

## Conceitos fundamentais, dimensionamento e resistência das ligações aparafusadas em alumínio e compósitos FRP

Adelino Trindade <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Politécnico de Viseu, Portugal. Email: atrind@estgv.ipv.pt

### Resumo

As ligas de alumínio apresentam bom aspeto visual, fácil processamento e excelentes propriedades: alta relação resistência-peso, boa resistência à corrosão, etc. que estão na origem de um elevado crescimento nas aplicações estruturais e em órgãos de máquinas. Por algumas dessas razões, alguns compósitos também se evidenciaram. A crescente opção pelo uso destes materiais ou, ainda, em juntas dissimilares requer boas ligações aparafusadas. Os parafusos de aço inoxidável são, em geral, de boa compatibilidade com a maioria destes, embora haja soluções complementares que tenham de ser adotadas, conforme a exigência. Neste estudo optou-se por parafusos de aço inoxidável em juntas simples de alumínio, de CFRP e dissimilares. Considerando pré-esforço e disposições de parafusos M6, fez-se uma análise da resistência em juntas sobrepostas. Um segundo estudo, com parafusos M8, teve objetivos em termos de: - resistência de ligações Al-Al, CFRP-CFRP e Al-CFRP; - efeito de tamanho; localização dos limites de resistência calculados pelo EC9. Sobretudo, o estudo vai ao encontro desse objetivo, com especial referências às normas europeias e à sua divulgação.

**Palavras-chave:** Ligações, aparafusadas, Eurocódigo 9, A2-70, alumínio, CFRP, dissemelhantes, esmagamento, rotura.

### Abstract

Aluminium alloys are visually pleasing, easy to process and have excellent properties: high strength-to-weight ratio, good corrosion resistance, etc. which have led to high growth in structural applications and machine parts. For some of these reasons, some composites have also come to the fore. The growing choice of using these materials or even dissimilar joints requires good bolted connections. Stainless steel bolts are generally well compatible with most of these, although there are complementary solutions that have to be adopted, depending on the requirement. This study opted for stainless steel bolts in simple aluminium, CFRP and dissimilar joints. Considering preloading and M6 bolt arrangements, the strength of overlapping joints was analysed. A second study, with M8 bolts, had objectives in terms of: - strength of Al-Al, CFRP-CFRP and Al-CFRP connections; - size effect; localisation of strength limits calculated by EC9. Above all, the study meets this objective, with special reference to European standards and their dissemination.

**Keywords:** Bolted connections, A2-70, aluminium, Eurocode 9, CFRP, dissimilar, bearing, rupture.

### 1. Introdução

O alumínio é de elevada importância entre os metais na construção de estruturas ou no fabrico de componentes de mecanismos [1 - 5]. A seguir ao aço, tem-se vindo a acentuar a sua implementação desde algumas décadas. Isto é devido à sua boa relação entre a resistência e peso

específico, ao bom comportamento na maioria dos ambientes corrosivos e à boa adaptabilidade por diversos processos de fabrico, sobretudo pelos processos de conformação plástica e até pela soldadura [6, 7].

À medida que os compósitos de fibras de carbono reforçadas em matriz polimérica (CFRP) são cada vez

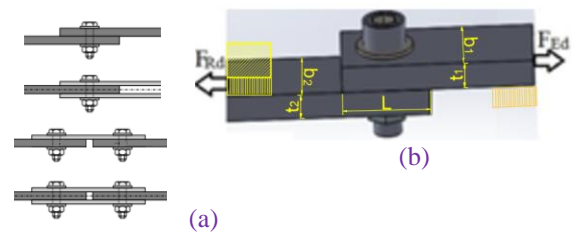
mais aplicados em estruturas de aeronaves, a investigação tem aumentado significativamente. Estes compósitos são de elevada resistência à tração combinada com baixa densidade, o que faz deles de grande importância na construção aeronáutica. A incidência recai sobre a resistência mecânica e à fissuração e estas tornaram-se essenciais para o projeto de estruturas de compósitos. São possíveis boas características de isotropia devido à orientação das muitas fibras no direções no compósito. Pode haver falhas de delaminação ou microfissuração na matriz polimérica, o que pode causar uma complexidade de efeitos que podem conduzir a falhas catastróficas. A solução para estes problemas depende de muitos fatores, que começa no número de fibras por fio, da disposição das fibras, da espessura de cada e do número de camadas no compósito do tipo sanduiche, mas também do tamanho e disposição das fissuras. Particularmente, nas zonas de ligação, é importante a investigação minuciosa dos efeitos desses fatores para que seja garantida boa integridade.

Além da construção aeronáutica, a aposta destes materiais compósitos, como um concorrente do alumínio, a maior parte faz-se nas áreas da construção de infraestruturas e dos transportes, elétricas e equipamentos desportivos [8], da energia eólica e outros. Esta diversificação traz novos desafios ao uso destes materiais e dos processos de fabrico, particularmente das tecnologias das ligações mecânicas [9].

O número de estruturas híbridas em componentes estruturais produzidas de metal e compósitos tem vindo a aumentar. Os compósitos referidos e ligas de alumínio estão entres os híbridos mais comuns devido às propriedades referidas ou outras, mas também por mecanismos de falha e fratura, grau de plasticidade, em resposta a diferentes tipos de carregamento, isto é, tensão versus compressão. Enfim, todas essas capacidades e a resistência ao impacto e à fadiga, bem como outras propriedades, sem esquecer o seu peso específico, estão na razão desse aumento, [10].

As ligações desmontáveis são muito utilizadas devido à possibilidade de refazer a ligação e de substituir componentes sempre que for necessário. O tipo de junta sobreposta simples é o modo mais comum de ligação, embora haja outras possibilidades: - sobreposta dupla, com recobrimento simples e duplo, respetivamente apresentadas na Figura 1 (a). Os parafusos de cabeça sextavada (HC) e os do tipo *umbrako* (CHC), porcas também sextavadas e anilhas são os elementos complementares de ligação normalmente usados.

A folga em redor do parafuso é fundamental para facilitar a sua montagem e assegurar que não haja danos nos seus boleados e arestas no furo dos materiais, [11], mas origina alguma incerteza na posição relativa entre eles, aquando do aperto da porca.



**Figura 1.** Tipos de juntas (a) com realce à sobreposta simples com um parafuso (b) e placas de sobreposição esquematizadas. Fonte: elaboração própria.

A seleção e dimensionamento dos parafusos para ligações de peças ou de placas de alumínio, de compósitos ou mistos (dissemelhantes) passa pela utilização das normas de projeto EN 1999.1.1 [12] e de execução EN 1090-3 [13]. Nos casos das ligações entre Al-Al, CFRP-CFRP e Al-CFRP há também o condicionamento à utilização de parafusos constituídos de metal compatível com os problemas típicos entre os materiais envolvidos, particularmente a resistência à corrosão.

Os parafusos de alumínio podiam ser uma boa opção na ligação destes metais, por diversas razões, [14, 15], como boa resistência à corrosão. No entanto, ainda têm comercialização insignificante e, na ligação de compósitos CFRP, podem desenvolver corrosão galvânica severa [16, 17]. Este tipo de incompatibilidades, que não são exclusivas destes materiais, onde se inclui o aço, tem de ser considerado na constituição das juntas e na seleção dos parafusos mais adequados para as ligações. Os parafusos de aço podem ser usados se for evitado o contacto superficial com as peças, por via dum revestimento ou outro tipo de isolamento. Além do risco, garantir o isolamento apresenta uma tarefa adicional. Os de aço inoxidável são os mais comuns e referenciados pelas normas EN ISO 3506-1 [18]. A sua designação é, genericamente, do tipo Ax-yy, ver Tabela 1, onde com o A (austenítico) são os mais comuns, embora possam ser F (ferrítico) ou C (martensítico), o x designa o grupo e classe de material e o yy é o valor de resistência última ( $f_{ub}$ ) dividida por 10 (do mesmo modo que na classe 8.8 nos parafusos de aço, por exemplo) [18]. Os parafusos de alumínio lacados não estão ainda muito difundidos e comercializados. Na construção de aeronaves, os parafusos são de aço resistente à corrosão, inoxidável ou aço resistente revestido com cádmio ou zinco ou de ligas de alumínio anodizado ou de titânio [19].

A utilização de parafusos parcialmente roscados é conveniente e que o seu liso (parte não roscada) suporte as reações de corte e de esmagamento, norma 1090-3 [13]. Consequentemente, as ligações aparafusadas de chapas finas apresentam algumas dificuldades devido ao comprimento da parte não roscada ser, em geral, maior que a soma das espessuras das peças a ligar.

**Tabela 1.** Designação e propriedades dos parafusos de aço inoxidável austenítico [18].

Grupo e classe	$\approx f_{ub}/10$	$f_0$ (MPa)	$f_{ub}$ (MPa)
A1, A2, A3, A4, A5	50	210	500
	70	450	700
	80	600	800

Fonte: elaboração própria

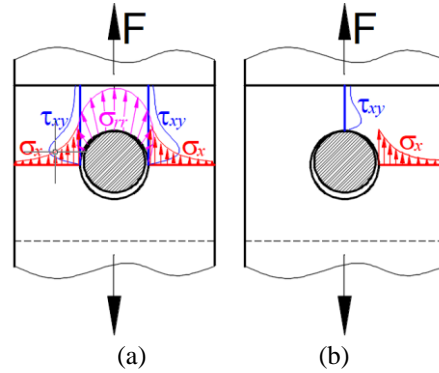
Até a um certo valor de carregamento, a resistência ao escorregamento poupa o parafuso ao corte e à ação dinâmica. Com isto, há uma contribuição adicional para a resistência segundo a sua linha de ação no plano de corte. A ideia é dispor de parafusos compatíveis com os materiais das juntas de modo que se possa aplicar pré-esforço sem introdução de danos, escoriações no corpo e filetes da rosca, durante o aparafusamento e sem inconvenientes adicionais de resistência. O projeto Siroco [20] está a desenvolver um procedimento para o uso mais adequado do pré-esforço com lubrificante adequado no aperto de parafusos de diversos aços inoxidáveis, considerando a perda de pré-carga devido à fluência e relaxamento. O pré-esforço no parafuso incrementa a rigidez da junta e garante que o contato entre superfícies seja mais uniforme e com valores de tensão mais baixos, que melhoram quer a resistência inicial quer à fadiga da ligação [21]. Nas ligações aparafusadas em juntas de ligas de alumínio verifica-se uma relaxação do aperto, o que justifica o uso de pré-esforço [22 - 24].

Os modos de falha dependem da combinação das distribuições de tensões normais  $\sigma_x$ , de corte  $\tau_{xy}$  e radiais  $\sigma_{rr}$ , Figura 2 (a) ou rotura em bloco, Figura 2 (b) [25, 26]. No entanto, em compósitos de CFRP, estes valores ainda variam segunda a direção da espessura, onde a folga entre o parafuso e o furo tem influência no campo não uniforme de tensão no interior do laminado [9].

Em [27] é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o pré-esforço nos parafusos em ligações de compósitos de fibra e da sua relaxação em vários meios. O uso do pré-esforço tem vantagens na rigidez e resistência e deve constituir um guia adequado para investigadores e engenheiros que procuram novas soluções para melhorar o desempenho de metais compósitos e juntas aparafusadas compostas.

Um dos primeiros objetivos definidos com este trabalho foi de contribuir com resultados válidos obtidos da caracterização experimental do desempenho de juntas aparafusadas no alumínio e no CFRP.

Planeou-se a sua análise isolada (Al - Al) e conjuntamente com materiais dissemelhantes (Al - CFRP), usando-se ensaios de tração e análise microscópica. Foram consideradas as ações dos


**Figura 2.** Modos de distribuições de tensões nas falhas das juntas (a): - à tração (a vermelho), - ao corte (a azul), - compressão local, esmagamento (a magenta); (b) rotura em bloco (misto: tração e corte). Fonte: elaboração própria.

parafusos com pré-esforço, sujeitos ao corte em juntas sobrepostas simples. Foram analisadas quanto ao modo de cedência predominante em diversas distribuições, em número e configurações, quer dos parafusos por si, quer das categorias das juntas aparafusadas: - esmagamento - A (*bearing mode*); - resistência ao deslizamento - B (*slip resistente at serviceability*); C (*slip resistente at ultimate*) [4, 5], mas também pode haver falha por rotura em bloco na junta (*block tearing*).

A consideração do uso de pré-esforço implica a verificação da resistência ao escorregamento contrariado pelo atrito que, segundo o EC9, seria calculada pela equação (1)

$$F_{s,Rd} = \frac{n \mu}{\gamma_{Ms}} F_{p,C}, \quad (1)$$

$$\text{onde } F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s. \quad (2)$$

Em (1) e (2),  $n$  é número de superfícies de contacto,  $\mu$  é o coeficiente de atrito e  $A_s$  é a área de secção resistente do parafuso. A aplicação do pré-esforço foi baseada na equação (3) e dados tabelados.

$$T = k d F_{p,C}, \quad (3)$$

onde  $k$  é o coeficiente do binário de aperto e  $d$  é o diâmetro do parafuso. O coeficiente de atrito, quando uma superfície metálica contaminada desliza sobre a outra situa-se na gama entre 0,1 a 0,3, segundo Rabinowicz [28]. O óxido ( $Al_2O_3$ ) é o principal contaminante no contacto em Al-Al a seco, sendo  $\mu = 0,21$  um valor aceitável [29].

A avaliação da resistência ao esmagamento, segundo o EC9, é calculada pela equação (4)

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_{ud} t}{\gamma_{M2}}, \quad (4)$$

onde  $k_1 = \min[2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5]$  e  $\alpha_b = \min[\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0]$  para parafusos de extremidade, onde  $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}$ .

A avaliação da resistência em bloco é, segundo o EC9 e em carregamento concêntrico, equação (5), sendo o segundo termo nulo quando há rotura líquida devido a  $\sigma_x$ , ou seja, sem a componente de corte  $\tau_{xy}$  da figura 1.

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_0 A_{nv}}{\sqrt{3}\gamma_{M1}}, \quad (5)$$

Uma das principais inovações deste estudo é de utilizar estas relações do EC9 e comparar os resultados com os da análise experimental.

## 2. Metodologia

O método utilizado é da avaliação da resistência das juntas de ligação, estudando a importância de cada uma nos resultados. Os parafusos são intencionalmente mais resistentes para não serem os responsáveis pela cedência. Por outro lado, pretende-se a confrontação dos resultados com os analíticos do EC9. Com estes objetivos, foram reunidas as condições que se a seguir se apresentam.

### 2.1. Materiais e métodos

Os materiais constituintes dos provetes são de liga de alumínio EN AW 6061 e compósitos de fibra de carbono CFRP, explorando-se as suas combinações. A incompatibilidade existente entre os materiais a ligar e o constituinte dos parafusos, para prevenir corrosão ou outros efeitos, exige uma seleção cuidadosa. Neste trabalho, escolheram-se parafusos da classe A2-70 por serem os mais comuns de aço inoxidável e de grande disponibilidade no mercado e por apresentarem uma resistência média pouco abaixo da classe mais comum dos de aço, a 8.8. Especificamente, os parafusos usados neste estudo apresentavam as designações ISO 4017 M6×20 A2-70, ISO 4762 M6×35×24 A2-70 e ISO 4762 M8×40×28 A2-70, cada um com a respetiva porca ISO 4032 M6 A2-70 ou ISO 4032 M8 A2-70 e 2 anilhas ISO 7089 M6 A2 ou ISO 7089 M8 A2. A dificuldade em obter parafusos curtos parcialmente roscados para fazer as ligações de chapas finas, com o plano de corte a situar-se no liso, foi ultrapassada com o uso de parafusos *umbrako*. Cumpre-se, assim, os

requisitos dos espaçamentos entre parafusos e destes às extremidades das barras, segundo a EC9, são apresentados na Figura 3. A alternativa levaria a ter provetes de maiores dimensões ou usar parafusos totalmente roscados, de cabeça sextavada.

### 2.2. Equipamentos e métodos

A primeira fase do planeamento do trabalho experimental, seguiu os requisitos mínimos do dimensionamento segundo o EC9. Fez-se com recurso a CAD e a furação foi efetuada numa fresadora CNC para garantir maior precisão de posicionamento e de diâmetros dos próprios furos. Os desenhos da Figura 3 apresentam as dimensões de planeamento das peças constituintes dos provetes. Os provetes de alumínio (A, B, C, D e E) foram constituídos a partir de barra de secção 3×50 (mm).

O compósito CFRP utilizado era um laminado de 5 camadas (T300) 3k (adquirido na marca Laitehm) na forma de barra de secção 3×24 (mm). Neste, os feixes de fibras são tecidos bidireccionalmente e perpendiculares entre si, do tipo sarja (*twill weave*) [30, 31]. Cada feixe é constituído por nano fibras de carbono agrupadas em 3k (k - milhares) unidades.

As ligações entre componentes de material compósito apresentam algumas dificuldades, quer ao nível do material da matriz quer em termos das fibras que o constituem. Nos componentes de CFRP, a furação foi efetuada cuidadosamente com pré-furos e apoiada em placas de sacrifício, evitando danos nas fibras e matriz dos compósitos. Para reduzir as forças de corte, efetuaram-se pré-furos de 3 mm de diâmetro, seguindo-se os finais com  $d_0=9$  mm, com velocidades de corte de  $v_c=23,5$  m/min e  $v_c=33,9$  m/min, respetivamente e ambos com velocidade de avanço  $v_a=0,1$  m/min. Este método funcionou na perfeição, não havendo qualquer indício de delaminação ou dano na resina, como pode ser visto na foto da Figura 4. Isto, verificou-se em todos os furos efetuados.

O aparafusamento foi efetuado com aperto com pré-esforço  $F_{p,c}$  (1), que correspondeu a usar valores de binário de aperto  $T=10$  N.m e  $T=24$  N.m, nos parafusos A2-70 M6 [32] e M8, respetivamente, consultados em [33].

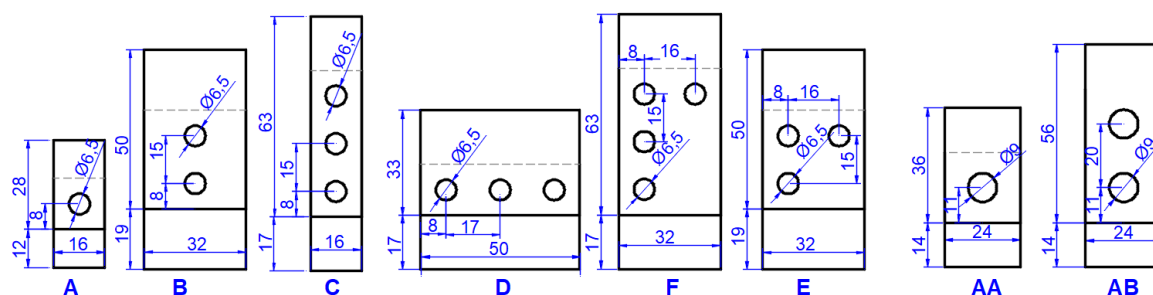
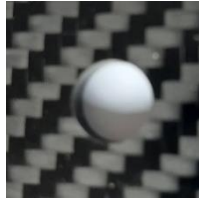


Figura 3. Desenhos dos componentes dos provetes dos estudos: 1º - A – E; - 2º - AA e AB. Fonte: elaboração própria.





**Figura 4.** Exemplo de um furo efetuado no compósito CFRP, sem delaminação. Fonte: elaboração própria.

A Tabela 2 resume os valores considerados e as Figuras 5 e 6 apresentam fotografias dos provetes dos dois estudos, ou seja, com parafusos M6 e M8, respetivamente. A avaliação da resistência dos provetes foi efetuada numa máquina de ensaios de tração Instron 4206. Em todos os provetes foram fixadas placas de sobreposição.



**Figura 5.** Foto dos provetes do 1º estudo. Fonte: elaboração própria

**Tabela 2.** Propriedades dos parafusos de aço inoxidável austenítico: (1) de [18] e calculado de (2) com  $k=0,22$ .

Parafusos	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	$F_{p,C}$ (N)		$T$ (Nm)	
		(1)	(2)	(1)	(2)
M6	20,1	9849	6613	9,5	9
M8	36,7	17983	12074	24	21,3

Fonte: elaboração própria



**Figura 6.** Provetes do segundo estudo com compensadores de espessura colocados. Fonte: elaboração própria.

### 3. Resultados

Os resultados são, essencialmente, relativos à resistência e aos aspectos macro e microscópicos das ligações.

#### 3.1 Resistência das ligações

Os primeiros resultados que se obtêm da resistência é o modo como a cedência acontece. A Tabela 3 apresenta o quadro-resumo dos modos de cedência relativos aos dois estudos.

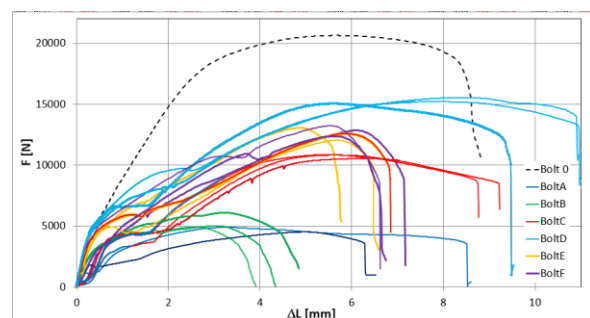
Os resultados obtidos, provenientes dos ensaios de tração permitem, em primeira instância, comparar os comportamentos de carregamento, resultados de força – deslocamento da tração dos provetes aparafusados M6, Figura 7.

**Tabela 3.** Modos de cedência dos provetes: - rb - rotura em bloco; - dp – deformação plástica; \* parcialmente misto.

Estudo	Provetes n°			Estudo	Provetes n°	
	1	2	3		1	2
A	dp	rb*	rb	AAA	rb	rb
B	dp	dp	dp	AAC	dp	dp
C	dp	dp	dp	AAM	dp	dp*
D	dp	dp	dp	BBA	rb	rb
E	rb	rb	rb	BBC	rb	rb
F	rb	rb	rb	BBM	rb	rb

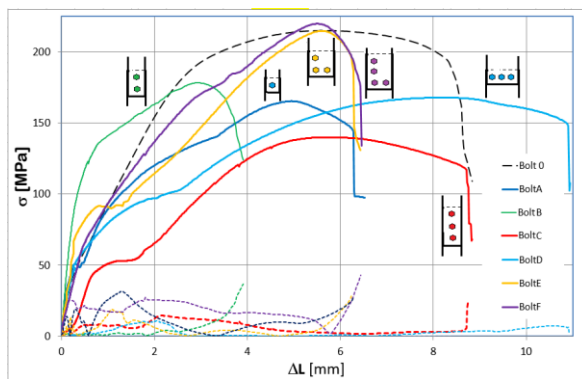
Fonte: elaboração própria

Na Figura 8 são apresentadas as distribuições de tensões e as curvas equivalentes de desvios-padrão, correspondentes aos ensaios vistos na Figura 7, o que permite a abstenção do efeito de tamanho e ter uma ideia da dispersão de resultados.



**Figura 7.** Distribuições de resultados de força - deslocamento dos ensaios de tração dos provetes aparafusados M6 (traços contínuos) e no material sem ligação (traço interrompido). Fonte: elaboração própria.

É típico das ligações aparafusadas com poucos parafusos que se verifique o degrau correspondente à fase de deslizamento devido ao atrito na interface entre as superfícies de contacto na ligação até o parafuso ficar em contacto com o os furos [34]. No entanto,

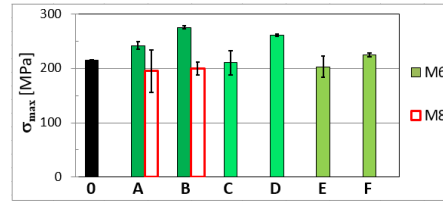


**Figura 8.** Distribuição de resultados de tensões dos ensaios de tração de provetes aparafusados M6 (traços contínuos) e curvas equivalentes de desvios-padrão (traço interrompido).  
Fonte: elaboração própria.

podem haver exceções devido à disposição inicial dos parafusos relativamente aos furos, o que tem consequência no comportamento nesta fase de resistência das ligações. Kulak [35] demonstrou que a resistência ao deslizamento de uma junta aparafusada desalinhada é maior ou igual à de uma junta com alinhamento. Entre os furos alinhados segundo a linha de ação da força ou na direção transversal correspondem a juntas com parafusos alinhados. Nos casos de assimetria, com os parafusos dipostos em L, casos E e F que correspondem, em parte, a haver desalinhamento. Esta disposição aumenta a resistência e a rigidez da ligação.

A verificação da influência de tamanho dos parafusos na cedência dos provetes de alumínio por esmagamento ou na rotura em bloco foi analisada tendo em consideração os tipos de falha, resumidos na Tabela 3, sendo os resultados apresentados na Figura 9. Na determinação destes resultados de tensão máxima ( $\sigma_{\max} = F_{\max}/A$ ), foram usados o valor da área (A) em cada caso: - do furo projetado ( $d_0 \times t$ ) nos casos de cedência por esmagamento; - da área líquida ( $b \times t - d_0 \times t$ ) quando houve rotura em bloco. Há uma pequena discrepância de resultados que se deve-se aos diferentes modos de cedência, aos provetes equivalentes mas com diferente número de parafusos (casos A, B ou C) mas igual distância destes às extremidades (segundo o EC9), o que influencia a área resistente da secção e o resultado. O provete 0 é de apenas de referência e sem rigor.

Usando os casos mais simples dos dois estudos, isto é, só provetes de alumínio com 1 ou 2 parafusos, M6 e M8, fez-se uma análise crítica de comparação de resultados experimentais de carga – deslocamento (F-ΔL), com os respetivos valores de projeto, calculados pelo EC9. Os resultados de resistência ao deslizamento, ao esmagamento e à rotura em bloco, relativos aos dois estudos e com as relações (1), (4) e 5), são apresentados na Tabela 4.



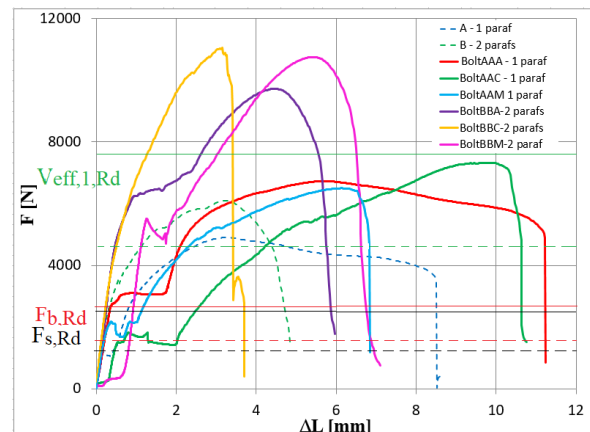
**Figura 9.** Resultados médios de valores máximos de tensão ( $\sigma_{\max}$ ), dos estudos com parafusos M6 e com M8 nas ligações em provetes de alumínio e respetivos desvios-padrão. Fonte: elaboração própria.

**Tabela 4.** Valores de resistência ao deslizamento, ao esmagamento e de rotura em bloco, e relações do EC9.

	Deslizamento $F_{s,Rd}$ (1) $n=1, \mu=0,2, \gamma_{Ms}=1,1$	Esmagamento $F_{b,Rd}$ (4) $f_u=150, f_{ub}=700, \gamma_{M2}=1,25$	Rotura bloco $V_{eff,1,Rd}$ (5) $f_u=150, \gamma_{M2}=1,25$
M6	1202 N	1631 N	4980 N
M8	2195 N	2258 N	7560 N

Fonte: elaboração própria

As distribuições de resultados F-ΔL dos ensaios do segundo estudo com os de 1 ou 2 parafusos do primeiro estudo (casos A e B) são comparadas na Figura 10. Neste gráfico são, ainda, inseridos os limites de resistência dispostos na Tabela 4.



**Figura 10.** Comparação de distribuições de resultados de ensaios de tração de provetes aparafusados M6 e M8 e valores calculados de EC9. (traços contínuos – M8 e traços interrompidos – M6). Fonte: elaboração própria.

Os patamares existentes na parte inicial das curvas de carregamento estão razoavelmente próximos dos valores calculados  $F_{s,Rd}$ , tendo em consideração que, nos casos das ligações com n parafusos, o valor foi multiplicado por n. Relativamente aos casos em que não existe patamar, a justificação é devida à posição inicial dos parafusos relativamente ao centro do furo, pressupondo-se já encostados à superfície interna, sem haver escorregamento.

Com valores  $F_{s,Rd} < F_{b,Rd}$  garante-se o estado normal de carregamento, pois que só depois de haver encosto interno do parafuso à superfície do furo, seguido de compressão, é que há estado de tensão  $\sigma_{rr}$ . Na Figura

10, isto verifica-se, permitindo justificar que o valor do coeficiente de atrito não pode ser maior do que o usado ao determinar  $F_{s,Rd}$ .

### 3.2 Análise de resultados macro e microscópicos

Durante os respetivos ensaios de resistência já se tinha visualizado quanto aos respetivos modos de cedência, dispostos na Tabela 3. A análise visual macro e microscópica permite obter outras conclusões. Como tinha sido planeado, a opção por parafusos mais resistentes do que os materiais a ligar, suportaram as solicitações sem nenhum caso aparente de dano externo.

A desmontagem das ligações permitiu efetuar uma análise mais cuidada de como os componentes dos provetes ficaram após os ensaios de tração e concluir melhor sobre quais foram os respetivos modos de cedência em cada caso do primeiro estudo, Figura 11. Pode-se verificar que quase todos os provetes constituídos por uma fila de parafusos, dispostos longitudinal ou transversalmente, falharam por esmagamento dos furos pelo parafuso (*bearing mode*). Verificou-se que as ligações com parafusos dispostos em L houve falha por rotura em bloco ou “rotura da área líquida” devido a elevados valores de  $\sigma_x$  na junta, embora as suas dimensões cumpram os requisitos mínimos do EC9 e poder haver falha pelos parafusos, que são mais resistentes, como se verifica em [36].



**Figura 11.** Estado em que os provetes do primeiro estudo ficaram após os ensaios de tração. Fonte: elaboração própria.

Ao fazer-se uma análise idêntica à anterior no segundo conjunto de provetes, Figura 12, verificou-se que os casos de um parafuso houve falha por esmagamento dos furos (*bearing*) e os com dois parafusos falharam pelo tipo de rotura em bloco (*block tearing*). De igual modo, estes foram os tipos de cedência que ocorreram no compósito.

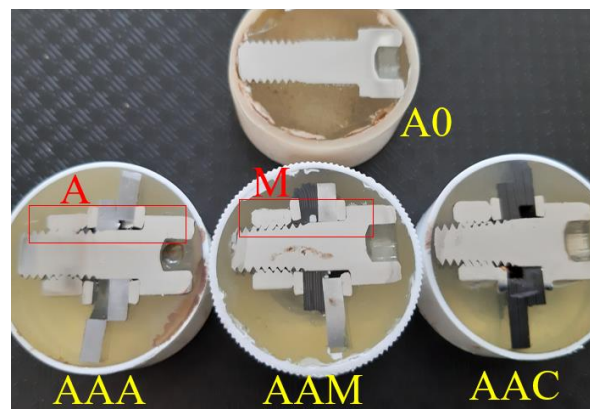
No segundo estudo, foram preparadas amostras para análise microscópica, num exemplar de cada tipo de provetes com apenas um parafuso M8, após os respetivos ensaios de tração. Houve o cuidado de

efetuar o corte posteriormente à montagem das amostras com resina de epóxico, seguida do polimento. Com isto, pressupõe-se que a resina manteve posicionados todos os componentes sem alívio significativo de tensões, embora não tenha sido confirmado.



**Figura 12.** Estado em que os provetes do segundo estudo ficaram após os ensaios de tração. Fonte: elaboração própria.

Foram adotadas as designações apresentadas na Figura 13: - A0, parafuso isolado; - AAA, entre peças de alumínio; - AAM, misto entre alumínio e compósito; - AAC, entre placas de compósito. Numa primeira análise, verificou-se que na amostra AAA houve grande deformação na superfície interna do furo, o que reforça as primeiras conclusões da cedência por esmagamento apresentada na Tabela 3 e nos parágrafos anteriores. Nas outras duas amostras, a deformação é mais reduzida. Parte desta deformação ficou a dever-se ao deslizamento das interfaces, seguida de um comportamento misto de esmagamento e de rotura das fibras por tração, típica da cedência em bloco. Os casos de delaminação reduzida apenas se verificaram nos casos onde houve deformação plástica no compósito.



**Figura 13.** Montagem de microfotografias em que os provetes ficaram após os ensaios de tração. Fonte: elaboração própria.

A partir de fotos tiradas no microscópio ótico com ampliação de 50× permitiu que se fizesse a montagem que é apresentada na Figura 14, onde é mostrado o contacto entre os filetes do parafuso M6 e respetiva porca. Nesta figura verificam-se casos de deterioração

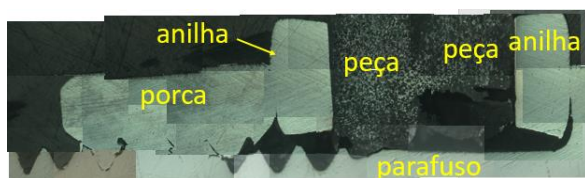


da rosca, com roturas e alguma falta de homogeneidade no contacto de alguns filetes.

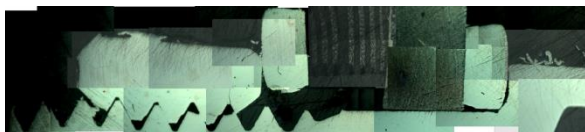


**Figura 14.** Montagem de micografias em que os provetes ficaram após os ensaios de tração. Fonte: elaboração própria.

Noutras montagens efetuadas, equivalentes à anterior, onde se apresentam parte de todos os elementos constituintes da ligação, são apresentadas na Figura 15 e Figura 16, relativas ao pormenor A e M, respetivamente indicados na Figura 13.



**Figura 15.** Montagem de micografias com ampliação 50 $\times$  correspondente à ligação Al - Al, apresentada no pormenor A da Figura 13. Fonte: elaboração própria.



**Figura 16.** Montagem de micografias com ampliação 50 $\times$  correspondente à ligação CFRP - CFRP, apresentada no pormenor M da Figura 13. Fonte: elaboração própria.

A análise das Figuras 13, 15 e 16 permite confirmar as grandes folgas criadas pela deformação no ensaio de tração e a existência de alguns defeitos, tipo rotura e fissuras nalguns filetes. Aparentemente, o número de filetes de contacto é reduzido, causando um certo estado de tensão que pode estar na origem desses defeitos. Este tipo de anomalias também são vistas em [37]. Uma solução seria o uso de porcas mais largas. Outra, passaria pela redução do atrito no ato do pré-esforço com o uso de lubrificante adequado, como é sugerido no projeto Siroco [20].

#### 4. Conclusões

Genericamente, o desenvolvimento deste estudo, permitiu obter boa sensibilidade do comportamento da resistência numa ligação com parafusos inoxidáveis. Fica um conhecimento útil ao projeto e execução de ligações aparafusadas de alumínio e de compósitos. É importante haver pré-esforço, cujo valor aplicado aos parafusos inoxidáveis, ainda necessita de afinação de algumas particularidades.

Os valores de resistência ao deslizamento, ao esmagamento e à rotura em bloco, calculados do EC9,

enquadram-se bem nos de carregamento  $F - \Delta L$  experimental das ligações.  $F_{s,Rd} < F_{b,Rd}$  é uma condição normal do estado de carregamento, tirar ilações, como porexemplo do valor de  $\mu$  adotado.

Devem-se ter cuidados para prevenir danos nos filetes da rosca. Por exemplo, aumentando o número de filetes de contacto com uso de porcas mais largas.

#### 5. Agradecimentos

O autor agradece ao Eng. Nelson Santos pelo apoio prestado na oficina e execução de furos em CNC. Ao Centro de Investigação em Serviços Digitais (CISeD) e ao Politécnico de Viseu pelo apoio.

#### 6. Referências

- [1] E. Georgantzia, M. Gkantou, G. Kamaris. "Aluminium alloys as structural material: A review of research". Engineering Structures, 227 (2021). ISSN 0141-0296.
- [2] J.R. Davis. "Alloying: Understanding the Basic". ASM International p351-416. 2001 DOI:10.1361/autb2001p351
- [3] F. Passarini, L. Ciacci, P. Nuss, S. Manfredi. "Material flow analysis of aluminium, copper, and iron in the EU-28" Technical report - Joint Research Centre (JRC) -European Commission's, 2018.
- [4] L. Muchová, P. Ede. "End-of-waste Criteria for Aluminium and Aluminium Alloy Scrap: Technical Proposals. JRC - European Commission 2010 ISBN 978-92-79-15990-9.
- [5] M. Wang. "Aluminum in Green Buildings" A Guide to Environmental Declarations. The Aluminum Association 2014.
- [6] F. Mazzolani. "Structural Applications of Aluminium in Civil Engineering". Structural Engineering International Vol. 16, - Issue 4 16(4), pp. 280-285, 2006. <https://doi.org/10.2749/101686606778995128>
- [7] J. Peko, N. Torić, I. Boko. "Comparative analysis of steel and aluminum structure" e-gFos nº 13, pp. 50-61, 2016 <https://doi.org/10.13167/2016.13.6> <https://hrcak.srce.hr/file/252932>
- [8] E. Witten, M. Sauer, M. Kühne. Composites Market Report 2017 Market developments, trends, outlook and challenges. Carbon Composites AVK - Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe 2017.
- [9] G. Kelly, S. Hallström. "Bearing strength of carbon fibre/epoxy laminates: effects of bolt-hole clearance" Composites: Part B 35 (2004) pp. 331-343.
- [10] Z. Kapidžić. "Strength analysis and modeling of hybrid composite-aluminum aircraft structures"



Linköping Studies in Science and Technology, Thesis No. 1590 2013.

[11] C. den Otter. “Preload loss of stainless (steel) bolts in aluminium / steel joints” MsC Thesis, Eindhoven University of Technology 2019

[12] EN 1999-1-1: Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-1: General structural rules (2007).

[13] EN 1090-3 Execution of steel structures and aluminium structures - Part 3: Technical requirements for aluminium structures (2019).

[14] Svenskt Aluminium. Trial Edition (August 2020) ISBN 978-91-519-0957-8.

[15] A. Elkjaer. “On the Substitution of Aluminium for Copper Conductors in Battery Systems: Aspects of development strategy and design” Performance Trondheim, Doctoral theses at NTNU, (2024).

[16] E. Håkansson. “Galvanic Corrosion of Aluminum/Carbon Composite Systems” Electronic Theses and Dissertations. 1120. <https://digitalcommons.du.edu/etd/1122016>

[17] “Corrosion and Inspection of General Aviation Aircraft”. CAP 157. Civil Aviation Authority, 2017 Civil Aviation Authority, 2017 [www.caa.co.uk](http://www.caa.co.uk)

[18]. EN ISO 3506-1 “Fasteners - Mechanical properties of corrosion-resistant stainless steel fasteners – Part 1: Bolts, screws and studs with specified grades and property classes 2020.

[19] Pocket Guide 3 “Corrosion Resistance of Aluminium and Protective Measures Where Appropriate” 1st Ed: AFSA - Aluminium Federation of South Africa, 2011.

[20] N. Stranghöner, D. Jungbluth, N. Afzali. “Preloading of stainless steel bolting assemblies” · ce/papers 1 (2017), EUROSTEEL pp. 342-351, 2017, Copenhagen, <https://doi.org/10.1002/cepa.65>.

[21] O. Kukkonen. “Numerical analysis of a bearing strength in delaminated composite joint” KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden 2023.

[22] J. Peth, C. Friedrich. “Design influences of preload relaxation behaviour in bolted joints using aluminium parts” Paper ref: 7242 - Proceedings IRF2018: 6th International Conference Integrity-Reliability-Failure, Symp-06: Fastening and Joining Technology, Lisbon, 22-26 July 2018.

[23] T. Held, J. Peth, C. Friedrich. “Preload Stability of Modern Bolted Joints” Athens Journal of Technology and Engineering – Vol. 9, No. 3, pp. 187-212, 2022.

[24] T. Jaglinski, R. Schmitz, R. Lakes “Study of Bolt Load Loss in Bolted Aluminum Joints” J. of Eng. Materials and Technology, Vol. 129, 2007.

[25] H. Wen, H. Mahmoud. “Simulation of block shear fracture in bolted connections” J. of Constructional Steel Research Vol. 134, pp. 1-16 July 2017

[26] X-M. Lin, M. Yam, K. Ke, Q. He K-F. Chung. “Investigation of block shear strength of high strength steel bolted connections” J. of Constructional Steel Research vol. 196 pp. 1-14 (2022) <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107407>.

[27] A. Galińska. “Mechanical Joining of Fibre Reinforced Polymer Composites to Metals—A Review. Part I: Bolted Joining”, Polymers 12, 2252, pp. 2-48, 2020; doi:10.3390/polym12102252

[28] S. Sullivan. “Pin-on-flat Sliding Friction of Aluminum on Polytetrafluoroethylene Coated Aluminum” MSD thesis, Uniniversity of Toronto 2003.

[29] M. Lång. “Static Friction in Slip Critical Bolt Joints - Coefficient of Friction in Steel, Aluminium and ED Coated Steel” Degree Project of Bachelor of Science in Mechanical Engineering. Karlstads Universitet 2017

[30] A. da Silva. “Comportamento Mecânico e Balístico de Laminados Híbridos de Aramida/Vidro” tese PhD 2022.

[31] I. Katar. “Evaluate State-of-the-Art Carbon Fibers’ Composites (CFC) as Finishing Materials in Building Construction” Int. J. of Applied Eng. Research ISSN 0973-4562 Vol.12, No.23 pp. 13826-13833, 2017.

[32] M. Keikhosravy, R. Oskouei, P. Soltani, A. Atas, C. Soutis. "Effect of geometric parameters on the stress distribution in Al 2024-T3 single-lap bolted joints", Int. J. of Structural Integrity, Vol. 3 Iss: 1 pp. 79 – 93, 2012.

[33] WASI Norm – Technical manual – 50 years Excellence in Stainless Steel. [pdf]. Disponible em: [https://www.dadsro.sk/data/dadsro.sk/documents/WASI\\_product\\_catalogue\\_norm\\_en\\_1446106222.pdf](https://www.dadsro.sk/data/dadsro.sk/documents/WASI_product_catalogue_norm_en_1446106222.pdf)

[34] A. Trindade. “Caraterização do comportamento força-deslocamento de ligações aparafusadas sem e com pré-esforço” 13º Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica - XIII CIBEM – Lisboa 2017

[35] G. Kulak, J. Fisher, J. Struik. “Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints” AICS - American Institute of Steel Construction, 2nd Ed. 2001. ISBN 0-471-83791-1.

[36] J. J. Santos. “Estudo Experimental de Ligações Aparafusadas de Aço Inoxidável Submetidas à Tração”. Tese de Doutorado, PUC – Rio 2014.

[37] J. Zheng, H. Chen, Y. Zhang. “Discussion on Causes and Solutions of the Biting Mechanism of Stainless Steel Bolts” MATEC Web of Conferences 363, AMME (2022) <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236301026>