	29
Bibliografia	30

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Tipos de juntas e respetivas solicitações: a) juntas de sobreposição; b) juntas topo-a-topo.	4
Figura 1.2 – Juntas coladas sobrepostas simples: a) Distribuição das tensões de corte; b) Distribuição das tensões normais.	6
Figura 1.3 – Distribuição das tensões de corte ao longo da secção transversal de uma junta colada sobreposta simples.	6
Figura 1.4 – Distribuição das tensões ao longo da linha central da camada da cola.	7
Figura 1.5 – Modos de ruína em juntas coladas de sobreposição simples: a) Rotura do aderente; b) Delaminação	8
Figura 1.6 – Mecanismos de falha por delaminação nos aderentes	8
Figura 2.1 – Geometria dos provetes com 80 μm de espessura da cola e $t = 1.5\text{mm}$ para o aço Docol 1000 e $t = 2\text{mm}$ para a Pecolit.	13
Figura 2.2 – Equipamento utilizado nos ensaios de impacto (Charpy): a) Vista geral; b) Vista em detalhe.	14
Figura 3.1 – Curvas típicas carga-deslocamento obtidas para juntas com diferentes aderentes.	17
Figura 3.2 – Típicos modos de ruína observados em juntas coladas com aderentes em: a) aço/aço; b) aço/compósito; compósito/compósito.	18
Figura 3.3 – Resistência à tração para diferentes ambientes hostis em função do tempo de exposição (AD = Água destilada à temperatura ambiente; AS = Água salgada à temperatura ambiente).	19
Figura 3.4 – Resistência à tração para diferentes ambientes hostis em função do tempo de exposição (AD = Água destilada à temperatura ambiente; AQ 40 = Água destilada à temperatura de 40°C).	20
Figura 3.5 – Resistência à tração para diferentes ambientes hostis em função do tempo de exposição (AS = Água salgada à temperatura ambiente; AQ 40 = Água destilada à temperatura de 40°C).	20
Figura 3.6 – Típicos modos de ruína ocorridos em juntas coladas, após quatro semanas de imersão, para: a) aderentes aço/aço imersos em água destilada à temperatura ambiente e água do mar; b) aderentes aço/compósito imersos em água destilada a 40°C; c) aderentes compósito/compósito imersos em água do mar.	22
Figura 3.7 – Curvas carga-tempo e energia-tempo para juntas coladas com aderentes aço/compósito (provetes de controlo).	24

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Vantagens e limitações das juntas coladas.	3
Tabela 2.1 – Composição química do aço Docol 1000.	12
Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas da cola e dos aderentes.	12
Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas das juntas coladas.	17
Tabela 3.2 – Resistência ao impacto das diferentes juntas coladas em função do meio ambiente e tempo de imersão.	25

Lista de Acrónimos

ASTM	American Society for Testing and Materials
ILSS	Tenacidade à fratura interlaminar
ISO	International Organization for Standardization
UP	Poliéster não saturado

Notação

A_b	Resiliência no ponto de rotura
E_{break}	Energia de impacto no ponto de rotura
E	Módulo de elasticidade
σ_{UTS}	Resistência à tração
σ_{YS}	Tensão de cedência

Introdução

As ligações entre elementos estruturais ocorrem devido às limitações de tamanho impostas ao material, como resultado das conveniências de manufatura e/ou transporte, ou por questões de acessibilidade. Neste caso, as uniões clássicas (parafusos, rebites, soldaduras, etc.) têm respondido de forma eficaz quer às solicitações quer às condições duras de trabalho, no entanto, não se pode omitir uma série de problemas. A distribuição de tensões não uniforme, as tensões provocadas pelos orifícios, a corrosão, entre outras, são alguns dos problemas imputados e que o projetista deve ter em consideração.

O desenvolvimento de colas cada vez mais fiáveis e de maior durabilidade tem conduzido a que as ligações coladas, com fins estruturais, se assumam como uma alternativa promissora à tradicional fixação mecânica: Deste modo, conseguem-se solucionar alguns dos problemas indicados anteriormente. Por outro lado, a simplicidade e o fácil manuseamento das colas também promovem uma considerável redução de custos. Esta economia evidencia-se ao nível da redução de espessuras dos substratos, eliminação de vedantes adicionais, capacidade de unirem diferentes materiais bem como a eliminação de algumas operações como, por exemplo, as de acabamento.

Não é assim de estranhar que ao longo dos últimos anos se tenha assistido a um aumento significativo da aplicação de juntas coladas, em particular, nas indústrias automóvel, ferroviária e aeronáutica. Apesar de serem projetadas essencialmente para suportar cargas no plano da junta, verifica-se que, muitas vezes, elas também são sujeitas a cargas transversais. Neste contexto, revela-se do maior interesse a compreensão dos mecanismos de falha em ambos os planos de carregamento. Por outro lado, a resposta ao impacto de juntas coladas tem sido alvo de uma menor atenção comparativamente ao carregamento estático.

Assim, o presente trabalho tem como principal objetivo o estudo da resistência estática e da resistência ao impacto transversal de juntas coladas sobrepostas simples com diferentes aderentes (aço/aço, aço/compósito e compósito/compósito). Paralelamente, o efeito da humidade na resistência estática e ao impacto também é estudado. Para este fim, utilizou-se água destilada à temperatura ambiente, água destilada a 40 °C e água do mar. O efeito destes meios ambientes é comparado com os resultados obtidos com provetes de controlo, assim como o tempo de exposição (1, 2, 4 e 8 semanas de imersão) é igualmente estudado na degradação das referidas propriedades. Os resultados obtidos serão comparados entre si e os mecanismos de dano analisados em detalhe.

Para tal, esta dissertação encontra-se organizada em 4 capítulos sendo, no primeiro, feito um enquadramento teórico sobre os temas abordados. Diferentes tipos de juntas coladas, vantagens/desvantagens da sua aplicação, juntas coladas sobrepostas simples e sua distribuição de tensões, critérios de ruína e impacto transversal em juntas coladas, são alguns tópicos focados nesta contextualização. Posteriormente, no capítulo 2, faz-se uma descrição sumária dos materiais, provetes, equipamentos e procedimentos experimentais utilizados. No capítulo 3 é discutido o efeito da humidade na resistência estática e ao impacto de juntas coladas sobrepostas simples com diferentes aderentes. Finalmente o capítulo 4 apresenta as conclusões finais e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 1

Enquadramento teórico

1.1 - Introdução

Devido às dimensões dos materiais disponíveis no mercado ou por razões do seu fabrico, a maior parte das estruturas mecânicas são compostas por vários componentes que se ligam entre si. Neste contexto, existem vários tipos de ligações capazes de cumprir as necessidades decorridas do seu desempenho em serviço, como: parafusos, rebites, ligações soldadas ou ligações coladas. Relativamente às uniões mais clássicas (parafusos, rebites e ligações soldadas), e apesar de darem boas respostas em termos mecânicos, estão associados vários problemas como: a existência de orifícios, uma distribuição não uniforme de tensões, a corrosão, etc.. Por estas razões, as juntas coladas têm-se assumido como uma importante técnica de união nas indústrias aeronáutica, automóvel e eletrónica [1-4].

Apesar das ligações coladas apresentarem inúmeras vantagens, existem também desvantagens que podem condicionar a generalização da sua aplicação. A Tabela 1.1 ilustra, neste caso, as principais vantagens e limitações que podem condicionar o seu uso [5].

Tabela 1.1 - Vantagens e limitações das juntas coladas [5].

Vantagens	Desvantagens
Estruturas mais leves e rígidas	As peças não podem ser separadas
Capacidade de unir materiais distintos	Tensões residuais resultantes dos diferentes coeficientes de expansão térmica
Capacidade de unir materiais com espessuras finas	Sensíveis às tensões de tração segundo a espessura
Melhor distribuição de tensões (sem concentrações de tensões nos aderentes)	Fraca resistência à temperatura e ao fogo
Melhores propriedades à fadiga devido à melhor distribuição de tensões	Suscetíveis à degradação ambiental e incerteza relativamente à sua durabilidade
Melhor resistência à corrosão	Problemas de toxicidade e inflamabilidade
Melhor aparência superficial (sem cabeças de parafusos, etc.)	Dificuldade ao nível de inspeções
Fabrico de formas complexas	-
Boa capacidade de vedação	-
O processo de colagem pode ser automatizado	-

O sucesso da aplicação das juntas coladas, e respetivo desempenho em serviço, passa por vários pontos a ter em consideração logo na fase de projeto. Por exemplo, a geometria da junta colada deve ter sempre em conta o carregamento a que esta vai estar sujeita em serviço para que, deste modo, se possa selecionar a sua melhor configuração. Por outras palavras, é necessário conhecer a magnitude de todas as forças que ocorrem em serviço, e respetivas direções, para, assim se garantir que a maior parte da área colada seja utilizada na resistência às solicitações. A Figura 1.1 ilustra, por exemplo, as várias juntas de sobreposição e topo-a-topo bem como as respetivas solicitações para que foram concebidas.

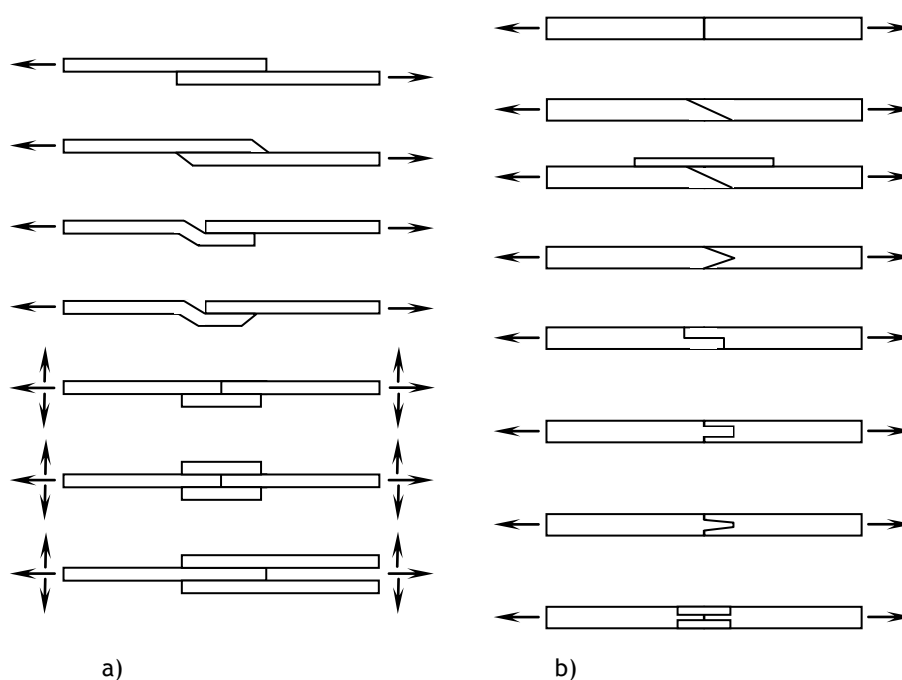


Figura 1.1 - Tipos de juntas e respetivas solicitações: a) juntas de sobreposição, b) juntas topo-a-topo.

Em termos de materiais, devido a estarem fortemente condicionados pelas condições de serviço, torna-se praticamente impossível os projetistas poderem alterar os aderentes. Neste caso, a escolha vai recair ao nível da cola que, segundo a literatura, é um material polimérico com vista a unir as superfícies e resistir à sua separação. No entanto, no mercado existem vários tipos de colas, pelo que a sua classificação não é um processo fácil. A bibliografia sugere assim vários critérios, segundo os quais é possível agrupá-las quanto à sua estrutura molecular, origem, processo de endurecimento, modo de apresentação e desempenho [6, 7]. Todavia, aquele que está mais próximo do utilizador classifica as colas relativamente ao seu desempenho em: estruturais e não estruturais. No caso das colas estruturais, considera-se todo o material polimérico capaz de transferir as forças aplicadas sem que ocorra falha durante um determinado período de tempo [8] e podem ser agrupadas em cinco grandes famílias: fenólica, acrílica, poliuretanos, poliamidas e epoxídica [9, 10].

Por outro lado, as juntas ao envolverem no mínimo dois materiais distintos (cola e aderente), estes devem ser compatíveis para estabelecer uma interface capaz de assegurar uma forte ligação ao longo da vida útil. Paralelamente, a zona de interface deve estar ausente de qualquer contaminação. Torna-se assim evidente que a preparação das superfícies a unir é de extrema importância e revela-se mais uma tarefa a ter em consideração nas preparações das juntas coladas. Magalhães [9] apresenta uma revisão dos procedimentos de limpeza que mais se adequam tanto às superfícies metálicas como poliméricas. Basicamente eles recorrem a sistemas mecânicos e/ou químicos [1], revelando-se os primeiros mais económicos e menos complexos.

1.2 - Juntas coladas sobrepostas simples

As juntas coladas sobrepostas simples são as mais utilizadas na indústria, pois associam ao baixo custo uma boa capacidade de carga. Segundo a norma ASTM D 1002 [11], a tensão de rotura (τ) é definida como o quociente entre a carga para a qual ocorre o colapso (P) e a área de colagem. Esta abordagem assume que os aderentes são rígidos e que as juntas apenas se deformam ao corte, pelo que conduzem a simplificações muito longe da realidade. Por exemplo, a tensão de corte apresenta um valor médio constante ao longo da junta, a qual não corresponde à sua verdadeira distribuição de tensões. Todavia, este valor pode ser entendido como uma primeira aproximação, apesar de existirem vários métodos capazes de obter com enorme exatidão o estado de tensões na junta [5].

A não colinearidade das forças aplicadas induz o aparecimento de um momento fletor, o qual vai provocar a rotação da junta. Surgem assim tensões de corte e tensões normais de tração na cola para além dos aderentes serem tracionados e fletidos. Neste caso, estas juntas apresentam uma distribuição típica à ilustrada na Figura 1.2 para as tensões de corte e para as tensões normais de arrancamento [12, 13]. Devido às restrições laterais dos aderentes (efeito de Poisson) ocorrem também tensões de corte significativas ao longo da secção transversal, conforme ilustra a Figura 1.3.

A alteração de alguns parâmetros das juntas coladas alteram a distribuição das tensões representadas nas Figuras 1.2 e 1.3 e, deste modo, é possível aumentar a sua capacidade de carga. Por exemplo, o aumento da rigidez dos aderentes promove maior resistência da junta à flexão e, assim, não só diminui a concentração de tensões (nas extremidades da sobreposição) como também aumenta a sua resistência mecânica. Do mesmo modo, o aumento da espessura dos aderentes contribui para menores concentrações de tensões como resultado de uma menor rotação da junta. Finalmente, o aumento da espessura da cola também melhora a resistência mecânica da junta colada, no entanto, a partir de um dado valor verifica-se que esta tendência passa a inverter-se.

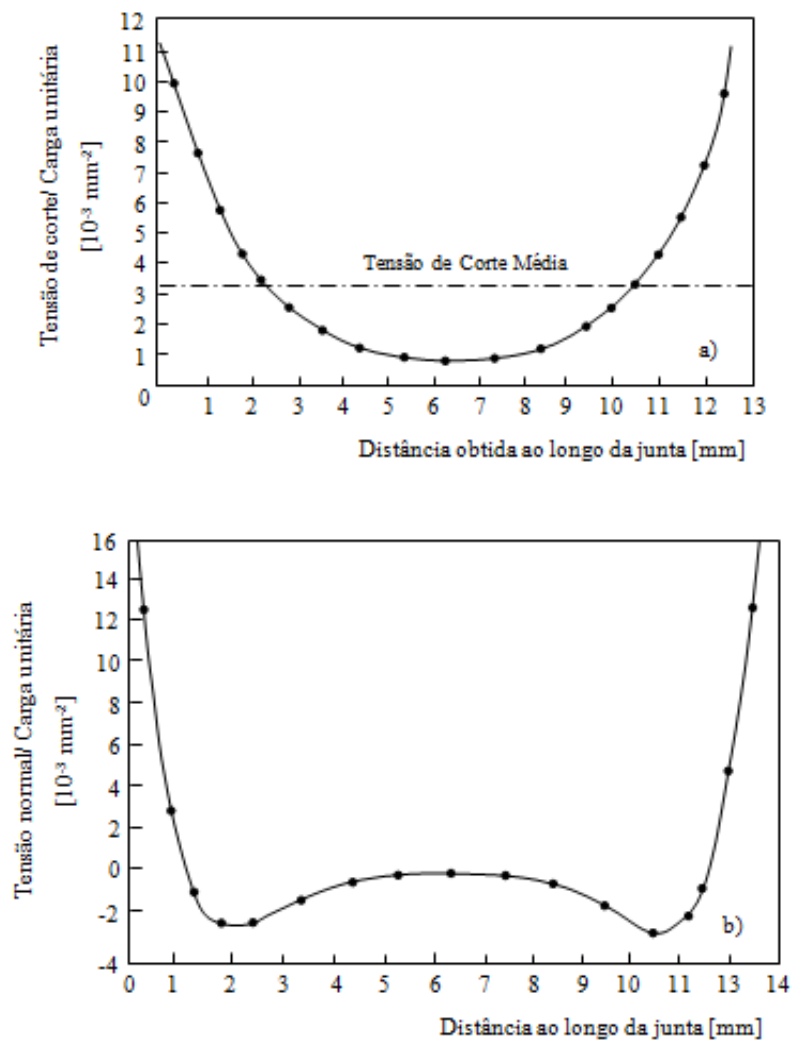


Figura 1.2 - Juntas coladas sobrepostas simples: a) Distribuição das tensões de corte; b) Distribuição das tensões normais [5].

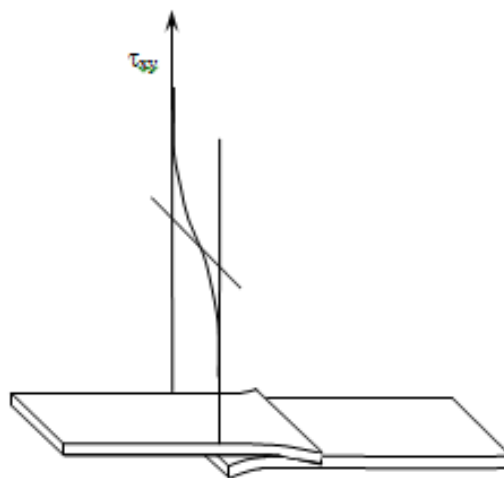


Figura 1.3 - Distribuição das tensões de corte ao longo da secção transversal de uma junta colada sobreposta simples [5].

Relativamente ao comprimento de colagem (sobreposição), o seu aumento conduz a maiores cargas de colapso, no entanto, a partir de um dado valor ele deixa de produzir qualquer efeito na resistência mecânica da junta. Este comportamento é explicado pelo aumento do momento fletor e respetivo aumento da concentração de tensões nas extremidades de sobreposição. Por fim, as geometrias das extremidades de sobreposição condicionam também o campo de tensões na junta colada, conforme ilustra a Figura 1.4. Neste caso compara-se a tensão normal de tração e a tensão de corte entre duas juntas com extremidades diferentes (ângulo reto na cola com ângulo de 135°). Este efeito resulta essencialmente numa diminuição das tensões máximas, pois a concentração de tensões diminui devido à maior suavidade da geometria com a introdução do ângulo de 135° na cola.

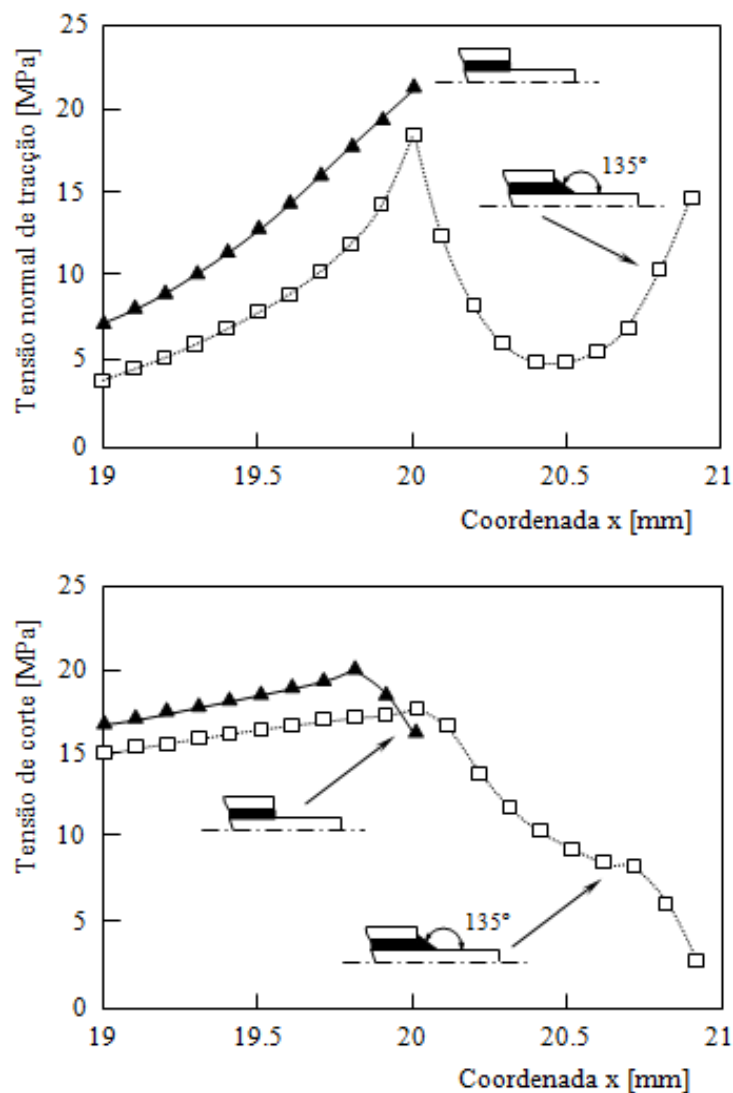


Figura 1.4 - Distribuição das tensões ao longo da linha central da camada da cola [5].

1.3 - Critérios de ruína

O colapso das juntas coladas pode surgir a partir de diferentes modos de ruína e em diversos locais. Este fenómeno revela-se ainda mais complexo quando os aderentes envolvem materiais compósitos. A norma ASTM D 5573-94 [14], por exemplo, identifica os diferentes modos de ruína: (i) ruína nos aderentes por tração, compressão, flexão, etc.; (ii) ruína na interface aderente/cola (falha adesiva); (iii) falha coesiva e (iv) arrancamentos ocorridos no compósito devido a delaminações. A Figura 1.5 ilustra, para juntas coladas de sobreposição simples, a rotura nos aderentes (Figura 1.5a) e a delaminação (Figura 1.5b).

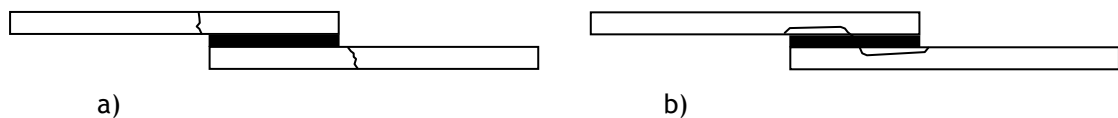


Figura 1.5 - Modos de ruína em juntas coladas de sobreposição simples: a) Rotura do aderente, b) Delaminação [5].

Por sua vez, a falha por delaminação está esquematizada na Figura 1.6. Uma vez iniciada a delaminação (Figura 1.6b), esta pode conduzir a uma fratura imediata da camada (Figura 1.6c) ou então promove a propagação da delaminação ao longo da camada (Figura 1.6d).

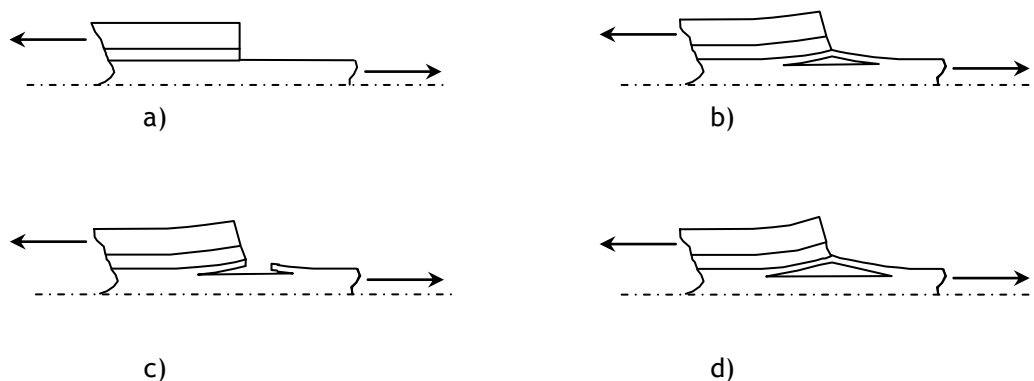


Figura 1.6 - Mecanismos de falha por delaminação nos aderentes.

Finalmente, a bibliografia apresenta alguns critérios de ruína, os quais são usados para prever a resistência das juntas coladas. Basicamente, eles estão agrupados em critérios baseados na resistência dos materiais e em critérios baseados na mecânica da fratura [15]. No

primeiro caso são desprezados os defeitos iniciais e determinam-se as tensões num dado ponto. Por sua vez, os critérios baseados na mecânica da fratura admitem a existência de defeitos iniciais e prevêm a sua propagação a partir dos conceitos do fator de intensidade de tensão ou da taxa de libertação de energia.

1.4 - Impacto transversal em juntas coladas

Existem três tipos de carregamentos que os projetistas devem ter em consideração, as cargas estáticas, as cargas dinâmicas (com variação no tempo) e as cargas de curta duração (vulgarmente denominadas por cargas de impacto). Se no caso das primeiras a bibliografia apresenta vários estudos em termos de juntas coladas, no que diz respeito às cargas de impacto a literatura não é tão abundante e mesmo quase inexistente no domínio do impacto transversal.

As cargas de impacto são caracterizadas pela força exercida num espaço de tempo muito pequeno e as tensões a propagarem-se em redor da zona de contacto. Neste domínio, a velocidade de impacto revela-se como um parâmetro bastante importante, podendo ocorrer impactos de baixa velocidade (ou de grande massa) e impactos de alta velocidade (ou de pequena massa) [16]. No primeiro caso, está associada uma resposta quasi-estática enquanto no segundo caso a resposta é tipicamente de natureza dinâmica (balística). Todavia, quando estão envolvidos materiais compósitos, segundo Ruiz e Harding [17], existem três possíveis classificações:

- Impactos na ordem dos 300 m/s, em que ocorre perfuração e os danos estão confinados a uma pequena região em torno do ponto de impacto;
- Impactos entre os 50 e os 300 m/s, em que as ondas de tensão iniciam-se no ponto de colisão e são transmitidas à restante estrutura;
- Impacto a baixas velocidades, em que existem múltiplas reflexões até se atingir o equilíbrio quasi-estático.

O pêndulo de Charpy e o ensaio de Izod são vulgarmente utilizados para avaliar a energia absorvida ou para determinar a sensibilidade ao entalhe e a resistência à fratura de um determinado componente/junta. Mais recentemente surgiram as máquinas de impacto por queda de peso, sendo então possível realizar testes com velocidades e energias mais elevadas através da variação da altura de queda do impactor ou pela sua variação de massa. O impactor também pode ser instrumentado e assim torna-se possível obter as curvas força-tempo.

Apesar de tudo, a resposta ao impacto de juntas coladas tem sido alvo de uma menor atenção comparativamente ao carregamento estático. No entanto, de acordo com Beevers *et*

al. [18], a resistência ao impacto de juntas coladas com aderentes em aço é maior do que a observada quando submetidas a um carregamento estático. Este facto está relacionado com a deformação e com a sensibilidade à taxa de deformação dos aderentes de aço. Kihara *et al.* [19] concluíram que nas cargas de impacto de baixa magnitude a ruína é provocada pelas tensões de tração, enquanto nas cargas de impacto de elevada magnitude a ruína é promovida principalmente pelas tensões de corte, ainda que se verifique uma pequena contribuição das tensões de tração.

Reis *et al.* [20] estudaram a influência do comprimento superposição (comprimento da zona colada) na resposta ao impacto transversal de juntas coladas. Para este efeito, os ensaios foram realizados utilizando uma máquina de impacto por queda de pesos e um impactor hemisférico. Foram considerados três “gaps” com comprimentos: $l_0 = 0, 10$ e 20 mm, e concluíram que juntas com maiores l_0 têm energias de impacto mais elevadas, apesar da menor área colada. Este fenómeno é consequência da menor deformação local. De acordo com a análise numérica desenvolvida por estes autores, o “gap” igual a zero ($l_0 = 0$) é responsável pelo valor mais alto das tensões normais de arrancamento e à medida que se aumenta o valor do “gap” a magnitude destas tensões diminui. No mesmo estudo, os autores observaram que o comportamento destas juntas sujeitas ao impacto transversal é semelhante ao obtido quando elas são testadas à flexão em três pontos. Verificou-se que a maior resistência à flexão (maior valor da carga média) ocorreu nas amostras com o “gap” igual a 20 mm ($l_0 = 20$ mm), enquanto o “gap” igual a zero ($l_0 = 0$) deu a menor resistência à flexão. Na verdade, os ensaios de flexão promovem uma sobreposição de cargas, com diferentes direções no interior da cola, como resultado da deflexão que se cria. Portanto, as juntas coladas são sensíveis ao comprimento de sobreposição tanto no carregamento transversal como no carregamento axial [20-24].

Para Vaidya *et al.* [25], o carregamento transversal promove uma deformação considerável do aderente, o que leva a maiores concentrações de tensões em comparação à observada para carregamentos axiais. A magnitude da tensão máxima normal de arrancamento é então mais elevada do que a ocorrida no carregamento axial e, no caso do carregamento transversal, a ruína surge como uma combinação das tensões de corte com as tensões de tração (modo misto). As fendas iniciam-se na borda inferior do aderente, onde a tensão equivalente é mais elevada [21, 25].

Capítulo 2

Materiais, Equipamento e Procedimento Experimental

2.1 - Introdução

As juntas coladas estão, cada vez mais, a substituir as tradicionais técnicas de união. Apesar delas serem essencialmente projetadas para suportar carregamentos longitudinais, muitas vezes são sujeitas a cargas transversais. Neste caso, a literatura revela que a resposta ao impacto das juntas coladas tem recebido muito menos atenção do que as solicitações estáticas. Com vista a ultrapassar esta lacuna, foi realizado um trabalho experimental encontrando-se, nos pontos seguintes, uma descrição sumária dos materiais, provetes, equipamentos e procedimentos experimentais utilizados.

2.2 - Materiais

O aço Docol 1000 apresenta uma elevada resistência mecânica e torna-o, assim, adequado para muitas aplicações industriais com enormes vantagens ambientais. Ao apresentar elevada tensão de cedência permite reduzir a espessura da chapa, com a consequente redução de custos ao nível do fabrico, logística e funcionamento. Estes benefícios podem passar pela poupança de energia, tanto na produção do aço como nas suas operações de transporte, como reduzir custos de funcionamento (com particular incidência no consumo de energia e nas emissões de escape). Para além de ser 100% reciclável, ele é pré-temperado durante a sua produção, eliminando, assim, riscos ambientais bem como custos adicionais.

A composição química do Docol 1000 encontra-se ilustrada na Tabela 2.1 e as suas principais propriedades mecânicas, de acordo com a ficha técnica do fornecedor, encontram-se representadas na Tabela 2.2. As propriedades mecânicas são obtidas a partir de um recozimento a 750°C ao que se segue um endurecimento através de têmpera em água. Finalmente o aço adquire a sua estrutura final por revenido, onde este é aquecido entre os 200-400°C. Tanto o recozimento como o revenido são efetuados numa atmosfera controlada para evitar que o aço oxide. A sua microestrutura contém a fase martensítica, responsável pela dureza, e a ferrite, a fase mais macia, ao que a resistência do aço aumenta com o aumento da percentagem de martensite na microestrutura. A proporção de martensite é

determinada pela percentagem de carbono no aço e pelo ciclo de temperaturas que é sujeito no processo de recozimento contínuo.

Relativamente ao compósito estudado, trata-se de um poliéster não saturado (UP) reforçado com fibra de vidro, denominado comercialmente por Pecolit. Este polímero, UP, tem a particularidade de ser o mais usado, de entre os termoendurecíveis, na aplicação de matrizes para compósitos reforçados com fibras [26]. O poliéster tem muitas aplicações na indústria automóvel devido ao seu baixo custo, estabilidade térmica e dimensional, boas propriedades mecânicas, resistência química e baixa densidade [27]. Relativamente ao reforço, trata-se de uma fibra de vidro do tipo E correspondente à formulação mais simples e económica, o que associada às suas boas propriedades de resistência, rigidez, elétricas e de desgaste, justifica a sua enorme aplicação nos compósitos como elemento de reforço. As fibras de vidro, no presente compósito, entrelaçam entre si, segundo duas direções perpendiculares, com uma percentagem em peso na ordem dos 24,75%. Finalmente é aplicado um “Gelcoat” que, para além de dar um acabamento superficial liso, tem ainda a capacidade de absorver os raios ultravioleta. Segundo a ficha técnica do fornecedor, apresenta as propriedades mecânicas indicadas na Tabela 2.2.

Finalmente, foi utilizada uma cola epoxídica (Araldite® 420 A/B) cujas propriedades mecânicas se encontram indicadas na Tabela 2.2. As referidas propriedades foram obtidas no estudo [28].

Tabela 2.1 - Composição química do aço Docol 1000 (% em peso).

C	Si	Mn	P	S	Nb	Al	Fe
0,15	0,50	1,50	0,010	0,002	0,015	0,04	Resto

Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas da cola e dos aderentes.

Material	σ_{UTS} [MPa]	σ_{YS} [MPa] Deformação 0.2 %	E [GPa]
Cola (Araldite® 420 A/B)	35	27	1,85
Docol 1000	1055	510	205
Pecolit	90	-	8,2

2.3 - Provetes

Os materiais descritos na secção anterior foram fornecidos em forma de chapas (de espessura 1,5 mm para o Docol 1000 e 2 mm para a Pecolit), as quais foram cortadas em pequenas barras de 80x10 mm² e coladas com "Araldite 420 A/B" (cujas propriedades estão apresentadas na Tabela 2.2). De acordo com o fornecedor, trata-se de uma cola epoxídica de alta resistência e tenacidade que envolve dois componentes com cura à temperatura ambiente. Foi dada especial atenção à preparação das superfícies a colar visando melhorar a adesão. Para tal as superfícies a colar foram limpas/desengorduradas com recurso a uma lixa P220, e finalmente, limpas com ar seco e álcool.

A geometria e as dimensões dos provetes utilizados no presente estudo encontram-se ilustradas na Figura 2.1. Conforme anteriormente referido, foram estudadas diferentes combinações de aderentes: aço/aço, aço/compósito e compósito/compósito.

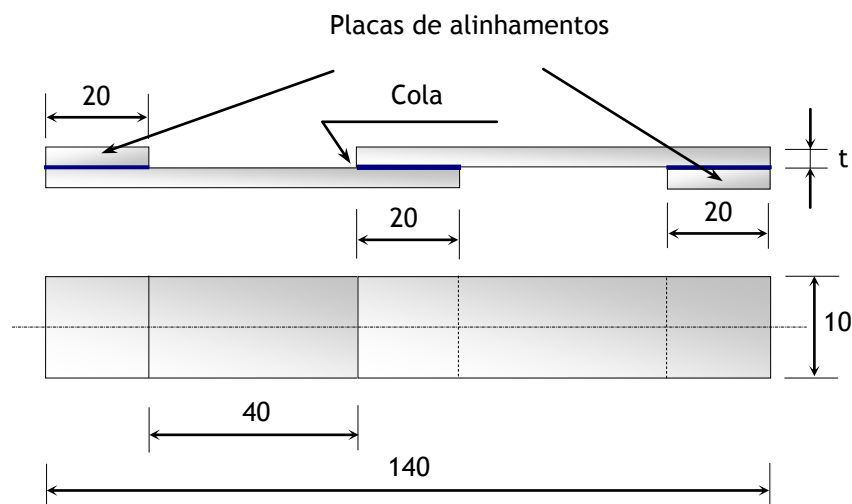


Figura 2.1 - Geometria dos provetes com 80 µm de espessura da cola e t = 1,5 mm para o aço Docol 1000 e t = 2 mm para a Pecolit (dimensões em mm).

2.4 - Equipamentos

Os ensaios de tração foram realizados com recurso a uma máquina de ensaios do tipo universal da marca Shimadzu, modelo AG-10 5kN. Esta máquina está equipada com uma célula de carga de 5 kN e com o software TRAPEZIUM X que permite obter os resultados já tratados.

Os ensaios Charpy foram realizados com recurso a uma máquina de impacto da marca Ceast, modelo 9050, ilustrada na Figura 2.2. Está equipada com um martelo de impacto

(impactor) de 5 J e tem um espaçamento de 60 mm na zona de prova (Figura 2.2b). Paralelamente existe um sistema de aquisição de dados D.A.S. 8000 Junior, de alta velocidade de processamento, com resolução de 14 bits e uma taxa de amostragem de 2 Mhz com conversor a/d de 8000 pontos adquiridos e armazenados.

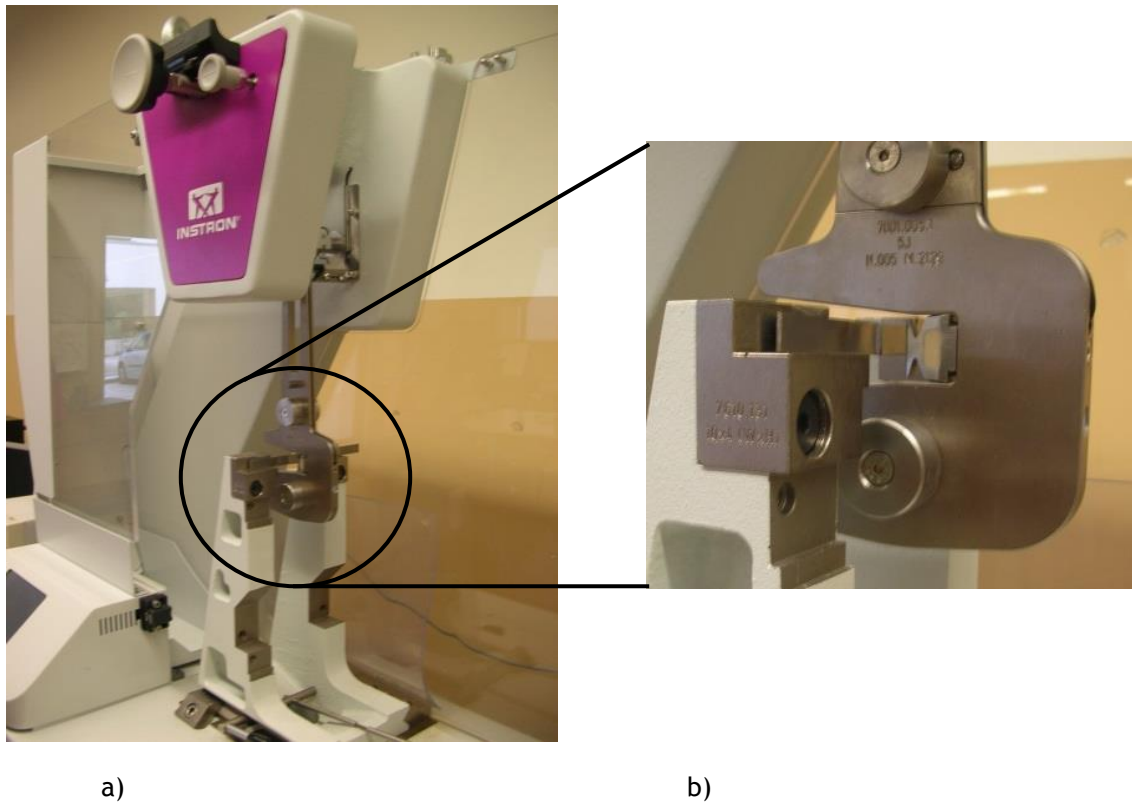


Figure 2.2 - Equipamento utilizado nos ensaios de impacto (Charpy); a) Vista geral; b) Vista em detalhe.

2.5 - Procedimento Experimental

Os ensaios de tração foram realizados na máquina Shimadzu, modelo AG-10 5kN, à temperatura ambiente, velocidade de deslocamento de 5 mm/min e segundo o procedimento descrito na norma ASTM D1002. Para cada condição de ensaio foram ensaiados 5 provetes, com as geometrias descritas em 2.3, tendo sido os dados posteriormente tratados em função dos respetivos valores médios.

Os ensaios Charpy foram realizados de acordo com a norma ISO 1792, máquina de impacto da marca Ceast, modelo 9050, com um martelo de impacto de 5 J. Para cada condição de ensaio foram ensaiados 5 provetes, à temperatura ambiente, tendo sido os dados posteriormente tratados em função dos respetivos valores médios.

Nestes ensaios foram utilizadas diferentes amostras, uma vez que se pretendia estudar o efeito do tipo de aderentes, tanto na resistência à tração como na resistência ao impacto transversal. Para tal utilizaram-se as combinações aço/aço, aço/compósito e compósito/compósito. Finalmente foi estudado o efeito da imersão em água destilada à temperatura ambiente, água destilada a 40 °C e água salgada à temperatura ambiente nas referidas propriedades mecânicas. O tempo de imersão nestas soluções também foi avaliado em termos de resistência à tração e ao impacto. Para tal, as juntas coladas, após a sua preparação, foram mergulhadas de imediato nos líquidos referidos anteriormente durante 1, 2, 4 e 8 semanas. Para manter a temperatura da água destilada a 40 °C, o contentor com os provetes foi colocado numa mufla Heraeus, modelo UT 6060, com uma precisão de $\pm 2^\circ\text{C}$.

Capítulo 3

Análise e Discussão de Resultados

3.1 - Introdução

Hoje em dia, cada vez mais, as juntas coladas estão a substituir as tradicionais técnicas de união. Esta tendência resulta de inúmeras vantagens, como: alta rigidez, boa relação resistência-peso e a capacidade de unir diferentes materiais, geometrias complexas e de pequena espessura.

Apesar desta técnica de união ser essencialmente projetada para suportar carregamentos ao longo do plano, em muitos casos, ela fica sujeita a cargas transversais. Neste contexto, é muito importante entender os mecanismos de falha, tanto num modo de carregamento como no outro. Por outro lado, a resposta ao impacto das juntas coladas tem recebido muito menos atenção em comparação às solicitações estáticas. Neste contexto, o presente capítulo discute o efeito da humidade na resistência estática e ao impacto de juntas coladas sobrepostas simples com diferentes aderentes.

3.2 - Análise e Discussão de Resultados

Foram realizados ensaios de tração para obter a resistência à rotura das juntas coladas sobrepostas simples com diferentes aderentes: aço/aço, aço/compósito e compósito/compósito. A Figura 3.1 mostra as curvas típicas carga-deslocamento, obtidas para as referidas combinações.

Numa primeira análise, verifica-se que as curvas apresentam um comportamento quase linear e estão de acordo com os trabalhos desenvolvidos por Reis *et al.* [29]. O deslocamento verificado na rotura e a tensão máxima apresentam a mesma tendência, para cada tipo de configuração, mas com valores diferentes. Os valores mais elevados são obtidos para juntas sobrepostas simples com aderentes de aço e, na tendência oposta, os valores mais baixos são obtidos com aderentes que envolvem os materiais compósitos. Para uma análise mais detalhada, a Tabela 3.1 apresenta os valores médios obtidos e respetivos desvios-padrão.

É possível constatar que as juntas coladas com aderentes em aço/aço apresentam as cargas mais elevadas. Neste caso, os valores são 257,5% mais altos que os obtidos com aderentes compósito/compósito e 118,1% relativamente aos aderentes aço/compósito.

Segundo Reis *et al.* [29], isto pode ser explicado pela baixa rigidez do compósito face à do aço de elevado limite elástico (ver Tabela 2.2). O aumento da rigidez dos aderentes promove menor deformação elástica no aderente, menor rotação da junta colada e, conseqüentemente, menor concentração de tensões na extremidade das juntas [20, 29]. Para juntas com materiais dissimilares, o material menos rígido revela-se mesmo determinante na resistência da junta [29].

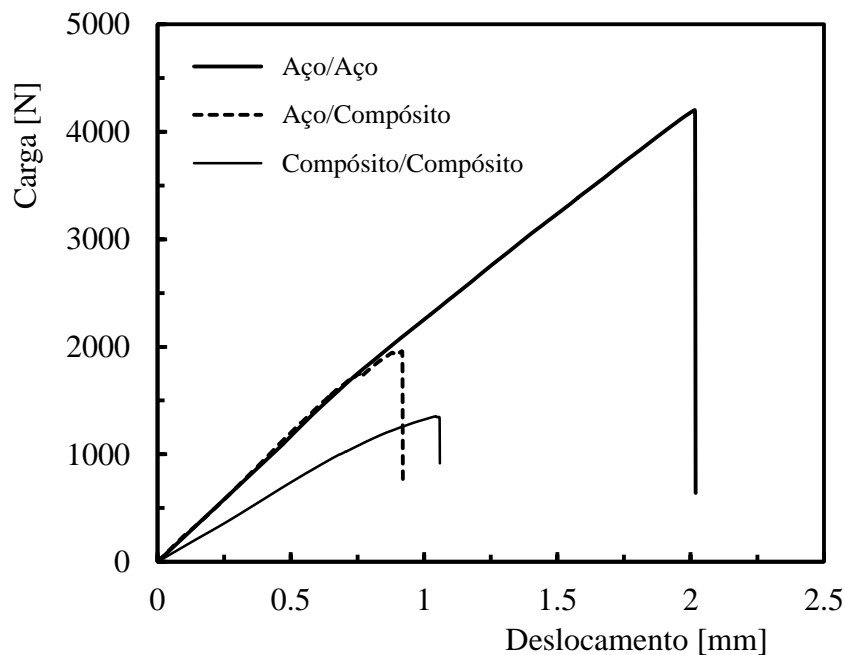


Figura 3.1 - Curvas típicas carga-deslocamento obtidas para juntas com diferentes aderentes.

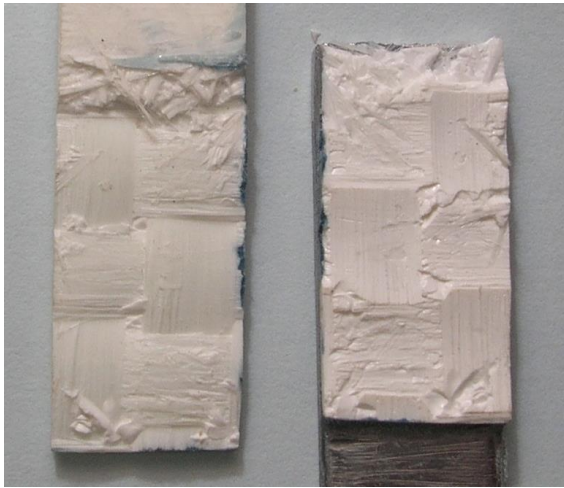
Tabela 3.1 - Propriedades Mecânicas das juntas coladas.

Aderentes	Carga Máxima [N]		Deslocamento Máximo [mm]	
	Valor Médio	Desv. Padrão	Valor Médio	Desv. Padrão
Aço/Aço	4579,4	254,3	1,8	0,2
Aço/Compósito	2099,5	157,4	1,0	0,2
Compósito/Compósito	1280,9	63,0	1,1	0,1

Por outro lado, em termos de deformação à ruptura, o valor mais elevado ocorre em juntas com aderentes aço/aço e é 63,6% maior que o observado em juntas com aderentes aço/compósito ou compósito/compósito. Na verdade, a deformação à ruptura em juntas com aderentes aço/compósito e compósito/compósito é muito semelhante. Para explicar este fenômeno foi realizado um estudo de microscopia ótica e as imagens obtidas encontram-se representadas na Figura 3.2.



a)



b)



c)



Figura 3.2 - Típicos modos de ruína observados em juntas coladas com aderentes em: a) aço/aço; b) aço/compósito; c) composto/compósito.

Verifica-se que para as juntas coladas envolvendo aderentes aço/aço (Figura 3.2a) ocorrem falhas adesivas, congruentes com a literatura [29, 30-32]. Segundo Grant *et al.* [30] e da Silva *et al.* [31], a deformação adesiva máxima tem um limite e a falha ocorre quando este é excedido. Por outro lado, para as juntas coladas que envolvem aderentes em materiais compósitos, o principal modo de dano verificado é a delaminação (Figure 3.2b e 3.2c), a qual é típica para aderentes que envolvam compósitos laminados [33]. Neste caso, todos os provetes que envolvem aderentes em materiais compósitos apresentam uma deformação máxima (deformação na rotura) muito semelhante. Contudo, comparando as juntas coladas compósito/compósito com as aço/compósito, verifica-se que as últimas apresentam valores de carga máxima mais elevados como consequência da maior rigidez do aço [29].

As Figuras 3.3, 3.4 e 3.5 mostram o efeito da exposição a diferentes ambientes hostis e tempo de exposição na resistência à tração. Os símbolos representam os valores médios e as bandas de dispersão (linhas) referem-se, respetivamente, aos valores máximos e mínimos obtidos. No caso da Figura 3.3 é avaliado o efeito da água destilada e da água do mar, enquanto a Figura 3.4 compara o efeito de água destilada à temperatura ambiente com o da água destilada a 40 °C na resistência à tração. Finalmente, a Figura 3.5 ilustra os valores obtidos para a água do mar e para a água destilada à temperatura de 40 °C.

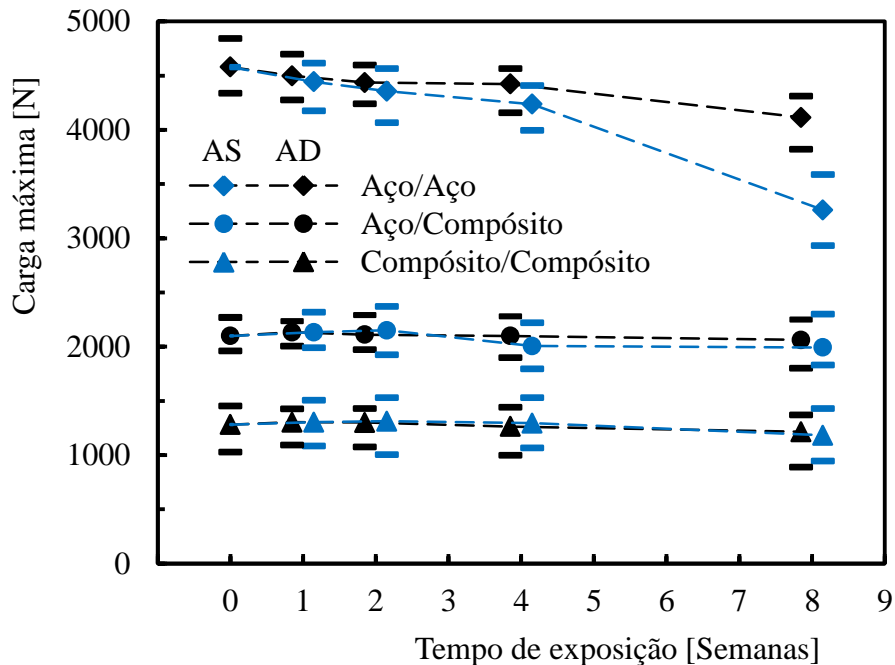


Figura 3.3 - Resistência à tração para diferentes ambientes hostis em função do tempo de exposição (AD = Água destilada à temperatura ambiente; AS = Água salgada à temperatura ambiente)

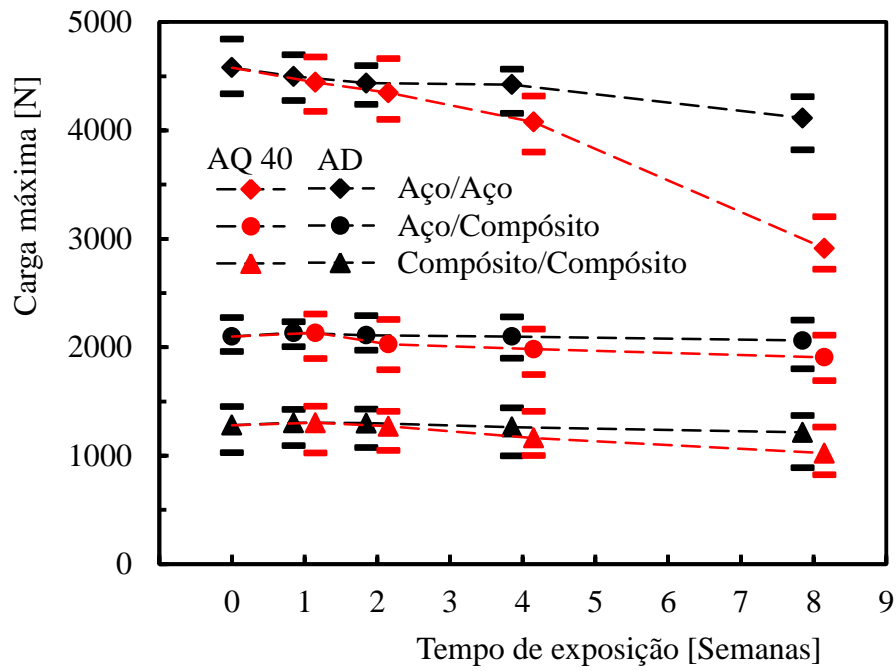


Figura 3.4 - Resistência à tração para diferentes ambientes hostis em função do tempo de exposição (AD = Água destilada à temperatura ambiente; AQ 40 = Água destilada à temperatura de 40°C)

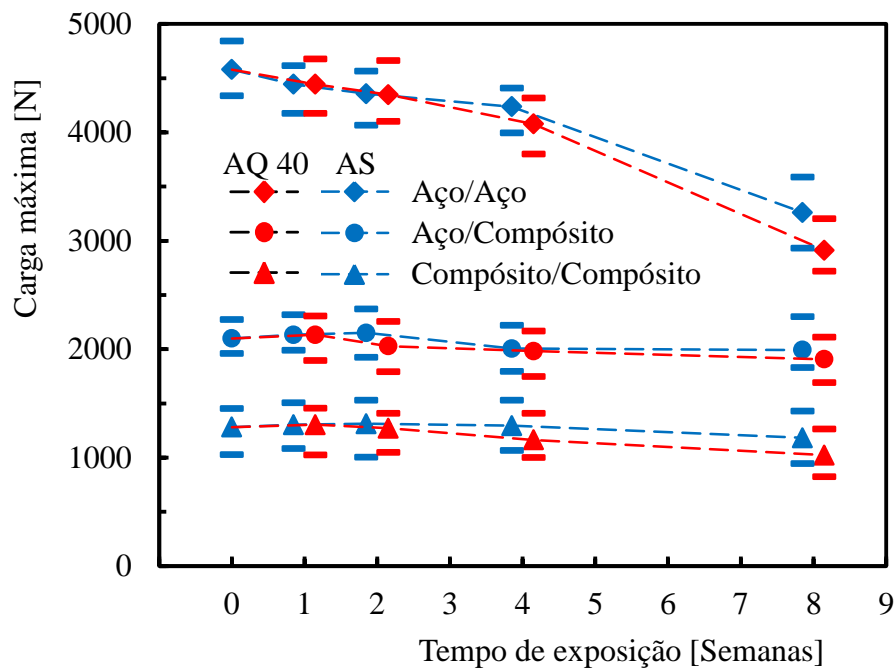


Figura 3.5 - Resistência à tração para diferentes ambientes hostis em função do tempo de exposição (AS = Água salgada à temperatura ambiente; AQ 40 = Água destilada à temperatura de 40°C)

De acordo com a Figura 3.3, pode-se verificar a existência de dois comportamentos distintos. No caso das juntas coladas que envolvem aderentes em materiais compósitos, e para o tempo de exposição estudado, é possível observar que a resistência à tração é praticamente semelhante, independentemente do meio hostil (água destilada e água do mar). Apesar de ocorrerem algumas oscilações em termos de valores médios, quando estes são analisados em contexto das bandas de dispersão é possível verificar que a imersão em água destilada à temperatura ambiente ou a imersão em água do mar à temperatura ambiente não induz qualquer influência na resistência à tração. Na verdade, como ilustra a Figura 3.6, os principais mecanismos de dano continuam associados às delaminações. Isto significa que a resistência à fratura interlaminar do compósito não é afetada pela água do mar nem pela água destilada, para o tempo de exposição estudado.

A Figura 3.6 mostra as falhas observadas para todas as configurações estudadas e expostas durante 4 semanas às diferentes soluções. No entanto, estes mecanismos de dano são característicos de cada junta colada, independentemente do tempo de exposição.

Por outro lado, as juntas coladas que envolvem apenas aderentes em aço mostram-se muito sensíveis ao meio ambiente estudado e respetivo tempo de exposição. Por exemplo, considerando apenas as juntas coladas imersas em água destilada, a resistência à tração diminui na ordem dos 3,4% e 10,2%, após 4 semanas e 8 semanas de imersão, respetivamente, relativamente às amostras de controlo. A mesma análise para as amostras imersas em água do mar mostra uma diminuição muito maior, com valores na ordem dos 7,5% e 28,8%, respetivamente. Independentemente do tempo de exposição, a água do mar promove degradações praticamente duas vezes maiores do que a observada para a água destilada.

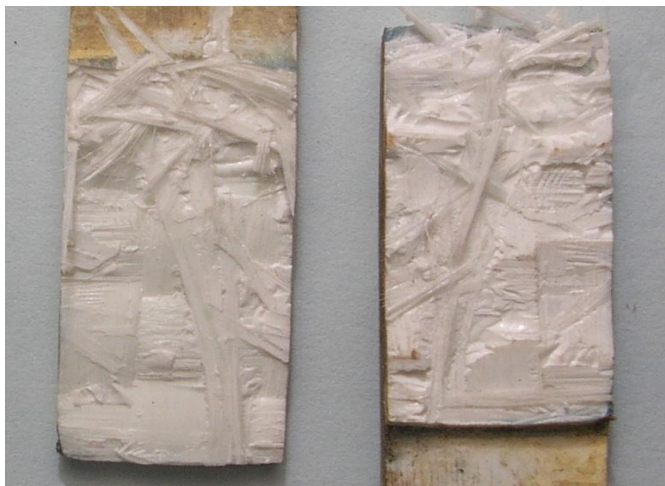
Na verdade, quando se está na presença de aderentes de metal, Comyn [34] e Pereira *et al.* [32] sugerem que a água pode entrar nas juntas por difusão através da cola, pelo transporte ao longo da interface, por capilaridade ou através de fendas existentes na cola. Deste modo ocorre diminuição da resistência mecânica, porque a água influencia a plasticização da cola, dilata ou interrompe as ligações interfaciais e promove, deste modo, danos irreversíveis [32, 35, 36]. Por outro lado, como já foi mencionado anteriormente, a deformação adesiva tem um valor máximo que depende da resistência da interface cola/aderente [30-32]. No entanto, a água do mar não só diminui a resistência da interface como, ao mesmo tempo, promove a ocorrência de alguns pontos de corrosão conforme ilustra a Figura 3.6a). Estes pontos de corrosão são então responsáveis pela iniciação de falhas múltiplas, pelo que não é de estranhar que a resistência mecânica seja bastante menor face à observada nas juntas coladas imersas em água destilada. Estes resultados estão de acordo com os estudos desenvolvidos por Prolongo e Ureña [37] e Pereira *et al.* [32], nos quais o ambiente salino levou à degradação das juntas coladas por corrosão.



a)



b)



c)



Figura 3.6 - Típicos modos de ruína ocorridos em juntas coladas, após quatro semanas de imersão, para:
 a) aderentes aço/aço imersos em água destilada à temperatura ambiente (esquerda) e água do mar (direita); b) aderentes aço/compósito imersos em água destilada a 40°C; c) aderentes compósito/compósito imersos em água do mar.

Por sua vez, da Figura 3.4, é possível concluir que o efeito de água destilada e da temperatura, quando associado em conjunto (efeito higrotérmico), é muito mais grave do que o efeito isolado da água destilada. No caso das juntas coladas que envolvem aderentes compósitos, é possível observar uma ligeira diminuição da resistência à tração. Estes valores, relativamente às amostras de controlo, são da ordem dos 3,4% para o aço/compósito e 1% para os aderentes compósito/compósito após duas semanas de exposição. Todavia, ocorre uma considerável diminuição após 8 semanas de exposição com valores de 9,1% para os aderentes aço/compósito e 20,2% para compósito/compósito, relativamente às amostras de controlo. Em ambos os casos, os principais modos de ruína observados continuam a ser delaminações e, até às 2 semanas de imersão, não é visível qualquer efeito em termos de resistência à tração.

A temperatura promove assim um aumento da humidade absorvida e, de acordo com Aoki *et al.* [38], a degradação do material inclui modificações químicas da matriz e separação fibra/matriz ao longo das suas interfaces. Por exemplo, Ray [39] estudou o efeito higrotérmico na resistência ao corte interlaminar (ILSS) de laminados carbono/epóxi e fibra de vidro/epóxi, tendo constatado que a temperatura tem um papel importante na ILSS desses laminados. A velocidade à qual a água é absorvida por um compósito depende de muitas variáveis, incluindo o tipo de fibra, matriz e temperatura, a diferença de concentração de água no interior do compósito, meio ambiente e se a água absorvida reage quimicamente com a matriz [40]. No entanto, Wright [41] observou que a taxa de água/humidade absorvida depende da estrutura química da resina e do seu agente de reticulação, em conjunto com a temperatura e humidade relativa.

Finalmente, em termos de juntas coladas envolvendo apenas aderentes de aço, a temperatura apresenta um efeito muito mais significativo ao observado anteriormente para as juntas aço/compósito ou compósito/compósito. Neste caso os valores são muito mais expressivos, pois após duas semanas de imersão a resistência à tração diminui cerca de 5,1% e, após 8 semanas de imersão, este valor diminuiu para 36,4%, relativamente às amostras de controlo. A temperatura atua assim como um ativador da difusão das moléculas de água através da cola (resina epóxi) [39].

Relativamente à Figura 3.5, é possível concluir que o efeito higrotérmico é muito mais severo do que a imersão das amostras em água do mar à temperatura ambiente. Até às duas semanas de imersão, e em termos de juntas coladas apenas com aderentes em aço, é possível observar que, para ambos os ambientes, os valores médios da resistência à tração diminuem na mesma proporção (ou seja, apresentam valores muito semelhantes). No entanto, após este tempo de imersão, a temperatura promove uma redução muito maior do que a observada com ambientes corrosivos. Por exemplo, considerando um tempo de exposição de 4 semanas, enquanto que a água do mar promove um decréscimo na ordem dos 7,5%, relativamente às amostras de controlo, este valor é de cerca de 10,9%, considerando o efeito higrotérmico.

Mas, durante 8 semanas de imersão, estes valores são muito mais expressivos, atingindo os 28,8% e os 36,4%, respetivamente. Portanto, para o tempo de exposição estudado (8 semanas), é possível concluir que o efeito higrotérmico é muito mais severo do que o ambiente corrosivo.

Em termos dos ensaios de impacto, a Figura 3.7 mostra as curvas típicas carga-tempo e energia-tempo obtidas para juntas coladas com aderentes aço/compósito. No entanto, elas são representativas de todas as condições ensaiadas. Em todos os ensaios realizados o impactor (martelo) partiu as amostras, o que significa que a energia de impacto foi suficiente para promover o colapso das juntas. Isto pode ser comprovado pelo facto da energia absorvida ser igual à energia máxima e, conseqüentemente, toda a energia foi transformada em dano [42-44]. Por outro lado, as curvas carga-tempo caracterizam-se por um aumento da carga, até um valor máximo, seguido por uma queda após o seu pico. Estas curvas contêm oscilações que resultam da onda elástica e são criadas pelas vibrações das amostras [42-46].

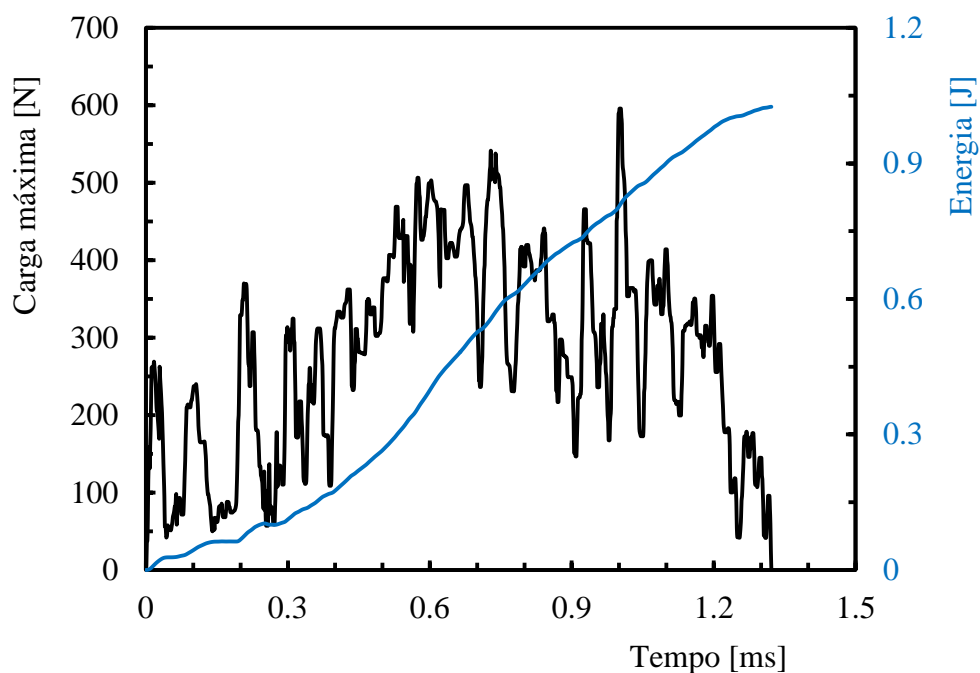


Figura 3.7 - Curvas carga-tempo e energia-tempo para juntas coladas com aderentes aço/compósito (provetes de controlo).

A Tabela 3.2 apresenta os valores médios, e respetivo desvio padrão, da resistência ao impacto obtida para as diferentes juntas coladas, meio ambiente e tempo de imersão. A resistência ao impacto é definida como o valor da resiliência no ponto de rotura e calcula-se de acordo com a equação 3.1:

$$A_b = \frac{E_{break}}{Area} \quad (3.1)$$

onde A_b é o valor da resiliência no ponto de rotura, E_{break} é a energia de impacto no ponto de rotura e “Area” é a área da junta colada dos respetivos provetes.

Tabela 3.2 - Resistência ao impacto das diferentes juntas coladas em função do meio ambiente e tempo de imersão.

Aderentes	Soluções	Parâmetros	Tempo de exposição [Semanas]				
			0	1	2	4	8
Aço/aço	Água destilada	Resistência Impacto [kJ/m ²]	36,5	32,2	27,4	27,1	25,8
		Desv. Padrão [kJ/m ²]	2,0	2,1	2,1	1,9	2,1
	Água destilada a 40 °C	Resistência Impacto [kJ/m ²]	36,5	31,6	26,2	25,5	21,9
		Desv. Padrão [kJ/m ²]	2,0	1,7	2,0	1,8	1,9
	Água salgada	Resistência Impacto [kJ/m ²]	36,5	30,6	26,7	26,0	23,1
		Desv. Padrão [kJ/m ²]	2,0	2,0	1,9	2,0	2,0
Aço/comósito	Água destilada	Resistência Impacto [kJ/m ²]	22,6	22,2	23,7	22,4	21,0
		Desv. Padrão [kJ/m ²]	2,1	1,9	2,1	2,0	2,1
	Água destilada a 40 °C	Resistência Impacto [kJ/m ²]	22,6	21,9	23,0	21,0	19,6
		Desv. Padrão [kJ/m ²]	2,1	1,7	1,7	2,0	1,9
	Água salgada	Resistência Impacto [kJ/m ²]	22,6	22,9	21,8	21,8	20,4
		Desv. Padrão [kJ/m ²]	2,1	1,9	2,0	1,7	1,4
Compósito/comósito	Água destilada	Resistência Impacto [kJ/m ²]	16,0	16,7	17,4	16,0	14,9
		Desv. Padrão [kJ/m ²]	1,7	2,0	1,9	1,9	2,0
	Água destilada a 40 °C	Resistência Impacto [kJ/m ²]	16,0	16,7	16,2	14,5	13,5
		Desv. Padrão [kJ/m ²]	1,7	2,1	2,3	1,8	1,8
	Água salgada	Resistência Impacto [kJ/m ²]	16,0	14,7	16,0	15,2	14,6
		Desv. Padrão [kJ/m ²]	1,7	1,7	2,0	1,8	1,9

É possível concluir que, para as juntas coladas com aderentes em aço, a resistência ao impacto segue a mesma tendência observada nos ensaios de tração. Mais uma vez, estas juntas revelam-se muito sensíveis às soluções estudadas e ao tempo de imersão. Quando

imersas em água destilada, a resistência ao impacto diminuiu cerca de 25,7% e 29,4%, após 4 e 8 semanas de imersão, respectivamente, relativamente às amostras de controlo. A mesma análise para as amostras imersas em água do mar conduz a uma diminuição na ordem dos 28,8% e 36,7%, respectivamente. No entanto, estes valores são muito mais expressivo para os provetes imersos em água destilada a 40 °C, em que a resistência ao impacto diminui cerca de 30,2% e 40%, respectivamente.

Em termos de modo de ruína, e tal como nos ensaios de tração, a falha adesiva foi observada para todas as juntas aço/aço ensaiadas, independentemente do meio envolvente e tempo de exposição. A água destilada, uma vez no interior da junta, não só plasticiza a cola como degrada as ligações interfaciais cola/aderente, promovendo, assim, uma diminuição da resistência ao impacto. No entanto, a água do mar não só diminui a resistência da interface como, ao mesmo tempo, promove a ocorrência de pontos de corrosão (como se observou na Figura 3.6a). Esta conjugação de fatores é então responsável pela maior diminuição da resistência ao impacto observada. Por fim, o efeito higrotérmico, ao conjugar humidade e temperatura revela-se ainda pior que o meio salino. Tal como se observou na tração, a resistência ao impacto é significativamente afetada uma vez que a temperatura atua como um ativador da difusão das moléculas de água.

Relativamente às juntas coladas que envolvem aderentes com materiais compósitos, a resistência ao impacto segue o mesmo comportamento observado anteriormente. No caso das juntas que envolvem aderentes aço/compósito, e comparando a resistência ao impacto obtida nos provetes de controlo com a obtida após 8 semanas de imersão, assiste-se a uma diminuição na ordem dos 7,1% para a água destilada e de 9,7% para a água do mar. No entanto, esta diferença sobe para 13,3% quando o efeito higrotérmico se faz sentir. Finalmente, a mesma análise para as juntas coladas compósito/compósito mostra que a imersão em água destilada durante 8 semanas promove uma diminuição da resistência ao impacto na ordem dos 6,9% enquanto a água do mar induz uma diminuição de 8,8%, para o mesmo período de imersão. Quando a água destilada é combinada com a temperatura o decréscimo é muito mais acentuado e apresenta valores na ordem dos 15,6%. Pode-se assim verificar que, independentemente do par de aderentes e sempre que existam materiais compósitos nas juntas coladas, os valores da diminuição da resistência ao impacto é muito semelhante. Por exemplo, comparando os resultados obtidos entre os provetes de controlo e os imersos em água destilada durante 8 semanas, assistiu-se a uma diminuição da resistência ao impacto de 7,1% nas juntas aço/compósito e de 6,9% nas juntas compósito/compósito. Esta reduzida diferença (apenas 0,2%) pode ser considerada desprezável dada a dispersão de resultados observada na Tabela 3.2. O mesmo é válido para os outros ambientes, sendo esta semelhança de valores resultado do mesmo tipo de dano que ocorre nas diferentes juntas coladas.

Tal como se verificou nos ensaios de tração, o principal e único modo de ruína é a delaminação em todas as juntas que envolveram materiais compósitos. Em termos de provetes de controlo, a resistência interlaminar entre as diferentes camadas do laminado revela-se inferior à resistência da interface aço/aderente, pois é nas interfaces dos laminados que ocorre a ruína (como se observa na Figura 3.6b e c). Para além deste facto, a resistência à fratura interlaminar do compósito também é afetada pelo meio ambiente envolvente, conduzindo, deste modo, a menores valores da resistência ao impacto.

Verifica-se ainda que, para todas as juntas coladas estudadas, o efeito do meio ambiente é muito mais expressivo na resistência ao impacto do que na resistência à tração.

Capítulo 4

Conclusões Finais e Recomendações para Trabalhos Futuros

De acordo com os objetivos estabelecidos, esta dissertação apresentou uma análise e discussão de resultados que conduziu a algumas conclusões, sendo aqui abordadas apenas as que se julgam mais relevantes.

No capítulo 4.2, apresentam-se algumas sugestões para trabalhos futuros.

4.1 - Conclusões Gerais

O presente trabalho estudou a resistência à tração e a resposta ao impacto de juntas coladas sobrepostas simples com diferentes aderentes (aço de alto limite elástico e um compósito comercial). Foi ainda estudado o efeito da exposição a diferentes soluções na resistência estática e na resistência ao impacto das referidas juntas.

As juntas coladas com aderentes em aço mostraram-se mais sensíveis ao meio ambiente estudado e ao tempo de exposição. A resistência à tração diminuiu cerca de 3,4% e 10,2%, quando imersas em água destilada durante 4 e 8 semanas, respetivamente. Estes valores, para imersão em água do mar, foram superiores e na ordem dos 7,5% e 28,8%, respetivamente. Relativamente às juntas coladas com aderentes em materiais compósitos, a água (destilada ou salgada) mostrou um efeito marginal. No entanto, o efeito higrotérmico foi marcante na resistência à tração em todas as juntas independentemente dos aderentes envolvidos.

Finalmente, a imersão nas soluções estudadas apresentaram um efeito na resistência ao impacto muito semelhante ao observado nos ensaios de tração, mas com uma maior severidade. O efeito higrotérmico também foi determinante na diminuição da resistência ao impacto, independentemente dos mecanismos de dano serem semelhantes aos observados nos ensaios de tração para todas as juntas coladas estudadas.

4.2 - Recomendações para Trabalhos Futuros

Na sequência do presente trabalho surgiram alguns aspetos que se revelaram interessantes para uma abordagem mais detalhada. De seguida, são referidos sumariamente aqueles que poderão vir a ser alvo de estudo:

- 1 - Elaborar um estudo numérico para fazer uma análise da distribuição de tensões nas juntas, com vista a justificar mais detalhadamente os fenómenos observados.
- 2 - Estudar a tenacidade à fratura em provetes colados com aderentes em aço/aço, aço/compósito e compósito/compósito.
- 3 - Estudar a tenacidade à fratura interlaminar do compósito envolvido neste estudo.
- 4 - Estudar o efeito do meio ambiente e do tempo de exposição na tenacidade à fratura das juntas coladas e na tenacidade à fratura interlaminar do compósito.

Bibliografia

- [1] Liesa, F.; Bilurbina, L. (1990) *Adhesivos Industriales*. Marcombo Boixareu Editores, Barcelona, Espanha.
- [2] Hattori, T. (1991) *A Stress-Singularity-Parameter Approach for Evaluating the Adhesive Strength of Single-Lap Joints*. JSME International Journal, Series I, Vol. 34, pp. 326-331.
- [3] Sawa, T.; Liu, J.; Nakano, K.; Tanaka, J. (2000) *A Two-Dimensional Stress Analysis of Single-Lap Adhesive Joints of Dissimilar Adherends Subjected to Tensile Loads*. Journal Adhesion Science and Technology, Vol. 14, pp. 43-66.
- [4] Tong, L. (1994) *Bond Shear Strength for Adhesive Bonded Double-Lap Joints*. International Journal of Solids and Structures, Vol. 31, pp. 2919-2931.
- [5] Reis, P.N.B. (2001) *Resistência de Uniões Estruturais em Polipropileno Reforçado com Fibra de Vidro*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Electromecânica, Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- [6] Esteves, J.L. (1990) *Estudo do Comportamento de Adesivos Estruturais*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [7] Skeist, I. (1990) *Handbook of Adhesives*. 3ª Edição, Chapman & Hall, New York, USA.
- [8] Gauthier, M.M. (1990) *Sorting out Structural Adhesives*. Advanced Materials & Processes, Vol. 138, ASM International.
- [9] Magalhães, A.G. (1999) *Aplicação das Técnicas de Emissão Acústica e Radiografia na Caracterização do Dano Produzido por Fluência em Juntas de Materiais Compósitos Sujeitas a Diferentes Condições Ambientais*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.
- [10] Correia, A.C.M. (1993) *Estudo Químico e Envelhecimento Higrotérmico de um Adesivo de Epóxido. Comportamento Mecânico de Juntas Coladas*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Universidade do Coimbra, Coimbra.
- [11] American Society for Testing and Materials (1996) *Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*. Annual Book of ASTM Standards, Section 15, Vol. 15.06, D 1002-94.
- [12] Lee, C.C. (1997) *Determination of the Mechanical Properties of Adhesive for Design of Bonded Joints*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia dos Materiais, Faculty of Applied Science, School of Materials Science and Engineering, University of New South Wales, Austrália.

- [13] Adams, R.D.; Peppiatt, N.A. (1974) *Stress Analysis of Adhesive-Bonded Lap Joints*. Journal of Strain Analysis, Vol. 9, pp. 185-196.
- [14] American Society for Testing and Materials (1996) *Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints*. Annual Book of ASTM Standards, Section 15, Vol. 15.06, D 5573-94.
- [15] Tong, L.; Steven, G.P. (1999) *Analysis and Design of Structural Bonded Joints*. Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London.
- [16] Ferreira, L.M.S. (2007) *Avaliação do Dano em Compósitos Laminados Devido a Impactos de Baixa Velocidade*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra.
- [17] Ruiz, C.; Harding J. (1992) *Modelling Impact of Composite Structures Using Small Specimens*. Composites Engineering, Vol. 2, pp. 164-167.
- [18] Beevers, A.; Ellis, M.D. (1984) *Impact behaviour of bonded mild steel lap joints*. Int. J. Adhes. Adhes. 4 (1), pp. 13-16.
- [19] Kihara, K.; Isono, H.; Yamabe, H.; Sugibayashi, T. (2003) *A study and evaluation of the shear strength of adhesive layers subjected to impact loads*. Int. J. Adhes Adhes. 23 (4), pp. 253-259.
- [20] Reis, P.N.B.; Ferreira, J.A.M.; Pereira, A.M.; Antunes, F.J.V. (2014) *Influence of Superposition Length on Transverse Impact Response of Single-Strap Adhesive Joints*. J. Adhesion 90 (1), pp.65-79.
- [21] Reis, P.N.B.; Antunes, F.J.V.; Ferreira, J.A.M. (2005) *Influence of superposition length on mechanical resistance of single-lap adhesive joints*. Compos. Struct. 67 (1), pp. 125-133.
- [22] Silva, L.F.M.; Critchlow, G.W.; Figueiredo, M.A.V. (2008) *Parametric study of adhesively bonded single lap joints by the Taguchi method*. J. Adhesion Sci. Technol. 22 (13), pp. 1477-1494.
- [23] Silva, L.F.M.; Carbas, R.J.C.; Critchlow, G.W.; Figueiredo, M.A.V.; Brown, K. (2009) *Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints*. Int. J. Adhes. Adhes. 29 (6), pp. 621-632.
- [24] Reis, P.N.B.; Ferreira, J.A.M.; Antunes, F. (2011) *Effect of adhered's rigidity on the shear strength of single lap adhesive joints*. Int. J. Adhes. Adhes. 31 (4), pp. 193-201.
- [25] Vaidya, U.K.; Gautam, A.R.S.; Hosur, M.; Dutta, P. (2006) *Experimental-numerical studies of transverse impact response of adhesively bonded lap joints in composite structures*. Int. J. Adhes. Adhes. 26 (3), pp. 184-198.
- [26] Bellenger, V.; Mortaigne, B.; Verdu, J. (1992) *Structure-property Relationships for Styrene Crosslinked Polyesters. II. Glass Transition Temperature*. Journal of Applied Polymer

Science, Vol. 44, Nº 4, pp. 653-661.

- [27] Sanchez, E. M. S.; Zavaglia, C.A.C.; Felisberti, M. I. (2000) *Unsaturated Polyester Resins: Influence of the Styrene Concentration on the Miscibility and Mechanical*. Polymer. 41 (2), pp. 765-769.
- [28] Pereira, A.M.; Ferreira, J.M.; Antunes, F.V.; Bártolo, P.J.J. (2010) *Analysis of manufacturing parameters on the shear strength of aluminium adhesive single-lap joints*. Mater. Process. Tech. 210 (4), pp. 610-617.
- [29] Reis, P.N.B.; Ferreira, J.A.M.; Antunes, F. (2011) *Effect of adhered's rigidity on the shear strength of single lap adhesive joints*. Int. J. Adhes Adhes. 31 (4), pp.193-201.
- [30] Grant, L.D.R.; Adams, R.D.; Silva, L.F.M. (2009) *Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry*. Int J Adhes Adhes 29 (4), pp. 405-413.
- [31] Silva, L.F.M.; Neves, P.J.C.; Adams, R.D.; Wang, A.; Spelt, J.K. (2009) *Analytical models of adhesively bonded joints-part II: comparative study*. Int J Adhes Adhes 29 (3), pp. 331-341.
- [32] Pereira, A.M.; Reis, P.N.B.; Ferreira, J.A.M.; Antunes, F.V. (2013) *Effect of saline environment on mechanical properties of adhesive joints*. Int J Adhes Adhes 47, pp. 99-104.
- [33] Tong, L.; Steven, G.P. (1999) *Analysis and Design of Structural Bonded Joints*. Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London.
- [34] Comyn, J. (1983) *Kinetics and Mechanism of Environmental Attack*. In: Kinloch, A.J. (editor). Durability of Structural Adhesives. London: Applied Science publishers, pp. 85-129.
- [35] Bowditch, M.R. (1996) *The durability of adhesive joints in the presence of water*. Int. J. Adhes. Adhes. 16 (2), pp. 73-79.
- [36] Armstrong, K.B. (1997) Long-term durability in water of aluminium alloy adhesive joints bonded with epoxy adhesives. Int. J. Adhes. Adhes. 17 (2), pp. 89-105.
- [37] Prolongo, S.G.; Ureña, A. (2007) *Durability of aluminium adhesive joints bonded with a homopolymerised epoxy resin*. J. Adhesion 83 (1), pp. 1-14.
- [38] Aoki, Y.; Yamada, K.; Ishikawa, T. (2008) *Effect of hygrothermal condition on compression after impact strength of CFRP laminates*. Compos. Sci. Technol. 68 (6), pp. 1376-1383.
- [39] Ray, B.C. (2006) *Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites*. J. Colloid Interf. Sci., 298 (1), pp. 111-117.
- [40] Kaushal, S.; Tankala, K.; Rao, R.M.V.G.K. (1991) *Some hygrothermal effects on the mechanical behaviour and fractography of glass-epoxy composites with modified interface*. J. Mater. Sci., 26 (23), pp. 6293-6299.
- [41] Wright, W.W. (1981) *The effect of diffusion of water into epoxy resins and their carbon fiber reinforced composites*. Composites, 12 (3), pp. 201-205.

- [42] Reis, P.N.B.; Ferreira, J.A.M.; Santos, P.; Richardson, M.O.W.; Santos, J.B. (2012) *Impact response of Kevlar composites with filled epoxy matrix*. Compos. Struct. 94 (12), pp. 3520-3528.
- [43] Reis, P.N.B.; Ferreira, J.A.M.; Zhang, Z.Y.; Benameur, T.; Richardson, M.O.W. (2013) *Impact response of Kevlar composites with nanoclay enhanced epoxy matrix*. Compos Part B-Eng, 46, pp. 7-14.
- [44] Reis, P.N.B.; Ferreira, J.A.M.; Zhang, Z.Y.; Benameur, T.; Richardson, M.O.W. (2014) *Impact Strength of Composites with Nano-enhanced Resin after Fire Exposition*, Compos Part B-Eng, 56, pp. 290-295
- [45] Schoeppner, G.A.; Abrate, S. (2000) *Delamination threshold loads for low velocity impact on composite laminates*, Compos. Part A-Appl. S. 31 (9), pp. 903-915.
- [46] Belingardi, G.; Vadori, R. (2002), *Low velocity impact of laminate Glass-Fiber-Epoxy matrix composite materials plates*. Int. J. Impact. Eng. 27 (2), pp. 213-229.