



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Departamento de Ciências Aeroespaciais

Resistência ao Impacto de Juntas Coladas

Hugo Davide Góis

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Aeronáutica
(ciclo de estudos integrado)

Orientador: Prof. Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis
Co-orientador: Prof. Doutor Pedro Vieira Gamboa

Covilhã, setembro de 2016

Agradecimentos

Ao longo dos últimos meses foram várias as pessoas e instituições que de alguma forma contribuíram e ajudaram na realização deste trabalho.

Quero agradecer, em primeiro lugar, ao professor Paulo Reis pela motivação inicial e por todo o apoio prestado, mostrando-se sempre disponível. Agradeço também ao professor Pedro Gamboa pela atenção disponibilizada.

Gratifico a Universidade da Beira Interior, em especial os Departamentos de Ciências Aeroespaciais e Eletromecânica, e o Instituto Politécnico de Abrantes pelas instalações e materiais disponibilizados, assim como todos os docentes, particularmente o Engenheiro Carlos Coelho, e técnicos envolvidos que tenham contribuído para a realização deste trabalho.

Agradeço aos meus colegas Rafael Santos, Pedro Sousa, Cherecheş Marius e Elena-Ionela Dinu por toda a ajuda imprescindível dada ao longo deste trabalho, sobretudo durante a parte realizada em laboratório.

Agradeço à minha família: à minha avó e ao meu avô por toda a força e ânimo dado ao longo destes anos; à minha mãe e ao meu pai que me apoiaram incondicionalmente e tornaram possível a minha passagem pela universidade; aos meus irmãos que todos os dias me incentivam a melhorar e à minha prima Verónica que é como uma irmã para mim.

Não posso deixar de reconhecer o apoio dos meus amigos, que embora me tenham desencaminhado algumas vezes, me motivaram até ao fim.

Quero agradecer especialmente à Sara Coelho por me ter acompanhado do início ao fim, tornando os obstáculos mais fáceis de ultrapassar.

Resumo

O comportamento das juntas coladas quando sujeitas ao impacto tem recebido pouca atenção por parte da comunidade científica. Visto que elas são a forma mais eficiente de ligar componentes/estruturas feitas em materiais compósitos e que, por sua vez, estes materiais têm vindo a ganhar terreno nas diversas áreas da engenharia, nomeadamente a aeronáutica, torna-se necessário aprofundar os conhecimentos neste domínio. Na verdade, são inevitáveis os choques com aves ou a simples queda de uma ferramenta e, deste modo, a aeronavegabilidade da estrutura pode ficar seriamente comprometida.

Os efeitos estudados ao longo deste trabalho, adotando uma geometria com um laminado a reforçar, foram a espessura e o comprimento desse mesmo laminado e, ainda, o comprimento do gap. Variando esses parâmetros, foram efetuados diferentes ensaios ao impacto a diferentes energias. Foi possível tirar algumas conclusões no que concerne ao melhor desempenho ao impacto. Assim, as configurações mais resistentes dentro dos intervalos estudados, foram obtidos para a maior espessura (4,5 mm), maior comprimento (60 mm) e maior comprimento do gap (20 mm). Para além disso, também se obtiveram resultados no que toca à força e deslocamento máximos, bem como a energia absorvida e a rigidez à flexão, sendo que os melhores valores destes não se prendem, necessariamente, com os provetes que melhor performance ao impacto tiveram.

Palavras-chave

Materiais compósitos; Juntas coladas; Impacto de baixa velocidade.

Abstract

The behavior of adhesive joints when subjected to the impact has received little attention. Adhesive joints are the most efficient way of connecting parts made of composite materials. Since the use of these materials have been increasing in the most varied areas of engineering, especially aeronautical engineering, it is necessary to deepen the knowledge about this theme. Several components of an aircraft are subject to impacts, whether low or high-velocity impacts. For example, bird strikes or a simple tool drop can trigger catastrophic failures that compromise the airworthiness of the whole structure.

The effects studied throughout this work, adopting a simple geometry with an overlay laminate were the thickness and the length of that laminate and also the gap length. By varying these parameters, different tests using different impact energies were executed. It was possible to draw some conclusions regarding the best performance to impact. Therefore, the better configurations, responding to impact, within the ranges studied, were obtained for the thicker laminate (4.5 mm), the laminate with the largest length (60 mm) and the largest gap length (20 mm). Furthermore, there were also other results obtained regarding the maximum force and displacement as well as the absorbed energy and impact bending stiffness. The best values for these do not relate necessarily to the samples which had the best performance to impact.

Keywords

Composite materials; Adhesive joints; low-velocity impact.

Índice

Introdução	1
Capítulo 1 - Enquadramento Teórico	3
1.1 Introdução	3
1.2 Materiais Compósitos	3
1.2.1 Introdução	3
1.2.2 Matrizes	4
1.2.3 Reforços	5
1.2.4 Vantagens e desvantagens do uso dos materiais compósitos	7
1.2.5 Aplicações dos materiais compósitos	8
1.3 Juntas Coladas	11
1.3.1 Introdução	11
1.3.2 Tipos de juntas, solicitações e modos de danos	13
1.3.3 Preparação das superfícies a colar	17
1.3.4 Fundamentos da adesão	18
1.3.5 Classificação das colas	20
1.3.6 Impacto em juntas coladas	21
Capítulo 2 - Materiais, Equipamento e Procedimento experimental	23
2.1 Introdução	23
2.2 Manufatura dos laminados	23
2.3 Provetes	24
2.4 Equipamento	26
2.5 Procedimento experimental	28
Capítulo 3 - Análise e Discussão dos Resultados	29
3.1 Introdução	29
3.2 Efeito da espessura do laminado de sobreposição	31
3.3 Efeito do comprimento do laminado de sobreposição	35
3.4 Efeito do comprimento do gap	39
Capítulo 4 - Conclusões finais e recomendações para trabalhos futuros	43
4.1 Conclusões finais	43
4.2 Recomendações para trabalhos futuros	43
Bibliografia	45

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Aplicação dos materiais compósitos em: a) Chassis em fibra de carbono [15]; b) Raquete de ténis [16]; c) coletes de proteção [17].	9
Figura 1.2 - a) Aplicação dos materiais compósitos no sector aeronáutico [18]; b) Benefício em termos de consumo de energia com a aplicação dos materiais compósitos [19].	10
Figura 1.3 - a) Secção da fuselagem do Dreamliner em material compósito [20]; b) Maior asa de uma aeronave fabricada em materiais compósitos, Airbus A350 XWB [22].	11
Figura 1.4 - Modos de carregamento: a) Tração; b) Corte; c) Clivagem; d) Arrancamento.	13
Figura 1.5 - Efeito do carregamento (a) e do tipo de cola (b) na resistência de uma junta.	14
Figura 1.6 - Tipos de juntas e respetivas solicitações para as quais foram concebidas: a) juntas de sobreposição, b) juntas topo-a-topo [33].	15
Figura 1.7 - Distribuição das tensões ao longo da linha central da camada da cola, para uma junta colada de sobreposição dupla com e sem o efeito do chanfro [40].	16
Figura 1.8 Modos de ruína em juntas coladas de sobreposição simples em materiais compósitos: a) Rotura do laminado; b) Delaminação [40].	16
Figura 1.9 - Ruína por delaminação nos aderentes [40].	17
Figura 1.10 - Ilustração dos ângulos de contacto de uma gota numa superfície solida [43].	
Figura 2.1 - Geometrias dos provetes para o estudo do efeito do comprimento do laminado de sobreposição.	24
Figura 2.2 - Geometrias dos provetes para o estudo do efeito da espessura do laminado de sobreposição.	25
Figura 2.3 - Geometrias dos provetes para o estudo do efeito do comprimento do gap.	25
Figura 2.4 - Provetes depois de cortados.	25
Figura 2.5 - Impactor utilizado.	26
Figura 2.6 - Máquina de tese Imatek IM10.	27
Figura 3.1 - Influência do gap nas curvas carga-tempo e energia-tempo obtidas com uma energia de 7 J e para a geometria com a sobreposição de 40 mm e uma espessura de 4,5 mm.	30
Figura 3.2 - Evolução das curvas carga-tempo e energia-tempo com o número de impactos.	30

Figura 3.3 - Morfologia típica dos danos observados nas juntas coladas para todas as configurações.	31
Figura 3.4 - Energia do impacto versus número de impactos para diferentes espessuras do laminado de sobreposição. (ensaios realizados com: comprimento do laminado de sobreposição = 40 mm; comprimento da gap = 0 mm).	33
Figura 3.5 - Influência da espessura do laminado de sobreposição: a) força máxima e deslocamento máximo; b) energia absorvida e rigidez à flexão.	34
Figura 3.6 - Energia do impacto versus número de impactos para diferentes comprimentos do laminado de sobreposição. (ensaios realizados com: espessura do laminado de sobreposição = 1,5 mm; comprimento da gap = 0 mm).	37
Figura 3.7 - Influência do comprimento do laminado de sobreposição: a) força máxima e deslocamento máximo; b) energia absorvida e rigidez à flexão.	38
Figura 3.8 - Energia do impacto versus número de impactos para diferentes comprimentos do gap (ensaios realizados com: espessura do laminado de sobreposição = 4,5 mm; comprimento do laminado de sobreposição = 40 mm).	39
Figura 3.9 - Influência do comprimento do gap: a) força máxima e deslocamento máximo; b) energia absorvida e rigidez à flexão.	41

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 - Propriedades mecânicas de vários materiais, incluídos os materiais compósitos [3].	4
Tabela 1.2 - Propriedades físicas/mecânicas de alguns polímeros usados nas matrizes de compósitos [3,4,8,9].	5
Tabela 1.3 - Propriedades físicas/mecânicas de algumas fibras [3,4,8].	6
Tabela 1.4 - Composição química de algumas fibras de vidro, em percentagem de peso [14].	7
Tabela 1.5 - Agrupamento dos adesivos pelo seu desempenho [4].	20
Tabela 1.6 - Comportamentos e causas associados a intervalos de impacto [66,67].	22
Tabela 2.1 - Propriedades da resina utilizada como matriz para os provetes [68].	23
Tabela 2.2 - Propriedades da cola utilizada [69].	26
Tabela 3.1 - Valores do primeiro impacto para diferentes espessuras do laminado de sobreposição.	32
Tabela 3.2 - Valores do primeiro impacto para diferentes comprimentos do laminado de sobreposição.	36
Tabela 3.3 - Valores do primeiro impacto para diferentes comprimentos do gap.	40

Lista de Acrónimos

ASTM	American Society for Testing Materials
DGEBA	Diglycidyl ether of bisphenol-A
DGEBF	Diglycidyl ether of bisphenol-F
HM	High modulus
HS	High strenght
PVC	Polyvinyl chloride

Notação

Caracteres Latinos

A	Alongamento à rotura
C_0	Constante de integração
E	Módulo de elasticidade
F	Força
G	Módulo de cisalhamento
ℓ_g	Comprimento do gap
ℓ_l	Comprimento do laminado de sobreposição
m	Massa
t	Espessura do laminado de sobreposição
T	Temperatura
T_g	Temperatura de transição vítrea
V	Velocidade
V_0	Velocidade inicial
x	Deslocamento da célula de carga

Símbolos Gregos

α	Coefficiente de expansão térmica
ε	Deformação a compressão
ρ	Massa específica
σ_{uts}	Resistência à tração
\varnothing	Diâmetro do filamento

Introdução

Este trabalho surge do interesse na área dos materiais e estruturas, em especial dos materiais compósitos, dadas as suas propriedades e crescente aplicação na engenharia, em particular a aeronáutica.

A utilização de materiais compósitos de matriz polimérica com reforços fibrosos têm vindo a aumentar ao longo dos tempos, sendo a indústria aeronáutica a principal impulsionadora do seu estudo, uma vez que oferecem resistência e rigidez elevadas a uma densidade baixa, quando comparados com outros materiais utilizados, por exemplo, ligas metálicas. A maneira mais eficiente de juntar peças feitas em compósito é através de colas estruturais, resultando em juntas coladas. Neste campo, os adesivos epóxicos são os mais utilizados no fabrico de aeronaves, visto serem de simples aplicação e baixo custo, proporcionando leveza. Por outro lado, a geometria da junta colada tem também influência no seu desempenho.

Este trabalho prende-se com o estudo do efeito de alguns parâmetros da geometria das juntas coladas com um laminado de sobreposição: a espessura e o comprimento desse laminado e o comprimento do gap. Para isso, foi necessário fabricar os provetes e posteriormente testá-los ao impacto. Uma vez que os impactos em estruturas, com enfoque nas aeronáuticas, são inevitáveis, sejam elas provenientes de animais ou objetos, surge a necessidade deste estudo, pois de facto trata-se de uma área ainda pouco aprofundada.

A presente dissertação consiste em quatro capítulos. No primeiro é feito um enquadramento teórico sobre materiais compósitos e juntas coladas. Para além das suas propriedades, são apresentadas algumas vantagens e desvantagens, assim como aplicações na engenharia. É neste capítulo que também é abordado a mecânica de impacto. No segundo capítulo encontra-se descrito todo o procedimento experimental, desde os materiais utilizados e métodos de fabricação até aos ensaios de impacto. No terceiro capítulo, os resultados encontram-se compilados. São posteriormente analisados e discutidos. Por último, no quarto capítulo, encontram-se as conclusões deste trabalho, bem como sugestões para outros trabalhos futuros.

Capítulo 1

Enquadramento teórico

1.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados alguns aspetos fundamentais sobre os materiais compósitos e juntas coladas, dois temas intimamente relacionados. Inicialmente é introduzida a definição de material compósito apresentando-se, seguidamente, as suas vantagens e desvantagens face aos materiais tradicionais, bem como os seus campos de aplicação. Os seus constituintes também são abordados, com especial enfoque no seu efeito sobre as propriedades mecânicas dos compósitos. Finalmente são introduzidas as juntas coladas, onde se aborda o tipo de juntas existentes, respetivas solicitações e modos de dano. Especial atenção também foi dada à preparação das superfícies a colar, fundamentos da adesão e possíveis modos de classificar as colas. Esta secção termina com uma abordagem ao impacto nas juntas coladas.

1.2 Materiais Compósitos

1.2.1 Introdução

Os materiais compósitos resultam da combinação de pelo menos dois materiais distintos, com a vantagem de poder associar o melhor de cada material na sua composição e, deste modo, permitir obter melhores propriedades (peso, resistência mecânica, rigidez, resistência à corrosão e à fadiga) face às dos seus constituintes individualmente. Esta definição é, no entanto, muito abrangente pois pode incluir quase todos os materiais desenvolvidos pelo Homem [1-4]. Assim, apesar das várias definições que podem ser encontradas na literatura [2,5], aquela que se revela como a mais adequada define o material compósito como sendo a combinação de dois materiais que permanecem em fases separadas, sendo uma delas a matriz e a outra o reforço [5]. O reforço é maioritariamente constituído por materiais de elevada resistência mecânica e rigidez, na forma de fibras com um diâmetro muito reduzido. Por sua vez, a matriz não só protege os elementos de reforço da abrasão e do meio ambiente, como também promovem a transferência da carga entre as fibras, conferem a estrutura e alguma ductilidade ao compósito.

De acordo com a literatura [4-6], a utilização de materiais compósitos remonta aos primórdios da História do Homem. Há milhares de anos, os Israelitas utilizavam palha e argila para construir as suas habitações. Também os Egípcios desenvolveram contraplacados, ao descobrirem que a madeira podia ser trabalhada de modo a aumentar a sua resistência. As espadas e as armaduras, durante a época medieval, combinavam várias camadas de diferentes metais. Mais

recentemente, as fibras reforçadas por diferentes resinas têm vindo a substituir os ditos materiais tradicionais devido às suas excelentes propriedades. Por exemplo, a tabela 1.1 compara algumas propriedades mecânicas com as apresentadas por alguns materiais tradicionais, onde se incluem os metais mais utilizados.

Tabela 1.1 - Propriedades mecânicas de vários materiais, incluídos os materiais compósitos [3].

Materiais	E [GPa]	σ_{uts} [GPa]	ρ [kg/m³]	E/ρ [10⁻³]	σ_u/ρ [10⁻³]
Convencionais:					
Aço	210	0,34-2,1	7800	26,9	0,043-0,27
Ligas de Al	70	0,14-0,62	2700	25,9	0,052-0,23
Vidro	70	0,7-2,1	2500	28	0,28-0,84
Tungsténio	350	1,1-4,1	19300	18,1	0,057-0,21
Berílio	300	0,7	1,83	164	0,38
Compósitos unidirecionais:					
Vidro-S/epóxi (45%)	39,5	0,87	1810	21,8	0,48
Carbono/epóxi (61%)	142	1,73	1590	89,3	1,08
Kevlar®/epóxi (53%)	63,6	1,1	1350	47,1	0,81

1.2.2 Matrizes

Existem vários materiais passíveis de serem usados como matriz, de entre os quais se realçam os polímeros, os metais e os cerâmicos. Assim sendo, não será de estranhar que as matrizes acabem por condicionar algumas propriedades dos compósitos, pois delas dependem muitas vezes a temperatura de trabalho, a resistência a ações externas, as propriedades elétricas e o próprio processo de fabrico.

A facilidade de processamento e a baixa densidade dos polímeros fazem com que estes materiais sejam os mais utilizados no campo das matrizes [1,4,6]. Deste modo, é possível agrupá-las em dois grandes grupos: as termoendurecíveis e as termoplásticas. No caso das primeiras, elas possuem uma estrutura bastante rígida, que não se altera significativamente com a temperatura. Apresentam a vantagem de poderem ser utilizadas a temperaturas mais elevadas mas, por outro lado, não são passíveis de serem recicladas [1]. Os poliuretanos, as poliésteres, as fenólicas e os epóxis são exemplos de algumas resinas termoendurecíveis. Sendo que estas últimas foram as utilizadas na parte experimental deste trabalho, merecem aqui um especial relevo.

As resinas epóxi têm propriedades mecânicas e químicas de excelência e são, por isso, bastante utilizadas na produção de compósitos para os mais diversos campos de aplicação (incluindo a aeronáutica). Paralelamente, também apresentam boas propriedades de adesão à fibra, baixa contração (logo boa estabilidade dimensional), baixa absorção de água e temperaturas de funcionamento entre 100 e 200 °C [4]. Durante o seu processo de cura não ocorre a emissão de produtos voláteis, mas necessita de um agente endurecedor, geralmente aminas alifáticas,

aromáticas ou algumas poliamidas. Comparativamente às outras resinas, estas apresentam um custo mais elevado.

Finalmente as resinas termoplásticas, são atualmente alvo de grande atenção pois apresentam a vantagem de poderem ser moldadas mais do que uma vez, menor custo de produção e boa performance (maior resistência ao impacto em relação às termoendurecíveis), para além de serem recicláveis. Os polietilenos, polipropilenos, PVC's e nylon são alguns exemplos de resinas termoplásticas.

O tipo de matriz utilizada num material compósito influencia, assim, significativamente as propriedades mecânicas destes materiais. Apesar de suportar uma pequena fração da carga aplicada, podemos dizer que quanto mais resistente for a matriz melhor será o desempenho do compósito [7]. As principais propriedades, físicas e mecânicas, de alguns materiais poliméricos de possível utilização nas matrizes de um compósito encontram-se resumidas na tabela 1.2.

Tabela 1.2 - Propriedades físicas/mecânicas de alguns polímeros usados nas matrizes de compósitos [3,4,8,9].

Matrizes	ρ [kg/m ³]	E [GPa]	σ_{uts} [GPa]	ϵ [%]	α [10 ⁶ /°C]	T _g [°C]	T _{máx. serviço} [°C]
Termoplásticas:							
Polipropileno	900	1,2	0,03	20-400	90	-10	70-140
Poliamida	1100	2,0	0,07	200	80	50	170
Policarbonato	1200	2,1-3,5	0,055-0,07	125	-	150	-
Poli-éter-eter-cetona	1300-1350	3,5-4,4	0,1	50	50	143	140-250
Polisulfureto de fenileno	1350-1400	3,4	0,08	110	-	85	240
Polyethersulfone	1350	3,0	0,085	60	60	-	180
Termoendurecíveis:							
Poliéster	1200	4,0	0,08	2,5	80	-	60-200
Fenólica	1300	3,0	0,07	2,5	10	-	120-200
Epóxi DGEBA	1200	3,0	0,09	8,0	-	180	125
Epóxi DGEBF	1200	4,1	0,0125	5	-	-	-
Silicone	1100	2,2	0,035	-	-	-	100-350
Poliamida	1400	4,0-19	0,07	1	80	-	250-300

1.2.3 Reforços

Os materiais compósitos podem utilizar diferentes tipos de reforço, tais como: partículas ou fibras [10]. No caso das partículas, as propriedades mecânicas do compósito dependem de fatores como: a sua dimensão/forma, distribuição e composição. Relativamente às fibras, estas podem classificar-se em contínuas, longas (cujo comprimento médio varia entre os 200 e os 300

mm), curtas (com comprimento inferior aos 25 mm) e *whiskers* (fibras muito curtas, geralmente com cerca de 1 mm de diâmetro e 3-4 mm de comprimento) [1,11].

A utilização de fibras deve-se ao facto de estas possuírem propriedades mecânicas muito superiores às do material na forma maciça. Por exemplo, o vidro possui uma tensão de rotura na ordem dos 170 MPa na forma maciça, enquanto que na forma de fibra atinge os 3500 MPa [4]. Atualmente existe uma enorme gama de fibras usadas no reforço de materiais compósitos, desde as naturais às sintéticas, sendo que as mais utilizadas são as de vidro, carbono, aramida e boro, cujas principais propriedades mecânicas se encontram resumidas na tabela 1.3.

Tabela 1.3 - Propriedades físicas/mecânicas de algumas fibras [3,4,8].

Fibra	\varnothing [μm]	ρ [kg/m^3]	E [GPa]	σ_{uts} [GPa]	E/ρ [10^{-3}]	σ_{uts}/ρ [10^{-3}]	ε [%]	α [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	$T_{\text{máx.}}$ Serviço [$^{\circ}\text{C}$]
Vidro-E	7	2540	70	3,45	27	1,35	4,8	5	700
Vidro-S	15	2500	86	4,50	34,5	1,8	5,7	2,9	-
Carbono HM	7,5	1900	400	1,8	200	0,9	1,5	-	-
Carbono HS	7,5	1700	240	2,06	140	1,5	0,8	-	-
Kevlar® 29	12	1450	80	2,8	55,5	1,9	3,5	-2,0	-
Kevlar® 49	12	1450	130	2,8	89,5	1,9	2,5	-2 (longitudinal)	-
Boro	130	2600	400	3,5	155	1,3	-	-	500

HM - Elevado módulo; HS - Elevada resistência.

As fibras de aramida, vulgarmente denominadas por kevlar®, foram introduzidas na década de 70 e as primeiras a serem aplicadas na estrutura das aeronaves (em carenagens, revestimentos, etc.). Possuem uma resistência e rigidez específica superior às das fibras de vidro, apresentam boas propriedades mecânicas para temperaturas superiores a 400°C e têm a capacidade de absorver elevadas quantidades de energia durante os processos de fratura. Por outro lado, não apresentam grande resistência à compressão e degradam-se quando expostas à radiação ultravioleta, o que não acontece quando fazem parte do compósito pois a matriz protege-as dessas radiações [12,13]. As fibras de carbono apresentam uma resistência comparável à dos aços, com a vantagem de terem uma densidade muito mais baixa. Simultaneamente apresentam uma elevada condutividade elétrica/térmica e um coeficiente de expansão térmico perto de zero, pelo que são muito utilizadas na indústria aeroespacial [1].

As fibras de vidro são o tipo de reforço mais utilizado pelo que, associado ao facto de serem utilizadas neste estudo, merecem aqui um maior destaque. O seu processo de fabrico consiste no estiramento do vidro fundido através de uma fieira em liga de platina-ródio com orifícios calibrados. À temperatura de 1260°C a sílica sofre um processo de fusão com outros minerais conferindo, assim, as propriedades desejadas para o fim a que se propõem. O diâmetro das

fibras comerciais varia entre 3 a 20 μm . Apresentam uma boa resistência mecânica, elétrica e ao desgaste, bem como boa rigidez [4]. No entanto existem fibras de vidro que, em função da percentagem relativa dos óxidos, apresentam características típicas para certas aplicações. A tabela 1.4 indica alguns tipos de fibras de vidro bem como os seus nomes comerciais.

Tabela 1.4 - Composição química de algumas fibras de vidro, em percentagem de peso [14].

Elemento	Vidro E	Vidro C	Vidro S
SiO_2	55,2	65,0	65,0
Al_2O_3	8,0	4,0	25,0
CaO	18,7	14,0	-
MgO	4,6	3,0	10,0
Na_2O	0,3	8,5	0,3
K_2O	0,2	-	-
B_2O_3	7,3	5,0	-

O vidro tipo E corresponde à formulação mais simples e económica, sendo o mais utilizado como elemento de reforço. O vidro tipo C apresenta a particularidade de ter uma maior resistência à corrosão que o vidro E, mas é mais dispendioso e menos resistente. Finalmente, o vidro tipo S é usado essencialmente em aplicações especiais, tais como a indústria aeronáutica, devido à sua maior resistência e melhor desempenho às altas temperaturas.

As fibras de vidro revelam-se extremamente sensíveis aos defeitos superficiais, os quais surgem muitas vezes do contacto entre si durante o processo de fabrico e ao aumento da temperatura. Apresentam também uma diminuição da sua resistência quando expostas ao ar húmido, especialmente nas regiões dos defeitos, sendo, no entanto, mais acentuada quando estas são expostas a alguns meios ácidos.

1.2.4 Vantagens e desvantagens do uso dos materiais compósitos

Como referido anteriormente, a aplicação dos materiais compósitos não é recente, mas foi na década de 50 do século passado, que eles passaram a ter alguma expressão nas aplicações de engenharia devido ao desenvolvimento de novas fibras e resinas. Contudo, só no início dos anos 70, com a crise do petróleo, é que o interesse por este tipo de materiais se acentuou significativamente e, desde então, passaram a ser aplicados nos mais variados campos industriais. As seguintes vantagens contribuíram para este fenómeno [3]:

- Maior capacidade de adaptação, podendo uma única peça em compósito substituir diversas em metal;
- Fácil monitorização devido à presença de sensores que permitem detetar danos ocorridos em serviço (conhecidos por materiais “inteligentes”);

- Resistência específica elevada, o que representa uma grande vantagem em relação aos materiais tradicionais, como os metais;
- Resistência à fadiga muito superior (enquanto que em ligas metálicas a resistência à fadiga é de, aproximadamente, 50% da sua resistência estática, no caso de um compósito carbono/epóxi esse valor é na ordem dos 90%);
- Elevada resistência à corrosão, devido à sua superfície polimérica, ao contrário de metais, como o ferro e o alumínio, que necessitam de tratamentos especiais para diminuir o desgaste provocado pela água ou pelo ar;
- Flexibilidade no design, uma vez que é possível obter um coeficiente de expansão térmica nulo, o que se traduz em estabilidade dimensional;
- Boas propriedades ao impacto;
- Custo de produção menor, em relação aos metais, devido ao equipamento necessário ser menos dispendioso (não é preciso atingir temperaturas e pressões tão elevadas como no processo de ligas metálicas).

Todavia, apesar destas enormes vantagens, estes materiais também apresentam algumas desvantagens, tais como [3]:

- Custo elevado dos materiais (fibras, resinas, etc.) comparativamente aos metais;
- Produção em grande escala pouco eficiente, mas novas técnicas estão a surgir para ultrapassar esse problema;
- Devido a serem relativamente recentes, as bases de dados para projeto ainda estão pouco desenvolvidas face às dos metais;
- Pouca resistência às temperaturas elevadas, pois a maioria dos materiais compósitos utiliza matriz polimérica, cujas temperaturas máximas de serviço são inferiores às dos metais;
- Absorção de humidade, o que afeta as propriedades mecânicas e a estabilidade dimensional.

1.2.5 Aplicações dos materiais compósitos

A utilização dos materiais compósitos tem vindo a aumentar, não só pelos avanços da ciência e necessidades do Homem, mas também pelas preocupações ambientais. A substituição das tradicionais ligas metálicas por estes materiais permite manter a resistência mecânica e diminuir o peso, o que traz enormes vantagens, especialmente no sector dos transportes, devido ao impacto direto na diminuição do consumo de combustíveis fósseis.

A sua utilização no setor automóvel deu-se mais tarde do que na indústria aeronáutica, tendo os anos 80 do século passado marcado o ponto de viragem (figura 1.1a). Até então, por exemplo, os carros de Fórmula 1 eram fabricados em aço e alumínio, passando a ser utilizados em vários componentes (incluindo o chassis) os materiais compósitos (essencialmente à base das fibras

de carbono). Deste modo para além de reduzir peso e, conseqüentemente, poupar combustível, também permitiu aumentar a segurança e beneficiar dos métodos de fabrico.

A sua resistência à corrosão é vantajosa no que concerne à indústria naval (cascos de navios e revestimentos de submarinos), em plataformas offshore e noutros equipamentos de extração de petróleo no mar. Também no sector da produção de energias renováveis, a resistência à corrosão e mecânica, aliadas à leveza do material permitem aumentar a eficiência das turbinas eólicas. No domínio do desporto também é frequente a utilização destes materiais em produtos como: raquetes (figura 1.1b), pranchas, canoas, bicicletas, etc. No campo da medicina, temos a sua aplicação em próteses, implantes e mesas de raios X. Embora em menor quantidade, também são utilizados na indústria da construção, nomeadamente em edifícios e pontes. Em termos do setor militar, este utiliza os referidos materiais em componentes de blindagem de tanques de guerra, antenas, capacetes, coletes a prova de bala (figura 1.1c), etc.

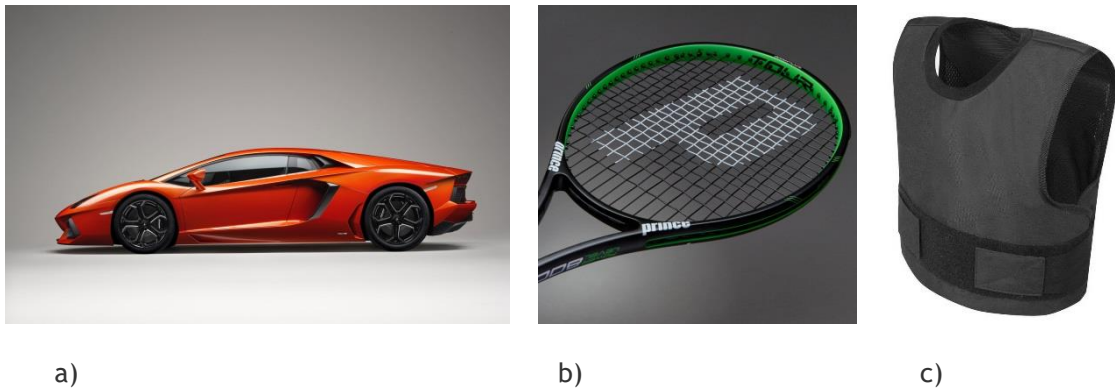


Figura 1.1 - Aplicação dos materiais compósitos em: a) Chassis em fibra de carbono [15]; b) Raquete de ténis [16]; c) coletes de proteção [17].

Finalmente, em termos de aplicações aeronáuticas, a sua utilização tem vindo a aumentar, embora a um ritmo muito mais brando do que era previsto na década 80 do século passado [12]. Apesar das suas enormes vantagens, especialmente ao nível da redução do peso da aeronave, os custos de produção dos componentes fabricados em materiais compósitos ainda se revelam muito superiores aos verificados com as tradicionais ligas de alumínio [12]. A figura 1.2a mostra o aumento da aplicação dos materiais compósitos neste sector. Como se pode observar o crescimento tem sido exponencial. Por exemplo, na década de 80, o Airbus A310 tinha menos de 10% do peso da sua estrutura em materiais compósitos. Atualmente, já existem aeronaves em que esse valor ultrapassa os 50%. Na figura 1.2b é notável a diminuição do consumo de energia, influenciado em grande parte pela redução de peso das aeronaves, consequência direta da maior aplicação de materiais mais leves, como os compósitos.

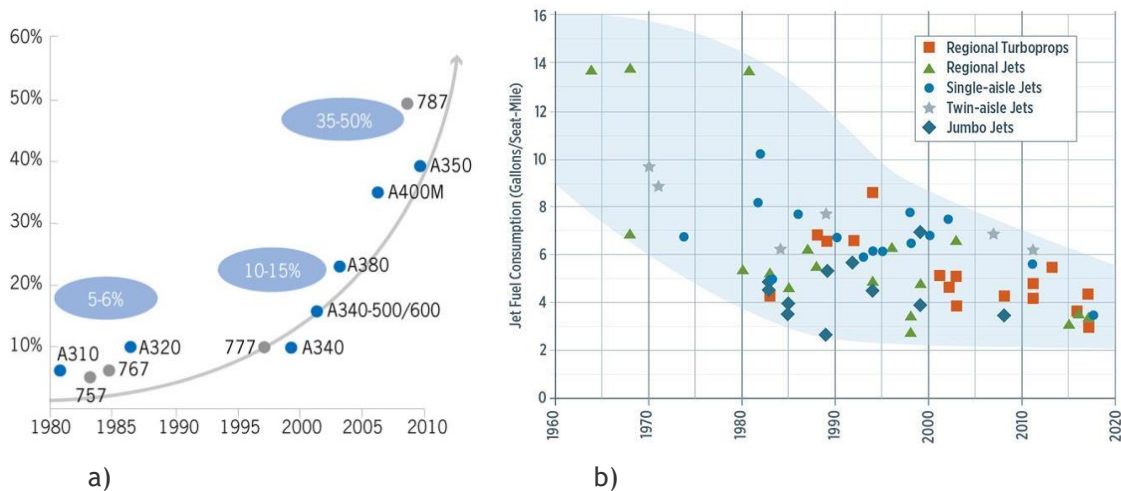


Figura 1.2 - a) Aplicação dos materiais compósitos no sector aeronáutico [18]; b) Benefício em termos de consumo de energia com a aplicação dos materiais compósitos [19].

O primeiro uso de materiais compósitos na aviação deu-se durante a Segunda Guerra Mundial, com a incorporação das fibras de vidro e resina de poliéster nas pontas de asa e empenagens ou partes da fuselagem, componentes que se caracterizavam por estar sujeitos a baixos carregamentos. Ainda havia muito receio da sua aplicação em componentes estruturais, mas com a introdução de resinas mais resistentes depressa começaram a incorporar estruturas aeronáuticas. No campo militar, por exemplo, assistimos mais recentemente ao revestimento dos estabilizadores horizontais do F-14A e, posteriormente, dos estabilizadores verticais e leme dos F-15 e F-16. No F-18 já cobriam toda a asa, mas no AV-8B já constituíam toda a asa, estabilizadores e parte da fuselagem exterior [4].

Por outro lado, no segmento comercial, temos a título de exemplo o Boeing 787 Dreamliner, o mais avançado avião comercial, cujo peso dos materiais compósitos corresponde a 50% do peso da estrutura total. Dadas as diferentes densidades entre materiais, esse peso corresponde a 80% do volume da aeronave. A figura 1.3a mostra uma secção da fuselagem do Dreamliner. O uso de compósitos permite reduzir o número de componentes, o que melhora a aerodinâmica significativamente [20]. Os materiais compósitos são aplicados essencialmente nas asas, empenagens e fuselagem. Como resultado, o Dreamliner permite uma poupança de combustível na ordem dos 20% [21]. Em termos de concorrência, o Airbus A350 XWB apresenta 52% do peso total da aeronave em materiais compósitos. Pertence a esta aeronave a maior asa feita em compósitos, como se vê na figura 1.3b. Deste modo, poupança de combustível, aumento da capacidade de transporte, melhor manobrabilidade são benefícios comprovados e estimulam a continuidade da sua aplicação [12].

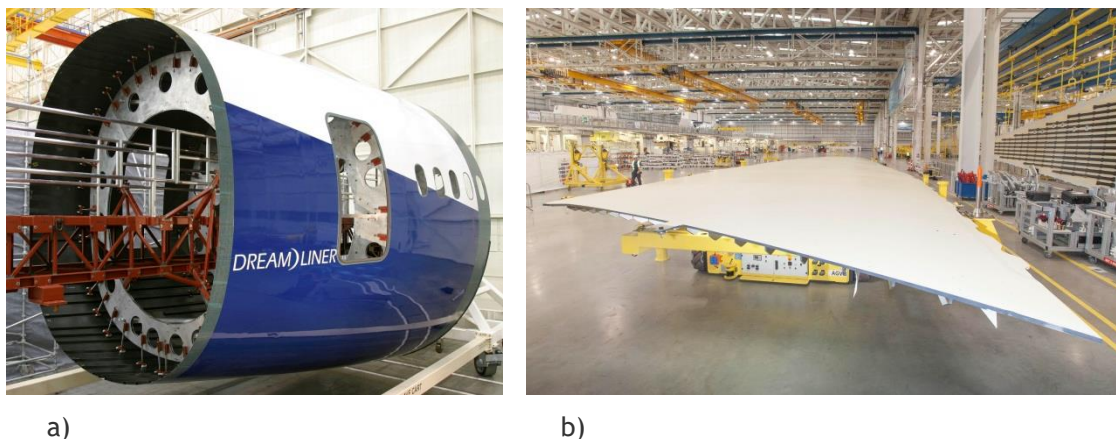


Figura 1.3 - a) Secção da fuselagem do Dreamliner em material compósito [20]; b) Maior asa de uma aeronave fabricada em materiais compósitos, Airbus A350 XWB [22].

1.3 Juntas Coladas

1.3.1 Introdução

Devido às dimensões ou questões de fabrico, a maioria dos componentes e/ou estruturas são constituídas por elementos individuais que se interligam entre si para cumprirem o fim a que são propostos. Estas uniões podem ser efetuadas através de parafusos, rebites, ligações soldadas ou ligações coladas.

Apesar das ditas uniões clássicas terem mostrado ao longo dos tempos uma enorme eficácia, elas apresentam alguns problemas como: tensões provocadas pelos orifícios, distribuição não uniforme de tensões, corrosão, entre outras. Neste sentido, as juntas coladas revelam-se como uma alternativa promissora na resolução de alguns destes problemas, essencialmente nas indústrias aeronáutica, automóvel e eletrónica [23-26].

O objetivo da cola é, então, unir duas superfícies permanentemente, evitando, deste modo, que elas se separem. Neste sentido, desde há muitos séculos que o Homem utiliza diferentes tipos de colas para unir os materiais, contudo, foi apenas nos últimos 70 anos que esta técnica mais se desenvolveu com a introdução das colas sintéticas [1,27].

Por outro lado, o processo de ligação tem várias etapas [27]. Em primeiro lugar é necessário escolher a melhor cola, de forma a maximizar a resistência mecânica e ter em conta o método de aplicação desta. A cola deve assim ser compatível com os materiais dos aderentes (quer ao nível químico quer da resistência mecânica) e resistir tanto às condições de serviço (temperatura e meio ambiente envolvente) como ao tempo de vida útil imposto. Depois, é necessário selecionar a geometria que mais se adequa ao carregamento imposto. Esta fase assume uma enorme importância, dado existirem vários tipos de juntas aos quais se encontram associados determinados carregamentos típicos. Uma boa preparação das superfícies a colar

também é determinante, pois vários estudos revelam que a falha muitas vezes não se deve a uma escolha errada da cola, mas fundamentalmente à má descontaminação das superfícies dos aderentes. Numa fase seguinte, as juntas devem ser avaliadas em termos das suas dimensões, de modo a suportar as cargas de serviço. Finalmente, deve-se efetuar uma análise global com recurso a métodos analíticos ou numéricos, com o intuito de avaliar o seu desempenho em serviço.

As principais vantagens das juntas coladas são [27,28]:

- Distribuição uniforme de tensões ao longo da área colada permitindo, assim, uma maior rigidez e transmissão de carga;
- Ligação de elementos com diferentes espessuras, incluindo espessuras muito pequenas;
- Ligação de materiais com diferentes coeficientes de expansão térmica, devido à flexibilidade da cola;
- Boa resistência à fadiga e absorção de choques;
- Possibilidade de automatização, tornando o processo mais eficiente;
- Possibilidade de unir estruturas com contornos suaves e regulares;
- Prevenção/minimização da corrosão eletroquímica, no caso de materiais diferentes;
- Boa relação de resistência/peso, ou seja, mais leve comparativamente aos tradicionais métodos de fixação.

Por outro lado, destacam-se as seguintes desvantagens [27,28]:

- Difícil análise de danos/defeitos na área colada, dificultando assim todo o controlo de qualidade mais difícil;
- Necessidade de uma boa preparação das superfícies a colar;
- Processo muitas vezes demorado (longos tempos de cura) e rigoroso;
- Em determinadas situações existe a necessidade de sistemas de fixação e equipamentos adicionais (fornos, autoclaves, etc.), o que pode tornar a sua produção dispendiosa;
- Pouco resistentes a condições extremas, como temperaturas muito elevadas e humidade;
- Não podem ser separadas posteriormente;
- Vida útil influenciada pelo ambiente em que se encontra;
- Custo por vezes elevado.

Em termos aeronáuticos, as colas revelam-se um material imprescindível na criação de estruturas. Inicialmente eram utilizadas colas naturais, como por exemplo a caseína, que, apesar de funcionarem bem, tinham pouca durabilidade dada a elevada exposição à humidade. Este problema foi então solucionado com a introdução de adesivos sintéticos, na altura da Segunda Guerra Mundial, mas ainda não eram suficientemente fortes e fraturavam facilmente. Posteriormente, a introdução de colas com recurso a polímeros de elevada tenacidade permitiu

alargar o seu campo de aplicação sendo, atualmente, as juntas coladas utilizadas nas ligações de reforço da fuselagem e das asas, para além de permitirem a construção de estruturas em ninho de abelha [27]. Simultaneamente, elas diminuem a complexidade das juntas, reduzem o custo e o peso [12]. Esta indústria revela-se assim como a principal impulsionadora do estudo/desenvolvimento das juntas coladas.

1.3.2 Tipos de juntas, solicitações e modos de dano

As colas devem ser capazes de resistir a diferentes formas de solicitação, sem comprometer a resistência mecânica das juntas coladas. Para tal, devem distribuir as cargas/tensões ao longo da zona de contacto com o aderente, em vez de as concentrarem num único ponto. Revela-se assim necessário identificar os modos de carregamento que as juntas coladas podem estar sujeitas para, deste modo, desenvolver um projeto adequado. Neste contexto, existem basicamente quatro modos: tração, corte, clivagem e arrancamento (figura 1.4) [27].

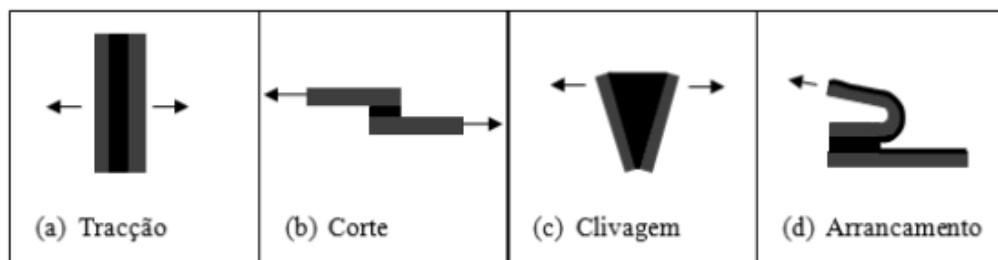


Figura 1.4 - Modos de carregamento: a) Tração; b) Corte; c) Clivagem; d) Arrancamento.

No primeiro caso, as tensões de tração ocorrem perpendicularmente ao plano da junta e distribuem-se uniformemente pela área colada. Na teoria, isto só acontece quando as superfícies dos aderentes são paralelas e normais ao carregamento, no entanto, não é muito vulgar a sua ocorrência na prática. Revela-se necessário controlar a espessura da camada de cola, garantir um carregamento axial rigoroso (figura 1.5a) e que os aderentes sejam suficientemente rígidos para distribuírem uniformemente as tensões. Dessa forma, evita-se que as juntas não passem a estar sujeitas a forças de clivagem ou arrancamento [27].

As tensões de corte resultam de forças que atuam no plano da cola, ou seja, paralelamente aos aderentes das juntas coladas. Quando sujeitas a este carregamento elas são mais resistentes, pois toda a área colada contribui simultaneamente e os substratos são mantidos alinhados. Apesar da força se dividir pela área colada, a maior parte da tensão esta localizada nos extremos da sobreposição, contribuindo, assim, muito pouco a região central para a capacidade de suportar a carga [27].

Finalmente, as cargas de clivagem e arrancamento são as mais perigosas, pois as juntas coladas são as menos resistentes. Isto deve-se ao facto de a tensão ser concentrada numa área muito pequena, em vez de estar distribuída por toda a zona colada. As tensões de clivagem ocorrem quando forças atuam num dos extremos da junta, separando os aderentes. O arrancamento, semelhante à clivagem, atua na zona limite da junta e aplica-se a casos em que um ou mais aderentes são flexíveis. Por esta razão, o ângulo de separação é, geralmente, muito superior em termos de tensões de arrancamento. As colas mais dúcteis/flexíveis são as mais adequadas para as juntas sujeitas a este tipo de carregamento, pois permitem que as tensões se distribuam e, assim, oferecem mais resistência (figura 1.5b).

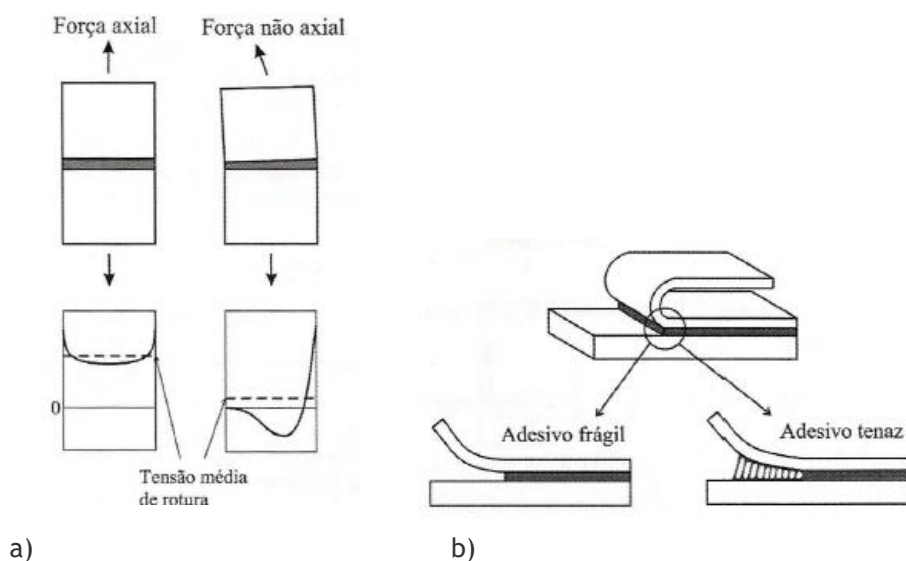


Figura 1.5 - Efeito do carregamento (a) e do tipo de cola (b) na resistência de uma junta.

Relativamente aos modos de carregamento anteriormente descritos, os projetistas dispõem de diferentes geometrias para que as juntas coladas se possam tornar mais eficientes face ao carregamento que venham a estar solicitadas [27]. Assim, as geometrias mais comuns encontram-se ilustradas na figura 1.6.

As juntas coladas de sobreposição simples são as mais utilizadas e, simultaneamente, as mais estudadas, devido à fácil execução. No entanto, elas não são as mais simples de analisar, pois o carregamento não é colinear o que introduz flexão nos aderentes. A cola fica então sujeita ao corte e à tração (arrancamento) na extremidade da junta [27]. Todavia, existem vários fatores que podem influenciar a resistência destas juntas.

Por exemplo, o aumento da rigidez dos aderentes conduz a uma maior resistência da junta à flexão, o que desta forma diminui as concentrações de tensões junto das extremidades de sobreposição como também aumenta a resistência mecânica da junta [29,30]. O recurso a colas

com módulos de elasticidade mais baixos é também outra forma de se conseguir o mesmo efeito que o conseguido com o aumento da rigidez dos aderentes [29-32], devido à maior flexibilidade da cola. O aumento da espessura dos aderentes, ao limitar a rotação, também diminui as concentrações de tensões na extremidade da junta colada [32].

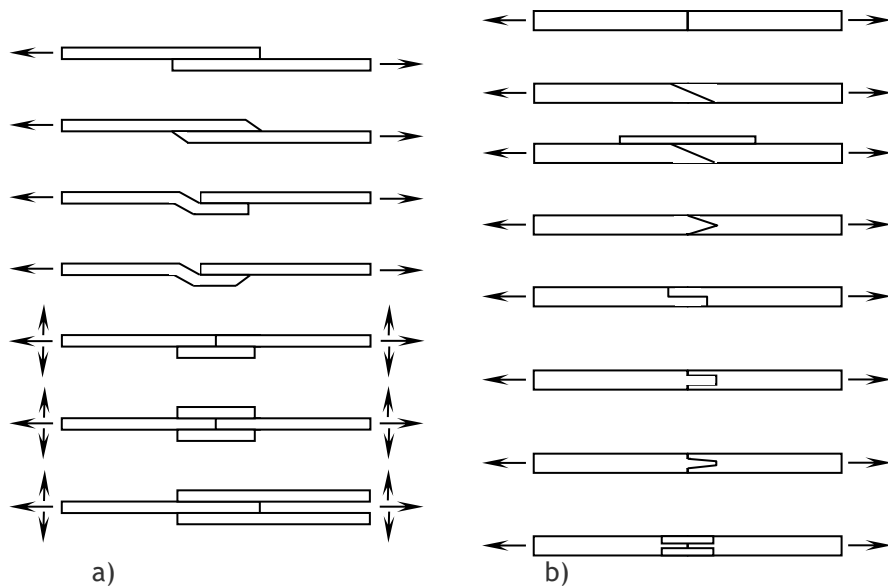


Figura 1.6 - Tipos de juntas e respectivas solicitações para as quais foram concebidas: a) juntas de sobreposição, b) juntas topo-a-topo [33].

Em relação à espessura da cola, a literatura revela que o valor ótimo para obter o melhor desempenho da junta se encontra entre 0,1 mm e 0,5 mm [27]. No entanto, na maior parte das aplicações, os próprios fabricantes recomendam espessuras de 0,1 a 0,2 mm para se garantir a resistência máxima. Para espessuras inferiores a 0,1 mm o risco de aparecimento de defeitos aumenta. Finalmente, o efeito do tipo de geometria usada nas extremidades da sobreposição também influencia fortemente a distribuição das tensões numa junta colada [34-39]. Por exemplo, a figura 1.7. ilustra a variação das tensões normal de tração e de corte para uma junta cuja extremidade termina em ângulo reto (sem chanfros) ou em chanfro com um ângulo de 135°. É evidente a diminuição das tensões máximas ocorridas na junta.

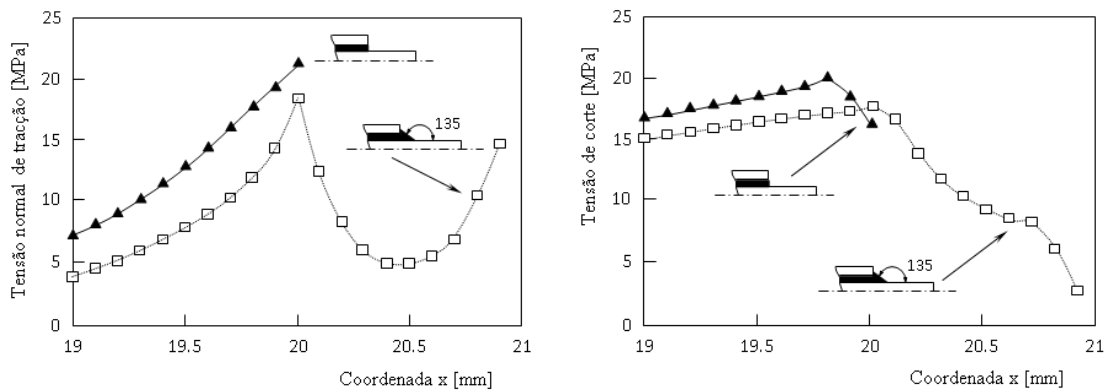


Figura 1.7 - Distribuição das tensões ao longo da linha central da camada da cola, para uma junta colada de sobreposição dupla com e sem o efeito do chanfro [40].

Em termos do colapso das juntas coladas, este ocorre através de diversos modos de falha e em diversos locais, dependendo da geometria da junta (como referido anteriormente), processo de manufatura, materiais dos aderentes e a cola utilizada. Assim, dependendo se a falha ocorre a nível do adesivo, aderente ou em ambos, existem três tipos de ruína: adesiva, coesiva e do substrato [27]. Caso a ruína ocorra na zona da interface (entre cola/aderente) é denominada por adesiva. Este tipo de falha é inaceitável em termos de qualidade e certificação, uma vez que se deve essencialmente a má preparação das superfícies dos aderentes. Por outro lado, quando uma camada de adesivo fica presente em ambas as superfícies dos aderentes, então denomina-se por ruína coesiva. Neste caso a falha ocorre no interior da cola e significa que a sua resistência interna é inferior à dos aderentes e à da ligação cola/aderente [27]. Poderá também ocorrer uma ruína mista que, tal como o nome indica, resulta de falhas que envolvem os dois tipos de danos referidos anteriormente. Finalmente, a rotura do aderente ocorre quando este é menos resistente do que a própria cola.

Todavia, este fenómeno torna-se ainda mais complexo quando os aderentes são compósitos [40]. A norma ASTM D 5573-94, por exemplo, classifica/identifica/caracteriza os seguintes modos de ruína: (i) ruína nos aderentes por tração, compressão, flexão, etc.; (ii) ruína na interface aderente/cola; (iii) falha coesiva e (iv) arrancamentos ocorridos no compósito devido a delaminações. A figura 1.8 ilustra os modos de ruína mais usuais para as juntas coladas de sobreposição simples em materiais compósitos poliméricos (rotura do laminado e delaminação) [40]. A falha por delaminação está, por sua vez, esquematizada na figura 1.9. Uma vez iniciada pode conduzir a uma fratura imediata da camada, ou então promover a propagação da delaminação ao longo da camada [40].

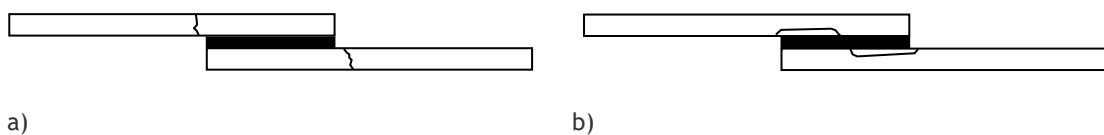


Figura 1.8 Modos de ruína em juntas coladas de sobreposição simples em materiais compósitos:

a) Rotura do laminado; b) Delaminação [40].

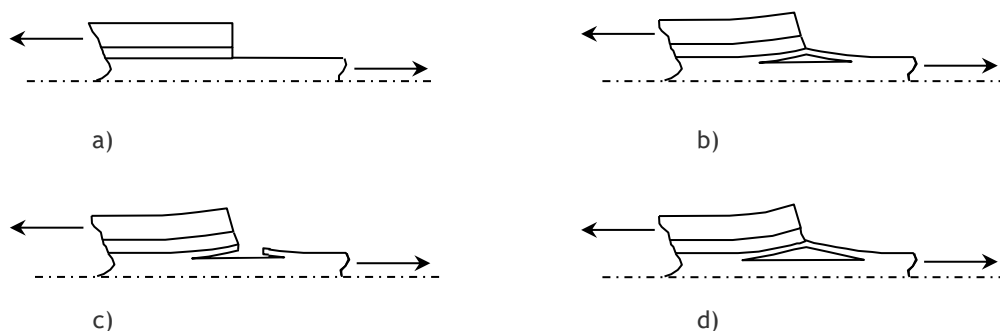


Figura 1.9 - Ruína por delaminação nos aderentes [40].

1.3.3 Preparação das Superfícies a Colar

A análise do tipo de falha revela aspetos importantes no desempenho de uma junta colada como, por exemplo, se a rotura ocorreu devido a uma má preparação da superfície a colar. Vários estudos revelam que a falha de uma junta muitas vezes não se deve a uma escolha errada da cola, mas da má descontaminação das superfícies dos aderentes [23]. A ausência de contaminantes é uma condição que só por si conduz ao estabelecimento de ligações mais fortes.

Desta forma, a preparação das superfícies a colar torna-se um fator de enorme importância no desempenho da junta, utilizando-se quer recursos mecânicos quer químicos. Embora os mecânicos sejam mais económicos e de menor complexidade, os químicos oferecem melhores efeitos, o que resulta no aumento do tempo de vida da junta. É usual aplicar ambos, ou seja, após se utilizar um sistema mecânico, segue-se um tratamento químico, obtendo-se bons resultados, devido ao aumento da área de colagem [23]. Os procedimentos de limpeza utilizados devem ser os adequados à superfície, seja esta metálica ou polimérica [41].

No caso dos compósitos de matriz polimérica, as suas superfícies são normalmente muito lisas e cobertas por agentes desmoldantes cuja base é composta por silicone ou fluorocarboneto. Revela-se então fundamental a sua remoção antes de aplicar a cola, mas cuidados especiais são necessários com alguns tratamentos abrasivos pois estes podem provocar danos nas fibras superficiais [27]. Por outro lado, as matrizes termoplásticas apresentam baixas energias de superfície. Neste caso, para além da limpeza, muitas vezes são necessários tratamentos energéticos com vista a aumentar a energia de superfície do polímero. Assim, a preparação de uma superfície não deve ser tida apenas como um processo de limpeza pois, muitas vezes, estão-lhe associados tratamentos que visam aumentar a energia de superfície do aderente como indica Wingfield [42]:

- Eliminação de todos os tipos de contaminantes (elementos gordurosos, óxidos, etc.);
- Melhorar a molhagem de superfícies de baixa energia;

- Alterações químicas através da introdução de grupos químicos polares;
- Promover a rugosidade da superfície aumentando, desta forma, a área de colagem.

1.3.4 Fundamentos da Adesão

Ao longo dos tempos, foram desenvolvidos vários mecanismos de adesão que assentam em diferentes fenómenos mecânicos, físicos e químicos. Uma vez que é difícil descrever uma ligação colada através de um único mecanismo, é necessário entender esses fenómenos de modo a perceber as teorias de adesão [27,28].

Em primeiro lugar devem ser abordadas as forças fundamentais que atuam nos materiais, ou seja, as ligações químicas. Estas podem ser divididas em três grandes grupos: ligações químicas primárias, secundárias ou de hidrogénio. Por sua vez, cada grupo pode ainda subdividir-se. As ligações químicas primárias envolvem as ligações iónicas, as covalentes e as metálicas. As ligações secundárias, também conhecidas como forças de van der Waals, podem dividir-se em ligações entre dipolos não permanentes (forças de dispersão ou de London), entre dipolos permanentes e não permanentes (forças de Debye) ou entre dipolos permanentes (forças de Keesom). As ligações de hidrogénio possuem propriedades de ambas as ligações referidas anteriormente, sendo dependentes das propriedades únicas do hidrogénio.

A rugosidade das superfícies dos aderentes é também um fator relevante e quantificável. Por exemplo, a rugosidade média para uma superfície polida encontra-se na ordem dos 0,2 μm . Já uma superfície cortada por serra apresenta valores na ordem dos 5 μm . Assim uma certa rugosidade revela-se importante pois a cola, no estado líquido, ao penetrar nas rugosidades aumenta a área de colagem.

A molhagem é a capacidade que um líquido tem de se espalhar numa superfície sólida e pode ser caracterizada através do ângulo de contacto que a gota deste líquido faz com a superfície sólida. Este pode variar entre 0° (dá-se a molhagem completa pelo líquido) e 180° (o líquido não molha o sólido). Para ângulos de contacto baixos, inferiores a 90° , a gota espalha-se e existe uma boa molhagem. Por outro lado, ângulos de contacto altos, superiores a 90° , revelam que a gota contrai-se e existe pouca afinidade da cola com o aderente [43].

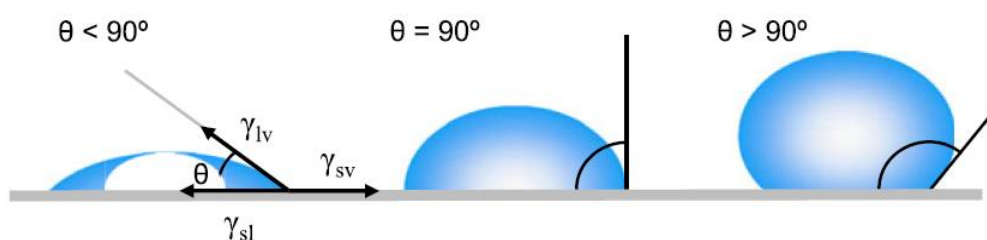


Figura 1.10 - Ilustração dos ângulos de contacto de uma gota numa superfície sólida [43].

Para entender este fenômeno, deve analisar-se a energia livre de superfície da cola e do aderente, individualmente, assim como da interface formada [41]. Os valores típicos das energias livres de superfície de alguns materiais, assim como os métodos utilizados para as estimar encontram-se, por exemplo, publicados em [44-50]. Desta forma, as superfícies podem ser denominadas como sendo de baixa ou alta energia, de acordo com esses valores [48,49]. No caso dos polímeros, encontram-se na ordem dos 30-45 mJm⁻², os quais são muito inferiores aos valores típicos das superfícies metálicas, que em condições ideais de limpeza podem ir dos 500 até aos 5000 mJm⁻² [48,50].

Entre as teorias mais utilizadas para descrever estes mecanismos destacam-se a teoria mecânica, a teoria eletrostática, a teoria da difusão e a teoria da absorção. No entanto, com os avanços da ciência, as teorias tradicionais têm sido melhoradas e outras novas têm surgido. É possível distinguir as ligações pela escala a que a cola e o aderente interagem, ainda que as interações ocorrem sempre a nível molecular [27,28,51,52].

A teoria mecânica é a mais antiga e dá-se a nível microscópico, ou seja, a ligação ocorre devido à rugosidade da superfície do material aderente. Neste caso a adesão ocorre pela penetração do adesivo nas irregularidades da superfície do aderente (poros, cavidades, entre outros), ou seja, pela ancoragem mecânica [27]. Uma superfície com rugosidades microscópicas para além de oferecer mais pontos de transferência de carga, também conduz a uma maior superfície com vista a estabelecer as ligações interfaciais. Para uma melhor compreensão, pode estabelecer-se a analogia chave/fechadura onde, após a inserção da chave e respetiva rotação, torna-se muito complicado a sua remoção. O mesmo acontece quando a cola penetra nas rugosidades do material aderente. Assim, uma vez bem preenchidas as rugosidades das superfícies a unir, obtém-se uma ligação forte que inviabiliza a sua separação. A viscosidade do adesivo e o tempo de cura têm assim um papel crucial no desempenho desta ligação.

Por sua vez, a teoria electrostática propõe que a adesão ocorre devido aos efeitos eletrostáticos entre a cola/aderente e foi desenvolvida essencialmente para adesivos em fita sensíveis à pressão. A força dá-se devido à passagem de eletrões através da interface cola/aderente, criando cargas positivas e negativas que se atraem. Deste modo, é formada uma dupla camada elétrica ao longo da zona de contacto entre os materiais, ocorrendo uma atração. A teoria eletrostática explica as ligações entre polímeros e metais. [27]

Finalmente na teoria da difusão, válida apenas para a ligação entre polímeros, a difusão dá-se quando a extremidade de uma cadeia molecular do polímero se difunde na estrutura de uma segunda superfície, criando assim uma ponte através da interface. Tendo em consideração o parâmetro de solubilidade, é possível medir as interações intermoleculares que ocorrem entre os materiais. Assim, a ligação cola/aderente será tanto mais forte quanto maior for a proximidade dos parâmetros de solubilidade dos dois elementos.

1.3.5 Classificação das colas

A grande variedade de colas disponíveis comercialmente dificulta a sua classificação. Porém, segundo vários critérios defendidos por vários autores [33,53,54], podem ser agrupadas de acordo com a sua estrutura molecular, origem, processo de endurecimento, modo de apresentação e desempenho.

Segundo Esteves [53], as colas devem ser classificadas à semelhança dos materiais poliméricos. Por outras palavras, devem agrupar-se em três grupos: elastómeros, termoplásticos e termoendurecíveis. Neste caso, as diferenças entre estes grupos verificam-se essencialmente ao nível da rigidez, resistência mecânica, fragilidade, resistência térmica e resistência química.

Tabela 1.5 - Agrupamento dos adesivos pelo seu desempenho [4].

Estruturais		Não estruturais	
Fenólicos	Fenólicos-vinílicos	Borrachas sintéticas	Silicone
	Fenólicos-nitrilo		Policloropreno e nitrilo
	Fenólicos-policloropreno		Polisulfureto
Acrílicos	Anaeróbicos		Poliésteres
	Cianoacrilatos		Termofusíveis
Poliuretano			Inorgânicos
Poliamida			
Epóxido	Epóxido-poliamida		
	Epóxido-polisulfureto		
	Epóxido-fenólicos		
	Epóxido-poliuretano		
	Epóxido-nitrilo		

Porém, o desempenho das colas é talvez o fator mais adequado para a sua classificação. Assim, conforme indica a tabela 1.5, as colas podem ser classificadas em estruturais e não estruturais. Uma cola estrutural, segundo Gauthier [55], define-se como um polímero capaz de transferir as forças aplicadas à junta, sem que ocorra falha durante um determinado período de tempo. A cola surge como parte integrante da estrutura e, portanto, deve ter uma resistência mecânica no mínimo equivalente à dos aderentes. Por sua vez, segundo Gledhill [51], as colas estruturais encontram-se divididas em cinco grandes famílias, nomeadamente a fenólica, a acrílica, os poliuretanos, as poliamidas e a epoxídica. Os últimos, usados maioritariamente nas indústrias aeronáuticas e automóvel, devido a serem facilmente modificados apresentam uma grande variedade de propriedades. Para além de aderirem bem à maior parte dos substratos, possuem elevada resistência à tração, ao corte e à fluência, ainda que fraca resistência às tensões de arrancamento. Em termos de meio ambiente, são resistentes à humidade, aos óleos e outros solventes, para além de não sofrerem muita contração durante o processo de cura.

1.3.6 Impacto em juntas coladas

O estudo do comportamento das juntas coladas ao impacto é de grande importância, uma vez que as colas são muito sensíveis à velocidade de deformação. Verifica-se que a energia absorvida aumenta com a espessura do adesivo, o que torna os ensaios pouco elucidativos, dado que esta não está relacionada unicamente com o tipo de juntas. Todavia, Goglio e Rosseto [56] estudaram o comportamento de juntas coladas sujeitas a impacto, focando-se na espessura do adesivo. Foi possível concluir que espessuras relativamente baixas são vantajosas quando comparadas com espessuras mais elevadas. Por outro lado, Silva *et al.* [57], citando Adams [58], defendem a importância da tensão de rotura na seleção das colas quando as juntas coladas estão sujeitas a impactos. Deste modo, a capacidade de absorção de energia pode ser substancialmente melhorada e, conseqüentemente, a tolerância ao dano. No entanto, mais recentemente, os fabricantes melhoraram as propriedades ao impacto através da introdução de partículas de borracha. Kihara *et al.* [59] constataram que para tensões de baixa incidência, os danos são causados por tensões de tração, ao invés das tensões de alta incidência, cuja fratura resulta geralmente de tensões de corte. Em relação à quantidade de energia absorvida, Bezemer *et al.* [60] observaram que esta é maior para carregamentos dinâmicos, como o caso de impactos, ao contrário de carregamentos estáticos. Vaidya *et al.* [61] estudaram o efeito de carregamentos transversos e no plano em juntas coladas em compósito, podendo concluir que os aderentes sujeitos a cargas transversais sofreram deflexões elevadas, apresentando maiores tensões de arrancamento. Reis *et al.* [62] estudaram o efeito do impacto transversal em juntas coladas simples variando o comprimento do laminado de sobreposição, concluindo que a performance da junta é mais dependente do comprimento do gap do que o comprimento do laminado de sobreposição. Os melhores resultados obtiveram-se para um comprimento do gap de 20 mm. O principal modo de falha observado foi a nível do adesivo.

A classificação do impacto não se revela consensual, mas para alguns autores pode dividir-se em impacto de baixa velocidade e impacto de alta velocidade. No entanto, é consensual que a velocidade tem influência no comportamento do material e, conseqüentemente, nos danos provocados [63,64].

Num impacto de baixa velocidade, ou de grande massa, o impactor está em contacto com a amostra entre 5 a 10 milissegundos. O resultado é uma grande zona danificada, uma vez que a resposta ao impacto se dá a um nível global da estrutura da amostra. Por outro lado, num impacto de alta velocidade, ou pequena massa, o tempo de contacto é muito reduzido e, por isso, geralmente associado à balística. Neste caso, a resposta é localizada, ou seja, a deformação não abrange toda a estrutura [4,65]. Segundo Hogg *et al.* [63], para velocidades de impacto entre 1 e 10 m/s, este é considerado de baixa velocidade. Impactos com velocidades superiores a 100 m/s classificam-se como testes balísticos. Os impactos de hipervelocidade são aqueles cujas velocidades ultrapassam os 1 km/s. De acordo com Zukas *et al.* [66], os impactos classificam-se de baixa velocidade para valores inferiores a 250 m/s, de alta velocidade para

valores entre 0,5 e 2 km/s e de hipervelocidade para valores superiores a 2 km/s. Este autor aborda também o comportamento do material, para as diferentes velocidades, assim como a natureza do impacto. A tabela 1.6 resume esses fenômenos [66,67].

Tabela 1.6 - Comportamentos e causas associados a intervalos de impacto [66,67].

Velocidade de impacto (m/s)	Comportamento do material	Causas
<50	Comportamento elástico com plasticidade localizada	Mecânica ou arma de ar
50-500	Comportamento plástico	Mecânica ou arma de ar
500-1000	Resposta viscosa ainda significativa	“Canhão” com detonador solido
2000-3000	Comportamento como fluido	“Canhão” de gás com detonador solido
3000-12000	Impacto hidrodinâmico compressível	Aceleração por explosão
>12000	Impacto explosivo com vaporização	-

Capítulo 2

Materiais, Equipamento e Procedimento experimental

2.1 Introdução

Este trabalho tem como objetivo o estudo de vários parâmetros ligados às juntas coladas quando sujeitas ao impacto. Para tal, realizou-se um vasto trabalho experimental, sendo aqui apresentados os materiais utilizados, o seu processo de fabrico, o equipamento utilizado e respetivo procedimento experimental.

2.2 Manufatura dos laminados

Tecido bi-direcional de fibra de vidro, 1195P (195 g/m²), e uma resina epóxi Biresin[®] CR122 com um endurecedor Biresin[®] CH122-3 (ambos fornecidos pela Sika) foram utilizados para produzir manualmente placas com uma dimensão global de 330x330 mm². As propriedades da resina utilizada encontram-se apresentadas na tabela 2.1. A percentagem de endurecedor adicionado, conforme sugerido pelo fabricante, foi de 30% em peso da resina.

Tabela 2.1 - Propriedades da resina utilizada como matriz para os provetes [68].

Propriedades	Resina Biresin [®] CR122 com endurecedor CH122-3
Mecânicas	
ρ [kg/m ³]	1170
σ [MPa]	84
E [MPa]	2800
ε [%]	5,8
Resistência à flexão [MPa]	129
Resistência ao impacto [kJ/m ²]	47
Térmicas	
T _g [°C]	114

Visto que um dos parâmetros a ser estudado era a espessura do reforço da junta colada, foram produzidos laminados com diferentes números de camadas:

- Para 1,5 mm, foram utilizadas 9 camadas do tecido de vidro;
- Para 3 mm, 18 camadas;

- Para 4,5 mm, 27 camadas.

As placas foram então colocadas dentro de um saco de vácuo e, posteriormente, foi utilizada uma prensa para aplicar uma carga de 2,5 kN, durante 12 horas, para manter uma fração de fibra e espessura do laminado constante. Durante as primeiras 4 horas o saco permaneceu ligado a uma bomba de vácuo para eliminar as bolhas de ar existentes no compósito. A pós-cura foi seguida de acordo com a ficha técnica do fabricante num forno a 60 °C durante 8 horas.

2.3 Provetes

Os provetes foram obtidos a partir dos laminados previamente descritos com recurso a uma serra de diamante, tendo, no entanto, existido um cuidado especial com a velocidade. A fim de evitar o aquecimento do compósito e consequentes alterações nas suas propriedades mecânicas, utilizou-se ar comprimido seco.

Foram utilizadas sete configurações de juntas coladas diferentes, conforme ilustra a figura 2.1. Todos os provetes apresentam uma largura de 25 mm. O processo de colagem começou com a limpeza das superfícies tendo, para tal, sido utilizado álcool. Posteriormente foi aplicada a cola Araldite® 420 A/B e com recurso a uma mola metálica foi aplicada uma pressão que se manteve até final de todo o processo. As principais propriedades da cola estão indicadas na tabela 2.2. Finalmente, de acordo com o fabricante, os provetes foram colocados num forno a 40 °C durante 4 horas.

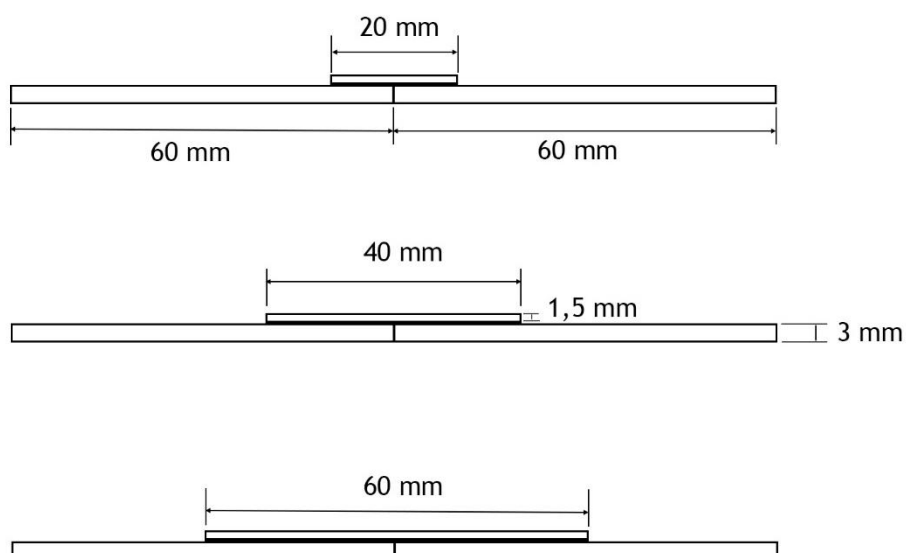


Figura 2.1 - Geometrias dos provetes para o estudo do efeito do comprimento do laminado de sobreposição.

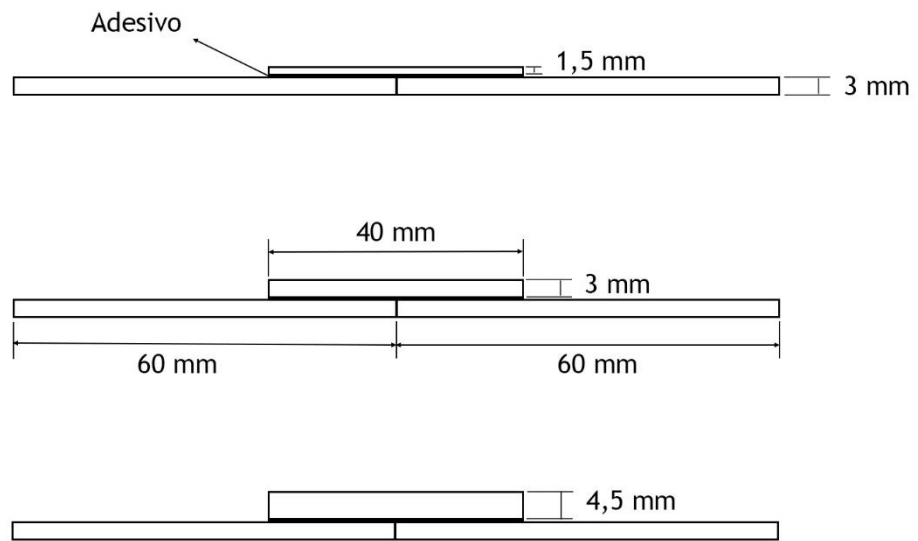


Figura 2.2 - Geometrias dos provetes para o estudo do efeito da espessura do laminado de sobreposição.

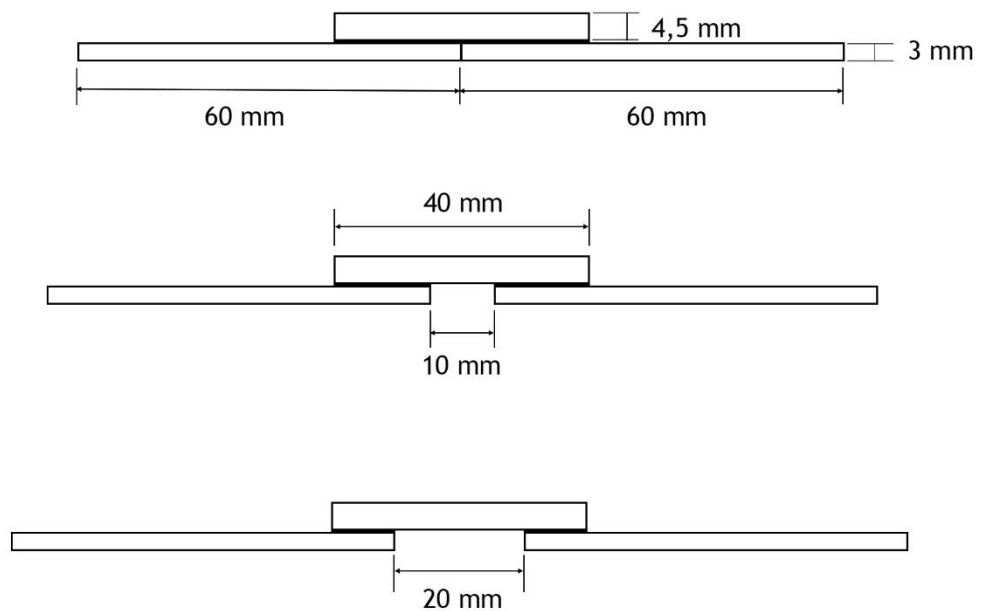


Figura 2.3 - Geometrias dos provetes para o estudo do efeito do comprimento do gap.



Figura 2.4 - Provetes depois de cortados.

Tabela 2.2 - Propriedades da cola utilizada [69].

Propriedades (a 23 °C)	Cola Araldite® 420A/B
σ [MPa]	29
E [MPa]	1495
A [%]	4,6
G [MPa]	730

2.4. Equipamento

Os ensaios de impacto foram realizados numa máquina IMATEK, modelo IM10, ilustrada na figura 2.2. O impacto dá-se por queda livre do impactor ilustrado na figura 2.3, o qual foi fabricado especialmente para os ensaios realizados no âmbito deste trabalho.



Figura 2.5 - Impactor utilizado.



Figura 2.6 - Máquina de tese Imatek IM10.

A energia do impacto é completamente fornecida pela gravidade e, por isso, controlada através da altura a partir do qual a massa é deixada cair. Esta altura máxima é de 2,5 metros e a velocidade de impacto é medida por um sensor ótico enquanto a força é obtida pela dupla integração da curva carga-tempo:

$$F(t) = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3.1)$$

em que $F(t)$ é a força medida pela célula de carga, m a massa do peso de queda e d^2x/dt^2 a aceleração desta. A partir da equação 3.1, é possível calcular a velocidade de impacto:

$$V(t) = -\frac{1}{m} \int F(t) dt + C_0 \quad (3.2)$$

onde $V(t)$ é a velocidade do peso e C_0 uma constante de integração. O deslocamento é obtido a partir da equação 3.2:

$$X(t) = \left(-\frac{1}{m} \int \int F(t) dt dt \right) + V_0 t \quad (3.3)$$

onde $X(t)$ é o deslocamento da célula de carga.

2.5. Procedimento experimental

Os testes de impacto foram realizados utilizando os provetes e o equipamento previamente descritos. Utilizou-se um impactor com um diâmetro de 6 mm, massa de 2,827 kg, e foi adotado o procedimento experimental descrito na norma EN ISO 6603-2. As amostras foram simplesmente apoiadas e, para cada condição, foram ensaiados 3 provetes. As energias de impacto usadas variaram entre 1 e 9 J, tendo os ensaios decorrido à temperatura ambiente.

Capítulo 3

Análise e Discussão de Resultados

3.1 Introdução

Ao longo deste trabalho foram efetuados vários ensaios experimentais, de acordo com o procedimento experimental descrito anteriormente, apresentando-se, no presente capítulo, todos os resultados obtidos bem como a sua análise.

A figura 3.1 ilustra a influência do gap nas curvas carga-tempo e energia tempo obtidas com uma energia de 7 J e para a geometria com a sobreposição de 40 mm e uma espessura de 4,5 mm. Por sua vez a figura 3.2 ilustra a evolução das curvas carga-tempo e energia tempo com o número de impactos, obtidas para uma energia de 5 J e para a geometria com a sobreposição de 40 mm, espessura de 4,5 mm e um gap de 20 mm. Estas curvas representam o comportamento típico observado para todos os provetes e estão de acordo a literatura [62].

As curvas contêm oscilações que, de acordo Schoeppner e Abrate [70], são originadas pelas vibrações do provete. Em pormenor, é possível observar que a força aumenta até a um valor máximo, P_{max} , a partir da qual passa então a diminuir. A energia de impacto não foi suficientemente elevada para promover o colapso total da junta colada porque o impactor bate na amostra e volta para trás. Este fenómeno pode ser confirmado pela evolução da curva energia-tempo, onde o valor mais alto é a energia no pico de carga e o início do patamar coincide com a perda de contacto entre o impactor e a amostra, ou seja, trata-se da energia absorvida pelo provete. Em termos de energia elástica, esta pode ser calculada pela diferença entre a energia absorvida e a energia no pico carga [71]. Relativamente ao último impacto, quando ocorre o colapso da junta, a energia elástica é zero pois toda a energia foi absorvida pelo provete em forma de dano. Em termos de curva carga-tempo, após a carga máxima ocorre um decréscimo abrupto do valor da força, evidenciando, assim, o colapso da junta.

Finalmente a figura 3.3 ilustra os modos de danos típicos que ocorreram para todas as configurações estudadas. Pode-se concluir que ocorreu ruína ao nível do laminado, tendo a cola arrancado a camada superficial de resina, deixando, deste modo, as fibras de vidro à mostra. Neste caso, tanto a preparação da superfície como a técnica de colagem foi eficiente, pois a ruína ocorreu fora da cola e fora da interface cola/aderente. Este tipo de ruína mostra que a interface fibra/matriz não é suficientemente forte face à cola ou interface cola/aderente, pelo que em situações destas é sugerido utilizar fibras com tratamentos superficiais mais adequados e resistentes.

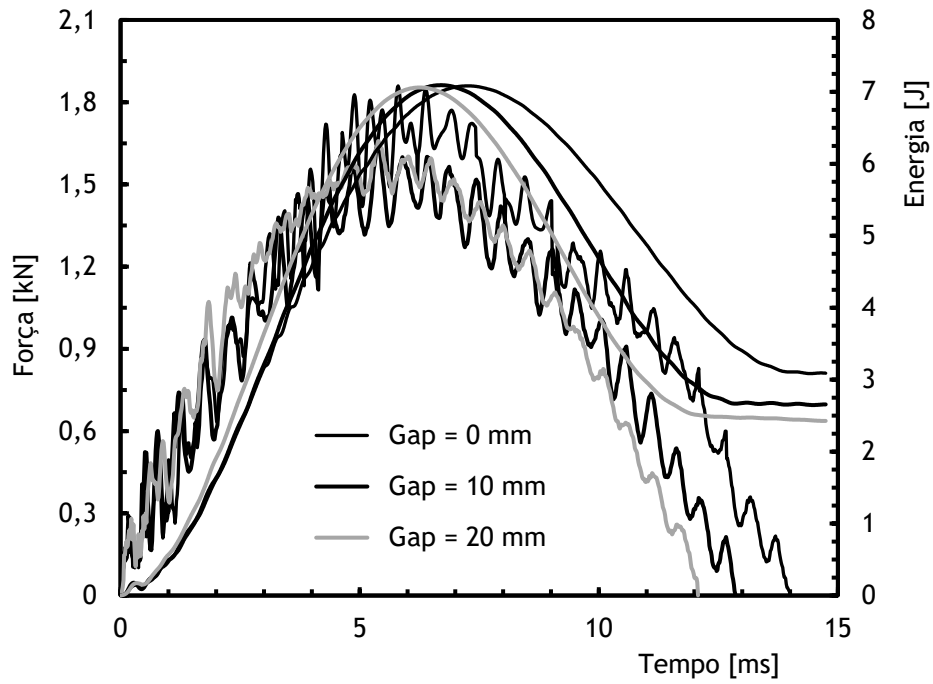


Figura 3.1 - Influência do gap nas curvas carga-tempo e energia-tempo obtidas com uma energia de 7 J e para a geometria com a sobreposição de 40 mm e uma espessura de 4,5 mm.

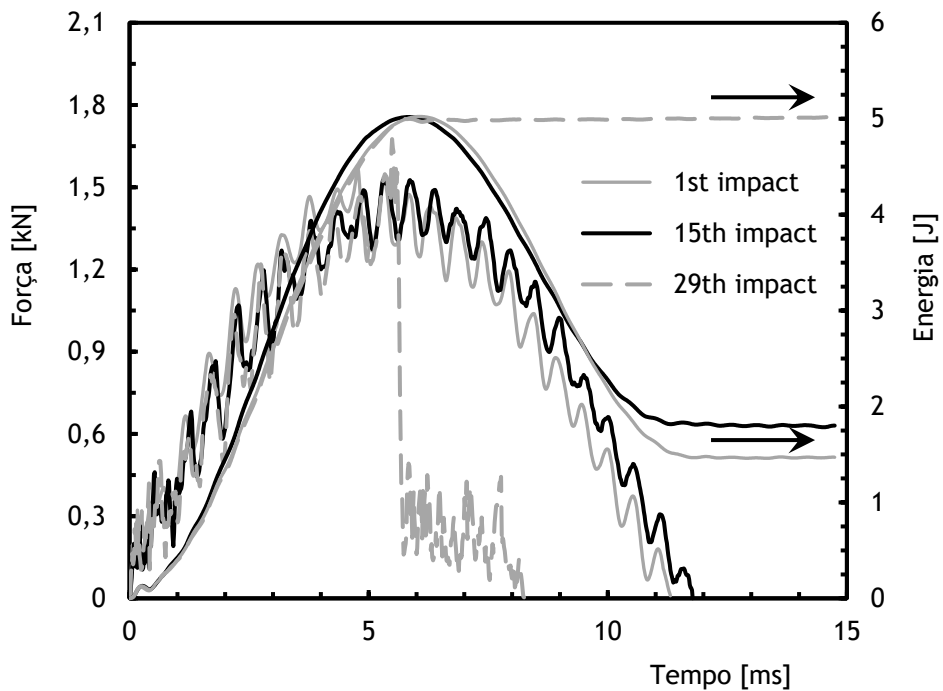


Figura 3.2 - Evolução das curvas carga-tempo e energia-tempo com o número de impactos.

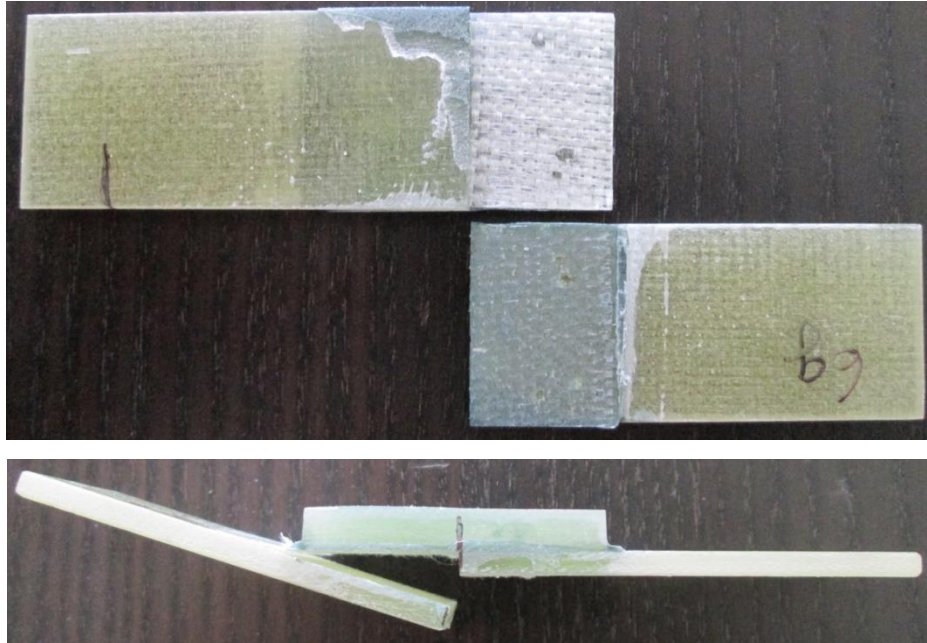


Figura 3.3 - Morfologia típica dos danos observados nas juntas coladas para todas as configurações.

Após esta análise geral, nas secções seguintes serão discutidos os efeitos do gap, da espessura da camada de sobreposição e o comprimento da camada de sobreposição.

3.2 Efeito da espessura do laminado de sobreposição

De modo a estudar este efeito, foram ensaiados vários provetes cujos laminados de sobreposição apresentavam espessuras de 1,5, 3 e 4,5 mm. Na tabela 3.1 encontram-se os valores médios da força máxima e deslocamento máximo, bem como da restituição elástica e rigidez à flexão para o primeiro impacto. Pode dizer-se que o aumento da energia de impacto promove o aumento da força máxima e do deslocamento e a diminuição da restituição elástica e da rigidez à flexão. Por exemplo, comparando os valores para uma energia de impacto de 3 J, pode afirmar-se que duplicando essa espessura o valor da força máxima aumenta cerca de 134,9% e que triplicando esse aumento é na ordem dos 228,5%.

Tabela 3.1 - Valores do primeiro impacto para diferentes espessuras do laminado de sobreposição.

Espessura [mm]	Energia [J]	Valores máximos médios				Valores médios			
		Força máxima [kN]	Desvio padrão [kN]	Deslocamento [mm]	Desvio padrão [mm]	Restituição elástica [%]	Desvio padrão [%]	Rigidez à flexão [kN/mm]	Desvio padrão [kN/mm]
1,5	1	0,57	0,10	8,9	1,4	27,1	3,8	82,1	9,6
	3	0,63	0,13	21,2	1,8	23,6	8,9	60,9	14,6
	5	0,73	0,11	-	-	-	-	-	-
3	2	1,46	0,21	5,7	0,6	50,1	6,8	114,1	3,5
	3	1,48	0,24	6,2	0,7	44,0	6,3	94,7	12,9
	5	1,56	0,23	8,1	1,1	38,4	8,8	81,9	11,1
	7	1,78	0,16	-	-	-	-	-	-
4,5	3	2,07	0,11	5,4	0,1	56,3	5,2	189,8	4,6
	5	2,19	0,21	6,8	0,4	52,2	5,4	166,3	9,3
	7	2,37	0,16	8,7	0,4	39,2	8,7	125,9	7,9

A figura 3.4 relaciona, para cada espessura, a energia com o número de impactos para que ocorra o colapso da junta. Como seria de esperar, o número de impactos é maior quando a energia diminui. Tomando como exemplo o comprimento de sobreposição com uma espessura de 1,5 mm e para uma energia de 1 J, o número de impactos necessários para que se verifique a ruína encontra-se entre os 30 e os 40. Para 3 J, esse número diminui significativamente e varia entre os 3 e os 4 impactos. O número de impactos é ainda menor quando a energia é de 5 J. Comparando a resistência ao impacto das diferentes espessuras, comprova-se que à medida que esta aumenta são necessários maiores energias de impacto para que o provete falhe.

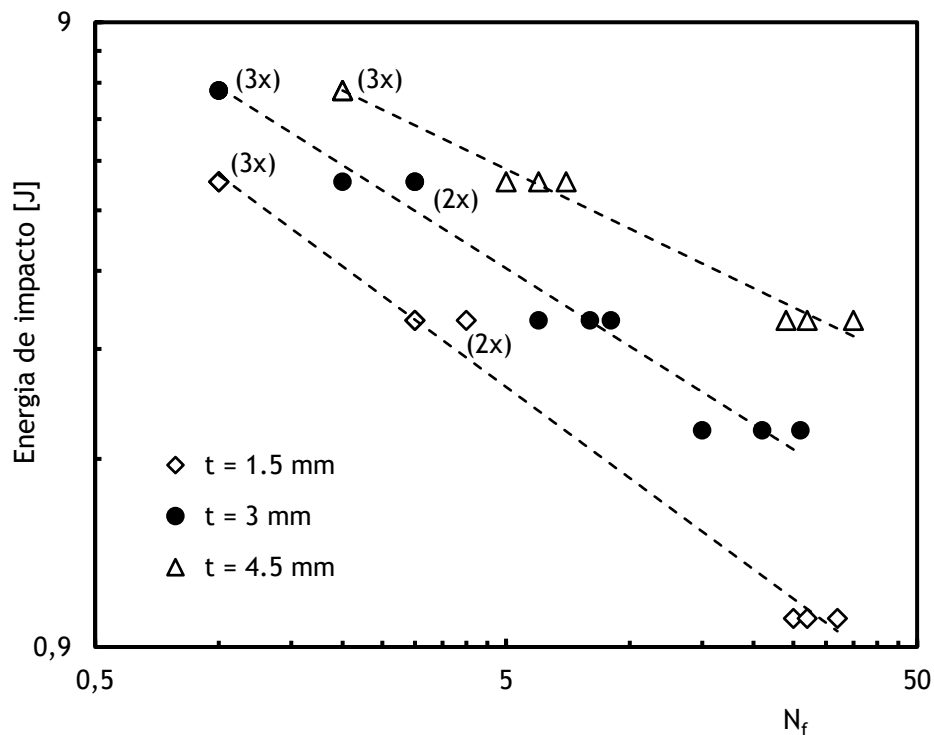
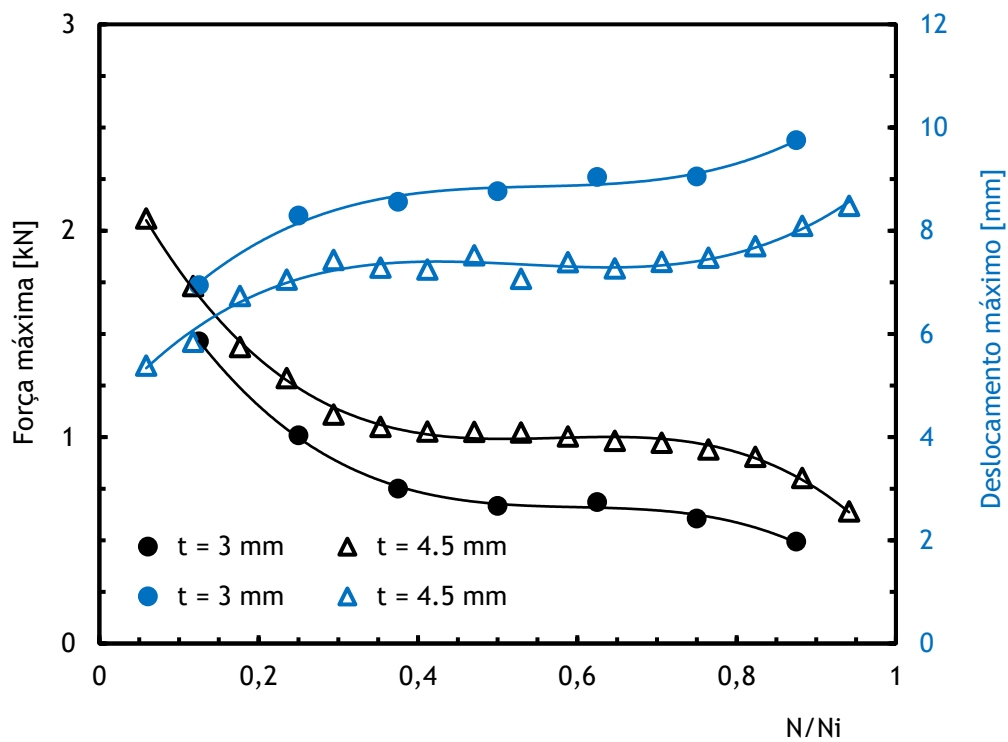


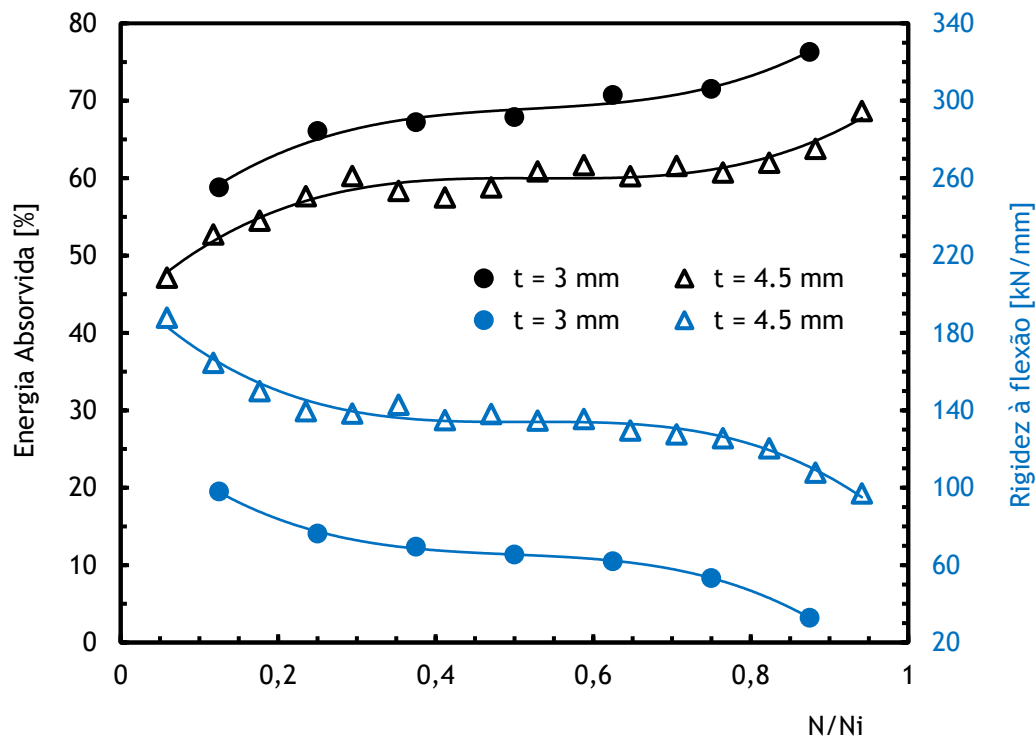
Figura 3.4 - Energia do impacto versus número de impactos para diferentes espessuras do laminado de sobreposição. (ensaios realizados com: comprimento do laminado de sobreposição = 40 mm; comprimento da gap = 0 mm).

A figura 3.5 representa a evolução da força máxima, deslocamento máximo, energia absorvida e rigidez à flexão por impacto com o número de impacto para dois provetes cujas espessuras de sobreposição são de 3 e 4,5 mm. No eixo das abcissas encontra-se a relação N/N_f onde N é representa o valor instantâneo e N_f o número total de impactos à rotura. Ambos foram testados com uma energia de impacto igual a 3 J, com o comprimento do laminado de sobreposição igual a 40 mm e o comprimento do gap igual a 0 mm.

Assim, na figura 3.5a representa-se a preto a evolução das curvas da força máxima para cada provete, as quais seguem um polinómio do terceiro grau. Pode dizer-se que em ambos os casos o valor da força máxima diminuiu ao longo da vida, ainda que os valores relativos à espessura



a)



b)

Figura 3.5 - Influência da espessura do laminado de sobreposição: a) força máxima e deslocamento máximo; b) energia absorvida e rigidez à flexão.

de 4,5 mm sejam sempre superiores aos da espessura de 3 mm. Nessa mesma figura, a azul, estão representadas as curvas do deslocamento máximo seguindo, mais uma vez, uma evolução que pode ser descrita por um polinómio do terceiro grau. Ao contrário da força máxima, os valores para o deslocamento máximo aumentam, tendo sido sempre superiores para a espessura de 3 mm. Na figura 3.5b, as curvas a preto representam a energia absorvida e mais uma vez seguem um andamento que pode ser descrito por um polinómio do terceiro grau. A energia absorvida pelos provetes com uma espessura de 3 mm é superior à dos provetes com 4,5 mm. Como seria de prever, as curvas azuis ilustram que os provetes com maior espessura são os que apresentam maior rigidez à flexão por impacto.

3.3 Efeito do comprimento do laminado de sobreposição

Para perceber efeito do comprimento de sobreposição, os provetes foram ensaiados para valores de 20, 40 e 60 mm. Os valores médios da força máxima, deslocamento máximo, restituição elástica e rigidez à flexão para o primeiro impacto encontram-se ilustrados na tabela 3.2. À semelhança do que aconteceu no estudo da espessura do laminado, também aqui o aumento da energia de impacto promove o aumento da força máxima e do deslocamento e a diminuição da restituição elástica e da rigidez à flexão. Tomando como exemplo os valores da força máxima para uma energia de impacto de 3 J, uma sobreposição de 40 mm apresenta uma carga máxima de 0,63 kN, enquanto para 60 mm este valor é na ordem dos 0,67 kN, o que corresponde a um aumento pouco significativo de 6,3%.

A figura 3.6 mostra, em função da energia, o número de impactos necessários para que ocorra o colapso da junta. Apesar de se ter ensaiado também o comprimento de 20 mm, os resultados obtidos não foram muito expressivos, pois este revelou-se muito sensível para a energia de impacto mínima da máquina. À semelhança da figura 3.4, o número de impactos é maior quando a energia de impacto é menor. Em relação à resistência ao impacto dos diferentes comprimentos de sobreposição, observa-se que o seu aumento conduz a uma maior vida. Por exemplo, para uma energia de 3 J, um comprimento de 40 mm apresenta uma vida entre os 5 e os 6 impactos, enquanto com 60 mm este valor pode ascender até aos 9 impactos.

A figura 3.7 ilustra graficamente a comparação entre dois provetes, cujos comprimentos são de 40 e 60 mm. À semelhança dos gráficos apresentados anteriormente, os parâmetros analisados, em função de N/N_f , são a força máxima, o deslocamento máximo, a energia absorvida e a rigidez à flexão. Ainda que as curvas sejam obtidas para uma energia de 3 J, espessura de 1,5 mm e o comprimento do gap igual a 0 mm, elas são representativas dos outros ensaios.

Tabela 3.2 - Valores do primeiro impacto para diferentes comprimentos do laminado de sobreposição.

Geometria	Energia [J]	Valores máximos médios				Valores médios			
		Força máxima [kN]	Desvio padrão [kN]	Deslocamento [mm]	Desvio padrão [kN]	Restituição elástica [%]	Desvio padrão [%]	Rigidez à flexão [kN/mm]	Desvio padrão [kN/mm]
$\ell_l = 40$ mm	1	0,57	0,10	8,9	1,4	27,8	3,8	82,1	9,6
	3	0,63	0,13	21,2	1,8	23,6	8,9	60,9	14,6
	5	0,73	0,11	-	-	-	-	-	-
$\ell_l = 60$ mm	2	0,63	0,11	11,5	1,4	42,4	7,6	84,6	8,2
	3	0,67	0,12	20,4	1,8	36,2	9,2	68,7	7,8
	5	0,74	0,13	30,8	1,0	31,3	6,6	42,1	10,1

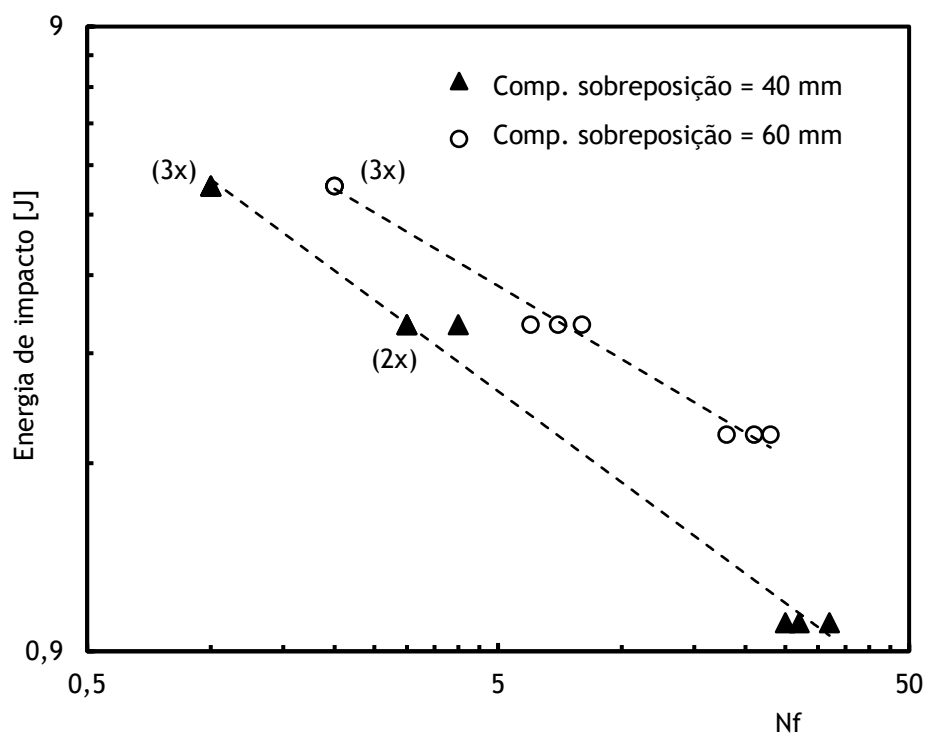
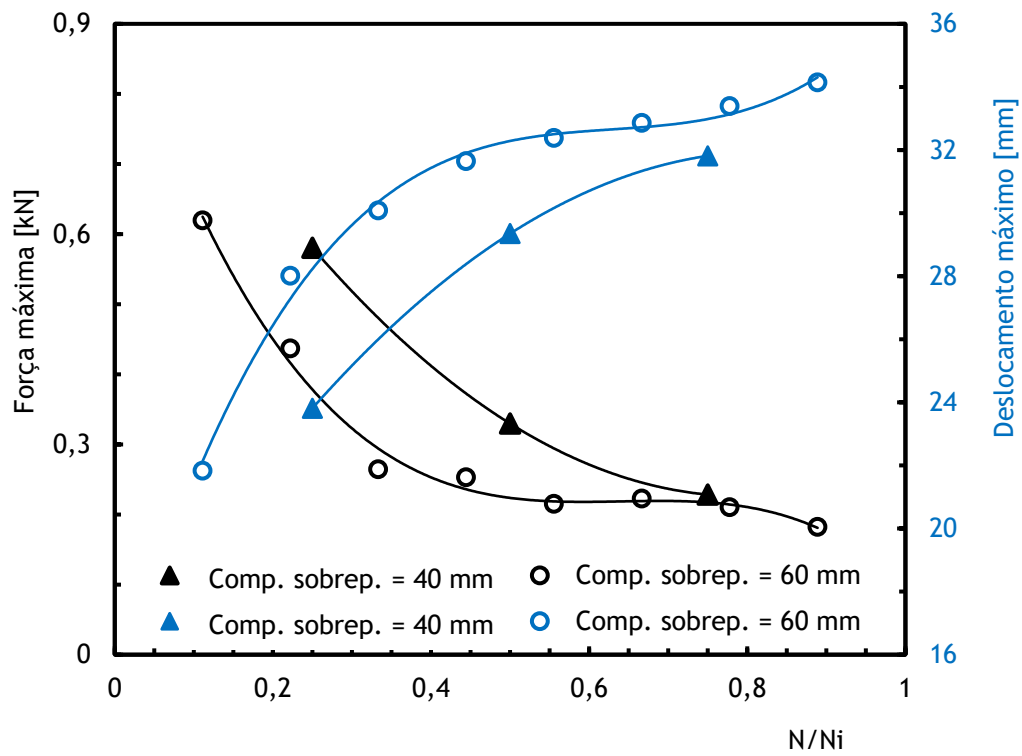
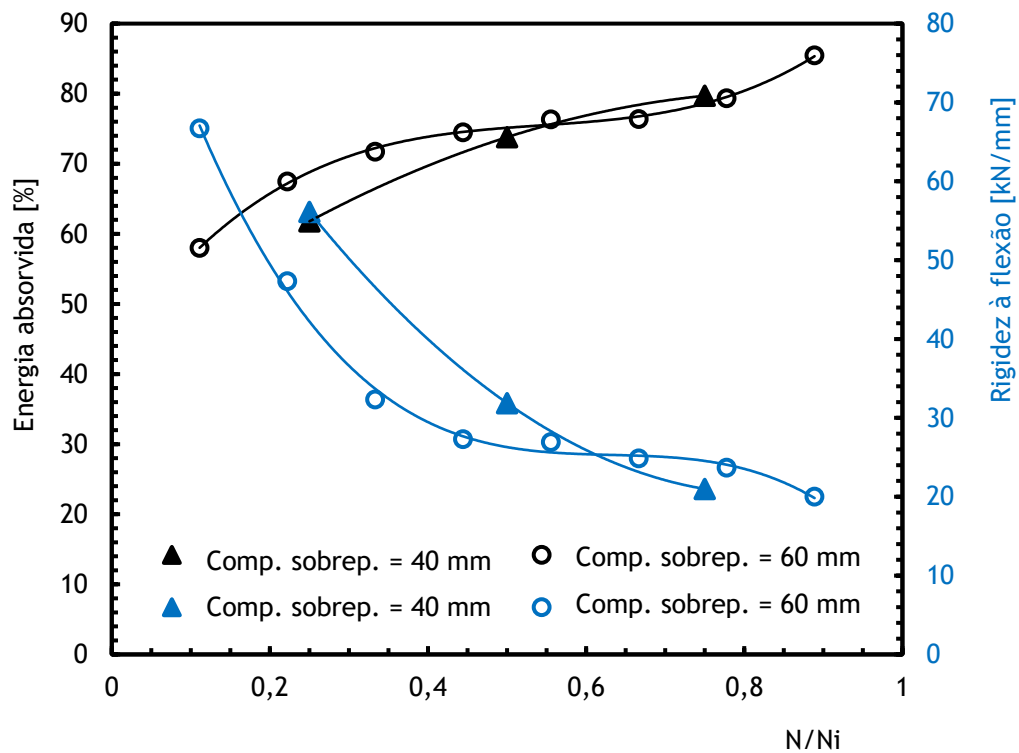


Figura 3.6 - Energia do impacto versus número de impactos para diferentes comprimentos do laminado de sobreposição. (ensaios realizados com: espessura do laminado de sobreposição = 1,5 mm; comprimento da gap = 0 mm).

Assim, na figura 3.7a, as curvas a preto ilustram a evolução da força máxima que, à semelhança da figura 3.5, podem ser representadas por um polinómio do terceiro grau. O valor da força máxima diminuiu ao longo da vida, apresentando o laminado com menor comprimento (40 mm) valores superiores em relação ao de 60 mm. No entanto, as curvas aproximam-se no fim da vida, ou seja, para N/N_f igual a 0,8, os valores da força máxima são muito semelhantes. Na mesma figura, as curvas a azul representam o deslocamento máximo. O deslocamento máximo tem tendência a aumentar com o número de impactos e os valores mais altos foram obtidos para um comprimento de sobreposição de 60 mm. Por sua vez na figura 3.7b, as curvas a preto representam a energia absorvida. Pode dizer-se os valores são bastantes semelhantes para ambos os comprimentos de sobreposição, aumentando ao longo do tempo. No que diz respeito à rigidez, esta diminuiu ao longo da vida observando-se valores superiores para 40 mm até aproximadamente N/N_i igual a 0,6.



a)



b)

Figura 3.7 - Influência do comprimento do laminado de sobreposição: a) força máxima e deslocamento máximo; b) energia absorvida e rigidez à flexão.

3.4 Efeito do comprimento do gap

Para estudar o efeito do comprimento do gap foram usados valores de 0, 10 e 20 mm. À semelhança do que aconteceu anteriormente, um aumento da energia de impacto promove o aumento da força máxima e do deslocamento. Por sua vez, ocorre uma diminuição da restituição elástica e da rigidez à flexão, como ilustra a tabela 3.3.

A figura 3.8 mostra a relação entre a energia e o número de impactos até à rotura para os comprimentos de 0, 10 e 20 mm. Relativamente à resistência ao impacto dos diferentes comprimentos do gap, pode afirmar-se que aumentando este valor, é possível obter uma maior vida. Tomando como exemplo a energia de 5 J, observa-se que para um gap de 0 mm o número de impactos até à falha ronda os 6, para 10 mm este valor sobe para 16 e para 20 mm já atinge quase os 60 impactos.

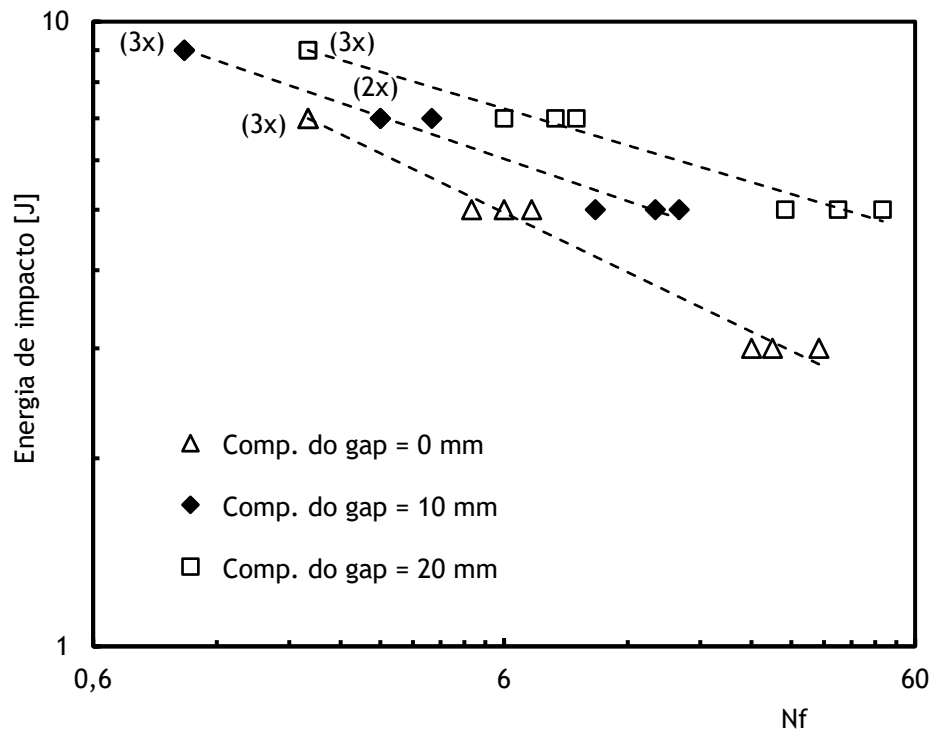
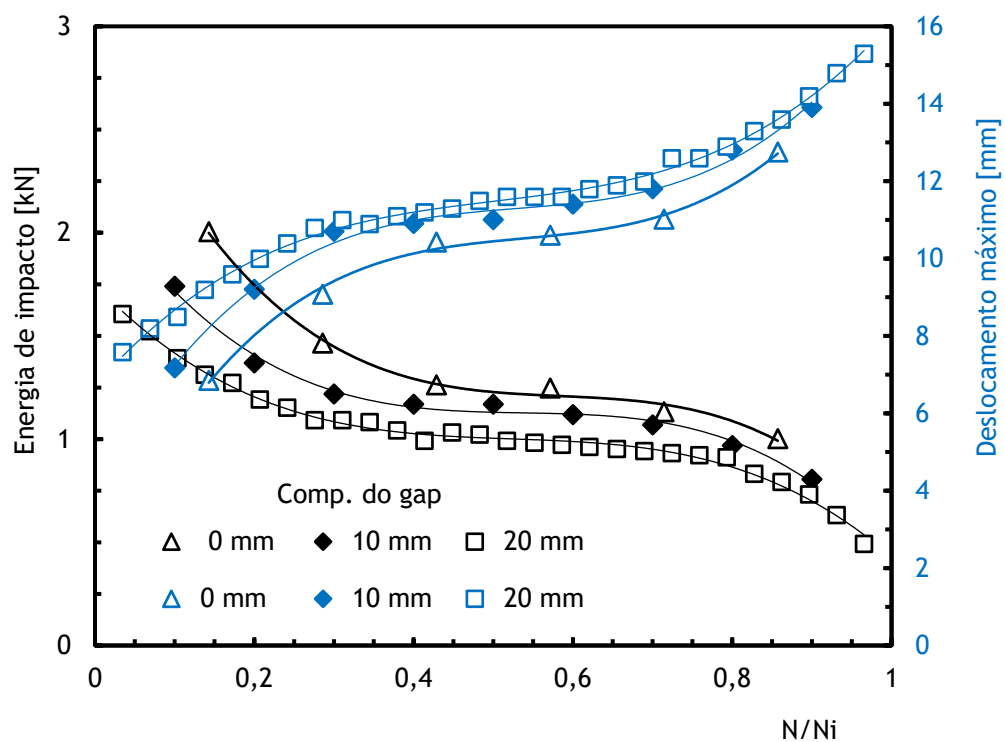


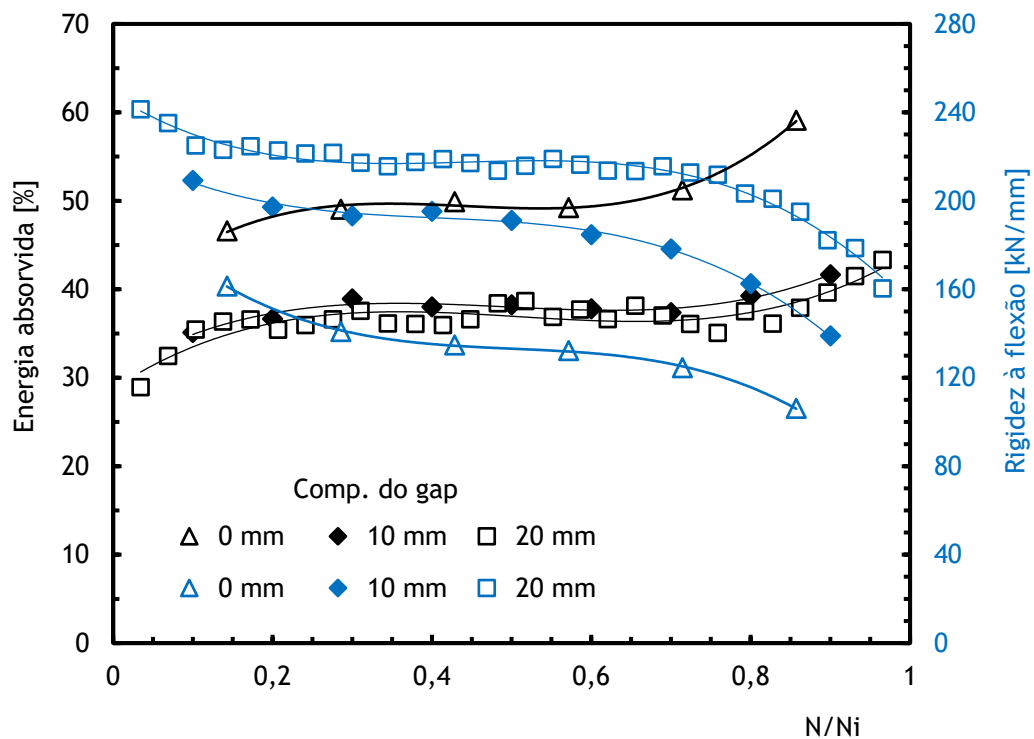
Figura 3.8 - Energia do impacto versus número de impactos para diferentes comprimentos do gap (ensaios realizados com: espessura do laminado de sobreposição = 4,5 mm; comprimento do laminado de sobreposição = 40 mm).

Tabela 3.3 - Valores do primeiro impacto para diferentes comprimentos do gap.

Geometria	Energia [J]	Valores máximos médios				Valores médios			
		Força máxima [kN]	Desvio padrão [kN]	Deslocamento [mm]	Desvio padrão [kN]	Restituição elástica [%]	Desvio padrão [%]	Rigidez à flexão [kN/mm]	Desvio padrão [kN/mm]
$\ell_g = 0 \text{ mm}$	3	2,07	0,11	5,4	0,1	56,3	5,2	189,8	4,6
	5	2,19	0,21	6,8	0,4	52,2	5,4	166,8	9,3
	7	2,37	0,16	8,7	0,4	39,2	8,7-	125,9	7,9
$\ell_g = 10 \text{ mm}$	5	1,65	0,17	7,1	0,3	66,8	2,0	199,2	10,2
	7	1,84	0,16	7,9	0,7	31,8	3,9	175,1	4,8
	9	2,30	0,15	-	-	-	-	-	-
$\ell_g = 20 \text{ mm}$	5	1,49	0,11	7,4	0,5	67,4	3,6	226,4	20,3
	7	1,64	0,19	8,5	0,4	60,9	3,5	208,3	14,8
	9	1,95	0,21	-	-	-	-	-	-



a)



b)

Figura 3.9 - Influência do comprimento do gap: a) força máxima e deslocamento máximo; b) energia absorvida e rigidez à flexão.

A figura 3.9 apresenta a comparação do comprimento do gap. Tal como anteriormente, os parâmetros em análise são a força máxima, o deslocamento máximo, a energia absorvida e a rigidez à flexão em função de N/N_f . Os provetes em análise, ainda que representativos, foram ensaiados com uma energia de 5 J, comprimento de sobreposição igual a 40 mm e uma espessura de 4,5 mm.

De acordo com a figura 3.9a, a força máxima diminuiu para três comprimentos estudados. É possível afirmar que a força máxima teve valores superiores para um comprimento de 0 mm. No caso do deslocamento máximo verifica-se o inverso, ou seja, ao longo dos ensaios esse parâmetro tem tendência a aumentar sendo, no entanto, superior para um comprimento de 20 mm. Face à figura 3.9b, o comprimento menor (0 mm) foi o que maior energia absorveu. Em todos os casos, como seria de esperar, o valor da energia absorvida aumentou ao longo do tempo. Finalmente, as curvas da rigidez mostram que o maior comprimento (20 mm) são as que apresentam valores mais elevados. Para todos os provetes esses valores diminuíram ao longo da vida.

Capítulo 4

Conclusões finais e recomendações para trabalhos futuros

4.1 Conclusões finais

A presente dissertação prendeu-se com o estudo do efeito de alguns parâmetros da geometria das juntas coladas. Com recurso a uma máquina de impacto, foi possível testar vários provetes, sendo que após a análise e discussão dos resultados apresentados no capítulo anterior se retiraram algumas conclusões. Deve ser, no entanto, realçado que todas as afirmações se aplicam apenas aos intervalos dos valores estudados.

1. Para todos os casos, ao longo da vida, a força máxima e a rigidez à flexão diminuíram, enquanto que o deslocamento máximo e a energia absorvida aumentaram.
2. Em relação ao estudo do efeito da espessura de sobreposição, verificou-se que para a espessura mais elevada corresponde a maior força de impacto máxima e o menor deslocamento. Os laminados de maior espessura foram os que menor energia absorveram, porém apresentaram maior rigidez à flexão por impacto.
3. No que diz respeito ao efeito do comprimento do laminado de sobreposição, conclui-se que o maior comprimento obteve a menor força e o maior deslocamento máximo, apesar das curvas desses parâmetros terem tendência de se aproximar ao longo da vida.
4. Quanto ao efeito do comprimento do gap, é possível afirmar que, a força mais elevada foi obtida para o menor comprimento, correspondendo-lhe também o menor deslocamento máximo. É também para o menor comprimento do gap que corresponde uma maior energia absorvida e menor rigidez à flexão por impacto.
5. No que diz respeito à resistência ao impacto, a espessura de 4,5 mm, o comprimento de sobreposição de 60 mm e o comprimento do gap de 20 mm foram os que apresentaram os valores mais elevados.

4.2 Recomendações para trabalhos futuros

Na sequência do presente trabalho surgiram alguns aspectos 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 com vista a obter um modelo de previsão de dano.
2. Estudar o comportamento ao impacto de juntas coladas que tenham sido previamente sujeitas a outros tipos de solitação.

3. Efetuar um estudo da resistência residual após determinado número de impactos.
4. Estudar os efeitos ambientais na resistência ao impacto das juntas coladas.

Bibliografia

- [1] D.D.L. Chung, *Composite Materials*, Springer-Verlag, London, 2010.
- [2] R.M. Jones, *Mechanics of Composite Materials*, Taylor & Francis, Inc., Philadelphia, 1999.
- [3] S.K. Mazumdar, *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, CRC Press LLC, Boca Raton/London/New York/Washington D.C., 2002.
- [4] M.F.S.F. Moura, A.B. Morais, A.G. Magalhães, *Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, Publindústria, Edições Técnicas, Porto, 2009.
- [5] A.B. Strong, *Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications*, Second Edi, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, 2007.
- [6] J.R. Vinson, R.L. Sierakowski, *The Behavior of Structures Composed of Composite Materials*, Springer, Dordrecht, 2008.
- [7] A. Kelly, *Concise Encyclopaedia of Composite Materials for Aircraft Structures*, Pergamon, Cambridge, 1995.
- [8] D. Gay, S. V. Hoa, S.W. Tsai, *Composite Materials: Design and Applications*, CRC Press, Boca Raton/London/New York, 2003.
- [9] P.K. Mallick, *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*, CRC Press, Boca Raton/London/New York, 2007.
- [10] J. Callister, William D., *Materials Science and Engineering: An Introduction*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2007.
- [11] R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. De Moura, *Modelação Numérica de Reparações por Sobreposição Simples e Dupla em Materiais Compósitos*, Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões Vol. 15, 2008.
- [12] A. Baker, S. Dutton, K. Donald, *Composite Materials for Aircraft Structures*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Reston, 2004.
- [13] A.K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials*, CRC Press, Boca Raton, 2006.
- [14] K.K. Chawla, *Composite Materials: Science and Engineering*, Springer-Verlag, New York, 1987.
- [15] Lamborghini Aventador LP700, (n.d.). <http://fullhdpictures.com/wp-content/uploads/2016/07/Lamborghini-Aventador-LP700-4-HD-Wallpapers.jpg> (accessed August 31, 2016).
- [16] Raquete Prince TeXtreme, (n.d.). http://www.prodirecttennis.com/productimages/V3_1_Main/125920.jpg (accessed

August 31, 2016).

- [17] Colete à prova de bala, (n.d.).
http://www.safeguardclothing.com/media/catalog/category/coovert_1_2_3.jpg
(accessed August 31, 2016).
- [18] Aircraft composite content over time, (n.d.).
<http://zagan.unizar.es/record/5149/files/TAZ-PFC-2010-220.pdf> (accessed August 31, 2016).
- [19] Consumo Aeronaves, (n.d.). <http://www.compositesworld.com/articles/composites-in-commercial-aircraft-engines-2014-2023> (accessed August 31, 2016).
- [20] Fuselagem 787, (n.d.). <http://www.jyi.org/issue/the-boeing-787-dreamliner-designing-an-aircraft-for-the-future/> (accessed August 31, 2016).
- [21] S.A. da C. Almeida, Análise Computacional de Juntas Adesivas Simples e Duplas em Materiais Compósitos, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2012.
- [22] Asa A350, (n.d.). <http://www.compositesworld.com/blog/post/battle-of-the-composite-wings-> (accessed August 31, 2016).
- [23] F. Liesa, B. L., Adhesivos Industriales, Marcombo Boixareu Editores, Barcelona, 1990.
- [24] T. Hattori, A Stress-Singularity-Parameter Approach for Evaluating the Adhesive Strength of Single-Lap Joints, JSME International Journal, Serie I, Vol. 34, Nº3, 1991.
- [25] L. Tong, Bond Shear Strength for Adhesive Bonded Double-Lap Joints, International Journal of Solids and Structures, Vol. 31, Nº21, 1994.
- [26] T. Sawa, J. Liu, K. Nakano, J. Tanaka, A Two-Dimensional Stress Analysis of Single-Lap Adhesive Subjected to Tensile Loads, Journal Adhesion Science and Technology, Vol. 14, Nº1, 2000.
- [27] L.F.M. Silva, A.G. Magalhães, M.F.S.F. Moura, Juntas Adesivas Estruturais, Publindústria, Edições Técnicas, Porto, 2007.
- [28] S. Ebnesajjad, A.H. Landrock, Adhesives Technology Handbook, 2008.
- [29] J.R. Vinson, Adhesive-Bonding of Polymer Composites, Polymer Engineering and Science, Vol. 29, Nº19, 1989.
- [30] R.T. Thompson, Five Design Considerations for Adhesive-Bonded Plastic Joints, Adhesives'85, SME Technical Paper, AD85-776, 1985.
- [31] E.W. Kuenzi, G.H. Stevens, Determination of Mechanical Properties of Adhesives for Use in the Design of Bonded Joints, U.S. Forest Products Service Research Note FPL-011, U.S: Department of Agriculture, Madison, 1963.
- [32] W.A. Lees, Stress Distribution in-Bonded Joints: An Exploration Within a Mathematical Model, International Journal of Materials and Product Technology, Vol. 2, Nº 2, 1987.

- [33] J.P. Trotignon, J. Verdu, M. Piperaud, *Précis de Matériaes Plastiques*, AFNOR, 1982.
- [34] R.D. Adams, J.A. Harris, The Influence of Local Geometry on the Strength of Adhesive Joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 7, Nº2, 2002.
- [35] R.D. Adams, Strength Predictions for Lap Joints, Especially with Composite Adherends: A Review, *Journal of Adhesion*, Vol. 30, 1989.
- [36] S. Amijima, T. Fujii, A Simple Stress Analysis Method for Adhesive Bonded Tapered Joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 9, Nº 3, 1989.
- [37] H.L. Groth, P. Nordlund, Shape Optimization of Bonded Joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 11, Nº 4, 1991.
- [38] M.Y. Tsai, J. Morton, F.L. Matthews, Experimental and Numerical Studies of a Laminated Composite Single-Lap Adhesive Joints, *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, Nº 9, 1995.
- [39] T.P. Lang, P.K. Mallick, Effect of Spew Geometry on Stresses in Single Lap Adhesive Joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 18, 1998.
- [40] L. Tong, G.P. Steven, *Analysis and Design of Structural Bonded Joints*, Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, 1999.
- [41] A.G. Magalhães, *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 Doutoramento em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 1999.
- [42] J.R.J. Wingfield, Treatment of Composite Surfaces for Adhesive Bonding, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 13, Nº 3, 1993.
- [43] Y. Yuan, T.R. Lee, Chapter 1, Contact Angle and Wetting Properties, *Springer Series in Surface Sciences 51*, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2013.
- [44] J. Comyn, Contact Angles and Adhesive Bonding, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 12, Nº 3, 1992.
- [45] D.E. Packham, Work of Adhesion: Contact Angles and Contact Mechanics, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 16, Nº 2, 1996.
- [46] P. Teixeira, R. Oliveira, Influence of Surface Characteristics on the Adhesion of *Alcaligenes Denitrificans* to Polymeric Substrates, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 13, Nº 11, 1999.
- [47] K. Grundke, A. Augsburg, On the Determination of the Surface Energetics of Porous Polymer Materials, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 14, 2000.
- [48] C.C. Lee, Determination of the Mechanical Properties of Adhesive for Design of Bonded Joints, *Dissertação para Doutoramento em Engenharia dos Materiais*, Faculty of Applied Science, School of Materials Science and Engineering, University of New South

Wales, Austrália, 1992.

- [49] A.J. Kinloch, Durability of Structural Adhesives, Applied Science Publishers Ltd, England, 1983.
- [50] C.E.M. Morris, P.J. Pearce, Surface Preparation-The Key to Strong, Durable Adhesive Joints, Proc. of the Engineering with Adhesives Conference, Melbourne, 1993.
- [51] R.A. Dukes, R.A. Gleldhil, A.J. Kinloch, Adhesion Science and Technology, Plenum Press, New York, 1975.
- [52] S.J. Wu, Recent Advances in Adhesion, Gordon and Breach, New York, 1973.
- [53] J.L. Esteves, Estudo do Comportamento de Adesivos Estruturais, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1990.
- [54] I. Skeist, Handbook of Adhesives, Springer US, New York, 1990.
- [55] M.M. Gauthier, Sorting out Structural Adhesives, Advanced Materials & Processes, Vol. 138, ASM International, 1990.
- [56] L. Goglio, M. Rossetto, Impact Rupture of Structural Adhesive Joints under Different Dstress Combinations, International Journal of Impact Engineering Vol. 35, 2008.
- [57] L.F.M. Silva, M.R.G. Silva, E.A.S. Marques, Behaviour under Impact of Mixed Adhesive Joints for the Automotive Industry, 2016.
- [58] R.D. Adams, Adhesive Bonding, Science, Technology and Applications, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2005.
- [59] K. Kihara, H. Isono, H. Yamabe, T. Sugibayashi, A Study and Evaluation of the Shear Strength of Adhesive Layers subjected to Impact Loads, International Journal of Adhesion and Adhesives Vol.23, 2003.
- [60] A.A. Bezemer, C.B. Guyt, A. Volt, New Impact Specimen for Adhesives: Optimization of High-Speed-Loaded Adhesive Joints, International Journal of Adhesion and Adhesives Vol. 18, 1998.
- [61] U.K. Vaidya, A.R.S. Gautam, Experimental-Numerical Studies of Transverse impact Response of Adhesively Bonded Lap Joints in Composite Structures, International Journal of Adhesion and Adhesives Vol. 26, 2006.
- [62] P.N.B. Reis, J.A.M. Ferreira, A.M. Pereira, F.J.V. Antunes, Influence of Superposition Length on Transverse Impact Response of Single- Strap Adhesive Joints, The Journal of Adhesion Vol. 90, 2014.
- [63] J.M. Hodgkinson, Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2000.
- [64] R.L. Sierakowski, S.K. Chaturvedi, Dynamic Loading and Characterization of Fiber-Reinforced Composites, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 1997.

- [65] L.M.S. Ferreira, Avaliação do Dano em Compósitos Laminados devido a Impactos de Baixa Velocidade, Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2006.
- [66] J.A. Zukas, T. Nicholas, H.F. Swift, L.B. Greszczuk, D.R. Curran, Impact Dynamics, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 1982.
- [67] J.M.C.F. Justo, Estudo do Comportamento ao Impacto de Alta Velocidade de Estruturas em Materiais Compósitos, Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia do Porto, Universidade do Porto, Porto, 1996.
- [68] Datasheet Biresin CR122, (n.d.). [http://www.johnburn.co.uk/docs/datasheets/BiresinCR122EpoxyResin \[1\].pdf](http://www.johnburn.co.uk/docs/datasheets/BiresinCR122EpoxyResin[1].pdf) (accessed September 1, 2016).
- [69] (Araldite), Technical Datasheet: Araldite Structural Adhesive 420 A/B, (2009) 1-5.
- [70] G.A. Schoeppner, S. Abrate, Composites Part A: applied science and manufacturing 31, 2000.
- [71] P.N.B. Reis, J.A.M. Ferreira, P. Santos, M.O.W. Richardson, J.B. Santos, Composite Structures 94, 2012.