

# **CAPÍTULO 3**

## **ESTUDO EXPERIMENTAL EM JUNTAS COLADAS**

*Este capítulo irá dar a conhecer um método alternativo de união, que permite unir diferentes materiais, em especial, materiais compósitos, de diferentes espessuras, produzindo resultados satisfatórios comparativamente a outros métodos tradicionais. A sua aplicação potencia novos patamares de criação, para além, de proporcionar uma maior qualidade de acabamentos.*

### 3.1 Introdução

As uniões coladas têm vindo a tornar-se cada vez mais como uma alternativa promissora face aos tradicionais sistemas de fixação mecânica. O seu interesse revela-se determinante quando, por exemplo, se pretende unir diferentes tipos de materiais. Neste caso muitas técnicas são de imediato excluídas.

Os materiais compósitos são um exemplo de onde as uniões coladas se revelam como sendo a mais apropriada, uma vez que as outras ligações induzem descontinuidades nas fibras (dada a necessidade da abertura de furos para a aplicação de parafusos e rebites) e, conseqüentemente, potenciais zonas de ruína. Por outro lado a sua aplicação a este tipo de materiais aumenta ainda mais o seu interesse, visto associar enormes vantagens económicas.

Ainda que a sua utilização apresente enormes vantagens face às ditas uniões tradicionais, não podemos, contudo, desprezar algumas limitações que lhes estão associadas. Na tabela 3.1 encontram-se mencionadas, por exemplo, algumas vantagens e limitações que podem decorrer das suas aplicações [17, 18-21]. O sucesso da sua aplicação passa, desta forma, por eliminar essencialmente as desvantagens apontadas na tabela 3.1 logo na fase de projecto. Para tal, Findlater [22] propõe a existência de cinco estágios ao nível do projecto, e que são: concepção, determinação da geometria da junta, selecção do material, dimensionamento da junta e análise.

No que diz respeito à selecção do material, é certo que o projectista muitas vezes não pode alterar os aderentes. Neste caso a sua escolha deve recair ao nível das colas, as quais devem ser compatíveis com os materiais dos aderentes (quer ao nível químico quer da resistência mecânica) e resistir tanto às condições de serviço como ao tempo de vida útil imposto. No entanto, vários estudos mostram que a falha ocorrida numa junta nem sempre se deve à escolha errada da cola, mas resulta essencialmente de uma 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, dada a alteração da energia de superfície do sólido.

Torna-se deste modo evidente que a preparação das superfícies a unir é uma fase de extrema importância, sendo usual o recurso a sistemas mecânicos e/ou químicos [23]. Magalhães [17], por exemplo, faz uma revisão dos procedimentos de limpeza que mais se adequam às superfícies metálicas e poliméricas. Este autor realça a necessidade

de tratamentos específicos para determinados polímeros e/ou famílias, os quais, segundo Lees [24], podem também ser uma função da cola aplicada.

Tabela 3.1 – Vantagens e limitações que advêm da aplicação das juntas coladas [17, 18-21].

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Capacidade de se obter estruturas mais leves e rígidas	As peças não podem ser posteriormente separadas
Capacidade de unir materiais distintos (por exemplo metais com compósitos)	Podem ocorrer tensões residuais resultantes dos diferentes coeficientes de expansão térmica
Capacidade de unir eficientemente materiais de espessuras finas	Sensibilidade a tensões de tracção segundo a espessura
Melhor distribuição de tensões (sem concentrações de tensões nos aderentes contrariamente às ligações tradicionais)	Fraca resistência à temperatura e ao fogo
Melhores propriedades à fadiga devido à melhor distribuição de tensões	Susceptíveis a degradação ambiental e incerteza relativamente à sua durabilidade a longo prazo em condições de serviço severas
Melhor aparência superficial (sem cabeças de parafusos, etc.)	Dificuldade ao nível de inspecções
Fabrico de formas complexas	-
Boa capacidade de vedação	-
O processo de colagem pode ser automatizado, tornando-se economicamente mais favorável	-

Todavia, a preparação de uma superfície não é só um processo de limpeza, dado que muitas vezes estão-lhe associados tratamentos tendo em vista o aumento da energia de superfície do sólido. Wingfield [25], por exemplo, apresenta os principais objectivos que devem estar subjacentes ao tratamento de uma superfície, e que são: eliminação de todos os tipos de contaminantes (elementos gordurosos, óxidos, etc.), melhoramento da molhagem de superfícies de baixa energia, modificações químicas através da introdução de grupos químicos polares e promoção da rugosidade da superfície, aumentando desta forma a área de colagem.

Por outro lado as juntas coladas sobrepostas simples, devido à não colinearidade das forças exteriores aplicadas, conduzem ao aparecimento de um momento flector, o qual vai provocar a sua rotação e o conseqüente aparecimento de tensões de corte e

tensões normais de tracção na cola, enquanto os aderentes são simultaneamente traccionadas e flectidos. Neste caso existem vários factores que podem influenciar as distribuições de tensões nas juntas coladas, entre os quais: a rigidez dos aderentes [26-27], a espessura dos aderentes [28, 29], a espessura da cola [28, 29], o comprimento de sobreposição [29-31] e o tipo de geometria usada nas extremidades da sobreposição [28, 32-35].

Neste sentido, o presente capítulo pretende caracterizar o comportamento mecânico das juntas coladas de compósitos carbono/epoxy, alumínio e aço de elevada resistência. Apresentan-se os resultados obtidos a partir dos ensaios de tracção uniaxial, com vista a obter a melhor eficiência mecânica da junta colada. Para tal foram estudados alguns parâmetros como: o efeito da rugosidade nos aderentes metálicos e o comprimento de sobreposição. As superfícies de fractura também foram analisadas por microscopia electrónica com vista a caracterizar os mecanismos de dano.

A relação de ensaios realizados encontra-se sintetizada na tabela 3.2. No ponto seguinte é efectuada uma descrição sumária do material, provetes, equipamentos e procedimentos experimentais utilizados. Na secção 3.4 é feita uma análise e discussão de resultados apresentando-se, finalmente, na secção 3.5 as principais conclusões.

Tabela 3.2 – Relação dos ensaios realizados.

<b>Tipo Ensaio</b>	<b>Nº ensaios</b>	<b>Objectivos</b>	<b>Variáveis Estudadas</b>	<b>Material</b>
Tracção Uniaxial	50	Propriedades monótonas	Influência da rugosidade	Alumínio e aço
	20	Propriedades monótonas	Influência da orientação da rugosidade	Alumínio e aço
	30	Propriedades monótonas	Influência do comprimento de sobreposição	Alumínio, aço e compósito

## 3.2 Materiais, Provetes, Equipamentos e Técnicas Experimentais

### 3.2.1 Materiais

Os materiais utilizados ao longo do trabalho experimental foram a liga de alumínio AlMgSil (DIN 6082) com tratamento térmico T6, o aço de elevada resistência

Docol 1000 é um compósito laminado carbono-epoxy. A opção de utilizar estes materiais no presente estudo deve-se ao facto de serem bastante atractivos para fins estruturais associados ao seu baixo peso. Deste modo consegue obter-se uma elevada resistência e rigidez específica.

Por exemplo, cerca de 80% da produção mundial de Alumínio na forma extrudida é feita com base nas ligas de alumínio da série 6XXX [36], cujos principais elementos de liga são o magnésio e o silício. As suas propriedades mecânicas revelam ser dependentes destes elementos, 0.6 a 1.2 % de magnésio e 0.4 a 1.3 % de silício [37], bem como da presença dos elementos de liga secundários; manganês, cobre e cromo.

Estas ligas revelam-se muito atractivas devido à sua resistência mecânica elevada, como resultado da precipitação do composto  $Mg_2Si$  por meio de tratamento térmico. Para além desta vantagem elas apresentam ainda boa conformabilidade, excelente resistência à corrosão, boa soldabilidade e bom comportamento mecânico a baixas temperaturas [38, 39]. Todavia apresentam resistência mecânica limitada a altas temperaturas [36], ao que, depois de soldadas, podem chegar a perder cerca de 50% da sua resistência face ao material após tratamento térmico [40]. Nesta sequência as juntas coladas revelam-se como uma possível alternativa.

Neste trabalho foi utilizada a liga de alumínio 6082-T6, já tratada termicamente. O tratamento T6 é um tratamento térmico composto pelas fases de solubilização, têmpera e envelhecimento artificial [36, 37]. A sua composição química encontra-se ilustrada na tabela 3.3; e na tabela 3.4 são apresentadas as propriedades mecânicas segundo a direcção de laminagem.

Tabela 3.3 – Composição química da liga 6082 (% em peso) [41, 42].

Si	Mg	Mn	Fe	Cr	Zn	Cu	Ti	Al
1.05	0.80	0.68	0.26	0.01	0.02	0.04	0.01	Resto

Tabela 3.4 – Propriedades mecânicas da liga 6082-T6 [36, 42].

Tensão de ruptura $\sigma_r$ [MPa]	Tensão de cedência $\sigma_c$ [MPa]	Módulo de Young E [GPa]	Alongamento de ruptura $\epsilon_r$ [%]	Coefficiente de Poisson $\nu$ [-]	Dureza Vickers HV <sub>50</sub> [kgf/mm <sup>2</sup> ]
300	245	74	9	0.32	100

Relativamente ao aço Docol 1000 a sua elevada resistência mecânica torna-o adequado a muitas aplicações industriais, associadas a enormes vantagens ambientais. Ao apresentarem elevadas tensões de cedência permite-lhes, deste modo, reduzir a espessura da chapa com a conseqüente redução de custos ao nível do fabrico, logística e funcionamento. Basta para isto pensar que se o peso de um produto diminuir teremos menos material necessário e, conseqüentemente, poupança de energia tanto na produção do aço como nas suas operações de transporte. Por outro lado em certas aplicações poderá reduzir os custos de funcionamento dos produtos (vagões, contentores, carroçarias, chassis, etc.) com particular incidência no consumo da energia e nas emissões de escape. Para além de ser 100% reciclável acresce ainda o facto deste aço ser pré-temperado, durante a sua produção, eliminando assim riscos ambientais bem como custos de aquecimento dos fornos de tratamento térmicos, após o fabrico das peças.

A composição química do aço de elevada resistência, Docol 1000, encontra-se ilustrada na tabela 3.5 e na tabela 3.6 as principais propriedades mecânicas, de acordo com o fornecedor.

Tabela 3.5 – Composição química do aço Docol 1000 (% em peso) [43].

C	Si	Mn	P	S	Nb	Al	Fe	Al
0.15	0.50	1.50	0.015	0.002	0.015	0.04	Resto	Resto

Tabela 3.6 – Propriedades mecânicas do aço Docol 1000.

Tensão de ruptura $\sigma_r$ [MPa]	Tensão de cedência $\sigma_c$ [MPa]	Módulo de Young E [GPa]	Alongamento de ruptura $\epsilon_r$ [%]	Coefficiente de Poisson $\nu$ [-]	Dureza Vickers HV <sub>50</sub> [kgf/mm <sup>2</sup> ]
1000	700	208	5	-	-

As suas propriedades são obtidas a partir de um recozimento a 750° C ao que se segue um endurecimento através de têmpera em água. Finalmente o aço adquire a sua estrutura final por revenido, onde este é aquecido entre os 200-400° C. Tanto o recozimento como o revenido são efectuados numa atmosfera controlada para evitar que

o aço se oxide. A sua micro-estrutura contém a fase martensítica, responsável pela dureza, e a ferrite, a fase mais macia, ao que a resistência do aço aumenta com o aumento da percentagem de martensite na micro-estrutura. A proporção de martensite é determinada pela percentagem de carbono no aço e pelo ciclo de temperaturas que é sujeito no processo de recozimento contínuo [43].

Finalmente o compósito carbono-epoxy foi manufacturado nos laboratórios do DEM/UBI. As placas foram processadas por autoclave a partir de pré-impregnados Texipreg HS 180 REMB from SEAL<sup>TM</sup> (Legnano, Italy) e de acordo com as recomendações do fabricante. O laminado foi obtido por empilhamento de oito lâminas de pré-impregnado com espessura de 0.15 mm e as fibras sempre dispostas na mesma direcção. Após o empilhamento colocou-se o compósito no interior de um saco devidamente fechado para se poder fazer vácuo. O ciclo de cura durou cerca de 2 horas e consistiu essencialmente no aquecimento, em auto-clave, até à temperatura de 125° C com uma velocidade de aquecimento de 3° C/min tendo sido, seguidamente, esta temperatura mantida constante durante 60 minutos. O arrefecimento foi efectuado à mesma velocidade até ser atingida a temperatura ambiente. De acordo com a ficha técnica do fornecedor cada lâmina de pré-impregnado é composta por fibras de carbono do tipo T300 e por resina epoxy na percentagem de  $36 \pm 3$  % em peso.

Para este trabalho foram obtidas placas com as dimensões de 240x200 mm e uma espessura de  $1 \pm 0.1$  mm, tendo o controlo de qualidade sido efectuado unicamente por inspecção visual.

A caracterização estática destes laminados foi efectuada a partir de ensaios de tracção, de acordo com a norma ISO standard [44], realizados numa máquina electromecânica da marca Instron, modelo 4206, à temperatura ambiente e com uma velocidade de deformação de 1 mm/min. Foram realizados quatro ensaios para a caracterização do material, encontrando-se duas curvas típicas ilustradas na figura 3.1.

Podemos observar que as curvas são praticamente lineares até à rotura e apresentam, em termos médios, uma tensão máxima de 568.3 MPa com um desvio padrão de 10.2 MPa. A rigidez média observada foi de 60.2 GPa com um desvio padrão de 0.7 GPa.

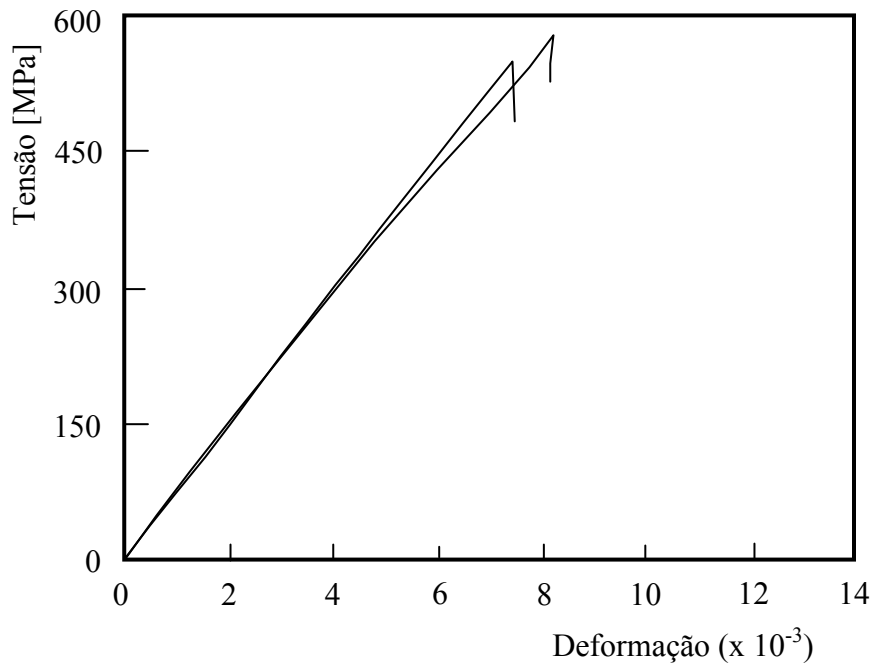


Figura 3.1 – Curvas típicas tensão deformação obtidas nos ensaios de tracção.

### 3.2.2 Provetes

Relativamente à geometria dos provetes utilizados nos ensaios experimentais ela encontra-se ilustrada na figura 3.2. Devido ao estudo envolver materiais compósitos foi seguida a norma ASTM D 5868-95 [45]. Apesar destes ensaios terem decorrido segundo os procedimentos descritos na referida norma, por uma questão de rentabilizar o material disponível utilizou-se  $20 \pm 0.5$  mm para a largura dos provetes, ao invés dos 25.4 mm aconselhados pela mesma. Semelhante geometria foi também encontrada na bibliografia [46]. Para eliminar o efeito da flexão nos provetes, devido ao desalinhamento provocado no aperto, foram ainda coladas placas de alumínio nas extremidades dos aderentes, com igual espessura.

Os provetes de carbono-epoxy foram manufacturados a partir das placas de 240x200 mm e espessura de  $1 \pm 0.1$  mm, fabricadas segundo o procedimento descrito no parágrafo anterior. Posteriormente, e com recurso a uma serra de corte com disco diamantado, as placas foram cortadas para as geometrias desejadas (100x20 mm). Houve um cuidado especial em evitar o aumento da temperatura nos provetes resultante

da maquinagem bem como a ocorrência de possíveis delaminações no compósito durante a preparação dos provetes.

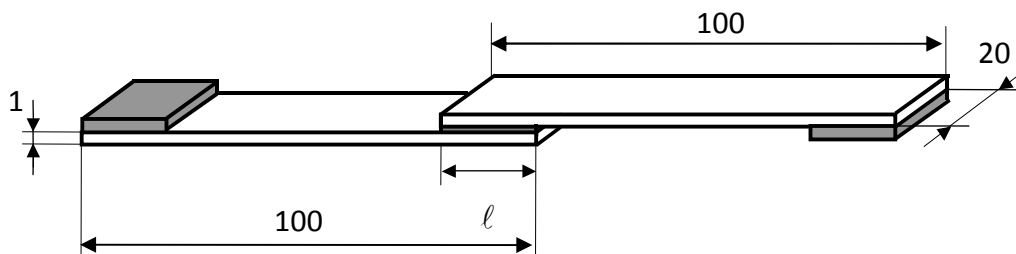


Figura 3.2 – Geometria dos provetes utilizados nos ensaios experimentais.

Por seu turno, os provetes com aderentes metálicos foram obtidos a partir de chapas com as dimensões de 1000x500x1 mm, gentilmente fornecidas pela SSAB e pelo DEM/FCTUC. Estas chapas foram cortadas com recurso a uma guilhotina e, posteriormente, a geometria final dos provetes (100x20 mm) obtida com recurso a uma fresadora. Esta última operação também tinha como função retirar as rebarbas produzidas durante a operação de corte.

Após a obtenção dos aderentes, e antes de serem colados, estes foram devidamente limpos com acetona. Foi utilizada uma cola epoxy Araldite 420A/B, cuja preparação consiste em misturar por cada 10 g de resina Araldite 420A, 4 g de endurecedor Araldite 420B. Para a sua pesagem é utilizada uma balança da marca OHAUS, modelo Analytical Plus, com uma precisão de 0.00001 g. Após a mistura destes dois componentes a cola é então aplicada nos aderentes. Por forma a ser atingida a sua máxima resistência, as juntas coladas são sujeitas, durante 4 horas, a uma temperatura de 50 °C. Neste processo foi utilizada uma mufla da marca Digiheat, modelo Selecta P.

Para o estudo do efeito da rugosidade efectuado no aço Docol 1000 foram utilizados provetes com a geometria ilustrada na figura 3.2 e com  $\ell = 25$  mm. Por seu lado, o mesmo estudo efectuado no alumínio 6082 T6 foi realizado com a mesma geometria, mas, neste caso, com um  $\ell = 20$  mm e uma espessura dos aderentes de 1.5 mm. Estas alterações resultam de se ter observado, em ensaios preliminares, a

ocorrência de deformação plástica nos aderentes para a geometria semelhante à utilizada nos ensaios do aço de elevada resistência.

As diferentes rugosidades foram produzidas por lixas P60, P100, P150, P220 e P400 cujo tamanho médio do abrasivo é de 269  $\mu\text{m}$ , 162  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 68  $\mu\text{m}$  e 35  $\mu\text{m}$ , respectivamente. A orientação dos sulcos produzidos pelas lixas também é estudado tendo, para isso, os aderentes sido lixados numa direcção perpendicular à da aplicação da carga, paralelamente à carga e aleatoriamente.

No que diz respeito ao efeito do comprimento de sobreposição, todos os provetes utilizados apresentavam a geometria da figura 3.2, com  $\ell = 12.5$  mm e  $\ell = 25$  mm, excepto nos que apresentassem aderentes de alumínio onde se utilizou apenas um  $\ell = 12.5$  mm. Mais uma vez esta medida foi limitada pela deformação plástica observada nos aderentes de 1 mm de espessura para valores de  $\ell$  superiores.

### 3.2.3 Equipamentos

Os ensaios de tracção uniaxial foram realizados numa máquina do tipo electromecânico, Instron modelo 4206, figura 3.3, com uma capacidade de carga de 100 kN e uma velocidade máxima do travessão de 500 mm/min.

Esta máquina é constituída por um motor que, através de um sistema de polias e correias, transmite o movimento a dois parafusos sem-fim. Estes, por seu turno, fazem movimentar verticalmente o travessão superior da máquina que, desta forma, aplica a carga ao provete a ensaiar. O controlo é feito por uma consola eléctrica de comando, a qual permite ainda a aquisição em tempo real dos sinais da carga, deslocamento do travessão e extensão do provete. Finalmente, os resultados podem ser registados numa impressora, ou adquiridos por uma porta interface IEEE-488 que possibilita a ligação da consola a um computador.

Os valores das rugosidades produzidas nos aderentes pelas diferentes lixas, utilizadas no presente estudo, foram obtidos com recurso ao equipamento laser Mahr RM600-3D, ilustrado na figura 3.4.

O sensor de distância óptico deste equipamento funciona com um laser de infravermelhos, cujo feixe é focado na amostra, ficando desta forma, sem qualquer tipo

de contacto com a superfície de fractura. A dimensão do spot e a resolução vertical deste equipamento são de  $1\ \mu\text{m}$  e  $0.01\ \mu\text{m}$ , respectivamente. O perfil de rugosidade foi obtido ao longo do comprimento da superfície tratada.

Antes da análise as amostras foram submetidas a uma limpeza por ultra-sons.



Figura 3.3 - Máquina electromecânica, Instron modelo 4206, utilizada nos ensaios de tracção.

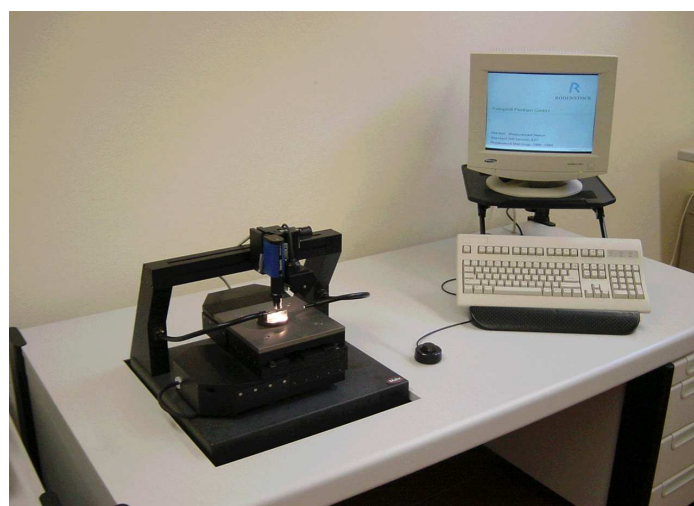


Figura 3.4 - Equipamento laser Mahr RM600-3D utilizado para obter os valores das rugosidades nos provetes.

### **3.2.4 Técnicas Experimentais**

As propriedades monótonas das juntas coladas foram obtidas através de ensaios de tracção uniaxial, realizados à temperatura ambiente e segundo o procedimento descrito na norma ASTM D 5868-95 [45]. A razão da utilização desta norma resulta do facto de ser usado um material compósito no presente estudo.

Os ensaios foram realizados numa máquina do tipo electromecânico da marca Instron, modelo 4206 (descrita em 3.2.3) e para uma velocidade de deslocamento da amarra de 1 mm/min. Os provetes utilizados apresentam a geometria descrita em 3.2.2. Para cada condição de ensaio foram usados cinco provetes, tendo sido os dados posteriormente tratados em função dos respectivos valores médios.

## **3.3 Análise de Resultados**

### **3.3.1 Estudo do efeito da rugosidade nos aderentes metálicos**

A preparação das superfícies a unir é uma forma de garantir o aumento da resistência mecânica da junta colada, onde, por exemplo, o efeito da rugosidade da superfície dos aderentes tem sido referido na bibliografia [47]. No presente estudo foi avaliado o efeito deste parâmetro nas juntas coladas sobrepostas simples com aderentes de alumínio 6082 T6 e aço Docol 1000, com vista a obter a sua máxima resistência ao corte. Para tal, foram usadas lixas com várias granulometrias, nomeadamente, P60, P100, P150, P220 e P400, às quais corresponde um tamanho médio do abrasivo de 269  $\mu\text{m}$ , 162  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 68  $\mu\text{m}$  e 35  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

Com vista a quantificar os sulcos produzidos pelas lixas nos aderentes, segundo a direcção perpendicular à carga, foram medidas as rugosidades com recurso ao equipamento laser Mahr RM600-3D, descrito em 3.2.3, e de acordo com a norma ISO 4288. A influência da rugosidade dos aderentes no comportamento mecânico das juntas coladas à tracção é apresentada na tabela 3.7, em função da carga média, da tensão de corte média e respectivo desvio padrão.  $R_a$  representa a média aritmética dos desvios do perfil de rugosidades em relação à linha média, dentro do comprimento de avaliação (no

presente estudo de 25 mm). É o parâmetro de medição mais utilizado na quantificação da rugosidade.

Tabela 3.7 – Resultados obtidos para as diferentes rugosidades produzidas.

Material	Tipo de lixa	R <sub>a</sub> [µm]	Des. Padrão	Carga Máx. [N]		Tensão de Corte [MPa]	
				Média	Desv. Padrão	Média	Desv. Padrão
Alumínio 6082 T6	P60	3.1	0.49	10312	758	18.88	1.51
	P100	2.5	0.41	10563	521	19.99	0.87
	P150	2.1	0.34	10873	248	20.37	0.51
	P220	1.6	0.28	10916	202	20.88	0.52
	P400	1.1	0.24	11089	627	21.12	0.46
Aço Docol 1000	P60	1.4	0.42	14228	740	25.88	0.63
	P100	0.9	0.39	13700	216	24.65	0.48
	P150	0.8	0.21	13794	537	24.47	0.62
	P220	0.7	0.24	13497	298	24.19	0.57
	P400	0.5	0.11	13280	283	23.84	0.53

Para os aderentes de alumínio podemos observar que à medida que a granulometria da lixa diminui (P cresce) menor é o valor médio de R<sub>a</sub>. Para a lixa P60 obtemos, por exemplo, um valor médio de R<sub>a</sub> igual a 3.1 µm, enquanto para P400 o valor médio é de 1.1 µm. Verificamos uma redução na ordem dos 64.5 % de R<sub>a</sub>, quando passamos da lixa P60 para a P400. Relativamente ao aço Docol 1000 assistimos à mesma tendência, contudo, para a lixa P60 o valor de R<sub>a</sub> é igual a 1.4 µm enquanto que para a lixa P400 é de 0.5 µm. Neste caso, a redução do valor de R<sub>a</sub> é de 64.3 %, muito semelhante ao observado para o alumínio. Por outro lado podemos também observar, e por exemplo para a lixa P60, que enquanto o valor de R<sub>a</sub> é igual a 3.1 µm no alumínio, no caso do aço é de 1.4 µm. Esta diferença, de 54.8 %, resulta do alumínio deixar-se riscar mais facilmente pela lixa que o aço Docol 1000, em igual critério de procedimento.

Na figura 3.5 encontra-se representada a evolução da tensão de corte média face às rugosidades obtidas. Este efeito é ilustrado em função do parâmetro de rugosidade R<sub>a</sub>, normalizado com o correspondente valor obtido para o abrasivo P400, respectivamente, 1.1 para o alumínio 6082 T6 e 0.5 para o aço Docol 1000.

Podemos observar, apesar da dispersão, que a resistência ao corte da junta colada aumenta com a rugosidade, no caso dos aderentes de aço. Esta tendência conduz a diferenças da tensão de corte média na ordem dos 7.9 % entre os valores obtidos com lixas P60 e P400. Este comportamento seria de esperar, pois uma maior rugosidade

conduz a um aumento do comprimento da linha efectiva e, conseqüentemente, da área efectiva de colagem. Desta forma, é possível concluir que o valor da rugosidade máxima obtida a partir das lixas P60 ( $R_a = 1.4 \mu\text{m}$ ) é a que conduz a tensões de corte mais altas para juntas coladas sobrepostas simples com aderentes em aço Docol 1000.

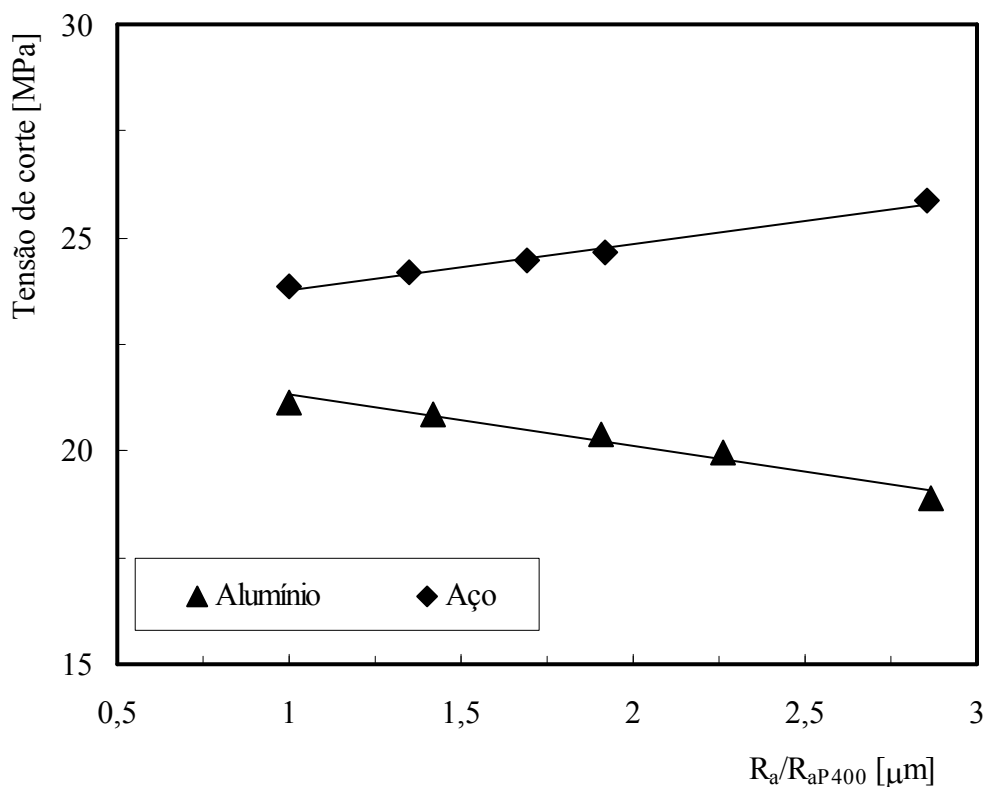


Figura 3.5 – Evolução da tensão de corte média com a rugosidade.

Por seu lado o efeito observado para os aderentes de alumínio é o inverso, onde a resistência ao corte da junta colada aumenta com a diminuição da rugosidade. Neste caso verificamos uma diferença na ordem dos 10,6 % quando se comparam os valores obtidos com as lixas P60 e P400. Podemos assim concluir que o valor da rugosidade máxima obtida a partir das lixas P400 ( $R_a = 1.1 \mu\text{m}$ ) é a que conduz a tensões de corte mais altas para juntas coladas sobrepostas simples com aderentes em alumínio 6082 T6. Neste caso, o aumento da área efectiva de colagem não se revela benéfica na resistência mecânica da junta.

O estudo da orientação dos sulcos produzidos pelas lixas nos aderentes também foi estudado com vista a averiguar se apresenta qualquer influência na resistência mecânica das juntas coladas. Assim, na tabela 3.8 encontram-se representadas as cargas

máximas e tensões de corte máximas obtidas para cada uma das orientações estudadas. Os sulcos foram produzidos por lixas P400 (com  $R_a$  igual a  $1.1 \mu\text{m}$ ) no caso do alumínio 6082 T6 e por lixas P220 (com  $R_a$  igual a  $0.7 \mu\text{m}$ ) no caso do aço Docol 1000 segundo as orientações perpendiculares à aplicação da carga, paralela à carga e aleatória.

Tabela 3.8 – Resultados obtidos para as diferentes orientações de rugosidades.

Material	Tipo De lixa	Orientação das Rugosidades	Carga Máx. [N]		Tensão de Corte [MPa]	
			Média	Desv. Padrão	Média	Desv. Padrão
Alumínio 6082 T6	P400	Perpendicular	11089	627	21.12	0.46
		Paralela	11077	90	20.71	0.42
		Aleatória	11192	97	21.14	0.21
Aço Docol 1000	P220	Perpendicular	13497	298	24.19	0.57
		Paralela	13546	299	24.22	0.66
		Aleatória	13280	283	24.26	0.3

Podemos observar que a tensão de corte média, no caso do alumínio 6082 T6, obtida para cada uma das condições estudadas é muito semelhante, na ordem dos 21 MPa, o que nos leva, assim, a concluir que a orientação do polimento não se revela importante na resistência mecânica das juntas coladas em condições de carregamento estático. A mesma conclusão é observada para o caso do aço Docol 1000, dado que não se evidencia qualquer influência da resistência mecânica da junta. Neste caso o valor médio da tensão de corte da junta é da ordem dos 24 MPa.

### 3.3.2 Estudo do efeito da rigidez dos aderentes

Como já foi referido anteriormente são vários os factores que influenciam as distribuições de tensões nas juntas coladas. Vinson [26] e Thompson [27], por exemplo, observaram que o aumento da rigidez dos aderentes conduz a uma maior resistência da junta à flexão, o que desta forma não só diminui as concentrações de tensões junto das extremidades da sobreposição (onde os seus valores são mais altos) como também, por consequência, aumenta a resistência mecânica da junta. Sawa *et al* [48] e Liu *et al* [49] observaram, por seu lado, que no caso dos aderentes apresentarem valores de rigidez

diferentes, as componentes das tensões  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  nas extremidades da sobreposição aumentam à medida que o quociente  $E_3/E_1$  diminui (onde  $E_1$  e  $E_3$  são a rigidez do aderente superior e inferior, respectivamente).

Neste trabalho também foi estudado o efeito da rigidez dos aderentes nas juntas coladas sobrepostas simples. Para tal realizaram-se ensaios de tracção em juntas coladas, de acordo com o procedimento experimental descrito 3.2.4, entre aderentes de aço Docol 1000, alumínio 6082 T6 e compósito carbono/epoxy. O comprimento de colagem usado foi de 12.5 mm e os resultados foram comparados com os obtidos para pares de aderentes do mesmo material já mencionado.

Nas tabelas 3.9 a 3.14 encontram-se representadas as cargas máximas, tensão de corte máxima, valores médios da tensão de corte máxima e respectivo desvio padrão, para cada um dos pares de aderentes estudados.

Podemos observar que, para as diferentes juntas coladas, aquela que apresenta menor resistência mecânica ocorre entre aderentes de compósitos de carbono/epoxy, com 18.21 MPa, e a resistência mais alta entre aderentes de aço, com 24.17 MPa.

Tabela 3.9 – Resultados obtidos para juntas coladas com aderentes em alumínio 6082 T6 e tratados com lixa P400 (comprimento de sobreposição de 12.5 mm).

Ref <sup>o</sup> Provete	Carga Máx. [N]	Tensão de Corte [MPa]		
		Máxima	Média	Des. Padrão
Al Al 12.5 1	3747.60	21.23	20.24	1.99
Al Al 12.5 2	3653.64	22.53		
Al Al 12.5 3	4421.09	19.01		
Al Al 12.5 4	4730.14	18.20		
Al Al 12.5 5	4012.78	20.24		

Tabela 3.10 – Resultados obtidos para juntas coladas com aderentes em aço Docol 1000 e tratados com lixa P60 (comprimento de sobreposição de 12.5 mm).

Ref <sup>o</sup> Provete	Carga Máx. [N]	Tensão de Corte [MPa]		
		Máxima	Média	Des. Padrão
D D 12.5 1	5895.22	23.06	24.17	0.88
D D 12.5 2	6671.05	24.42		
D D 12.5 3	6969.03	25.40		
D D 12.5 4	6880.44	24.33		
D D 12.5 5	6569.04	23.64		

Tabela 3.11 – Resultados obtidos para juntas coladas com aderentes em compósito carbono/epoxy (comprimento de sobreposição de 12.5 mm).

Ref <sup>a</sup> Provete	Carga Máx. [N]	Tensão de Corte [MPa]		
		Máxima	Média	Des. Padrão
C_C_12.5_1	3948.94	18.06	18.21	1.61
C_C_12.5_2	3165.06	16.68		
C_C_12.5_3	4668.39	19.88		
C_C_12.5_4	3927.44	17.92		
C_C_12.5_5	4312.52	18.51		

Tabela 3.12 – Resultados obtidos para juntas coladas com aderentes em aço Docol 1000 e compósito carbono/epoxy (aço tratado com lixa P60 e comprimento de sobreposição de 12.5 mm).

Ref <sup>a</sup> Provete	Carga Máx. [N]	Tensão de Corte [MPa]		
		Máxima	Média	Des. Padrão
D_C_12.5_1	4773.09	18.34	21.49	2.74
D_C_12.5_2	7114.00	23.33		
D_C_12.5_3	6021.39	22.80		
D_C_12.5_4	5689.12	21.98		
D_C_12.5_5	5106.78	20.99		

Tabela 3.13 – Resultados obtidos para juntas coladas com aderentes em aço Docol 1000 e alumínio 6082 T6 (aço Docol 1000 tratado com lixa P60 e alumínio 6082 T6 com lixa P400, comprimento de sobreposição de 12.5 mm).

Ref <sup>a</sup> Provete	Carga Máx. [N]	Tensão de Corte [MPa]		
		Máxima	Média	Des. Padrão
D_Al_12.5_1	4606.65	20.04	21.59	1.36
D_Al_12.5_2	5191.87	22.14		
D_Al_12.5_3	4961.01	22.58		
D_Al_12.5_4	4712.05	21.2		
D_Al_12.5_5	4584.23	21.98		

Tabela 3.14 – Resultados obtidos para juntas coladas com aderentes em alumínio 6082 T6 e compósito carbono/epoxy (alumínio 6082 T6 tratado com lixa P400, comprimento de sobreposição de 12.5 mm).

Ref <sup>a</sup> Provete	Carga Máx. [N]	Tensão de Corte [MPa]		
		Máxima	Média	Des. Padrão
C_Al_12.5_1	4088.53	18.02	18.56	1.84
C_Al_12.5_2	4499.27	18.51		
C_Al_12.5_3	4091.22	16.02		
C_Al_12.5_4	5194.56	19.16		
C_Al_12.5_5	4872.42	21.11		

Esta diferença de 24.65 % resulta da diferença de rigidez dos aderentes que, de acordo com 3.2.1, é de 208 GPa para o aço e 60.2 GPa para o compósito carbono/epoxy. A resistência mecânica da junta colada entre aderentes de alumínio é da ordem dos 20.24 MPa.

Quando combinamos os aderentes verificamos que os pares que envolvem o aço Docol 1000 são os que conduzem a juntas com resistências mecânicas mais elevadas. Por exemplo as juntas aço-alumínio e aço-compósito apresentam uma resistência muito semelhante, na ordem dos 21.59 MPa e 21.49 MPa, respectivamente. Contudo, comparando estes valores com os obtidos para a resistência mecânica da junta aço-aço, eles são 11.1 % mais baixos. Quanto ao par alumínio-compósito ele apresenta um valor ligeiramente superior à junta compósito/compósito e 8.3 % inferior à junta alumínio-alumínio.

### **3.3.3 Estudo do efeito do comprimento de sobreposição**

Outro parâmetro que influencia a resistência mecânica das juntas coladas é o comprimento de sobreposição. Existe um valor ideal, o qual é função da cola e dos aderentes [18]. Este comprimento conduz à melhor distribuição de tensões, ou seja, aos menores valores das concentrações de tensões que ocorrem na junta [29-31].

No presente estudo este parâmetro foi analisado para os aderentes de aço e compósito, com valores de comprimentos de sobreposição de 12.5 mm e 25 mm. Não foram usados aderentes de alumínio dado que eles apresentam plastificação significativa, para a espessura de 1mm, nos comprimentos de sobreposição de 25 mm.

Nas tabelas 3.15 a 3.17 encontram-se representadas as cargas máximas, tensão de corte máxima, valores médios da tensão de corte máxima e respectivo desvio padrão, para cada um dos comprimentos de sobreposição estudados.

Verifica-se que o comprimento de sobreposição, como é referenciado na bibliografia, depende da associação cola aderente. Por exemplo, para os aderentes de aço o aumento do comprimento de sobreposição de 12.5 mm para 25 mm conduz a um aumento da resistência mecânica da junta colada na ordem dos 6.6 %. Este aumento, a nível de projecto, torna-se bastante vantajoso já que permite o uso de maiores cargas

aplicadas. No entanto, quando se compara os resultados obtidos para os comprimentos de 12.5 mm e 25 mm nas juntas coladas aço-compósito e compósito-compósito verifica-se que este aumento se traduz numa diminuição da resistência mecânica da junta colada.

Esta diminuição que atinge os 10.9 % nas juntas aço-compósito e os 7.5 % nas juntas coladas entre aderentes de compósito-compósito reflectem que o aumento do comprimento de sobreposição piora a distribuição de tensões na junta.

Uma vez que a cola usada foi sempre a mesma fica aqui presente, da análise das tabelas, que os aderentes apresentam uma grade influência na determinação do comprimento de sobreposição ideal.

Tabela 3.15 – Resultados obtidos para juntas coladas com aderentes em aço Docol 1000 e comprimentos de sobreposição de 12.5 mm e 25 mm (tratados com lixa P60).

Refª Provete	Comprimento de sobreposição [mm]	Carga Máx. [N]	Tensão de Corte [MPa]		
			Máxima	Média	Des. Padrão
D D 12.5 1	12.5	5895.22	23.06	24.17	0.88
D D 12.5 2		6671.05	24.42		
D D 12.5 3		6969.03	25.40		
D D 12.5 4		6880.44	24.33		
D D 12.5 5		6569.04	23.64		
D D 25 1	25	14023.98	25.63	25.88	0.63
D D 25 2		15306.84	26.83		
D D 25 3		13599.82	25.35		
D D 25 4		13905.86	25.38		
D D 25 5		14104.51	26.22		

Tabela 3.16 – Resultados obtidos para juntas coladas com aderentes em aço Docol 1000 e compósitos carbono/epoxy para comprimentos de sobreposição de 12.5 mm e 25 mm (aços tratados com lixa P60).

Refª Provete	Comprimento de sobreposição [mm]	Carga Máx. [N]	Tensão de Corte [MPa]		
			Máxima	Média	Des. Padrão
D C 12.5 1	12.5	4773.09	18.34	21.49	2.74
D C 12.5 2		7114.00	23.33		
D C 12.5 3		6021.39	22.80		
D C 12.5 4		5689.12	21.98		
D C 12.5 5		5106.78	20.99		
D C 25 1	25	11731.39	19.08	19.14	0.08
D C 25 2		12429.37	19.21		
D C 25 3		12483.06	19.24		
D C 25 4		12257.56	19.12		
D C 25 5		10772.01	19.06		

Tabela 3.17 – Resultados obtidos para juntas coladas com aderentes em compósitos carbono/epoxy para comprimentos de sobreposição de 12.5 mm e 25 mm.

Ref <sup>a</sup> Provete	Comprimento de sobreposição [mm]	Carga Máx. [N]	Tensão de Corte [MPa]		
			Máxima	Média	Des. Padrão
Al Al 12.5 1	12.5	3747.60	21.23	20.24	1.99
Al Al 12.5 2		3653.64	22.53		
Al Al 12.5 3		4421.09	19.01		
Al Al 12.5 4		4730.14	18.20		
Al Al 12.5 5		4012.78	20.24		
Al Al 25 1	25	9344.84	19.70	18.72	1.42
Al Al 25 2		8042.85	16.58		
Al Al 25 3		7825.40	18.14		
Al Al 25 4		9210.62	20.17		
Al Al 25 5		8923.37	18.99		

### 3.4 Conclusões

Podemos tirar algumas conclusões deste estudo. No que diz respeito aos aderentes metálicos a direcção do polimento não apresenta qualquer efeito na resistência mecânica de juntas coladas sobrepostas simples, em condições de carregamento estático, ao contrário do tipo de lixa usada. Neste caso, dependendo do valor de granulometria da lixa usada os valores de tensão de corte variam, podendo-se mesmo dizer que existem valores ideais de rugosidades para cada tipo de aderente metálico.

Verifica-se também que a rigidez dos aderentes apresentam influência na resistência mecânica das juntas coladas. O estudo leva-nos a dizer que o aumento da rigidez dos aderentes se traduz numa maior resistência. Esta tendência é bem visível nos valores obtidos para as juntas aço-compósito, aço-alumínio e aço-aço, onde o aumento da rigidez dos aderentes leva a um aumento da resistência mecânica das juntas (21.49 MPa, 21.59 MPa e 24.17 MPa, respectivamente).

Finalmente foi observado que o comprimento de sobreposição ideal depende da associação cola/aderentes. O estudo revelou, por exemplo, que um aumento de 12.5 mm para 25 mm nas juntas aço-aço conduz a uma maior resistência mecânica enquanto que nas juntas coladas aço-compósito e compósito-compósito a resistência diminuiu.