

Instituto Politécnico de Viseu

Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu



RESUMO

Devido às necessidades da indústria atual é cada vez mais importante a utilização de métodos de união de materiais distintos. A utilização de adesivos no processo de produção de materiais compósitos tem uma grande aplicação, uma vez que permite ligar os diferentes materiais e ainda reduzir significativamente o peso do conjunto.

Este trabalho teve como principal objetivo aumentar a resistência à delaminação de materiais compósitos no sentido da espessura, concretamente dos plásticos reforçados com fibras de carbono (CFRP), através da utilização de placas da liga de alumínio 2024-T3. Este conceito é muito semelhante ao utilizado nos laminados por fibras e metal (LFM) para aumentar a sua resistência à delaminação.

Pretendeu-se também a identificação da configuração da junta que apresenta melhores resultados, comparativamente à junta de referência composta apenas por CFRP.

Inicialmente, produziram-se apenas juntas de CFRP que foram utilizadas como comparação com os laminados de fibras e metal. Com o objetivo de melhorar a adesão entre os CFRP e a liga de alumínio, foram realizados três tratamentos superficiais diferentes, nomeadamente a lixagem, a anodização e o ataque com ácido. Posteriormente, foram produzidas as juntas com as seguintes configurações: CFRP-AL-CFRP, CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP e AL-CFRP-AL.

A realização deste trabalho permitiu concluir que com a adição de placas de alumínio, se conseguiu um melhoramento da resistência à delaminação das fibras de carbono e ainda um aumento da resistência específica no sentido da sua espessura.

A JSS com a configuração AL-CFRP-AL e com comprimento de sobreposição de 50 mm foi a configuração que apresentou uma força de rotura mais elevada, ou seja, uma maior resistência à delaminação, comparativamente à junta de referência e às restantes configurações em estudo. A falha coesiva verificada perto da interface da junta AL-CFRP-AL, pode ser devida ao elevado comprimento de sobreposição e às diferentes elasticidades do alumínio e do CFRP, o que naturalmente levou a elevadas tensões localizadas nas extremidades da junta.

Os resultados demonstraram que é possível aumentar a resistência transversal do compósito utilizando uma placa de alumínio.

Palavras-chave: Juntas adesivas estruturais, Compósitos, CFRP, LFM.

ABSTRACT

Due to current industry needs it is ever more important to use methods of joining dissimilar materials. The use of adhesives in the manufacture of composite structures has wide application, since they allow connecting different materials and also a reduction of the total weight.

This work aimed to increase the resistance to delamination of composite materials in the thickness direction, namely of carbon fibre reinforced plastic (CFRP), by the use of aluminium alloy plates of 2024-T3 alloy. This concept is very similar to that used in fibre metal laminates (LFM) to increase their resistance to delamination.

It was also intended to identify the joint configuration that presents the best results, compared to the reference joint composed by CFRP substrates only.

At first, CFRP only joints were produced to be used as a comparison with the fibre metal laminates. In order to improve the adhesion between CFRP and the aluminium alloy, three different surface treatments were performed, namely sanding, anodizing and acid attack. Afterwards, joints with the following configurations were manufactured: CFRP-AL-CFRP, CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP and AL-CFRP-AL.

This work allowed to conclude that the addition of aluminium plates leads to an improvement in the resistance to delamination of the carbon fibre composite and also an increase in the specific resistance in the thickness direction.

The JSS with AL-CFRP-AL configuration with an overlap length of 50 mm was the configuration that presented higher strength, meaning a higher resistance to delamination, compared to the reference joints and all the other configurations under study. The cohesive failure observed near the ALCFRP-AL interface board may be due to the large overlap length and the different stiffness of aluminium and CFRP, which naturally led to high localized stresses at the ends of the joint.

The results revealed that it is possible to improve the transverse strength of composite using aluminium plate.

Keywords: Structural adhesive joints, composites, CFRP, FML.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao meu orientador, Professor Doutor Lucas Filipe Martins da Silva, pela partilha de conhecimento, pela compreensão, pelo apoio e orientação prestada durante a realização deste trabalho.

Agradeço em especial ao Dr. Ricardo Carbas, a paciência, o apoio, a partilha de conhecimento, a dedicação e a ajuda prestada durante as etapas teóricas e experimentais neste trabalho.

Ao Dr. Eduardo Marques agradeço o apoio prestado, o conhecimento transmitido e a disponibilidade demonstrada.

Gostava de agradecer à ESTGV, a oportunidade em poder realizar a minha dissertação na FEUP, à qual também agradeço a sua disponibilidade e acolhimento.

Agradeço ao grupo ADFEUP, por toda a ajuda oferecida.

À Tânia Ferreira, agradeço a amável ajuda, a compreensão, a disponibilidade, e o apoio incondicional, sobretudo nestes largos meses em que a minha ausência foi muitas vezes sentida.

Aos meus amigos, agradeço todo o apoio e compreensão.

Agradeço ao Miguel Ardérius a sua disponibilidade e apoio.

Finalmente, agradeço a toda a minha família, em especial ao meu irmão e aos meus pais pelo seu apoio, incentivo, motivação e compreensão em todos os momentos.

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT	v
AGRADECIMENTOS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABELAS	xix
NOMENCLATURA.....	xxi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo da dissertação	1
1.2 Metodologia utilizada	2
1.3 Estrutura da dissertação	2
2 ESTADO DA ARTE	5
2.1 Adesivos estruturais	5
2.1.1 Introdução.....	5
2.1.2 Aplicações práticas dos adesivos modernos.....	5
2.1.3 Juntas adesivas	7
2.1.4 Modos de carregamento	7
2.1.5 Tipos de juntas adesivas.....	8
2.1.6 Tipos de rotura de juntas adesivas.....	9
2.1.7 Vantagens e desvantagens dos adesivos estruturais e das juntas adesivas.....	10
2.1.8 Parâmetros que influenciam o desempenho das juntas	12
2.2 COMPÓSITOS	14
2.2.1 Introdução.....	14
2.2.2 Plástico reforçado com fibras de carbono	15
2.2.3 Aplicação de compósitos.....	16
2.2.4 Modos de rotura em compósitos	17
2.2.5 Soluções para evitar as delaminações em juntas compósitas.....	18
2.3 Laminados de fibra e metal.....	20
2.3.1 Introdução dos LFM.....	20
2.3.2 Conceito dos LFM.....	22

2.3.3 Vantagens dos LFM	23
2.3.4 Desvantagens dos LFM	24
2.3.5 Falhas nos LFM.....	24
2.3.6 Delaminação dos LFM	26
3 TRABALHO EXPERIMENTAL.....	27
3.1 Propriedades dos componentes	27
3.1.1 Propriedades do adesivo Araldite® AV138M / HV 998	27
3.1.2 Propriedades mecânicas dos substratos em material compósito	28
3.1.3 Propriedades mecânicas dos substratos em alumínio.....	29
3.2 Produção de placas de CFRP	30
3.2.1 Preparação das placas de carbono-epóxico (CFRP)	30
3.2.2 Execução do empilhamento das placas de carbono	31
3.2.3 Preparação dos pratos da prensa e colocação do molde na prensa.....	34
3.2.4 Modo de funcionamento da prensa hidráulica de pratos quentes (INTOCO)	35
3.2.5 Processo de cura dos CFRP	36
3.2.6 Controlo da espessura e da qualidade das placas de CFRP.....	37
3.3 Tratamento superficial dos LFM	37
3.3.1 Influência dos diferentes tratamentos superficiais	38
3.4 Procedimento de fabricação dos laminados de fibra e metal.....	38
3.4.1 Produção dos laminados.....	39
3.4.2 Procedimento de cura dos LFM	40
3.4.3 Tratamento da superfície da liga de alumínio 2024-T3	40
3.4.4 Análise SEM das placas de alumínio anodizadas pelo processo (PAA).....	42
3.5 Produção de JSS utilizando o adesivo AV138M / HV 998	43
3.5.1 Corte dos provetes	43
3.5.2 Tratamento superficial dos provetes	45
3.5.3 Análise SEM do substrato de alumínio atacado com ácido fosfórico a 85%	47
3.5.4 Produção de juntas de sobreposição simples (JSS).....	48
3.5.5 Remoção do excesso de adesivo das juntas adesivas	49
4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	51
4.1 Ensaio de tração das JSS com uma sobreposição de 12,5 mm.....	52
4.1.1 Junta de referência CFRP	52

4.1.2 Junta do laminado CFRP-AL	54
4.1.3 Junta do laminado CFRP-AL-CFRP	55
4.1.4 Junta do laminado CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP	56
4.1.5 Junta do laminado AL-CFRP-AL	58
4.2 Ensaio de tração das JSS com uma sobreposição de 50 mm.....	65
4.2.1 Junta de referência CFRP	65
4.2.2 Junta do laminado CFRP-AL-CFRP	67
4.2.3 Junta do laminado CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP	69
4.2.4 Junta do laminado AL-CFRP-AL	70
4.3 Discussão de resultados	76
4.3.1 Comparação das JSS com comprimentos de sobreposição 12,5 mm para um tratamento das superfícies por lixagem.....	77
4.3.2 Comparação das JSS com comprimentos de sobreposição 50 mm para um tratamento das superfícies por lixagem.....	79
4.3.3 Efeito do tratamento superficial na resistência das JSS	82
5 CONCLUSÕES	87
6 TRABALHOS FUTUROS	91
REFERÊNCIAS	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Configurações das possíveis combinações de LFM.	2
Figura 2: Fuselagem de um avião (Almeida, 2016).	5
Figura 3: Lotus Exige S3 em que a sua estrutura de alumínio tem ligações adesivas (Pistonheads, 2016).	6
Figura 4: Os quatro tipos básicos de carregamento em juntas adesivas.	8
Figura 5: Diferentes tipos de juntas adesivas (da Silva <i>et al.</i> , 2007).	8
Figura 6: Esquematização da flexão dos substratos e das tensões normais resultantes nas extremidades da sobreposição: a) junta antes da deformação; b) excentricidade da carga; c) momento fletor; d) deformação final da junta (Berry <i>et al.</i> , 2000).	9
Figura 7: Representação esquemática dos diferentes modos de rotura em JSS.	10
Figura 8: Análise da força-deslocamento de juntas de simples sobreposição, para diferentes espessuras do adesivo (da Silva <i>et al.</i> , 2007).	13
Figura 9: Distribuição percentual dos materiais constituintes do Boeing 787.	16
Figura 10: Boeing 787 Dreamliner.	17
Figura 11: Rotura interlaminar em juntas de sobreposição dupla de material compósito (da Silva <i>et al.</i> , 2006).	18
Figura 12: Representação esquemática do processo de fratura longitudinal num laminado unidirecional com um fixador-z (Chang <i>et al.</i> , 2006).	19
Figura 13: a) Tecelagem 3D; b) processo de costura de fibras; c) estrutura de fibras trançadas, (Boisse, 2011).	19
Figura 14: a) Exemplo de Laminados de Fibras e Metal.	21
Figura 15: Distribuição percentual dos materiais constituintes do Airbus A350 (Airbus, 2015).	23
Figura 16: Esquema ilustrativo da formação de fendas nos LFM (Alderliesten, 2007).	25
Figura 17: a) Adesivo AV138M e endurecedor HV 998; b) Máquina misturadora (SpeedMixer).	27
Figura 18: Curvas σ - ϵ do adesivo AV138M / HV998 (Campilho <i>et al.</i> , 2010).	28
Figura 19: Configurações possíveis para a produção de LFM.	30
Figura 20: a) Arca congeladora; b) Rolo de compósito de carbono-epóxico.	31
Figura 21: a) Procedimento de corte; b) Pré-impregnado de carbono (300 x 300 mm).	31
Figura 22: a) Pistola de ar quente; b) Aquecimento do pré-impregnado de carbono.	32
Figura 23: Empilhamento das placas de CFRP.	32

Figura 24: a) Espátula usada para a remoção das bolhas de ar; b) Remoção de bolhas de ar com o auxílio da espátula.	33
Figura 25: Remoção da película de proteção.....	33
Figura 26: Ilustração da placa de carbono com espessura de 3,2 mm.....	33
Figura 27: a) Desmoldante Loctite® - Frekote 770-NC™; b) Aplicação do desmoldante no molde.	34
Figura 28: Posicionamento das placas de carbono no interior do molde.	34
Figura 29: a) Pratos da prensa (INTOCO); b) Limpeza dos pratos.....	35
Figura 30: a) Colocação do molde/placas no interior da prensa; b) Posicionamento correto do molde/placas nos pratos da prensa.	35
Figura 31: Prensa hidráulica de pratos quentes (INTOCO).	36
Figura 32: Ciclo térmico para cura das placas CFRP.....	36
Figura 33: Medição da espessura da placa de CFRP com um paquímetro.....	37
Figura 34: Descolagem das placas de CFRP do alumínio.....	38
Figura 35: Empilhamento das placas de alumínio com as placas de CFRP.....	39
Figura 36: Aquecimento das placas de alumínio.....	39
Figura 37: Configurações dos laminados, com as combinações possíveis de produzir.	40
Figura 38: Representação esquemática do processo de anodização (PAA).	41
Figura 39: Setup usado para o processo de anodização.....	42
Figura 40: a) Análise da menor ampliação da placa de alumínio anodizada antes de ser utilizada nos laminados; b) Análise da maior ampliação da placa de alumínio anodizada.	43
Figura 41: Dimensões e geometria da junta de sobreposição simples.	44
Figura 42: a) Máquina de disco de corte (ISEP); b) Pormenor da mesa deslizante do disco de corte e do sistema de refrigeração; c) Provetes.	44
Figura 43: a) Processo de anodização (PAA), b) Provetes anodizados (PAA).	45
Figura 44: a) Processo de anodização local (<i>Locally Acid Etching</i>), b) Provetes de alumínio anodizados localmente.	46
Figura 45: Processo de lixagem dos provetes com CFRP no exterior.....	46
Figura 46: a) Análise da menor ampliação do substrato de alumínio atacado com ácido fosfórico a 85%; b) Análise da maior ampliação do substrato de alumínio atacado com ácido fosfórico a 85%.	47
Figura 47: Molde por pinos para a produção de juntas adesivas.....	48
Figura 48: a) Molde preparado para a aplicação de adesivo com os espaçadores de 3,4 mm de espessura; b) Aplicação do adesivo.	48

Figura 49: a) Junta adesiva com excesso de adesivo; b) Remoção do excesso de adesivo com uma lima; c) Aspeto final da junta sem excesso de adesivo.....	49
Figura 50: a) Pormenor da junta de sobreposição simples presa nas agarras; b) Máquina de tração (Instron [®] 3367) - FEUP.	51
Figura 51: Configuração da junta de referência CFRP, com um comprimento de sobreposição de 12,5 mm.	52
Figura 52: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de referência CFRP, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm (Radu, 2015).	52
Figura 53: a) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm (Radu, 2015).....	53
Figura 54: b) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm (Radu, 2015).....	53
Figura 55: a) Configuração da junta CFRP-AL com um comprimento de sobreposição de 12,5 mm.	54
Figura 56: Ilustração do empeno da placa do LFM (CFRP-AL) (Radu, 2015).....	54
Figura 57: Configuração da junta CFRP-AL-CFRP, com um comprimento de sobreposição de 12,5 mm.	55
Figura 58: Curva típica $P-\delta$ obtida para as juntas de CFRP-AL-CFRP com uma espessura do substrato de 3,2 mm (Radu, 2015).	55
Figura 59: a) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm (Radu, 2015).....	56
Figura 60: Configuração da junta CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP, com um comprimento de sobreposição de 12,5 mm.	56
Figura 61: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm.....	57
Figura 62: a) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm.	57
Figura 63: b) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm (Radu, 2015).....	58
Figura 64: Configuração da junta AL-CFRP-AL, com um comprimento de sobreposição de 12,5 mm.	58
Figura 65: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de AL-CFRP-AL, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de lixagem.	59
Figura 66: a) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm e com um tratamento da superfície pelo método de lixagem.	59

Figura 67: d) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de lixagem (Radu, 2015).....	60
Figura 68: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de AL-CFRP-AL, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de anodização.	61
Figura 69: b) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm e com um tratamento da superfície pelo método de anodização.....	61
Figura 70: e) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm, com um comprimento de sobreposição de 12,5 mm e com um tratamento da superfície pelo método de anodização.....	62
Figura 71: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de AL-CFRP-AL, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm, e com um tratamento da superfície pelo método de “etching” (ataque com ácido).	63
Figura 72: c) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm e com um tratamento da superfície pelo método ataque com ácido.....	63
Figura 73: f) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método ataque com ácido.....	64
Figura 74: Configuração da junta de referência CFRP, com um comprimento de sobreposição de 50 mm.	65
Figura 75: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de referência CFRP, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de lixagem (Radu, 2015).	65
Figura 76: a) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm e com um tratamento da superfície pelo método de lixagem (Radu, 2015).....	66
Figura 77: b) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de lixagem (Radu, 2015).....	66
Figura 78: Configuração da junta CFRP-AL-CFRP, com um comprimento de sobreposição de 50 mm.	67
Figura 79: Curva típica $P-\delta$ obtida para as juntas de CFRP-AL-CFRP com uma espessura do aderente de 3,2 mm (Radu, 2015).	68
Figura 80: a) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm (Radu, 2015).....	68
Figura 81: Configuração da junta CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP, com um comprimento de sobreposição de 50 mm.	69
Figura 82: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm.....	69
Figura 83: a) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm.....	69

Figura 84: b) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm (Radu, 2015).....	70
Figura 85: Configuração da junta AL-CFRP-AL, com um comprimento de sobreposição de 50 mm.	71
Figura 86: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de AL-CFRP-AL, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de lixagem.	71
Figura 87: a) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm e com um tratamento da superfície pelo método de lixagem.	72
Figura 88: d) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de lixagem (Radu, 2015).....	72
Figura 89: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de AL-CFRP-AL, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de anodização.	73
Figura 90: b) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm e com um tratamento da superfície pelo método de anodização.....	73
Figura 91: e) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de anodização.....	74
Figura 92: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de AL-CFRP-AL, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método por ataque com ácido.....	75
Figura 93: c) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm e com um tratamento da superfície pelo método por ataque com ácido.	75
Figura 94: f) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de “etching” (ataque com ácido).	76
Figura 95: Resumo das forças médias de rotura para as juntas com sobreposição de 12,5 mm, com espessura de substrato de 3,2 e 6,4 mm com tratamento superficial por lixagem.	77
Figura 96: Resumo das forças médias de rotura para as juntas com sobreposição de 50 mm, com espessura de substrato de 3,2 e 6,4 mm com tratamento superficial por lixagem.	80
Figura 97: Resumo das forças médias de rotura para as juntas AL-CFRP-AL com sobreposição de 12,5 mm.	82
Figura 98: Resumo das forças médias de rotura para as juntas AL-CFRP-AL com sobreposição de 50 mm.	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos adesivos estruturais	11
Tabela 2: Vantagens e desvantagens das juntas adesivas (Tong e Steven, 1999).	11
Tabela 3: Vantagens dos laminados de fibra e metal.	23
Tabela 4: Propriedades mecânicas do adesivo AV138M / HV998 (da Silva <i>et al.</i> , 2010; Neto <i>et al.</i> , 2012).	28
Tabela 5: Propriedades elásticas das camadas unidirecionais de CFRP (Campilho <i>et al.</i> , 2008).	29
Tabela 6: Propriedades mecânicas da liga de alumínio 2024-T3 (Alcoa, 2015).	30
Tabela 7: Parâmetros utilizados para o tratamento de superfície de PAA.	41
Tabela 8: Forças de rotura e tensões médias para as juntas de referência CFRP.	54
Tabela 9: Forças de rotura e tensões médias para CFRP-AL-CFRP.	56
Tabela 10: Forças de rotura e tensões médias para CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP.	58
Tabela 11: Forças de rotura e tensões médias para AL-CFRP-AL	60
Tabela 12: Forças de rotura e tensões médias para AL-CFRP-AL	62
Tabela 13: Forças de rotura e tensões médias para AL-CFRP-AL.	64
Tabela 14: Forças de rotura e tensões médias para as juntas de referência CFRP (Radu, 2015).	66
Tabela 15: Forças de rotura e tensões médias para CFRP-AL-CFRP (Radu, 2015).	68
Tabela 16: Forças de rotura e tensões médias para CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP.	70
Tabela 17: Forças de rotura e tensões médias para AL-CFRP-AL.	72
Tabela 18: Forças de rotura e tensões médias para AL-CFRP-AL.	74
Tabela 19: Forças de rotura e tensões médias para AL-CFRP-AL.	76
Tabela 20: Resumo das forças médias de rotura para as juntas com sobreposição de 12,5 mm e com tratamento superficial por lixagem.	78
Tabela 21: Resumo das forças médias de rotura para as juntas com sobreposição de 50 mm e com tratamento superficial por lixagem.	81
Tabela 22: Resumo das forças médias de rotura para as juntas AL-CFRP-AL com sobreposição de 12,5 mm e com tratamento superficial por lixagem, anodização e ataque com ácido.	83
Tabela 23: Resumo das forças médias de rotura para as juntas AL-CFRP-AL com sobreposição de 50 mm e com tratamento superficial por lixagem, anodização e ataque com ácido.	85

NOMENCLATURA

SÍMBOLOS

L_0	Comprimento de sobreposição
ν	Coefficiente de Poisson
ε	Deformação
ε_f	Deformação de rotura
δ	Deslocamento
t_a	Espessura do adesivo
P	Força
b	Largura do substrato
E	Módulo de Young
G	Módulo de corte
G_I	Taxa de libertação de energia em modo I
G_{II}	Taxa de libertação de energia em modo II
τ	Tensão de corte
σ	Tensões normais
σ_y	Tensão de cedência
σ_f	Tensão de rotura

ABREVIATURAS

Al	Alumínio
Arall	Alumínio reforçado com fibras de aramida
Carall	Alumínio reforçado com fibras de carbono
CFRP	Plástico reforçado com fibras de carbono
Glare	Alumínio reforçado com fibras de vidro
GFRP	Plástico reforçado com fibras de vidro
JSS	Juntas de sobreposição simples
JSD	Juntas de sobreposição dupla
LFM	Laminados de fibra e metal
PAA	Anodização com ácido fosfórico

PRF	Plástico reforçado com fibras
TiGr	Titânio reforçado com fibras de carbono
3D	Três dimensões

1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas tem-se verificado uma grande utilização dos materiais compósitos, devido às suas inúmeras vantagens e qualidades. Estes materiais apresentam um preço mais elevado o que condiciona a sua utilização, sendo esta a sua principal limitação. Algumas das suas principais vantagens são a elevada rigidez e resistência específica. Este tipo de material é utilizado sobretudo em aplicações aeronáuticas, tendo como principal objetivo reduzir o peso de estruturas.

O avião comercial, Boeing 787, apresenta na constituição da sua estrutura 50% de materiais compósitos, reduzindo assim o seu peso e consequentemente o consumo de combustível (Boeing, 2001). O sucesso desta conquista foi devido aos avanços tecnológicos que permitiram uma união adesiva mais eficiente nas estruturas, utilizando compósitos.

Um dos compósitos mais utilizados na indústria aeronáutica é o laminado de fibra e metal (LFM), desenvolvido na Faculdade de Engenharia Aeroespacial da Universidade de Tecnologia de Delft. O conceito de LFM passa por reforçar as fibras de carbono utilizando um metal, aumentando a resistência ao arrancamento (peel) dos compósitos e evitando assim a sua delaminação.

O presente trabalho tem por objetivo principal utilizar esta técnica na fabricação de juntas, conseguindo assim retardar ou até mesmo evitar a delaminação do compósito, levando a um aumento da resistência da junta.

1.1 Objetivo da dissertação

O principal objetivo do presente trabalho é a utilização de um conceito semelhante aos LFM, em que se pretende aumentar a resistência à delaminação dos materiais compósitos tradicionais, nomeadamente das fibras de carbono. Tipicamente, este conceito tem por objetivo o reforço do material, mas no presente estudo este será usado para reforçar o compósito (evitando a delaminação do compósito). O aumento de resistência será conseguido no sentido da espessura do material, com a aplicação de chapas finas de alumínio de alta resistência 2024-T3 para evitar a delaminação das fibras de carbono. Prevê-se que a chapa de metal reaja como um dissipador de carga, de modo a dificultar a ocorrência de falhas interlaminares. O alumínio representará em cada configuração de junta 25% do volume do conjunto do laminado, de modo a que o LFM esteja efetivamente mais próximo de um plástico reforçado com fibras de carbono (CFRP) do que um metal. Serão testadas várias espessuras de chapas de alumínio, bem como diferentes combinações de empilhamento, conforme o ilustrado na Figura 1. Pretende-se também a identificação da configuração do conjunto que apresentará melhores resultados, relativamente à resistência do conjunto (híbrido), em comparação com a junta de referência composta apenas por CFRP.

Plástico refor

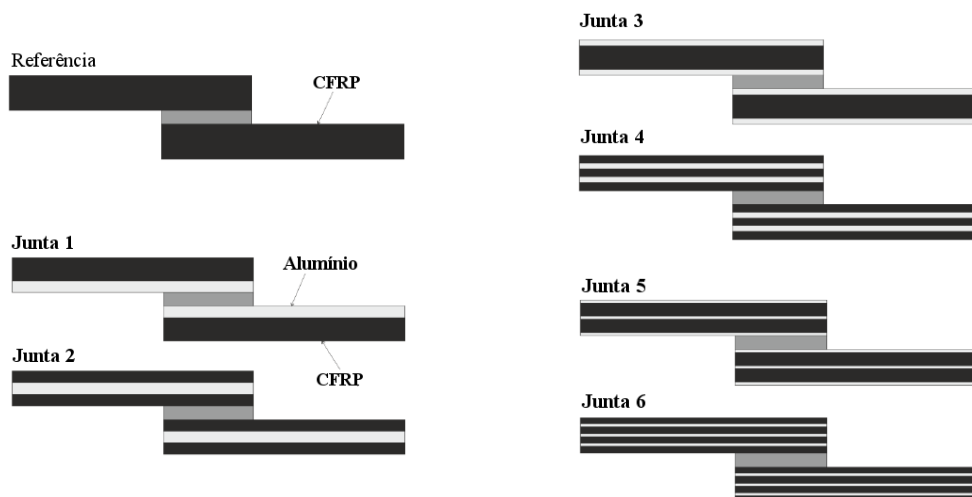


Figura 1: Configurações das possíveis combinações de LFM.

1.2 Metodologia utilizada

A metodologia aplicada no desenvolvimento de um novo conceito de juntas adesivas utilizando LFM foi a seguinte:

i) Foram fabricadas juntas compósitas utilizando diferentes combinações de LFM, tal como representado na Figura 1. Utilizaram-se fibras de carbono pré-impregnadas em epóxico (SEAL[®] Texipreg HS 160RM) com uma espessura de 0,15 mm e uma liga de alumínio de alta resistência (2024-T3) com diferentes espessuras, nomeadamente 0,4 e 0,8 mm, para formar o LFM. Para a produção das juntas de sobreposição simples (JSS) utilizou-se o adesivo AV138M / HV 998.

ii) Realizaram-se ensaios estáticos nas juntas produzidas.

Utilizou-se o mesmo tipo de alumínio em todas as juntas, variando apenas a sua espessura e o tratamento de superfície dos substratos a colar (lixagem, anodização e ataque químico), de modo a obter-se uma falha coesiva no adesivo. Foram comparados os tratamentos de superfície passivos e ativos, de forma a avaliar os resultados obtidos.

1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho encontra-se estruturado num conjunto de seis capítulos, os quais são descritos sumariamente a baixo.

No presente capítulo, foi feita uma pequena introdução ao procedimento experimental e foi apresentado o objetivo deste trabalho, bem como a metodologia utilizada.

O Capítulo 2, consistiu na revisão da literatura sobre os adesivos estruturais, assim como as suas aplicações práticas. As vantagens e desvantagens inerentes a esta tecnologia e aos tipos de adesivos existentes foram apresentadas. Neste capítulo foram também abordados os tipos de juntas adesivas e os modos de carregamento. Foi ainda feita uma abordagem aos diferentes tipos de tratamentos de superfícies, assim como uma descrição dos parâmetros que influenciam o desempenho das juntas. Foi feita uma introdução aos materiais compósitos, tais como os seus modos de rotura e as suas delaminações, assim como algumas soluções para evitar este processo. Foram abordados os laminados de fibra e metal (LFM) e as suas principais vantagens e desvantagens. Foram ainda descritos e apresentados os diferentes tipos de laminados existentes e foram analisadas as falhas nos LFM, tal como a delaminação.

No Capítulo 3, foram apresentadas as propriedades do adesivo Araldite® AV138M / HV 998, as propriedades dos substratos em material compósito de carbono com pré-impregnado, Texipreg® 160 RM, as propriedades mecânicas dos substratos em alumínio na liga 2024-T3 e todo o procedimento experimental para a produção de placas de CFRP e para a produção dos laminados de fibra e metal. Neste capítulo, foi também descrito o trabalho experimental efetuado com os diferentes tipos de tratamento superficial da liga de alumínio 2024-T3. Foi ainda descrito o procedimento efetuado para o corte dos provetes para a produção de juntas de sobreposição simples (JSS) com o adesivo AV138M / HV 998.

No Capítulo 4, foram analisados os resultados experimentais, especificamente os ensaios de tração das JSS com diferentes valores de sobreposição, de espessura de substratos e com diferentes combinações entre CFRP e Alumínio.

No Capítulo 5, foram apresentadas as principais conclusões deste trabalho e no Capítulo 6 foram feitas algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Adesivos estruturais

2.1.1 Introdução

A ligação de materiais através da tecnologia de adesivos estruturais possibilita uma melhoria significativa face às técnicas tradicionais (parafusos, rebites, soldadura, etc.). Apesar da comunidade científica desta área se encontrar em fraca expansão, as aplicações práticas desta tecnologia são inúmeras. São exemplos a indústria aeronáutica e a indústria do calçado (da Silva *et al.*, 2007).

O adesivo deve apresentar uma coesão e adesão adequada à superfície do material a ser unido, de forma a possibilitar a transferência de cargas. Enquanto a adesão está relacionada com a força de união entre o adesivo e o substrato, a coesão refere-se à interação existente entre as moléculas que as permite manter unidas, de modo a formarem um material (Carneiro, 2010).

Os adesivos podem ser considerados “colas”, sendo os mais utilizados os epóxicos, os poliuretanos e os fenólicos. Estes têm uma elevada resistência ao impacto e às variações de temperatura, podendo ligar inúmeros materiais diferentes, como a madeira, os metais e os compósitos, através da interação das suas superfícies.

O desenvolvimento dos adesivos surgiu devido à necessidade da procura pela indústria aeronáutica de elementos estruturais leves, de elevada resistência e rigidez. Os adesivos vieram solucionar o problema da redução de peso dos aviões, mantendo no entanto o seu desempenho.

2.1.2 Aplicações práticas dos adesivos modernos

A modernização dos adesivos é acompanhada, e está intimamente ligada com o desenvolvimento das indústrias aeronáuticas e aeroespaciais. O peso dos materiais usados neste tipo de indústria tem uma importância significativa, desde os primeiros voos até aos atuais. Um dos grandes exemplos práticos de ligações adesivas são as fuselagens dos aviões, Figura 2. A utilização de ligações adesivas nestas estruturas permitiu uma redução do peso e tornou-as mais flexíveis.

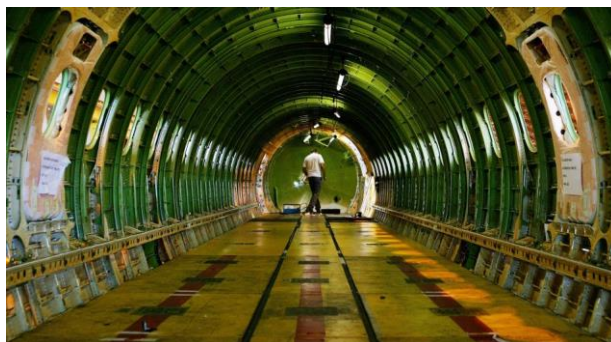


Figura 2: Fuselagem de um avião (Almeida, 2016).

Para além da aplicação das ligações adesivas na indústria aeronáutica, hoje em dia as ligações adesivas expandem-se para outras indústrias, tais como: a indústria automóvel, a indústria naval, a indústria ferroviária, a indústria têxtil, entre outras.

Na indústria automóvel a redução de peso é um fator preponderante no desenvolvimento de novos automóveis, de modo a reduzir os seus consumos e aumentar as suas velocidades médias. Deste modo, houve a necessidade de ligar materiais leves, como o alumínio, a plásticos reforçados com fibras; sendo este método de ligação ideal comparativamente ao método de ligação tradicional.

A Lotus é uma das empresas que mais utiliza os adesivos na fabricação dos seus automóveis, é o caso do Exige S3, Figura 3, representando um grande avanço na tecnologia de produção dos carros desportivos.



Figura 3: Lotus Exige S3 em que a sua estrutura de alumínio tem ligações adesivas (Pistonheads, 2016).

Como curiosidade, em 2001, para o fabrico do chassi do BMW Série 7 foram usados 10 metros de ligações adesivas (FEICA, 2011), enquanto o Mercedes Classe CL 2011 tem mais de 100 metros de ligações adesivas na sua estrutura (Omar, 2011). Além disso, o novo BMW Série 7 utiliza CFRP na estrutura do chassi (BMW AG, 2015), enquanto o BMW i3 utiliza uma estrutura completamente fabricada com compósitos, uma conquista obtida através de juntas adesivas.

Na indústria naval, cada vez mais se verifica a utilização de materiais plásticos e compósitos ligados por adesivos estruturais. Deve ter-se em conta, que o adesivo utilizado neste tipo de indústria deverá apresentar uma elevada resistência à humidade e à corrosão, uma vez que os meios marinhos são bastante agressivos (da Silva *et al.*, 2007).

Tem-se verificado também um aumento da utilização de adesivos estruturais na construção civil (pontes, caixilharia, etc.) e nos artigos desportivos (bicicletas, raquetes de ténis, tacos de golfe, pranchas de ski, etc.).

2.1.3 Juntas adesivas

O adesivo é considerado um material que tem a capacidade de unir dois materiais, através de forças de adesão e de coesão interna, sem modificar significativamente as suas estruturas.

As juntas adesivas promovem a ligação de substratos através de um adesivo, cuja cura consiste na criação de uma ligação rígida. A caracterização de um adesivo estrutural pode ser efetuada através da realização de ensaios sobre juntas de sobreposição simples. Existem várias dificuldades neste tipo de ensaios, sobretudo devido à reduzida espessura da camada de adesivo e de componentes de tensões indesejadas, como por exemplo, as tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição (Petrie, 2000). A distribuição das tensões de corte ao longo do adesivo é mais uniforme para valores de comprimento de sobreposição (L_0) reduzidos. À medida que L_0 aumenta, proporciona-se um aumento gradual das tensões de corte desde o centro da junta até às suas extremidades. A resistência das juntas não aumenta proporcionalmente com L_0 . Segundo a norma ASTM D 1002, o ensaio de sobreposição simples mede apenas um valor comparativo de tensão de rotura, pois não permite medir a verdadeira resistência ao corte do adesivo (a tensão de corte não é constante ao longo da ligação colada e são desprezados os efeitos de arrancamento).

A distribuição de tensões ao longo do comprimento de sobreposição raramente é uniforme e a rotura inicia-se quando as tensões locais excedem a resistência naquela região (Hartshorn, 1986).

2.1.4 Modos de carregamento

O engenheiro projetista tem como responsabilidade diminuir as concentrações de tensões das juntas adesivas. Convém identificar os diferentes modos de carregamento, sendo os mais utilizados: a tração, o corte, a clivagem e o arrancamento.

A análise da distribuição de tensões é fundamental nas ligações adesivas, esta análise é importante para condições ambientais adversas, como a humidade e a temperatura. É de extrema importância a avaliação da distribuição de tensões e consequentemente a avaliação dos tipos de rotura presentes nas juntas adesivas.

Na Figura 4 a) é ilustrado o carregamento à tração, ou seja, os substratos são afastados na direção perpendicular à área ligada. Neste tipo de carregamento a carga da tensão é distribuída uniformemente ao longo do adesivo. O carregamento ao corte é ilustrado na Figura 4 b), onde os substratos são afastados paralelamente com direções diferentes. Os carregamentos são geralmente mais resistentes quando solicitados ao corte, devido à área colada contribuir para manter os substratos alinhados paralelamente. A clivagem, Figura 4 c), é definida como a tensão que ocorre quando as forças na extremidade de uma junta rígida atuam de modo a separar os substratos. O arrancamento, ilustrado na Figura 4 d), é considerado um tipo de carga que ocorre

apenas numa das extremidades da área ligada, sendo sujeita à tensão, enquanto a outra extremidade teoricamente não sofre qualquer tensão.

Em termos práticos é difícil que ocorra só um tipo de carregamento, por vezes existem vários tipos de carregamentos a atuarem ao mesmo tempo.

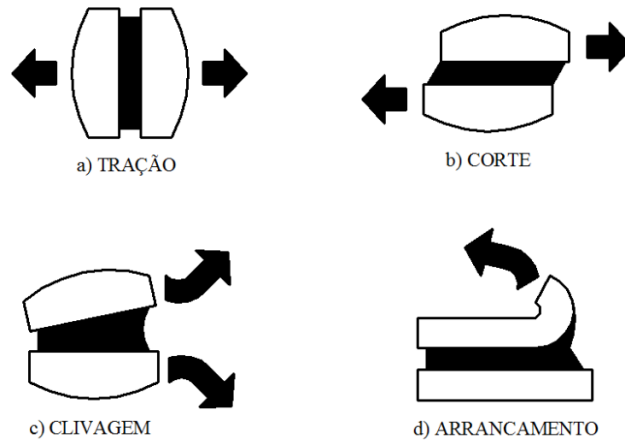


Figura 4: Os quatro tipos básicos de carregamento em juntas adesivas.

2.1.5 Tipos de juntas adesivas

Existem inúmeras configurações de juntas adesivas, sendo umas mais utilizadas do que outras; as juntas de sobreposição simples (JSS), as juntas de sobreposição dupla (JSD) e as juntas com chanfro (scarf joints), são alguns exemplos das mais usadas.

Devido à facilidade de utilização e fabricação, as JSS têm sido as mais estudadas na literatura, quer em termos experimentais quer teóricos (Adams, 2005 e da Silva, 2010). As JSD podem ser projetadas em chanfro ou em degrau, sendo sempre o objetivo projetá-las de forma a diminuir as forças de arrancamento (da Silva *et al.*, 2007).

Na Figura 5 são apresentados alguns tipos de juntas adesivas mais comuns nas aplicações práticas da engenharia.

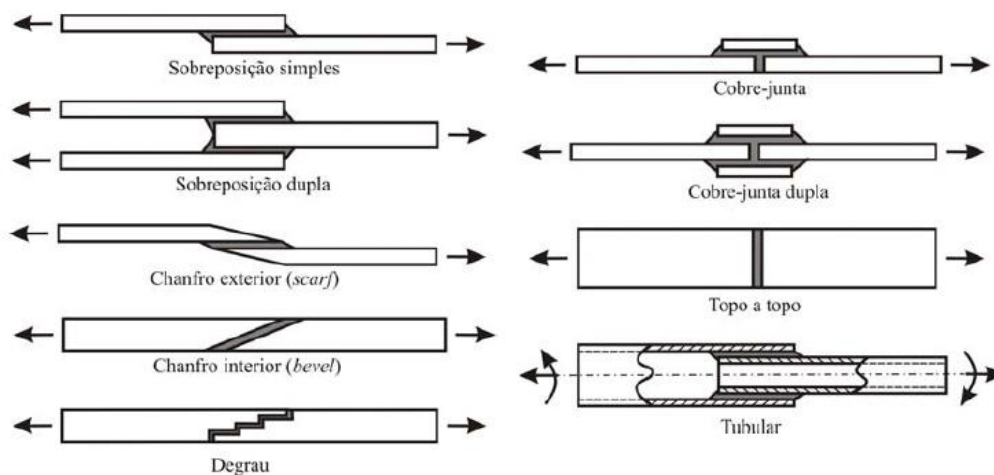


Figura 5: Diferentes tipos de juntas adesivas (da Silva *et al.*, 2007).

A aplicação descentrada da carga das JSS, Figura 6, causa efeitos de flexão, o que origina o aparecimento de tensões normais na direção da espessura do adesivo, ou seja, as forças de arrancamento reduzem a resistência da junta (Campilho *et al.*, 2005 e Pinto *et al.*, 2008). Para minimizar este problema, pode recorrer-se a juntas de sobreposição dupla (JSD) em que os efeitos da flexão são consideravelmente inferiores, comparativamente às juntas de sobreposição simples (JSS), no entanto, a produção de JSD é mais demorada e mais dispendiosa.

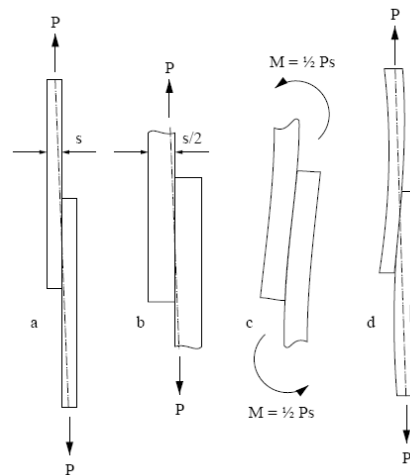


Figura 6: Esquemática da flexão dos substratos e das tensões normais resultantes nas extremidades da sobreposição: a) junta antes da deformação; b) excentricidade da carga; c) momento fletor; d) deformação final da junta (Berry *et al.*, 2000).

2.1.6 Tipos de rotura de juntas adesivas

O modo de rotura de uma junta pode estar relacionado com a preparação das superfícies, sendo que, uma preparação inadequada pode conduzir a uma falha de adesão entre o adesivo e o aderente, podendo assim comprometer a resistência da mesma.

A norma ASTM D 5573 – 99 classifica e distingue quatro diferentes tipos de rotura, sendo eles: a) a rotura adesiva na interface entre os substratos e o adesivo, b) a rotura coesiva no interior do adesivo, c) a rotura coesiva num dos substratos ou aderentes e d) a rotura mista.

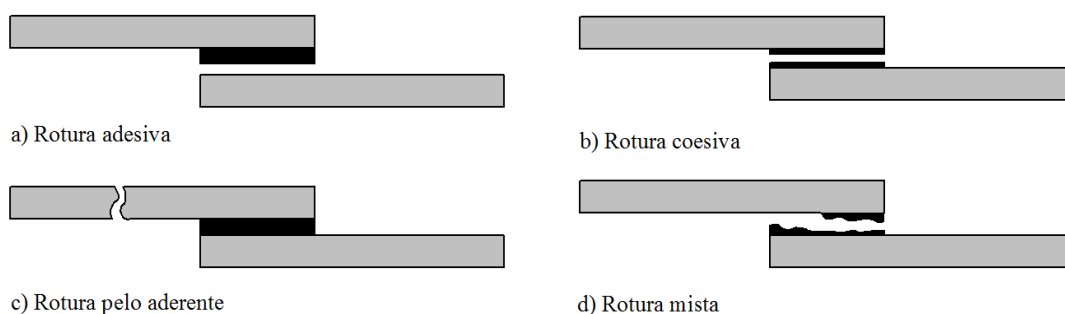


Figura 7: Representação esquemática dos diferentes modos de rotura em JSS.

Na Figura 7 a) a rotura adesiva ocorre na interface entre o substrato e o adesivo, estando este tipo de rotura associado a uma má preparação da superfície dos substratos (da Silva *et al.*, 2007). Após a rotura, observa-se que uma das superfícies dos substratos em contacto com o adesivo não contém qualquer resíduo de adesivo, o qual fica depositado na sua totalidade na outra superfície. Esta separação deve-se a uma falha na adesão entre o adesivo e a superfície do substrato. Na Figura 7 b) a rotura coesiva no interior do adesivo ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo (da Silva *et al.*, 2007). Neste caso, ambas as superfícies dos substratos estão cobertas por adesivo. Na Figura 7 c) a rotura coesiva no substrato ocorre no interior do substrato, quando a resistência à tração do adesivo é superior à resistência do substrato. A rotura de um dos substratos é considerada se a carga de rotura corresponder à resistência nominal do substrato. Na Figura 7 d) a rotura mista descreve-se como um tipo de rotura que combina características de uma rotura adesiva e de uma rotura coesiva. A sua rotura ocorre na zona de ligação entre o adesivo e o substrato e no interior do próprio adesivo. A sua origem pode estar numa falha de limpeza numa determinada secção das superfícies a ligar (Pinto, 2007). As roturas das juntas adesivas são orientadas por alguns fatores importantes, sendo eles: a contaminação das superfícies, o filete do adesivo, a espessura do adesivo, a orientação das camadas, a sequência de empilhamento e as condições ambientais.

Nos compósitos a análise e previsão dos modos de roturas nas juntas adesivas torna-se difícil, devido à multiplicidade de modos de rotura e aos diferentes valores de resistência de cada tipo de rotura (Banea *et al.*, 2009).

2.1.7 Vantagens e desvantagens dos adesivos estruturais e das juntas adesivas

Durante os últimos anos, tem-se verificado um aumento significativo da utilização de juntas adesivas. Esta tendência está relacionada com as inúmeras vantagens adjacentes que estas estruturas proporcionam e também devido ao facto de existir um maior conhecimento da comunidade geral sobre esta temática.

O processo evolutivo tem igualmente um grande peso a seu favor, nomeadamente através do aumento da qualidade de diferentes processos e a uma diminuição de custos a nível da indústria.

Tabela 1: Vantagens e desvantagens dos adesivos estruturais

Vantagens	Desvantagens
Distribuição de tensões mais uniformes	Fraca resistência à temperatura e à humidade
Melhores propriedades à fadiga devido a uma melhor distribuição de tensões	Suscetíveis a degradação ambiental e incerteza relativamente à sua durabilidade a longo prazo em condições de serviço severas
Melhor resistência à corrosão	Problemas de toxicidade e inflamabilidade
Boa capacidade de vedação	Não existe um critério de dimensão universal
Permite um melhor acabamento, obtendo estruturas com contornos regulares	-
Simplicidade na sua aplicação o que diminui os custos de produção	-

Comparativamente às técnicas de fixação convencionais, a utilização de juntas adesivas estruturais apresenta alguns benefícios, tais como: uma distribuição de tensões mais uniforme (da Silva *et al.*, 2011), uma elevada resistência à fadiga e a possibilidade de unir diferentes materiais, como por exemplo a ligação de plásticos reforçados com fibras de metais ou de outros compósitos (Banea e da Silva, 2008). Para além disso, as juntas adesivas estruturais apresentam outras vantagens e também desvantagens face às ligações tradicionais, conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2: Vantagens e desvantagens das juntas adesivas (Tong e Steven, 1999).

Vantagens	Desvantagens
Capacidade de absorver diferentes tipos de energia	As peças não podem ser separadas posteriormente
Capacidade de obter estruturas mais leves e rígidas	Podem ocorrer tensões residuais resultantes dos diferentes coeficientes de expansão térmica

Capacidade de unir materiais diferentes (por exemplo metais com compósitos)	Sensibilidade a tensões de tração segundo a espessura
Capacidade de unir eficientemente materiais de espessuras finas	As juntas adesivas são inerentemente fracas a forças de arrancamento
Comparando com as ligações rebitadas e aparafusadas, estas apresentam uma melhor distribuição da carga de uma maneira uniforme, minimizando as concentrações de tensões	Fraca resistência à temperatura e à humidade
Melhor aparência superficial (sem cabeças de parafusos, sem marcas de soldadura, etc.)	Dificuldade ao nível das inspeções
Facilidade no fabrico de formas complexas	As juntas adesivas necessitam de um prévio tratamento das superfícies envolvidadas
Criação de um contacto contínuo entre as superfícies ligadas	-
Processo fácil de robotizar	-
Juntas adesivas são muitas vezes uma técnica conveniente e de baixo custo	-

2.1.8 Parâmetros que influenciam o desempenho das juntas

Tratamentos da superfície

Os tratamentos superficiais são muito importantes para a teoria da adesão, pois têm como objetivo garantir uma boa molhagem. Por exemplo no caso dos polímeros, estes têm uma baixa energia superficial, inferior à dos adesivos, o que é indesejável. É sempre necessário considerar o tratamento da superfície em conjunto com as propriedades dos adesivos, para definir a adesão entre os materiais.

A grenalhagem, caracterizada como um processo passivo mecânico, é realizada pela projeção de partículas de diversos materiais sobre a superfície a tratar.

O processo ativo, designado por anodização, remove as camadas atómicas mais superficiais e deixa expostas as camadas atómicas mais homogéneas, contudo, apresenta como inconvenientes o risco de contaminação da área anteriormente limpa.

Já os tratamentos por ataque químico são à base de ácidos e oxidação, o que os torna mais agressivos, por isso, deve ter-se um cuidado especial para não atacar em demasia a superfície e não danificar os substratos (Brinson, 1990).

Espessura dos adesivos

A espessura do adesivo é uma das características geométricas mais importantes a considerar no projeto de uma junta. Deve garantir-se uma espessura ótima para o adesivo (entre 0,1 e 0,5 mm), para que a junta apresente o melhor desempenho. Na maioria das aplicações de juntas coladas, os fabricantes recomendam uma espessura de 0,1 a 0,2 mm para a obtenção da resistência máxima (Gleich *et al.*, 2001). O principal motivo para um decréscimo da resistência, para espessuras inferiores a 0,1 mm, é o facto de existir uma queda abrupta da resistência da junta, possivelmente devido à existência de risco de falhas de colagem (da Silva *et al.*, 2007). Para espessuras muito finas, o risco de falhas de colagem aumenta, e conseqüentemente formam-se defeitos (Mahdi *et al.*, 2003). Por outro lado, verifica-se experimentalmente que a resistência de uma junta diminui com o aumento da espessura do adesivo a partir de 0,2 mm.

Pode analisar-se na Figura 8 a diminuição da resistência das juntas em função do aumento da espessura do adesivo epóxico de alta resistência (da Silva *et al.*, 2007).

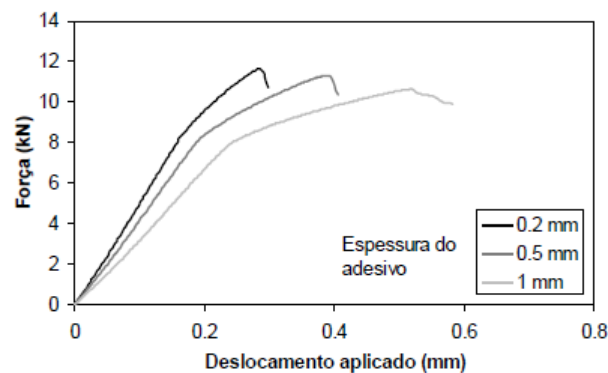


Figura 8: Análise da força-deslocamento de juntas de simples sobreposição, para diferentes espessuras do adesivo (da Silva *et al.*, 2007).

Efeito do comprimento de sobreposição

Para além da espessura do adesivo, o comprimento de sobreposição (L_0) também influencia diretamente o desempenho da junta. O aumento da largura de sobreposição aumenta proporcionalmente a resistência da junta. Contudo, o efeito de L_0 depende do tipo de adesivo utilizado, dúctil ou frágil, e do tipo de substrato. No caso de se utilizar um adesivo dúctil e um substrato elástico, a resistência da junta é proporcional ao valor de L_0 , pois o adesivo tem a capacidade de se deformar plasticamente e de redistribuir as tensões. Por outro lado, se for utilizado um adesivo frágil e um substrato elástico, a

resistência da junta não é proporcional a L_0 na medida em que a carga máxima suportada pela junta está sempre limitada pelos picos de tensão nas extremidades da sobreposição (Karachalios *et al.*, 2013). A resistência da junta aumenta para sobreposições curtas, mas para as juntas com substrato em aço macio, devido à plastificação dos substratos.

Propriedades dos substratos

Outro fator preponderante na influência do desempenho das juntas é o material dos substratos. De forma a obter-se uma junta adesiva com elevado desempenho, é necessário uma boa capacidade de adesão entre os substratos e o adesivo.

A resistência do substrato é fundamental e pode facilitar algumas explicações de diversas roturas de juntas (da Silva e Campilho, 2015).

Existem substratos em material polimérico que quando comparados com os materiais metálicos apresentam propriedades mecânicas inferiores. Deste modo, houve um grande interesse em utilizar materiais compósitos para reforçar os polímeros e aumentar a sua rigidez e resistência específica, adicionando metais, formando assim os LFM.

Existe uma forte tendência em se utilizar materiais mais leves e eficientes como os compósitos, tendo atualmente estes materiais uma elevada utilização (da Silva *et al.*, 2011).

2.2 COMPÓSITOS

2.2.1 Introdução

Os materiais compósitos apresentam na sua constituição pelo menos dois componentes, com propriedades físicas e químicas distintas. Estes componentes formam um composto com propriedades impossíveis de se obterem apenas com um dos materiais individualmente. Estes materiais podem surgir da ligação de metais com polímeros, metais com cerâmicos ou polímeros com cerâmicos. Contudo, para os compósitos e os adesivos, deve ter-se em conta a resistência dos adesivos em meios adversos, por exemplo em ambientes marítimos (da Silva *et al.*, 2007).

É de realçar que estes materiais são distintos das ligas metálicas, pois cada material continua a manter as suas propriedades químicas, físicas e mecânicas (Campbell, 2010). De uma forma geral, os componentes de um material compósito não se dissolvem e podem ser fisicamente identificados pelas interfaces que os separam. Estes materiais são amplamente utilizados na indústria, nomeadamente os plásticos reforçados com fibras de vidro (GFRP – *Glass Fibre Reinforced Plastics*). Os compósitos avançados, como as combinações de fibra de carbono com resina epóxida (CFRP) e de fibra de grafite com resina epóxida, estão a tornar-se cada vez mais

importantes nas aplicações estruturais de maior exigência técnica (Smith, 1998; de Moura, 2005).

Com o intuito de reduzir o peso das mais diversas estruturas, as indústrias recorrem cada vez mais aos materiais compósitos. A utilização destes materiais lança novos desafios aos engenheiros projetistas, quando estes necessitam de executar novos projetos de juntas adesivas, uma vez que os materiais compósitos, na direção das fibras têm uma alta resistência à fadiga e são ao mesmo tempo rígidos, mas as suas propriedades na direção transversal e ao corte são bastante inferiores.

As inovações na área dos compósitos têm permitido uma redução significativa de peso em projetos estruturais. Este tipo de material oferece diversas vantagens quando comparado com as ligas metálicas, particularmente quando a elevada resistência e rigidez são fatores determinantes. Além disso, os compósitos oferecem excelentes propriedades de resistência à fadiga e à corrosão (Botelho *et al.*, 2006).

A utilização de materiais compósitos na indústria tem vindo a crescer a um nível significativo, sendo esta tecnologia ao longo dos anos acompanhada e melhorada no sentido de proporcionar uma melhor utilização de adesivos estruturais, substituindo as técnicas tradicionais (Adams *et al.*, 1997).

2.2.2 Plástico reforçado com fibras de carbono

A matriz dos CFRP é geralmente uma resina termoendurecível de poliéster ou epóxico. O alto desempenho destes compósitos resulta da utilização das fibras de carbono, que para além de possuírem uma resistência e uma rigidez bastante superior às fibras de vidro, são significativamente mais leves. A resina epóxi possui uma resistência e adesão superior, pelo que é bastante usada em componentes que necessitam de elevada resistência à fadiga. Estas resinas são também caracterizadas pela alta resistência a esforços contínuos e uma baixa expansão térmica, garantindo uma grande estabilidade dimensional, o que é muito importante em várias aplicações aeroespaciais.

Tipicamente, as fibras de carbono por si só não possuem propriedades suficientes para serem utilizadas isoladamente, por isso deverão ser combinadas com matrizes de forma a resultarem num material com propriedades mecânicas excelentes.

Os CFRP apresentam algumas vantagens e desvantagens, como é comum em qualquer tipo de material. Podem considerar-se como principais vantagens, o seu reduzido peso, preços mais competitivos, uma boa rigidez específica e a possibilidade da sua adaptação a novas tecnologias, assim como a durabilidade, ou seja, a resistência à corrosão, a resistência à fadiga e o bom comportamento à fluência. A baixa resistência ao arrancamento, a fragilidade do material, o comportamento em situações de incêndio e facto de ser um material não reciclável são algumas das desvantagens impostas pelos CFRP.

As camadas deste tipo de materiais estão suscetíveis a sofrer danos, nomeadamente delaminações, devido à baixa resistência interlaminar. São ainda

sensíveis a qualquer tipo de impacto e devem ser reparadas assim que tal aconteça, pois este tipo de dano reduz significativamente a resistência da estrutura (Banea, 2009).

2.2.3 Aplicação de compósitos

Os materiais compósitos são cada vez mais utilizados em estruturas de engenharia, nomeadamente na indústria aeronáutica. O Boeing 787 Dreamliner, apresenta na sua constituição uma estrutura composta por 50% de materiais compósitos com plástico reforçado com fibras de carbono, Figura 9. Este aumento da utilização de compósitos, juntamente com as melhorias conseguidas no desenvolvimento das tecnologias, permitiu uma redução de cerca de 20% no consumo de combustível deste avião, o que equivale a uma redução do peso do avião em 20% (Boeing, 2014).

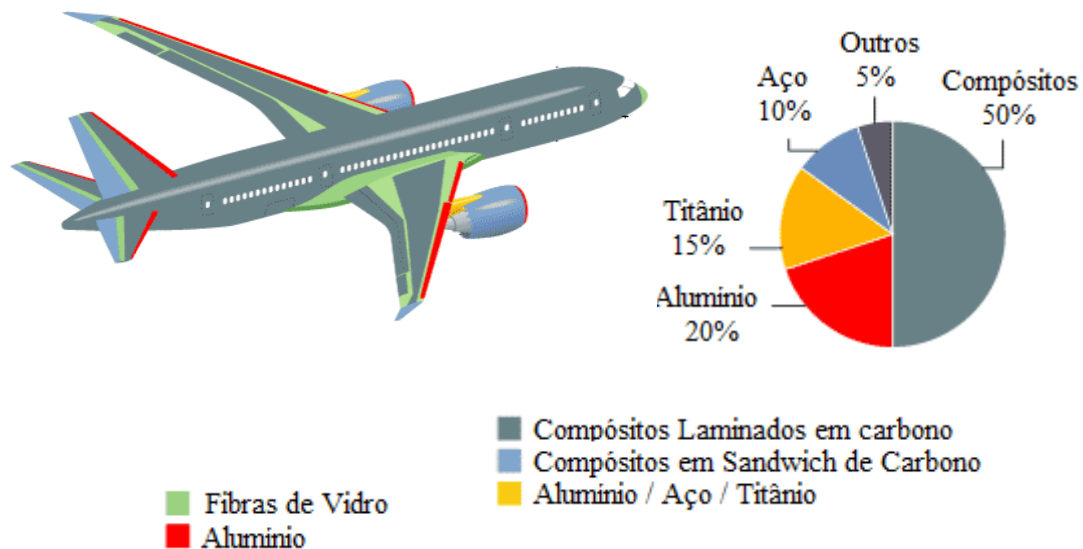


Figura 9: Distribuição percentual dos materiais constituintes do Boeing 787.

Cada vez mais se verifica um aumento na utilização de materiais compósitos. Vários estudos mostram que o maior mercado continua a ser o dos transportes (31%), seguido pelo mercado da construção civil (19,7%), da marinha (12,4%), dos equipamentos elétricos/electrónicos (9,9%), dos produtos de consumo (5,8%) e dos aparelhos e equipamentos comerciais, sendo estes também mercados com grande expansão. A indústria aeronáutica representa apenas 0,8 %, o que é surpreendente tendo em conta a importância atual da aplicação dos compósitos (Ana, 2009).

Na indústria aeronáutica os CFRP são também muito utilizados, sendo o avião Boeing 787 Dreamliner um bom exemplo, Figura 10. Desde o dia do seu lançamento mais de 835 unidades foram encomendadas por mais de 56 clientes tornando-se assim

no maior sucesso comercial da indústria aeronáutica. O Boeing 787 é o primeiro avião comercial a ser fabricado com CFRP. Este avião é produzido com 50% de materiais compósitos, contra os 12% utilizados na versão anterior, o Boeing 777. Este aumento da utilização de materiais compósitos leva a que o custo do transporte por milha seja 12% inferior, comparativamente a aviões com o mesmo porte (Boeing, 2014).



Figura 10: Boeing 787 Dreamliner.

2.2.4 Modos de rotura em compósitos

O modo de rotura é fortemente condicionado pelo tipo de material constituinte da matriz do compósito, assim como pela sua compatibilidade com o reforço.

É necessário estudar as juntas adesivas utilizando materiais compósitos e analisar os seus modos de rotura, assim como verificar se existe uma forma simples para prever a resistência destas juntas.

Os parâmetros típicos que influenciam as roturas das juntas adesivas em compósitos são: a contaminação da superfície, o filete do adesivo, a espessura do adesivo, a orientação das camadas, a sequência de empilhamento e as condições ambientais. No entanto, ainda é difícil prever o modo de rotura das juntas compósitas devido à multiplicidade dos modos de rotura e aos diferentes valores de resistência de cada tipo de rotura (Banea *et al.*, 2009).

O módulo de elasticidade transversal, ou seja, ao longo da espessura do substrato é apenas duas a três vezes maior do que o material que constitui a matriz, considerando o principal problema a baixa resistência à tração transversal. A maior parte das soluções analíticas considera apenas a tensão longitudinal nos substratos, contudo, a tensão de corte e a tensão normal no sentido da espessura são muito importantes, sobretudo no contexto dos materiais compósitos, uma vez que no sentido da sua espessura apresentam uma resistência inferior.

As tensões de arrancamento podem provocar a rotura interlaminar nos substratos do compósito, por intermédio das delaminações localizadas na proximidade das singularidades (da Silva *et al.*, 2007).

O substrato compósito divide-se localmente devido a tensões de delaminação, reduzindo a resistência de tensões de corte entre os dois substratos (da Silva, 2011), como mostra a Figura 11.

Um dos objetivos deste trabalho passa por impedir a formação das falhas de delaminação, melhorando a flexão dos CFRP através da utilização de LFM.

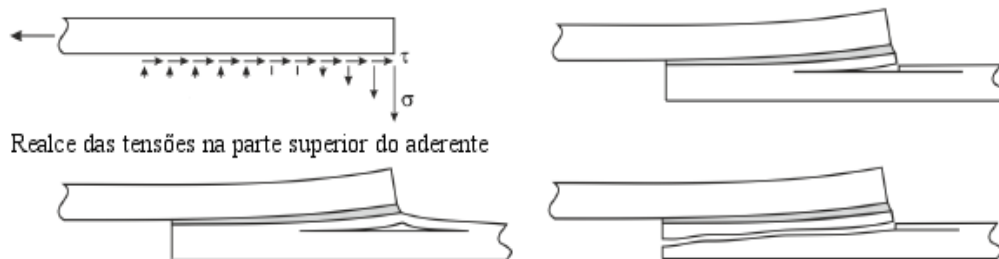


Figura 11: Rotura interlaminar em juntas de sobreposição dupla de material compósito (da Silva *et al.*, 2006).

A delaminação das camadas pode ser considerada um modo de falha que ocorre devido à elevada tensão interlaminar. Este modo de rotura é caracterizado pela separação das lâminas adjacentes do PRF. Isto pode resultar devido ao impacto a baixas velocidades, excentricidades no caminho de carga estrutural ou de fora do plano de tensão. Na ausência destas situações, pode ocorrer delaminação devido à força de compressão que provoca encurvadura geral ou local (da Silva *et al.*, 2006).

2.2.5 Soluções para evitar as delaminações em juntas compósitas

Alguns autores têm vindo a dissecar o problema das tensões de delaminação em juntas adesivas utilizando compósitos, tendo encontrado algumas formas de atenuar esta questão (da Silva, 2011). O seu fabrico é contudo difícil e caro de implementar na indústria, sendo por isso cada vez mais importante estudar juntas adesivas utilizando compósitos, de modo a encontrar um método fiável para evitar as falhas interlaminares que ocorrem geralmente com este tipo de material.

Diversos autores referem que o principal problema dos polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) é a baixa resistência interlaminar e as baixas propriedades mecânicas, podendo provocar a rotura do compósito em vez do adesivo.

Os investigadores da Silva e Adams (2007) estudaram as juntas de sobreposição simples (JSS) com diferentes geometrias de substratos, incluindo a utilização de filete de adesivo externo, para reduzir as tensões de delaminação e garantir uma distribuição de tensões mais uniforme. Este filete forma-se devido ao excesso de adesivo que sai fora da junta, aquando a sua colagem. A presença do filete é importante, na medida em que causa uma redistribuição das tensões, possibilitando um alívio dos picos de tensão,

contudo, esta técnica apresenta como principal desvantagem a dificuldade do seu fabrico. Foram ainda estudadas outras técnicas, mais sofisticadas, para reduzir as tensões de delaminação nos compósitos, tais como a utilização dos z-pins. Esta técnica tem como objetivo aumentar a resistência interlaminar, no sentido da espessura dos compósitos (Sinmazçelik *et al.*, 2011), porém a sua utilização apresenta como inconvenientes o difícil e economicamente dispendioso processo de fabrico. Os z-pinos reforçados por compósitos são formados por uma haste de pequeno diâmetro, inseridos na direção da espessura (o chamado “eixo z” em modelos analíticos, daí surgiu o nome “z-pinos”) dos materiais compósitos laminados, como ilustra a Figura 12. Existem algumas desvantagens relativamente à produção e ao processo de fixação dos z-pinos no sentido da espessura (Chang *et al.*, 2006).

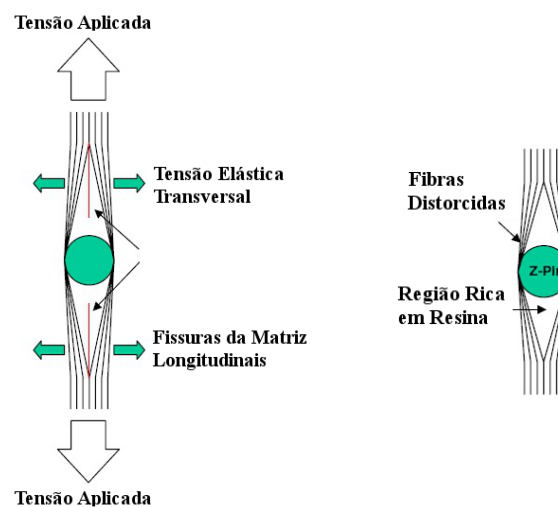


Figura 12: Representação esquemática do processo de fratura longitudinal num laminado unidirecional com um fixador-z (Chang *et al.*, 2006).

Uma das formas de aumentar a resistência no sentido da espessura dos materiais compósitos é modificá-los com algumas técnicas, tais como: a tecelagem 3D (Mouritz *et al.*, 1999), a costura (Dransfield *et al.*, 1994) e a trança (Tong *et al.*, 2002), como ilustra a Figura 13.

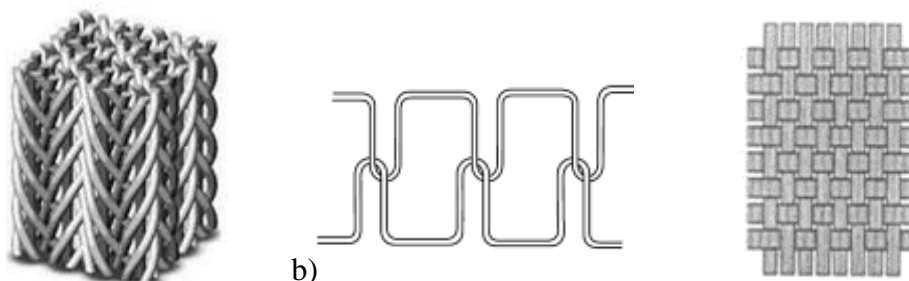


Figura 13: a) Tecelagem 3D; b) processo de costura de fibras; c) estrutura de fibras trançadas, (Boisse, 2011).

Estas técnicas utilizadas para evitar as delaminações em juntas compósitas, não são simples de implementar na prática e requerem trabalhos extras, o que leva a um aumento dos custos de produção.

O conceito LFM é desenvolvido para reforçar o alumínio, uma das soluções para aplicar o LFM é para melhorar a resistência transversal do compósito. Irão ser realizados ensaios experimentais para avaliar as combinações, de modo a prever as delaminações.

2.3 Laminados de fibra e metal

2.3.1 Introdução dos LFM

Pretende-se com a utilização dos LFM aumentar a resistência à delaminação dos materiais compósitos, nomeadamente das fibras de carbono. O aumento de resistência será conseguido no sentido da espessura do material, com a aplicação de chapas finas de alumínio de alta resistência 2024-T3 para evitar a delaminação das fibras de carbono.

No final da década de setenta, a ideia de se utilizar dois materiais para formar um compósito estrutural, teve como objetivo melhorar o desempenho à fadiga de estruturas, através da introdução de um metal laminado de forma a ultrapassar a maioria das desvantagens de ambos os materiais (Vogelshang e Vlot, 2000). Verificou-se que a taxa de crescimento das fendas, nos materiais laminados, pode ser reduzida se estes forem constituídos por materiais em chapas finas, em vez de se utilizar uma chapa sólida de igual espessura. Este novo conceito designou-se por laminados de fibra e metal (LFM) e permitiu aos metais uma melhoria da sua resistência à fadiga, através da introdução de fibras de materiais poliméricos entre as camadas de metal, como mostrado na Figura 14.

Os LFM têm sofrido um grande desenvolvimento e têm permitido um aumento significativo da resistência à fadiga das estruturas de alumínio laminado.

As fibras introduzidas nos LFM são resistentes às tensões de fadiga, aumentando assim a resistência na direção perpendicular das fibras. Apresentam ainda, características excelentes de fadiga, assim como bons resultados na redução do crescimento de fendas em camadas de metal e uma boa resistência ao crescimento de delaminações nas interfaces das camadas (Vlot e Gunnink, 2001).

Os LFM resultam num material compósito de baixa densidade, com alta resistência à fadiga, com alta tenacidade à fratura e com alta resistência ao impacto. Além disso, estas características mecânicas também oferecem maior segurança em comparação com o alumínio individualmente, devido ao elevado ponto de fusão das fibras de reforço (Sinmazçelik *et al.*, 2011).

Os primeiros LFM a serem desenvolvidos foram patenteados em 1983 (US4500589 A), com o nome Arall (Schijve *et al.*, 1983), em que as camadas de alumínio foram reforçadas com fibras de aramida, sendo estas desenvolvidas em 1978 na Faculdade de Engenharia Aeroespacial da Universidade de Tecnologia de Delft

(Villanueva e Cantwell, 2004). Este tipo de laminado consiste num conjunto de camadas de chapas finas de ligas de alumínio, alternadas com pré-impregnados de fibra de aramida uniaxial ou biaxial, como ilustrado na Figura 14 (Vogelstang e Vlot, 2000).

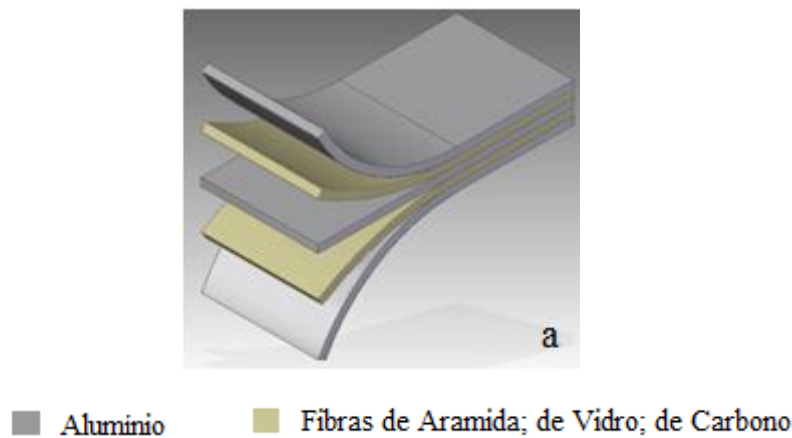


Figura 14: a) Exemplo de Laminados de Fibras e Metal.

Até aos dias de hoje foram ainda desenvolvidos outros tipos de LFM, são eles os Glare (alumínio reforçado com fibras de vidro), os Carall (alumínio reforçado com fibras de carbono) e os TiGr (titânio reforçado com fibras de carbono) (Alderliesten, 2009; Vermeeren, 2003). O desenvolvimento destes novos compósitos teve como objetivo melhorar as propriedades específicas da resistência à fadiga dos metais; no caso dos Glare consegue-se uma melhoria da resistência à compressão, utilizando os Carall a rigidez e a resistência são aumentadas e os TiGr permitem uma melhoria da resistência dos LFM a altas temperaturas, devido às boas propriedades mecânicas e térmicas, combinadas com uma baixa densidade e uma boa resistência a falhas (Vlot e Gunnink, 2005).

Em comparação com os Glare, os LFM de carbono-titânio têm uma maior resistência, rigidez e excelentes propriedades de fadiga. Contudo, a densidade deste laminado é inferior, devido à menor densidade das fibras de carbono, o que leva a uma maior redução de peso nas aplicações das aeronaves.

O uso de folhas de titânio tem, no entanto, algumas desvantagens em comparação com as folhas de alumínio, como o custo do material e o difícil pré-tratamento. Para aplicações mais exigentes, como é o caso de altas temperaturas, este LFM é, contudo, mais adequado do que o Glare.

Tem sido também estudada a utilização de LFM constituídos por folhas de magnésio combinadas com camadas de fibras de carbono. Esta combinação de materiais resulta num melhoramento da força específica (S. Abdullah *et al.*, 2009).

Desde os anos 80 que a investigação e o desenvolvimento do conceito LFM têm vindo a aumentar significativamente, sobretudo na Faculdade de Engenharia Aeroespacial da Universidade de Tecnologia de Delft. Em 1996, a investigação nesta área teve um avanço muito significativo, após a decisão da Airbus em querer aplicar as

fibras de vidro (Glare) como reforço nas estruturas dos seus aviões, nomeadamente no Airbus A380 (Vlot *et al.*, 1999). Em abril de 2005, a Airbus realizou o primeiro voo do avião A380, considerado o maior avião comercial do mundo, utilizando a nova construção que utiliza nas partes da fuselagem estrutural uma percentagem significativa de Glare. Por norma, os Glare são apresentados como uma sobreposição de placas finas de alumínio da liga 2024-T3, com fibras de vidro alternadas, utilizando entre ambos o adesivo epóxico FM94.

É evidente o grande avanço na investigação dos LFM, sobretudo na resistência residual e, no comportamento da fadiga dos metais laminados. Tem-se verificado que a natureza dos LFM (combinação metal / fibra) tem aumentado a complexidade do problema, tendo em conta que os vários materiais se combinam num só para redistribuir a carga aplicada (Vermeeren, 1995).

2.3.2 Conceito dos LFM

Os LFM são considerados um material híbrido, constituído por chapas finas de ligas de metal alternadas com camadas de fibras de materiais poliméricos reforçados (Vlot e Gunnink, 2001; Cortes e Cantwell, 2006). Os metais, materiais isotrópicos, apresentam uma elevada resistência à tração e a tensões de corte, assim como uma elevada resistência ao impacto, sendo fáceis de reparar. Apesar dos metais apresentarem uma baixa resistência à fadiga, os compósitos têm uma elevada resistência no sentido das fibras e uma elevada reparabilidade, devido à combinação compósito/metal (Vogeleisang e Vlot, 2000; Alderliesten e Benedictus, 2007; Chang *et al.*, 2008).

A tecnologia utilizada nos compósitos de fibra/metal combina as vantagens dos materiais metálicos com as vantagens dos materiais poliméricos de fibras reforçadas, obtendo-se melhores resultados comparativamente aos materiais monolíticos de igual espessura, o que leva a uma diminuição das taxas de propagação das fendas. Estão envolvidas uma série de variáveis na composição deste laminado, o que inevitavelmente leva a uma vasta gama de combinações diferentes de laminação. O tipo de liga do metal, o tipo de fibras, o tipo de polímero, a espessura das camadas, o número de camadas e mesmo a orientação das camadas são algumas das variáveis a ter em conta.

Os LFM foram desenvolvidos com algum sucesso na estrutura das fuselagens dos aviões, existindo atualmente um interesse crescente em aplicar este conceito nas estruturas das asas dos aviões de transporte civil e militar, assim como noutras aplicações (Vlot e Gunnink, 2001).

Devido ao aumento do número de passageiros em voos intercontinentais, têm vindo a ser realizados esforços de melhoria dos custos de produção dos aviões de grande capacidade (é o caso dos aviões da empresa Airbus). De modo a reduzir o custo de produção, para os próximos 30 anos, estão a ser analisadas e desenvolvidas novas tecnologias para aplicação de novos materiais nas estruturas dos aviões (S. Abdullah *et al.*, 2009).

Estudos realizados sobre os custos de produção dos LFM mostram que estes são cinco a dez vezes superiores aos de uma liga de alumínio tradicional, usada na indústria aeronáutica, contudo os LFM podem apresentar uma redução de pelo menos 20% no seu peso, em função da estrutura. Deste modo, os fabricantes do setor aeronáutico consideram que a substituição do tradicional alumínio por LFM pode vir a ser uma opção mais vantajosa, devido às suas excelentes propriedades mecânicas (Vlot e Gunnink, 2001).

O primeiro dos 12 aviões, Airbus A350, encomendados pela TAP chega a Lisboa em 2017, mais eficiente, com 25% de poupança no consumo de combustível e uma utilização de 53% de materiais compósitos, como mostra a Figura 15, (Airbus, 2015).



Figura 15: Distribuição percentual dos materiais constituintes do Airbus A350 (Airbus, 2015).

2.3.3 Vantagens dos LFM

Os LFM apresentam algumas vantagens significativas quando comparados com as ligas de alumínio convencionais, Tabela 3. Devido à aplicação das fibras permite-se reforçar o metal, oferecendo propriedades mecânicas superiores, boa resistência e rigidez (Chang *et al.*, 2008). Em comparação com os compósitos, os LFM têm uma elevada rigidez e uma boa resistência ao “peel” (arrancamento).

Tabela 3: Vantagens dos laminados de fibra e metal.

Comportamento do material	1. Os LFM apresentam excelentes propriedades à fadiga (Vlot, 1996; Alderliesten, 2005).
	2. Os LFM têm melhor tenacidade à fratura do que as suas próprias ligas constituintes. As taxas de crescimento de fendas para este tipo de material são mais baixas, pelo que se tornam muito apelativas no seu uso (Castrodeza <i>et al.</i> , 2003).

	3. Ao contrário dos materiais compósitos, o comportamento da tolerância do dano nos LFM é compatível às ligas de alumínio convencionais (Vogel <i>et al.</i> , 1995; Vogel e Vlot, 2000).
Propriedades Físicas	1. Apresentam uma baixa densidade, devido à matriz polimérica e às placas de alumínio (Asundi e Choi, 1997).
Redução de custos	1. Os LFM oferecem uma economia de peso em relação a estruturas metálicas atuais. 2. Apresentam um menor número de reparações e de manutenções, reduzindo assim os seus custos (Asundi e Choi, 1997).

2.3.4 Desvantagens dos LFM

No caso dos LFM, o ciclo de processamento para a cura da matriz polimérica nas camadas de compósitos é bastante longo, o que torna a sua aplicação menos vantajosa (Cortes e Cantwell, 2006). Esta particularidade leva a um aumento do tempo total de produção, diminuindo desta forma a produtividade e aumentando os custos de produção destes materiais.

2.3.5 Falhas nos LFM

A adição de fibras no adesivo permite que se origine um caminho secundário no trajeto da propagação das fendas, reduzindo significativamente a carga transferida nas camadas de metal. Devido ao equilíbrio entre a propagação das fendas e o crescimento da delaminação, as taxas de crescimento da fenda são aproximadamente constantes ao longo de um determinado período de vida do crescimento das fendas (Alderliesten, 2007).

O comportamento da fadiga é influenciado pelas características mecânicas, de posição e de tamanho, tal como as camadas de “pré-impregnado”, as camadas de alumínio e os elementos de reforço (Rodi, 2007).

A existência de “pontes” (bridged) sobre as fibras, atua como um caminho de carga secundário ao longo da fenda, parte da carga reduz a intensidade da tensão no início da fenda do metal, conforme o ilustrado na Figura 16 (Alderliesten, 2007). Nas fibras dos LFM, as “bridged” indicam as limitações das soluções analíticas lineares elásticas para o cálculo das deformações, quando as cargas estáticas aplicadas são elevadas.

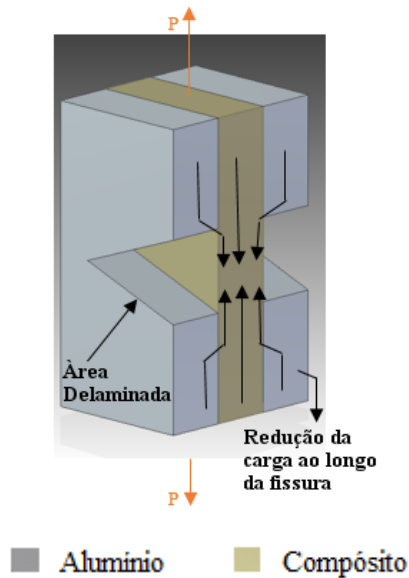


Figura 16: Esquema ilustrativo da formação de fendas nos LFM (Alderliesten, 2007).

A propagação da fadiga nas fendas nos LFM consiste no crescimento da fenda nas camadas metálicas e a delaminação nas interfaces metal / pré-impregnado. A propagação das fendas juntamente com o crescimento da delaminação são aproximadamente constantes ao longo do crescimento das fendas (Alderliesten, 2007).

Uma falha no desenvolvimento e no design é decisivo para o crescimento de fendas por fadiga nos LFM. Este crescimento da fenda só poderá ser calculado com precisão para um carregamento de amplitude constante. Para um carregamento de amplitude variável, que é o caso mais realista nas fuselagens e asas de aviões, ainda não se encontra disponível um modelo exato (Khan *et al.*, 2008).

Durante as duas últimas décadas, foram adotadas diversas abordagens de medição com a finalidade de investigar os mecanismos de fratura envolvidos na sequência de falha dos LFM (Alderliesten, 2007). O elevado conhecimento sobre o comportamento dos LFM que se adquiriu, resulta de investigações e medidas experimentais realizadas utilizando diferentes técnicas de medição (A. Fahr *et al.*, 2000).

O início da propagação da fenda no metal é devido à presença de uma fenda no sentido da espessura de um metal, no qual a sua tensão de corte aumenta. A formação da fenda ocorre quando localmente a tensão de rotura do metal é atingida (Vries, 2001).

Novos desenvolvimentos em ligas metálicas, materiais compósitos e materiais híbridos, como os LFM, resultaram em estruturas menos sensíveis a falhas e apresentam taxas de crescimento de falhas mais lentas (Vlot e Gunnink, 2001). A tolerância à falha pode ser definida como a capacidade de uma estrutura conseguir manter os níveis suficientes de falhas, resultantes da fadiga, corrosão e impacto, de modo a que a falha possa ser detetada e reparada antes que atinja um nível crítico.

2.3.6 Delaminação dos LFM

O mecanismo que provoca estragos mais graves é precisamente a delaminação em laminados compósitos, tendo um papel relevante durante a fadiga e implicando uma reduzida funcionalidade (Khan *et al.*, 2008).

A delaminação controlada no material torna possível uma abertura da fenda sem falha das fibras. A carga aplicada, que é transferida às fibras, reduz a fadiga e previne a abertura e propagação das fendas. As fibras laminadas podem ser combinadas com as ligas de alumínio, que têm uma força específica elevada comparativamente aos materiais compósitos e, em conjunto apresentam melhores propriedades do que individualmente.

Geralmente nos LFM podem ser considerados dois tipos de delaminação:

- **Delaminação estática:** este tipo de delaminação ocorre sem falha nas fibras e desenvolve-se devido a um aumento da força de corte entre as camadas de metal e de pré-impregnado. É reduzida a concentração de tensões nas camadas de fibra de epóxido e aumentada a pressão local nas camadas de alumínio. Poderá ocorrer a falha adesiva entre as fibras e o epóxido, a falha coesiva no próprio epóxido, ou poderá ainda ocorrer a falha adesiva entre o epóxido e as camadas de alumínio.

Os ensaios de crescimento da delaminação estática nos LFM foram realizados em várias configurações. O crescimento da delaminação estática nos LFM pode ser afetado pela ocorrência da deformação plástica nas camadas metálicas (de Vries e Vlot, 2001).

- **Delaminação dinâmica:** este tipo de delaminação ocorre em consequência de um descolamento súbito entre a fibra e o epóxido, devido à fragilidade da fibra. A área de delaminação dinâmica é inferior relativamente à área da delaminação estática.

A delaminação verifica-se quando a tensão de corte na interface atinge um valor crítico. Vermeeren (1995) explica que o sistema de tensão de corte é devido ao enfraquecimento causado pela fenda e à plasticidade na zona da fenda, explica também que a falha da fibra pode ocorrer após a delaminação estática ou sem delaminação estática. Quando ocorre a falha da fibra, a elevada quantidade de energia elástica é armazenada nas fibras causando delaminação junto à interface metal/fibra, sendo este comportamento é definido como delaminação dinâmica.

3 TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1 Propriedades dos componentes

3.1.1 Propriedades do adesivo Araldite® AV138M / HV 998

O adesivo estrutural utilizado neste trabalho foi o Araldite® AV138M, com o endurecedor HV 998, fornecido pela Huntsman, Figura 17 a).

A mistura dos componentes resina/endurecedor (AV138M/HV 998) foi realizada tendo em conta uma razão de peso de 100 g de resina para 40 g de endurecedor.

O adesivo foi aplicado nos substratos de forma manual com o auxílio de uma espátula, mas antes garantiu-se uma perfeita homogeneidade da mistura de resina e endurecedor, utilizando uma máquina misturadora (SpeedMixer) durante 3 minutos, Figura 17 b). A cura do adesivo foi efetuada a 100°C, durante 10 minutos (Huntsman, 2012).



Figura 17: a) Adesivo AV138M e endurecedor HV 998; b) Máquina misturadora (SpeedMixer).

Este adesivo apresenta-se em forma de uma pasta, sendo constituído por uma mistura de dois componentes. Este caracteriza-se por um adesivo frágil e apresenta uma boa resistência química e mecânica a elevadas temperaturas (120°C). As propriedades mecânicas do adesivo são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Propriedades mecânicas do adesivo AV138M / HV998 (da Silva *et al.*, 2010; Neto *et al.*, 2012).

Propriedades	Araldite® AV138M / HV998
E [MPa]	4890
ν	0,35
G [MPa]	1560
ε_f [%]	1,21 \pm 0,10
σ_f [MPa]	39,45
σ_y [MPa]	36,49
τ_f [MPa]	30,20
τ_y [MPa]	25,10
G_{IC} [N/mm]	0,35
G_{IIC} [N/mm]	4,91

As curvas tensão-deformação dos provetes maciços do adesivo AV138M / HV998 ensaiados à tração são apresentadas na Figura 18, sendo estas obtidas experimentalmente (Campilho *et al.*, 2013).

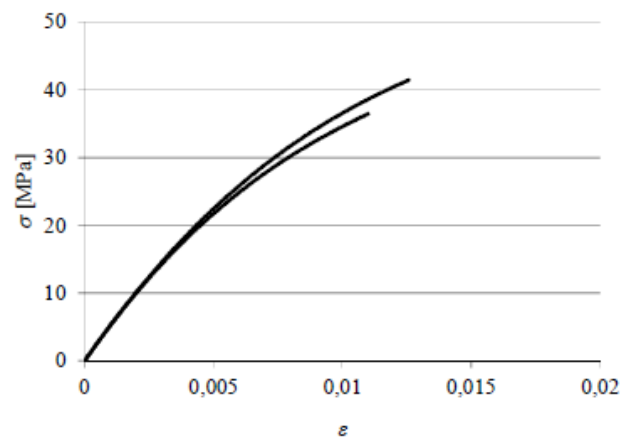


Figura 18: Curvas σ - ε do adesivo AV138M / HV998 (Campilho *et al.*, 2010).

3.1.2 Propriedades mecânicas dos substratos em material compósito

As propriedades elásticas das camadas unidirecionais do compósito de carbono, Texipreg® 160 RM, foram definidas no trabalho de Campilho *et al.*, (2008).

Tabela 5: Propriedades elásticas das camadas unidirecionais de CFRP (Campilho *et al.*, 2008).

Propriedades	Texipreg® 160 RM
E_X [MPa]	109000
E_Y [MPa]	8819
E_Z [MPa]	8819
ν_{XY}	0,342
ν_{XZ}	0,342
ν_{YZ}	0,380
G_{XY} [MPa]	4315
G_{XZ} [MPa]	4315
G_{YZ} [MPa]	3200

3.1.3 Propriedades mecânicas dos substratos em alumínio

O objetivo deste trabalho passa por melhorar as propriedades transversais (ao longo da espessura) dos CFRP, evitando a sua delaminação e consequentemente aumentando a resistência da junta ao arrancamento.

A liga de alumínio 2024-T3 é uma liga de elevada resistência, sobretudo à fadiga e representará em cada configuração de junta 25% do volume do conjunto do laminado, de modo a que o híbrido seja efetivamente mais similar a um CFRP do que um metal. O LFM tem como propósito reforçar o metal e neste estudo a técnica utilizada é semelhante à dos LFM, mas com o objetivo de reforçar o CFRP, nomeadamente aumentar a resistência ao arrancamento.

As principais aplicações da liga de alumínio 2024-T3 passam, não só, pela indústria aeronáutica, mas também pela indústria automóvel. Esta liga é muito utilizada na produção dos LFM, sobretudo nas estruturas Glare e Arall (Sinmazçelik *et al.*, 2011).

Nos LFM, a corrosão galvânica surge devido à diferença de potencial elétrico, no entanto existem alguns estudos que têm como objetivo encontrar um tratamento de superfície adequado, que proporcione uma boa proteção a este fenómeno (Wang *et al.*, 2007).

Outra liga de metal que também poderia ser utilizada era a liga de titânio Ti-6Al-4V (conhecida como Grau V), que não apresenta corrosão galvânica e possui uma elevada resistência e um baixo coeficiente de expansão térmica linear. Infelizmente, durante o presente trabalho não foi possível utilizar esta liga devido à dificuldade da sua obtenção por um fornecedor tradicional.

A liga 2024-T3 foi fornecida em placas com dimensões de 300 x 300 x 0,8 mm e 300 x 300 x 0,4 mm, sendo as suas propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Propriedades mecânicas da liga de alumínio 2024-T3 (Alcoa, 2015).

Propriedades	Alumínio 2024-T3
E [MPa]	73100
G [MPa]	28000
σ_y [MPa]	289
σ_u [MPa]	434 - 441
ε_u [%]	10 - 15

Tendo em conta a relação de 25% de alumínio e 75% de CFRP, obtém-se uma espessura mínima do laminado de 3,2 mm.

As diferentes configurações que foram produzidas e testadas estão representadas na Figura 19.

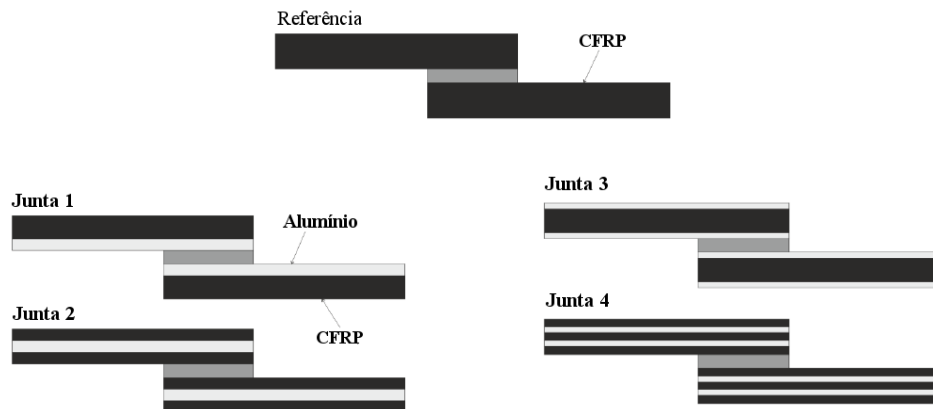


Figura 19: Configurações possíveis para a produção de LFM.

3.2 Produção de placas de CFRP

3.2.1 Preparação das placas de carbono-epóxico (CFRP)

O fabrico das placas de CFRP foi realizado com uma sequência de empilhamento de $[0^\circ]$ e com uma espessura de 0,15 mm em cada camada. O processo de produção consistiu nos seguintes procedimentos:

1. Retirou-se o rolo de pré-impregnado de carbono-epóxico (Texipreg HS 160 RM) da arca congeladora e deixou-se estabilizar até à temperatura ambiente, antes de se utilizar.

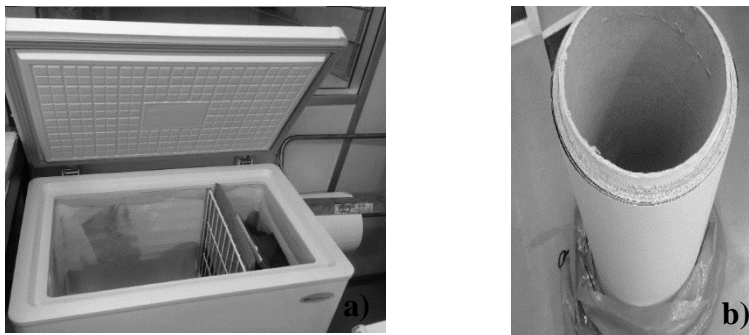


Figura 20: a) Arca congeladora; b) Rolo de compósito de carbono-epóxico.

2. De seguida, esticou-se o rolo de pré-impregnado de carbono-epóxico sobre uma bancada de forma a ser possível a medição e o corte de placas com dimensões de 300 x 300 mm.

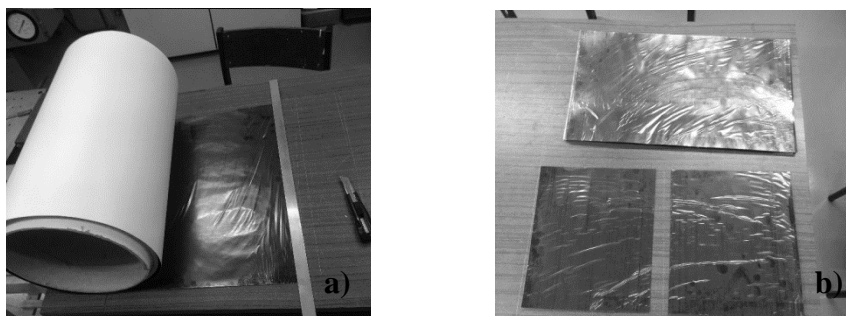


Figura 21: a) Procedimento de corte; b) Pré-impregnado de carbono (300 x 300 mm).

3.2.2 Execução do empilhamento das placas de carbono

1. Retirou-se com cuidado a película de Teflon[®] das placas de compósitos evitando colar os dedos ou danificar a resina das placas de carbono. Esta operação é por vezes considerada difícil e por este motivo colocaram-se as placas de carbono no frigorífico, durante alguns segundos, para facilitar a remoção da película de revestimento de Teflon[®].

2. Para permitir uma melhor adesão durante o empilhamento das placas de CFRP procedeu-se previamente a um pré-aquecimento das fibras, com o auxílio de uma pistola de ar quente. A temperatura da pistola não excedeu os 50°C.

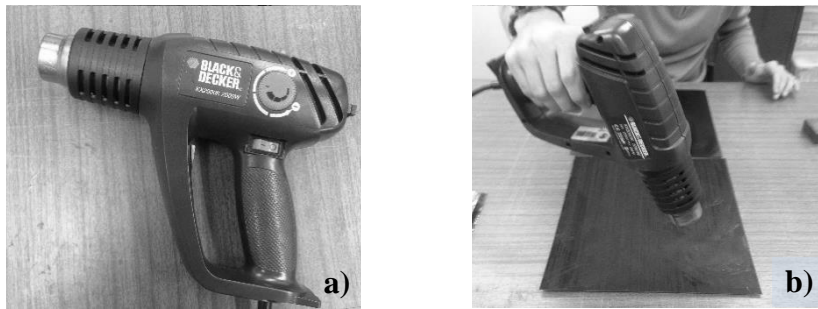


Figura 22: a) Pistola de ar quente; b) Aquecimento do pré-impregnado de carbono.

3. Já com as fibras pré-aquecidas e respeitando a sequência de empilhamento procedeu-se ao empilhamento das placas do pré-impregnado de carbono. Durante esta etapa as camadas foram empilhadas uma de cada vez, após a remoção do seu revestimento de Teflon[®], tendo o empilhamento das camadas uma orientação de $[0^\circ]$, ou seja, o sentido das fibras carbono apresentava uma orientação paralela. Na execução desta tarefa teve-se um cuidado reforçado, devido ao facto das placas depois de coladas serem impossíveis de descolar.

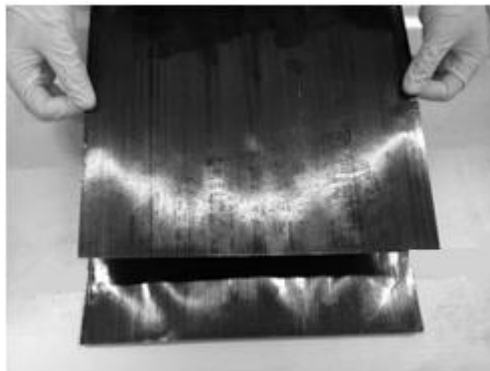


Figura 23: Empilhamento das placas de CFRP.

4. Um dos procedimentos inevitáveis realizado após o empilhamento das placas de pré-impregnado foi a remoção das bolhas de ar, que surgiram durante a colagem das mesmas. Com a ajuda de uma espátula, pressionaram-se as bolhas e estas foram empurradas para uma das extremidades da placa até desaparecerem, a execução desta tarefa foi realizada sobre o papel de proteção branco da placa, para não danificar as fibras de carbono, tal como ilustrado na Figura 24.

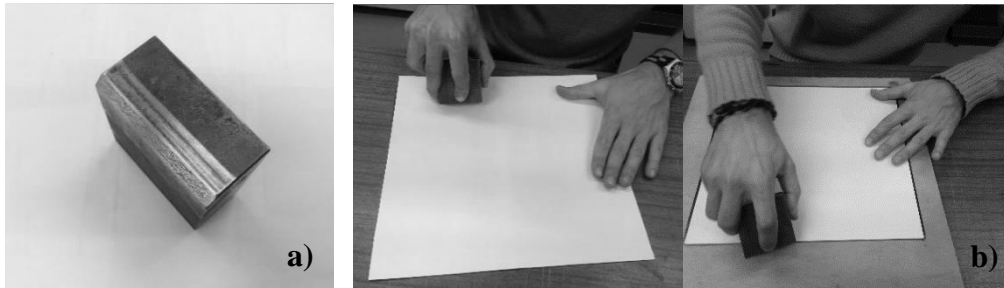


Figura 24: a) Espátula usada para a remoção das bolhas de ar; b) Remoção de bolhas de ar com o auxílio da espátula.

5. A remoção do papel de proteção foi realizada com o auxílio de uma pinça, no sentido da orientação das fibras, para evitar que estas se danificassem. No final desta etapa as placas encontravam-se preparadas para se poderem adicionar mais placas de pré-impregnado de CFRP.

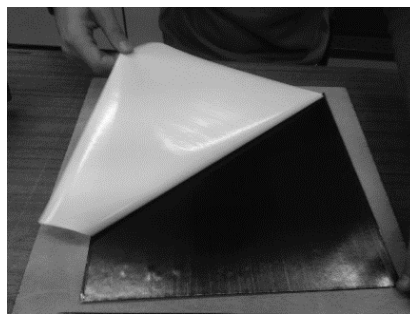


Figura 25: Remoção da película de proteção.

6. Repetiram-se os procedimentos de 1 a 5 para o empilhamento de todas as placas de pré-impregnado de carbono, até se obter uma espessura de 3,2 mm para a placa de CFRP, o que equivaleu a um empilhamento de 21 placas de pré-impregnado de carbono com espessura de 0,15 mm.



Figura 26: Ilustração da placa de carbono com espessura de 3,2 mm.

7. No fim do empilhamento desejado, procedeu-se à limpeza e desengorduramento do molde com ajuda de um papel humedecido em acetona. De seguida, com o auxílio de um pincel aplicou-se no molde o desmoldante, Loctite® - Frekote 770-NC™, para facilitar a remoção das placas após a sua cura.

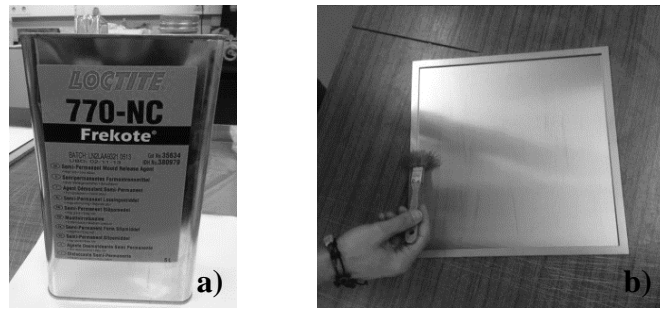


Figura 27: a) Desmoldante Loctite® - Frekote 770-NC™; b) Aplicação do desmoldante no molde.

8. O conjunto de laminados de placas de carbono (CFRP) foi colocado no interior do molde, que foi desenvolvido durante este trabalho com o intuito de facilitar a produção das placas, garantindo um bom acabamento superficial e uma uniformidade da sua espessura ao longo de toda a placa, evitando assim o problema do deslocamento das fibras das placas e a dispersão de resina durante a cura.

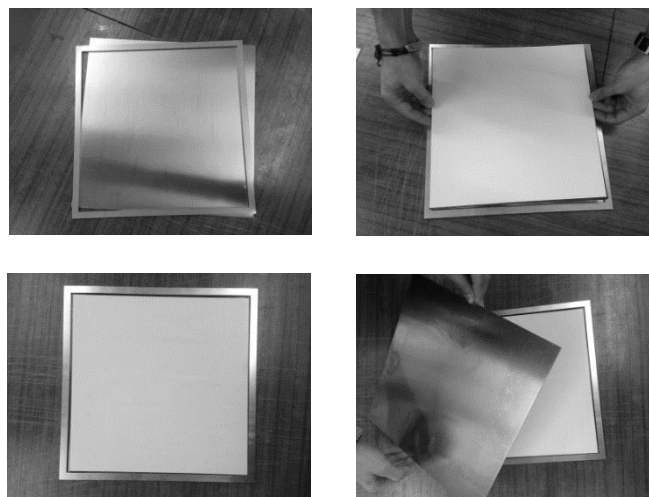


Figura 28: Posicionamento das placas de carbono no interior do molde.

3.2.3 Preparação dos pratos da prensa e colocação do molde na prensa

1. Antes da colocação do molde na prensa de pratos quentes, com o auxílio de um papel humedecido em acetona limpou-se a superfície dos pratos para remoção das sujidades e gorduras.

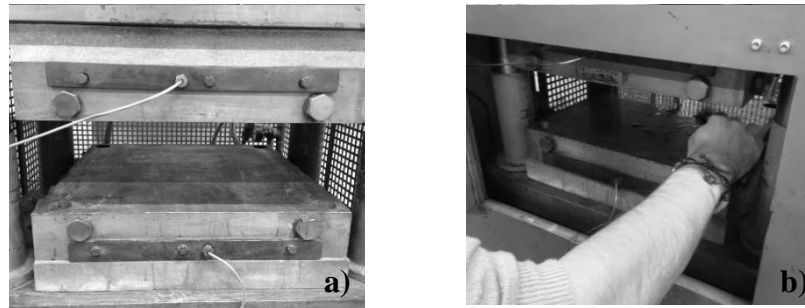


Figura 29: a) Pratos da prensa (INTOCO); b) Limpeza dos pratos.

2. Para a realização da cura das placas CFRP, colocou-se o conjunto molde/placas de CFRP na prensa de pratos quentes (INTOCO), onde as placas foram sujeitas a uma cura com pressão e temperatura constantes para formarem uma placa única e homogénea de CFRP, com uma espessura de 3,2 mm.

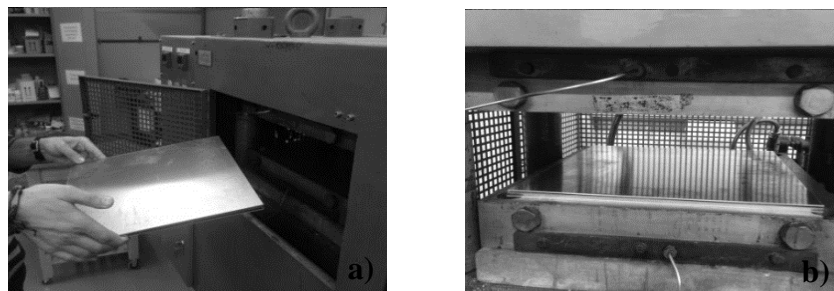


Figura 30: a) Colocação do molde/placas no interior da prensa; b) Posicionamento correto do molde/placas nos pratos da prensa.

3.2.4 Modo de funcionamento da prensa hidráulica de pratos quentes (INTOCO)

Depois da colocação do conjunto molde/placas de carbono, fechou-se a barreira de segurança, ligou-se a prensa de pratos quentes (INTOCO) e procedeu-se à cura das placas de CFRP.

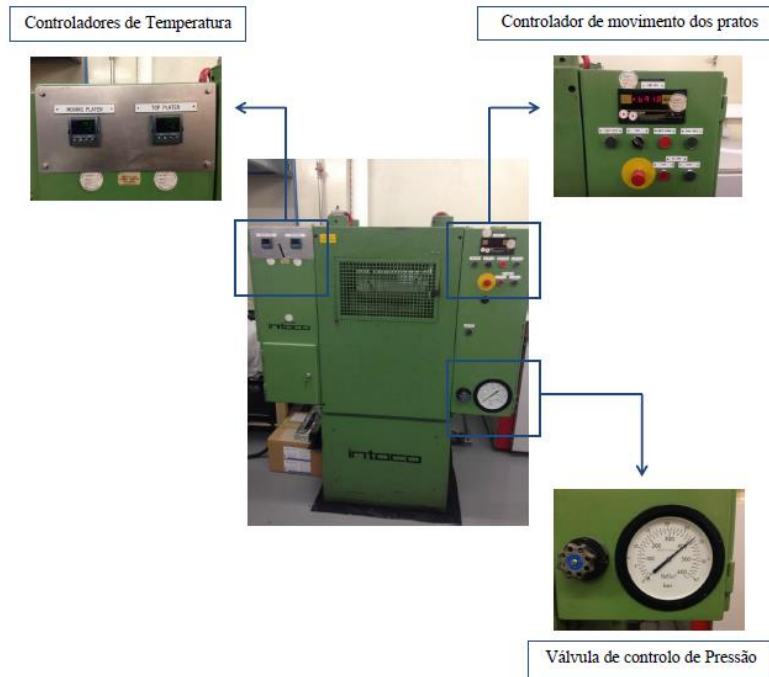


Figura 31: Prensa hidráulica de pratos quentes (INTOCO).

3.2.5 Processo de cura dos CFRP

1. As placas de CFRP foram submetidas a um ciclo térmico, com regulação de pressão e temperatura. Utilizaram-se os parâmetros de cura recomendados pelo fabricante para garantir boas propriedades das placas de compósito de fibras de carbono.

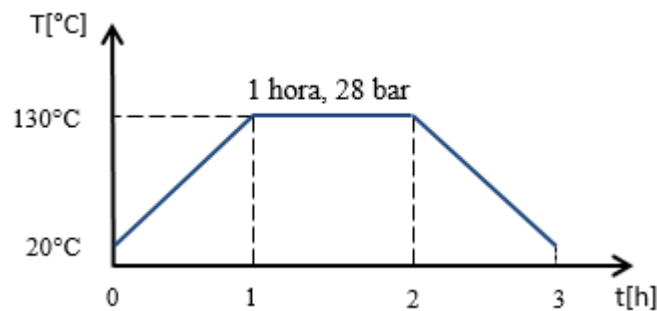


Figura 32: Ciclo térmico para cura das placas CFRP.

2. Numa primeira fase aqueceu-se a prensa, desde a temperatura ambiente, cerca de 20°C até aos 140°C que correspondem aproximadamente aos 130°C recomendados, considerando a existência de algumas perdas térmicas. A temperatura desejada foi atingida após 1 hora, sendo posteriormente mantida a prensa à temperatura de 140°C durante 1 hora, a uma pressão de 28 bar, para a realização da cura da placa de CFRP.

3. Ao fim de 1 hora, desligou-se a resistência elétrica da prensa, mantendo a pressão dos pratos a 28 bar, de forma a evitar a formação de empenos na placa. Assim que a placa atingiu a temperatura ambiente retirou-se a pressão da prensa e removeu-se a placa/molde.

3.2.6 Controlo da espessura e da qualidade das placas de CFRP

Um dos procedimentos importantes que se teve em conta no final do processo de cura das placas de carbono foi a realização do controlo da espessura e a avaliação da qualidade superficial das placas produzidas.

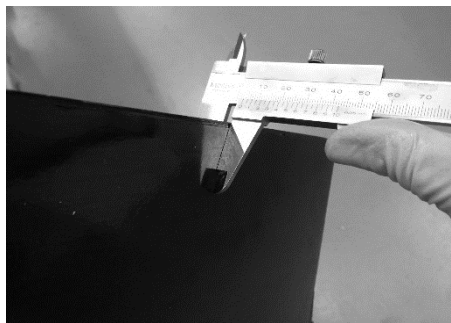


Figura 33: Medição da espessura da placa de CFRP com um paquímetro.

3.3 Tratamento superficial dos LFM

O tratamento de superfície é um passo crítico e fundamental que não pode ser depreciado, uma vez que é essencial para alcançar bons resultados de durabilidade a longo prazo (Critchlow e Brewis, 1996; Davis e Bond, 1999). O tratamento superficial permite à superfície do substrato ficar livre de contaminações, aumentando a energia superficial e garantindo uma boa molhagem, conseguindo assim uma boa adesão (Davis e Bond, 1999). É importante garantir um aumento da energia superficial e obter uma superfície com uma boa molhagem.

A superfície dos compósitos apresenta uma baixa rugosidade, o que implica uma baixa energia de adesão, sendo por isso importante a remoção de gorduras e contaminantes resultantes do processo de corte. Esse processo é efetuado utilizando um papel humedecido em acetona para a remoção de qualquer vestígio de sujidade.

O aumento da energia de superfície resultante dos tratamentos térmicos permite igualmente uma melhor molhagem do adesivo.

Após a análise inicial elaborada por Radu (2015), das propriedades de aderência entre a resina epóxido usada no pré-impregnado de CFRP e na liga de alumínio, realizarem tratamentos superficiais ao alumínio, de modo a aumentar a sua energia

superficial. Para além de serem estudadas as placas de alumínio sem tratamento da superfície, também se realizaram diferentes tratamentos superficiais, nomeadamente o processo de grenalhagem e o processo de anodização (Radu, 2015).

3.3.1 Influência dos diferentes tratamentos superficiais

Como mostra o estudo elaborado por Radu (2015), a influência do tratamento das superfícies é um fator muito importante e como tal deverá ser tido em conta neste trabalho.

Verificou-se durante o corte dos provetes que o pior caso de adesão foi obtido com as placas sem tratamento. A descolagem das placas CFRP do alumínio foi visível durante o corte das mesmas, Figura 34, devido às tensões térmicas introduzidas no alumínio.

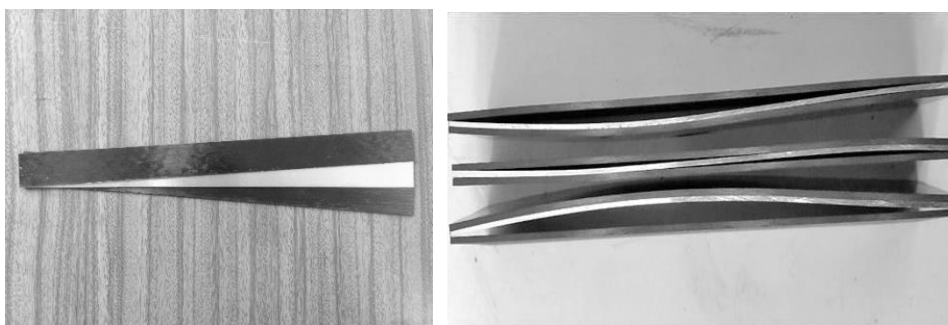


Figura 34: Descolagem das placas de CFRP do alumínio.

As placas de alumínio sujeitas a um tratamento por grenalhagem apresentaram melhores propriedades de adesão, mas a descolagem também ocorreu durante o corte em cerca de 75% dos provetes e, em alguns dos casos, após uma semana as placas descolaram-se uma da outra, devido às tensões térmicas residuais.

Após a análise da validação da boa adesão elaborada por Radu (2015), verificou-se que o tratamento superficial mais adequado e que apresenta melhores resultados é o tratamento por anodização de ácido fosfórico (PAA).

3.4 Procedimento de fabricação dos laminados de fibra e metal

O procedimento efetuado na produção dos laminados, que se encontra descrito neste subcapítulo, foi semelhante ao realizado na produção das placas de CFRP, sendo adicionada a etapa da colocação das chapas de alumínio juntamente com as placas de pré-impregnado de carbono, conforme o ilustrado na Figura 35.



Figura 35: Empilhamento das placas de alumínio com as placas de CFRP.

Numa primeira fase, antes da produção dos LFM, as placas de alumínio foram devidamente tratadas e sujeitas a tratamentos superficiais, de modo a aumentar a sua energia de ligação com as placas de CFRP.

3.4.1 Produção dos laminados

No empilhamento dos LFM efetuou-se um pré-aquecimento das placas de alumínio, Figura 36, de forma a aumentar a aderência com as placas de carbono.

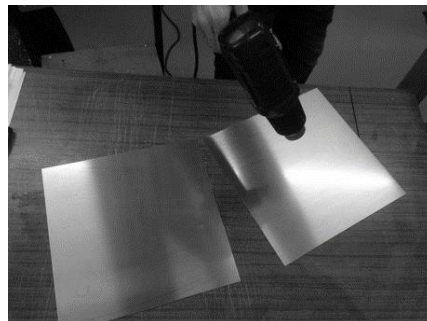


Figura 36: Aquecimento das placas de alumínio.

As seqüências de empilhamento dos LFM estudadas são as apresentadas na Figura 37:



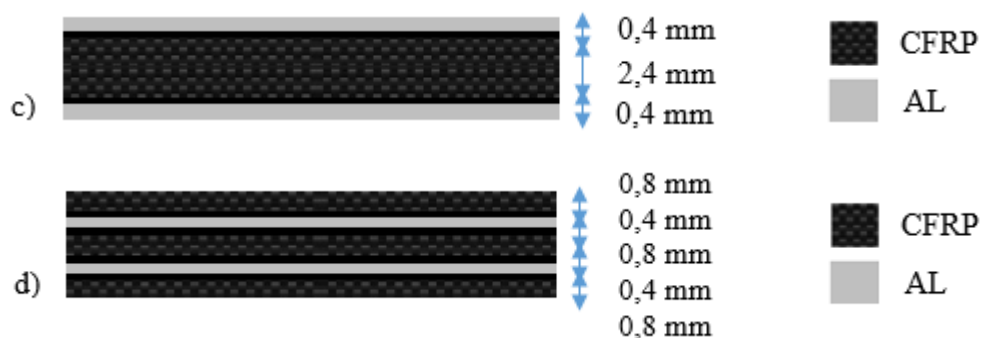


Figura 37: Configurações dos laminados, com as combinações possíveis de produzir.

Quanto à junta CFRP-AL, Figura 37 a), esta não foi possível de produzir devido aos diferentes coeficientes de expansão térmica das placas. A placa acabava por empenar, tal como é demonstrado no trabalho experimental e numérico validado por Radu (2015), em que este fenómeno ocorreu.

3.4.2 Procedimento de cura dos LFM

O procedimento efetuado no processo de cura dos LFM foi o mesmo que foi realizado na cura das placas CFRP, conforme indicado no ponto 2) do subcapítulo 3.2.5. Deste modo, os laminados de CFRP-Alumínio foram submetidos igualmente a um ciclo térmico controlado, com pressão e temperatura constantes.

3.4.3 Tratamento da superfície da liga de alumínio 2024-T3

A anodização é um processo utilizado frequentemente na indústria aeronáutica, com vista à melhoria das propriedades anticorrosivas das ligas de alumínio. De entre os processos mais comuns, destacavam-se a anodização crómica (ACr) e a anodização sulfúrica (AS), no entanto estes dois tipos de tratamento contêm substâncias tóxicas e cancerígenas, por isso estão em desuso.

Embora seja largamente utilizada na indústria aeronáutica, a anodização sulfúrica conduz a uma diminuição da resistência à fadiga do alumínio anodizado, pelo que o seu uso não é permitido em ligas de alta resistência (L. Domingues *et al.*, 2003).

Durante a última década, verificou-se um desenvolvimento de novos processos de anodização com base em banhos sulfúrico-bóricos. Contudo, este processo de anodização não apresenta um benefício relativamente ao aumento da resistência à corrosão da liga de alumínio 2024-T3 (G.E. Thompson *et al.*, 1999).

Neste trabalho, o tratamento da superfície das placas da liga de alumínio de alta resistência, 2024-T3, através do processo de anodização por ácido fosfórico consiste

num processo eletroquímico que cria uma película de óxido de alumínio sobre a superfície do alumínio. O metal a anodizar é ligado a um polo elétrico positivo e é mergulhado num banho eletrolítico, Figura 38. Neste processo, o metal a anodizar é transformado no ânodo eletrolítico (elétrodo onde se realiza sempre a oxidação, polo negativo), formando-se à superfície um óxido que será a película protetora. Esta película permitirá a conservação das propriedades do metal, nomeadamente da resistência à corrosão, da resistência à abrasão, da dureza, da resistência à água, da resistência elétrica, e proporcionando também uma melhor adesão (Marceau *et al.*, 1978).

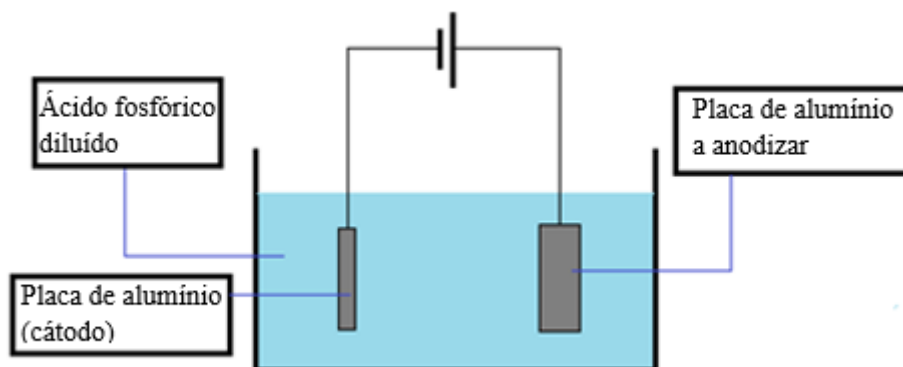


Figura 38: Representação esquemática do processo de anodização (PAA).

A escolha dos valores padrão utilizados no processo de anodização foi baseada na norma ASTM D 3933-98. Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros utilizados no tratamento superficial do alumínio.

Tabela 7: Parâmetros utilizados para o tratamento de superfície de PAA.

Parâmetros	Valor
Ácido fosfórico	12 wt%
Voltagem DC	15 – 16 V
Tempo	25 min

A realização do processo de anodização consistiu nas seguintes etapas:

1. Inicialmente, utilizou-se um processo manual de lixagem da superfície do alumínio, utilizando uma lixa P800 (diâmetros de cada partícula 21,8 μm), até se obter uma superfície uniforme.
2. Seguidamente procedeu-se à limpeza e à remoção das gorduras da placa de alumínio, com ajuda de um papel humedecido em acetona.

3. Colocou-se a placa de alumínio no banho eletrolítico e ligou-se a fonte de alimentação durante 25 minutos, conforme ilustra a Figura 39. Terminado o processo anterior desligou-se a fonte de alimentação e retirou-se a placa de alumínio do banho, sendo depois esta limpa com acetona.

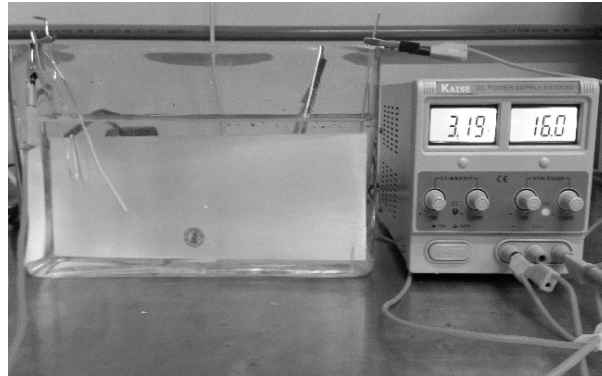


Figura 39: Setup usado para o processo de anodização.

4. Por fim, secou-se a placa de alumínio com o auxílio de um ventilador de ar frio e embalou-se, para proteger a superfície até à sua utilização de eventuais contaminantes.
5. Este processo foi realizado para todas as placas de alumínio com diferentes espessuras (0,4 e 0,8 mm).

3.4.4 Análise SEM das placas de alumínio anodizadas pelo processo (PAA)

Foi realizada uma análise SEM utilizando um Microscópio Eletrónico de Varrimento de alta resolução com microanálise de Raio-X: JEOL JSM6301F/Oxford INCA Energy 350/Gatan Alto 2500 (Tóquio, Japão). Antes da análise SEM, as superfícies de fratura das amostras ensaiadas foram revestidas com ouro (Au) / paládio (Pd) de película fina (por 120s e com uma corrente de 15 mA), por pulverização catódica, utilizando o equipamento Módulo SPI Sputter Coater.

As dimensões das células e dos poros dependem da composição do banho, da temperatura e da tensão aplicada à placa de alumínio, mas o resultado é sempre uma alta densidade de poros finos, conforme ilustra a Figura 40 b).

Durante o processo de anodização (PAA), enquanto a placa de alumínio está mergulhada na solução os ânodos de oxigénio do eletrolítico penetram a camada de óxido em direção à interface de metal-óxido e lá se combinam com o alumínio, aumentando a camada de óxido. À medida que o alumínio é oxidado a parede da célula e o poro aumentam em altura, ou seja, o filme aumenta a sua espessura, enquanto a célula e o diâmetro do poro permanecem constantes (L. Domingues *et al.*, 2003).

A Figura 40 b) é uma ampliação da Figura 40 a), na qual se observa o pormenor da superfície do alumínio que foi anodizada, apresentando esta uma estrutura porosa típica de uma superfície anodizada, concretamente uma grande quantidade de poros finos. Neste caso em particular, a estrutura não é muito visível, mas pode observar-se que esta apresenta um crescimento uniforme. Pode ainda verificar-se que a estrutura da camada porosa apresenta poros cilíndricos, perpendiculares à superfície do metal e que se estendem até à superfície exterior do óxido, que foi formado por este processo de anodização realizado durante este trabalho.

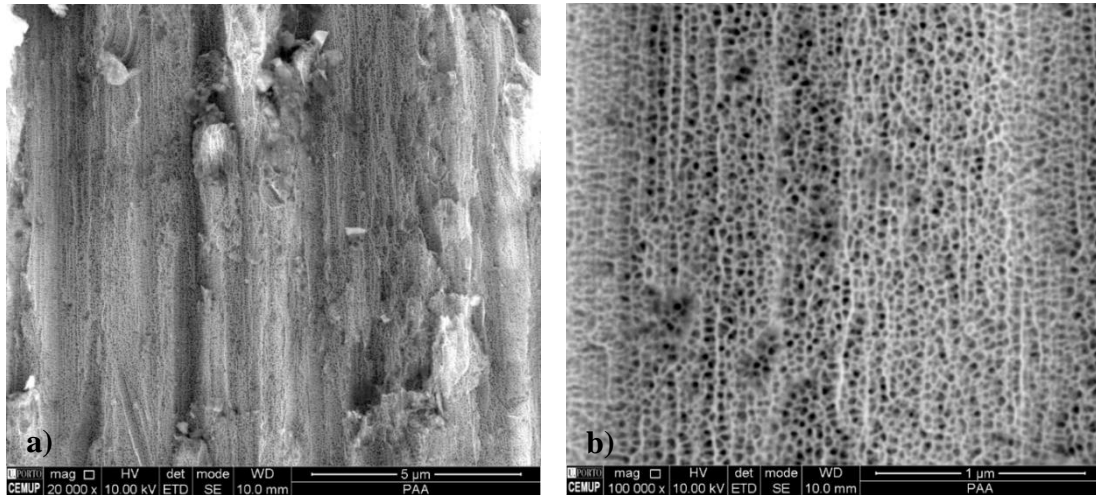


Figura 40: a) Análise da menor ampliação da placa de alumínio anodizada antes de ser utilizada nos laminados; b) Análise da maior ampliação da placa de alumínio anodizada.

3.5 Produção de JSS utilizando o adesivo AV138M / HV 998

3.5.1 Corte dos provetes

Após a produção das placas CFRP e dos LFM (300 x 300 mm) procedeu-se ao seu corte em provetes, para posteriormente as JSS serem submetidas a ensaios de tração com tamanhos específicos de 107,5 e 145 mm de comprimento e 25 mm de largura.

Neto *et al.*, (2012) observaram que nos substratos de CFRP ocorre delaminação se a largura da junta for maior do que 30 mm, por esta razão neste trabalho optou-se pela utilização de provetes com 25 mm de largura.

Mantendo o objetivo principal deste trabalho, aumentar a resistência à delaminação de materiais compósitos, procedeu-se à produção das JSS, com diferentes comprimentos de sobreposição (L_o), concretamente 12,5 e 50 mm.

A geometria dos substratos é ilustrada na Figura 41, já a largura dos substratos utilizada foi sempre a mesma, 25 mm, para qualquer tipo de configuração de junta.

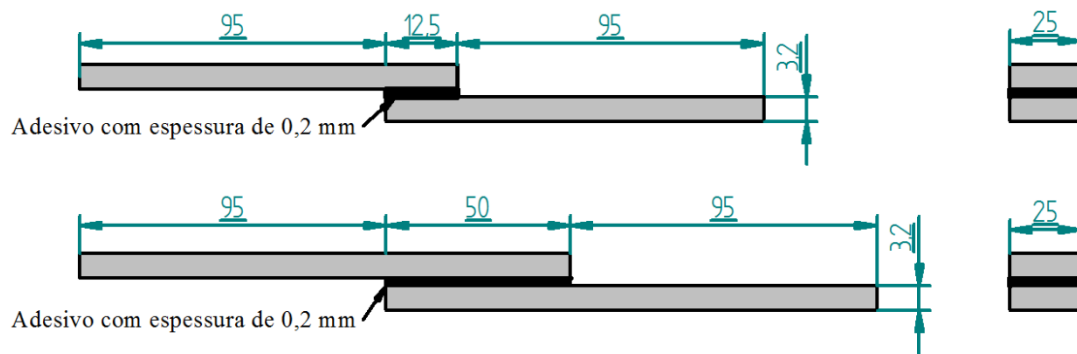


Figura 41: Dimensões e geometria da junta de sobreposição simples.

Os comprimentos de sobreposição (L_0) das juntas foram estabelecidos após a análise dos dados obtidos por Neto *et al.* (2012). Para o caso do comprimento de sobreposição de 50 mm, a ocorrência de delaminação é esperada, enquanto para o comprimento de sobreposição inferior, 12,5 mm, é esperada a ocorrência de falha no adesivo.

Relativamente ao corte das placas, recorreu-se a uma máquina de corte de materiais compósitos com um disco revestido a diamante e refrigerado a água, Figura 42 a), esta máquina predispuña de uma mesa deslizante onde se fixaram devidamente as placas, de forma a garantir a esquadria do corte dos provetes, para isso utilizaram-se uns batentes fixos à base da mesa para posicionar a placa, garantindo deste modo a uniformidade do corte dos provetes.



Figura 42: a) Máquina de disco de corte (ISEP); b) Pormenor da mesa deslizante do disco de corte e do sistema de refrigeração; c) Provetes.

3.5.2 Tratamento superficial dos provetes

Antes de se efetuar a produção das juntas de sobreposição simples (JSS) existe a necessidade de garantir uma boa adesão entre os provetes, para isso realizou-se novamente o tratamento superficial das superfícies que irão estar, neste caso, em contacto com o adesivo. Tendo em conta que o processo de anodização por ácido fosfórico (PAA) apresenta melhores propriedades de adesão superficial, optou-se pela realização deste processo de anodização nas placas de alumínio dos provetes dos LFM.

Numa primeira fase, colocaram-se os provetes dos LFM (AL-CFRP-AL) numa solução de ácido fosfórico, conforme a norma ASTM D 3933-98, Figura 43 a), de modo a anodizar as superfícies do alumínio.

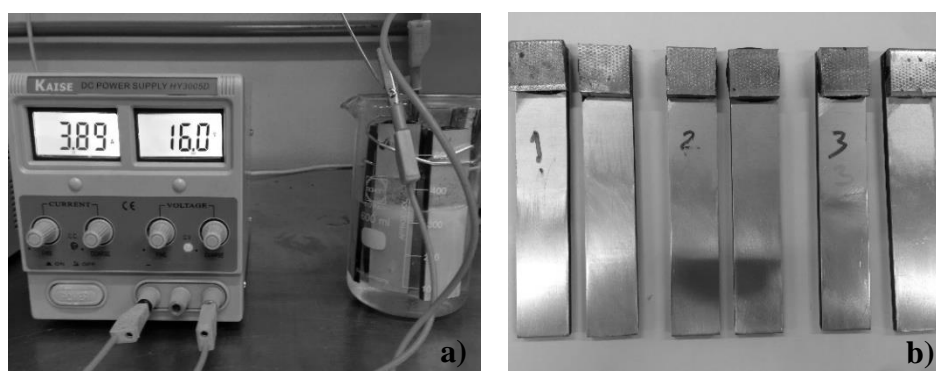


Figura 43: a) Processo de anodização (PAA), b) Provetes anodizados (PAA).

Tendo em conta que o processo de anodização, descrito anteriormente pela norma referida, consiste na colocação dos provetes submersos numa solução de ácido fosfórico e como estes provetes (AL-CFRP-AL) contêm CFRP, a solução acaba por escurecer e não anodizar o alumínio nas melhores condições, Figura 43 b). Uma das soluções previstas para evitar este fenómeno passava pelo isolamento das partes visíveis das placas de CFRP, de modo a evitar o contacto com a solução de ácido fosfórico. Esta operação é extremamente dispendiosa e de difícil execução, deste modo optou-se por utilizar um outro método como tratamento da superfície do alumínio dos provetes, concretamente o método de anodização local (*Locally Acid Etching*), que se realiza na zona onde se pretende aplicar o adesivo.

A Figura 44 a) ilustra o processo de anodização local. Este processo consiste na passagem local de ácido fosfórico, com uma concentração de 85%, na superfície do alumínio com o auxílio de algodão, reagindo durante 20 min. Na Figura 44 b) é visível a zona perfeitamente anodizada.

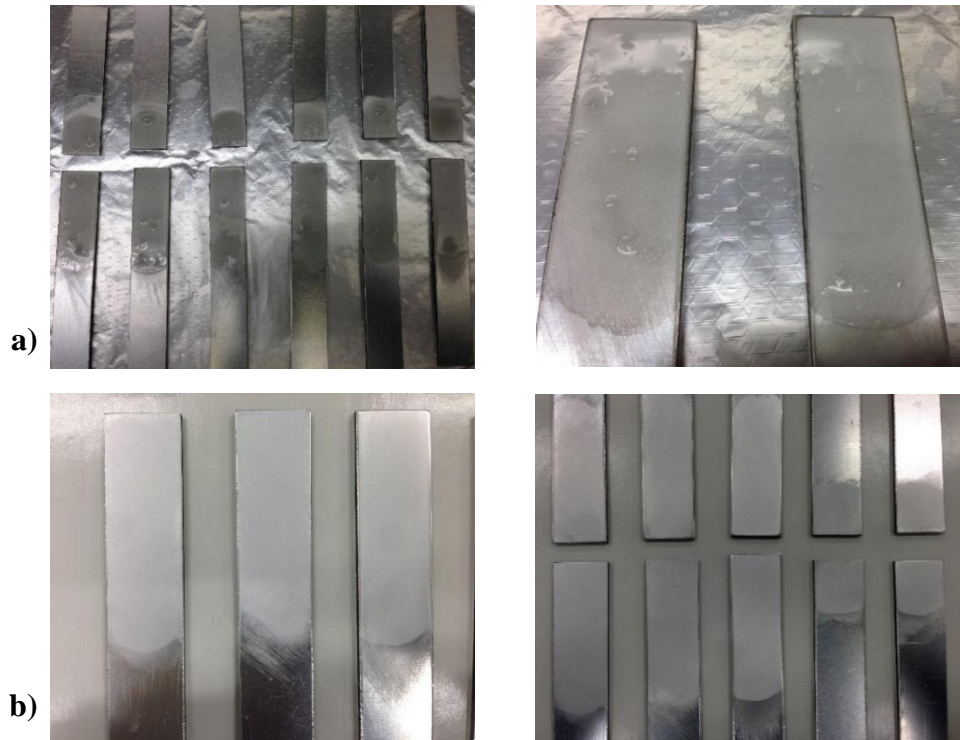


Figura 44: a) Processo de anodização local (*Locally Acid Etching*), b) Provetes de alumínio anodizados localmente.

Conforme os provetes dos LFM AL-CFRP-AL necessitaram novamente de tratamento superficial, também os provetes de referência (CFRP), os provetes dos LFM CFRP-AL-CFRP e os LFM CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP, que apresentam na parte exterior da junta as fibras de carbono, necessitaram uma vez mais de tratamento superficial. Para isso, utilizou-se uma lixa P320 (diâmetros de cada partícula 46,2 μm), conforme ilustra a Figura 45, para melhorar a adesão da área onde se iria aplicar o adesivo na produção das JSS.

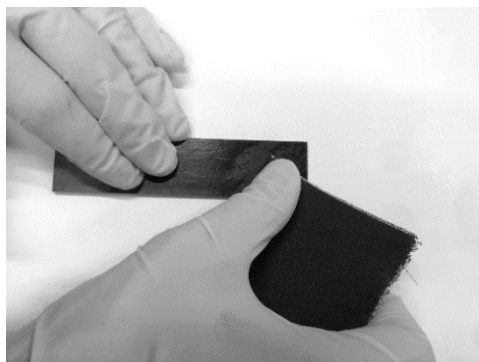


Figura 45: Processo de lixagem dos provetes com CFRP no exterior.

3.5.3 Análise SEM do substrato de alumínio atacado com ácido fosfórico a 85%

O substrato de alumínio atacado com ácido fosfórico a 85% foi observado utilizando a análise SEM, através de um Microscópio Eletrônico de Varrimento de alta resolução com microanálise de Raio-X: JEOL JSM6301F/Oxford INCA Energy 350/Gatan Alto 2500 (Tóquio, Japão). Antes da análise SEM, as superfícies de fratura das amostras ensaiadas foram revestidas com uma película fina de ouro (Au) / paládio (Pd) (durante 120s e com uma corrente de 15 mA), por pulverização catódica, utilizando o equipamento Módulo SPI Sputter Coater.

Tal como no tratamento da superfície por anodização, no processo de tratamento da superfície por ataque com ácido também as dimensões das células e dos poros, dependem da composição do banho, da temperatura e da tensão aplicada à placa de alumínio. Em particular, neste processo devido à pontualidade do mesmo, a placa de alumínio não é mergulhada numa solução de ácido fosfórico. Na zona que queremos atacar é colocada uma solução de ácido fosfórico com uma concentração de 85% durante um período de tempo. Este processo não engloba passagem de corrente e a placa não chega atingir elevadas temperaturas, assim a placa de alumínio está sujeita a uma maior agressividade superficial por parte da concentração do ácido, provocando uma superfície com poros deveras maiores, Figura 46 b), comparativamente ao processo de anodização (PAA), o que leva a concluir que o tratamento superficial por este processo apresenta melhores resultados.

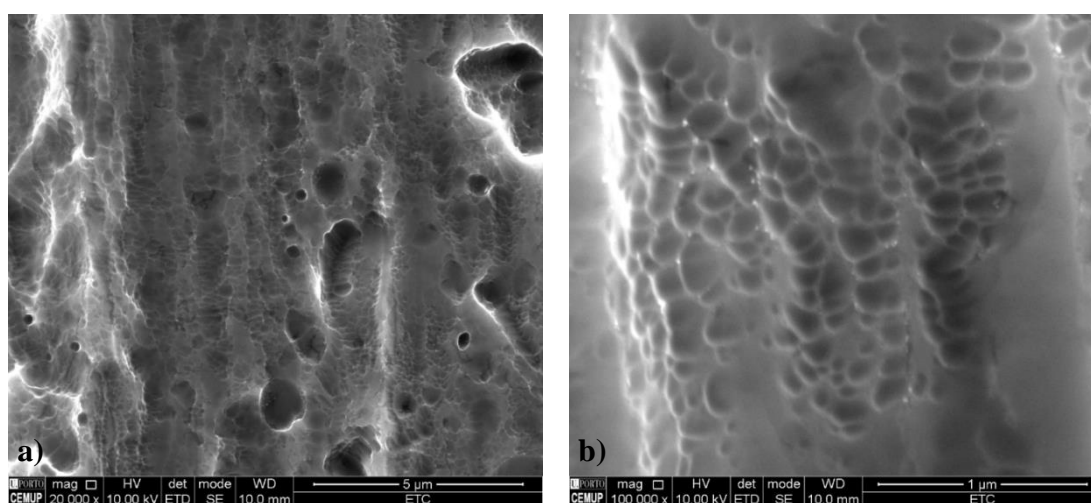


Figura 46: a) Análise da menor ampliação do substrato de alumínio atacado com ácido fosfórico a 85%; b) Análise da maior ampliação do substrato de alumínio atacado com ácido fosfórico a 85%.

Conforme ilustra a Figura 46 a) a superfície do alumínio atacado com o ácido, não apresenta a mesma estrutura que a superfície tratada pelo processo de anodização (PAA). Contudo, realça que a formação de uma irregularidade adicional pode favorecer a molhagem e a ancoragem do adesivo. É notório a diferença significativa da diferença

na espessura da camada da barreira e na dimensão dos poros, que neste caso é superior. Nesta análise observa-se uma estrutura com um padrão tipo granular, na qual deixam de ser observados poros perpendiculares à superfície, Figura 46 b).

3.5.4 Produção de juntas de sobreposição simples (JSS)

Depois do tratamento superficial dos provetes, estes foram colocados num molde de pinos, Figura 47, que garante o seu alinhamento e possibilita a colocação do adesivo nos provetes de forma a produzir as juntas adesivas. Previamente o molde é revestido com desmoldante para garantir uma fácil remoção das juntas no final da sua cura.

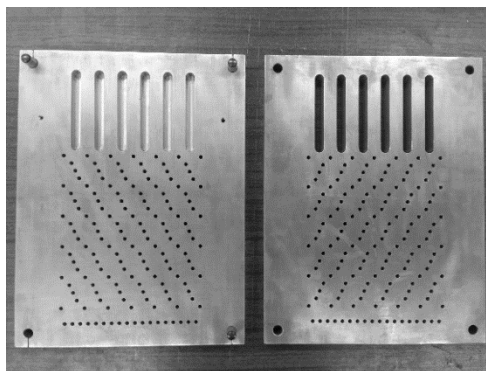


Figura 47: Molde por pinos para a produção de juntas adesivas.

Depois da aplicação do adesivo, Araldite® AV138M / HV 998, colocaram-se uns espaçadores no molde, Figura 48, com o intuito de garantir uma espessura do adesivo de 0,2 mm.

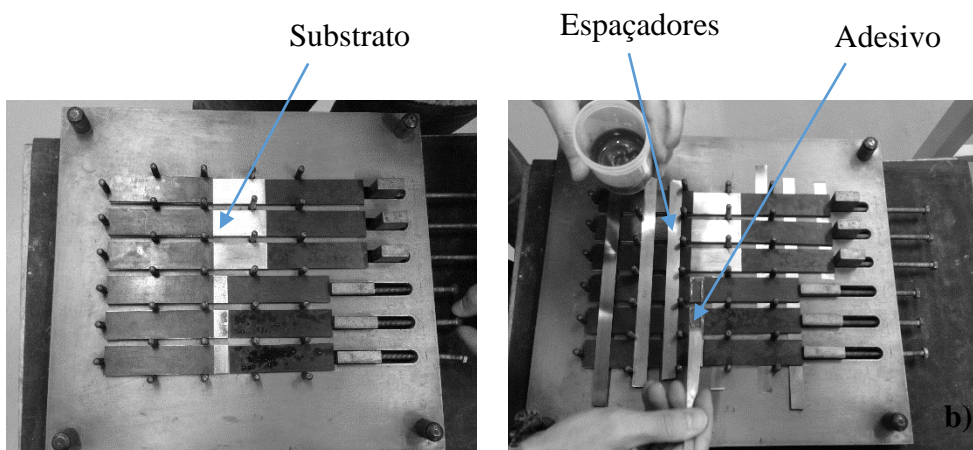


Figura 48: a) Molde preparado para a aplicação de adesivo com os espaçadores de 3,4 mm de espessura; b) Aplicação do adesivo.

Depois da aplicação do adesivo nos provetes e de forma a finalizar as juntas adesivas fechou-se o molde, sendo este colocado na prensa de pratos quentes durante cerca 10 min a 100°C e a uma pressão constante de 8 bar. Após a cura completa do adesivo, desligou-se a resistência elétrica da prensa mantendo a pressão até o molde atingir a temperatura ambiente, para posteriormente se removerem as juntas adesivas.

3.5.5 Remoção do excesso de adesivo das juntas adesivas

Depois de se obterem as JSS removeu-se o excesso de adesivo, obtido após a sua cura. Fixaram-se as juntas num torno mecânico, de modo a facilitar a remoção do excesso de adesivo com o auxílio de uma lima, conforme ilustra a Figura 49.

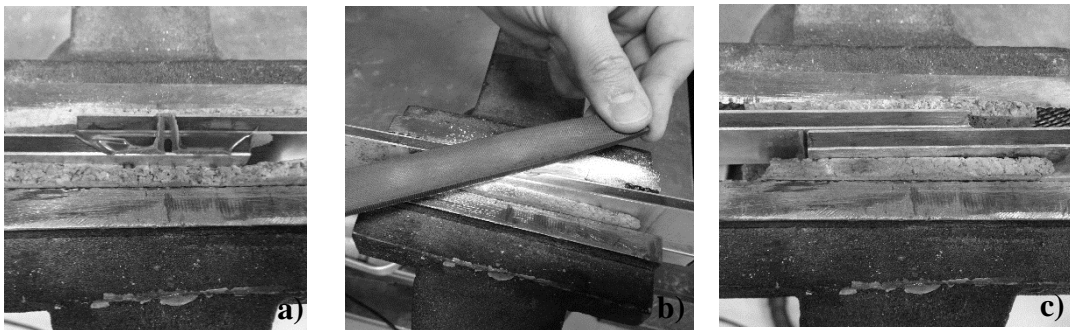


Figura 49: a) Junta adesiva com excesso de adesivo; b) Remoção do excesso de adesivo com uma lima; c) Aspeto final da junta sem excesso de adesivo.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para a realização dos ensaios experimentais foram utilizados calços nas extremidades da junta, para garantir o alinhamento do esforço aplicado durante o ensaio, Figura 50 a).

As amostras foram testadas de acordo com a norma padrão ASTM D1002-01, utilizando uma máquina de tração universal (Instron[®] 3367), com uma capacidade de 30 kN à temperatura ambiente e a uma taxa de deslocamento constante de 1 mm/min. Os ensaios de tração das juntas de sobreposição simples foram realizados para diferentes comprimentos de sobreposição, nomeadamente 12,5 e 50 mm.

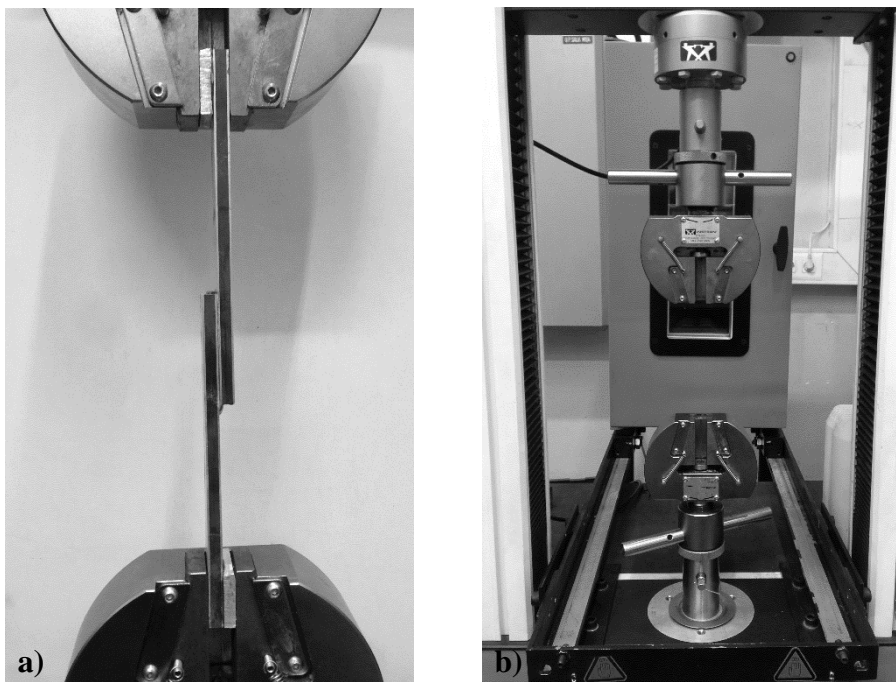


Figura 50: a) Pormenor da junta de sobreposição simples presa nas agarras; b) Máquina de tração (Instron[®] 3367) - FEUP.

Este trabalho experimental dá algum seguimento ao trabalho elaborado por Radu (2015), no qual o tratamento utilizado nas superfícies dos provetes foi apenas o processo de lixagem. Os resultados dos ensaios à tração elaborados por Radu (2015) estão devidamente identificados neste trabalho e são utilizados como comparação. Neste trabalho para além do processo de tratamento das superfícies dos provetes, por lixagem, também se utilizou o processo de anodização e o processo “etching” (ataque com ácido).

4.1 Ensaios de tração das JSS com uma sobreposição de 12,5 mm

Após a avaliação do comportamento dos tratamentos das superfícies, utilizaram-se as várias combinações possíveis de LFM e procedeu-se à análise dos ensaios de tração das juntas com um comprimento de sobreposição simples de 12,5 mm.

4.1.1 Junta de referência CFRP

Com o objetivo de avaliar os laminados produzidos, através da adição de chapas de alumínio, produziram-se juntas de referência de CFRP, com espessura de 3,2 e 6,4 mm, para servir de base de comparação com os resultados obtidos pelas juntas com diferentes combinações.



Figura 51: Configuração da junta de referência CFRP, com um comprimento de sobreposição de 12,5 mm.

Na Figura 52 são ilustradas apenas as curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de 3,2 e 6,4 mm de espessura. A curva não é linear devido à utilização de calços nas juntas, pelo qual ocorre um ligeiro escorregamento e por esse motivo a curva não é linear. Também é notório o início da rotação das juntas nos extremos da sobreposição (comportamento típico para este tipo de juntas adesivas).

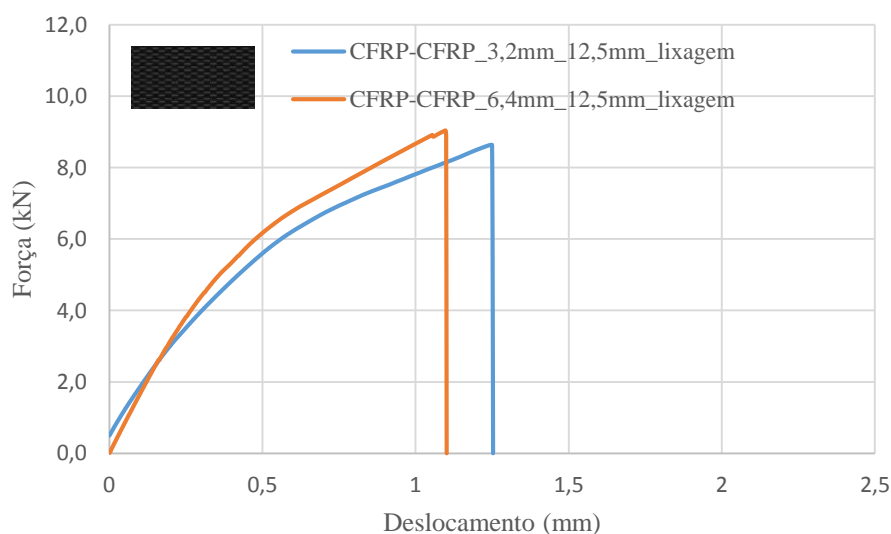


Figura 52: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de referência CFRP, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm (Radu, 2015).

Após os ensaios de tração verificou-se que a falha em ambas as configurações de CFRP com 3,2 e 6,4 mm de espessura foi coesiva, Figura 53 e 54. No caso da junta de maior espessura, verificou-se um ligeiro aumento da força máxima. Este aumento pode ser derivado da elevada rigidez longitudinal da placa de CFRP com maior espessura, que levou a uma redução das tensões de delaminação (Goland, 1944).

Como se pode verificar na Figura 53, ambas as superfícies dos provetes estão cobertas por adesivo, logo considera-se que o tipo de rotura obtida é coesiva no interior do adesivo. Este tipo de rotura ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo.

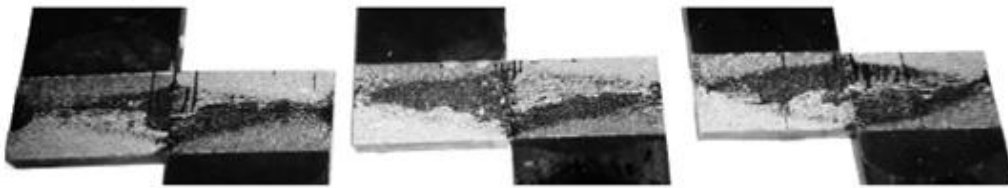


Figura 53: a) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm (Radu, 2015).

Observou-se que a falha obtida na JSS com espessura de 3,2 mm é do tipo coesiva, assim como na JSS com uma espessura de 6,4 mm, Figura 54. Contudo, nesta última falha ocorreu perto da interface da superfície, estando este tipo de rotura relacionado com o tipo de adesivo, que neste caso é frágil.

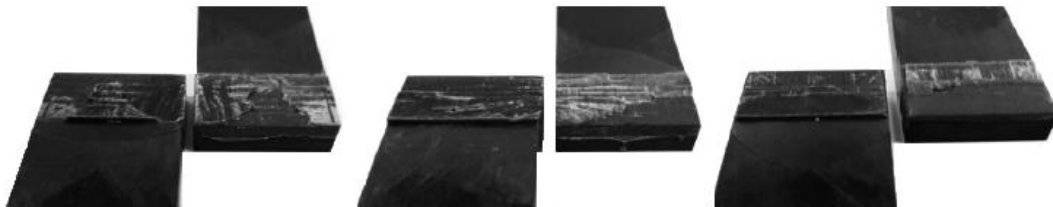
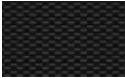
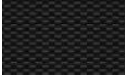


Figura 54: b) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm (Radu, 2015).

Analisando os resultados das tensões de corte das juntas de referência CFRP, conclui-se que os valores são muito semelhantes. Pode verificar-se que um aumento da espessura dos substratos levou a um aumento da resistência da junta, que é acompanhado pelo aumento da tensão de corte e da força de rotura

Os resultados médios da força são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Forças de rotura e tensões médias para as juntas de referência CFRP.

<i>Tipo de junta</i>	<i>Espessura da amostra [mm]</i>	<i>Força média [kN]</i>	τ [MPa]	<i>Mecanismo de falha</i>	<i>Tratamento superfície</i>
a) 	3,2	8,73 ± 0,21	27,94 ± 0,67	Coesiva	Lixagem com grão P320
b) 	6,4	9,20 ± 0,55	29,44 ± 1,76	Coesiva	Lixagem com grão P320

4.1.2 Junta do laminado CFRP-AL

A configuração deste laminado consiste numa placa de fibras de carbono e uma placa de liga de alumínio.

As propriedades elásticas consideradas para a liga de alumínio são apresentadas na Tabela 6, já as propriedades elásticas consideradas para o CFRP são apresentadas na Tabela 5.

Quanto à junta CFRP-AL, esta não foi possível de produzir devido aos diferentes coeficientes de expansão térmica das placas, pois esta acabava por empenar, tal como o comprovado pelo trabalho experimental e numérico validado por Radu (2015) em que este fenómeno ocorreu.

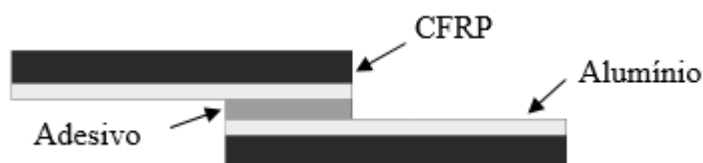


Figura 55: a) Configuração da junta CFRP-AL com um comprimento de sobreposição de 12,5 mm.

O estudo elaborado por Radu (2015), demonstra que as tensões térmicas residuais não podem ser ignoradas em análises futuras. Devido à expansão térmica, os valores de tensão obtidos pelas simulações de Radu (2015) são elevados, sendo o valor típico da resistência desta liga cerca de 289 MPa.



Figura 56: Ilustração do empeno da placa do LFM (CFRP-AL) (Radu, 2015).

4.1.3 Junta do laminado CFRP-AL-CFRP

A configuração deste laminado consiste no empilhamento de uma placa de alumínio entre duas placas de carbono.

De forma a avaliar os laminados produzidos CFRP-AL-CFRP, com um comprimento de sobreposição de 12,5 mm e uma espessura de substrato de 3,2 mm, foram utilizadas apenas placas de alumínio com uma espessura máxima de 0,8 mm, para garantir o rácio 1:3 (AL:CFRP). Assim apenas se produziram substratos com uma espessura de 3,2 mm.

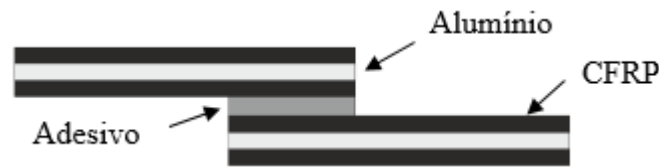


Figura 57: Configuração da junta CFRP-AL-CFRP, com um comprimento de sobreposição de 12,5 mm.

Os valores de força máxima obtidos são inferiores aos conseguidos com a junta de referência com espessura de 3,2 mm, com um tratamento superficial por lixagem. A curva típica $P-\delta$ obtida está representada na Figura 58.

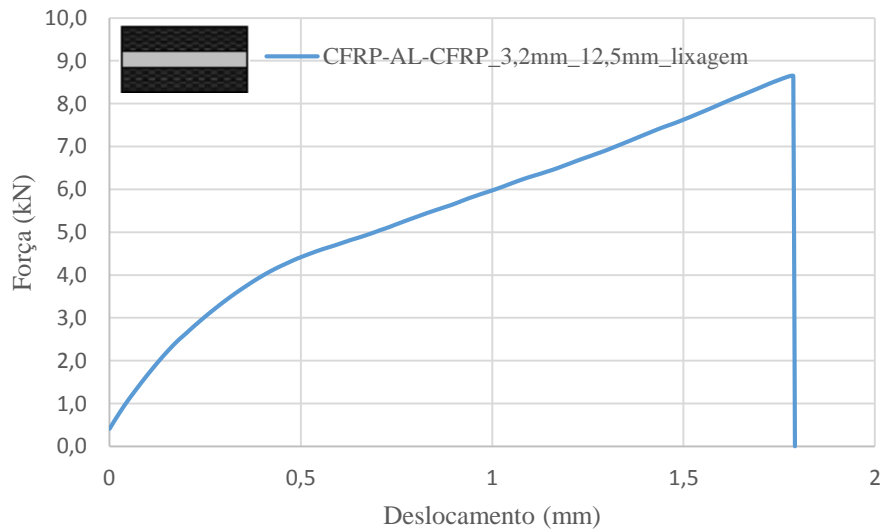


Figura 58: Curva típica $P-\delta$ obtida para as juntas de CFRP-AL-CFRP com uma espessura do substrato de 3,2 mm (Radu, 2015).

A falha verificada nesta junta foi coesiva, conforme se pode verificar na Figura 59. Este tipo de falha está relacionado com o tipo de adesivo utilizado, que neste caso é um adesivo frágil. O facto da curva não apresentar uma perfeita linearidade pode

ser devido, uma vez mais, à utilização de calços nas juntas. Se compararmos este tipo de junta com a junta de referência, esta apresenta uma diminuição da força máxima de 3,78%, Tabela 9.

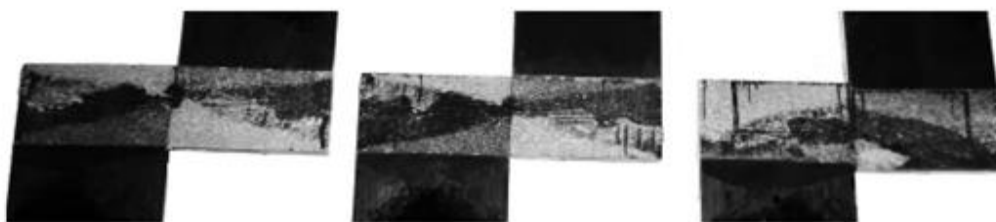



Figura 59: a) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm (Radu, 2015).

Tabela 9: Forças de rotura e tensões médias para CFRP-AL-CFRP.

	<i>Tipo de junta</i>	<i>Espessura da amostra [mm]</i>	<i>Força média [kN]</i>	τ [MPa]	<i>Mecanismo de falha</i>	<i>Tratamento superfície</i>
a)		3,2	8,40 ± 0,21	26,88 ± 0,67	Coesiva	Lixagem com grão P320

4.1.4 Junta do laminado CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP

Com o objetivo de melhorar as características da junta CFRP-AL-CFRP, produziu-se a junta CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP com um comprimento de sobreposição de 12,5 mm e com espessuras de 3,2 e 6,4 mm. A configuração deste laminado consiste na inserção de duas placas de AL durante a sua produção.

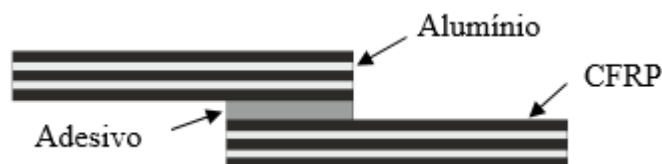


Figura 60: Configuração da junta CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP, com um comprimento de sobreposição de 12,5 mm.

As curvas típicas $P-\delta$ obtidas para a junta CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP com um tratamento superficial por lixagem estão representadas na Figura 61.

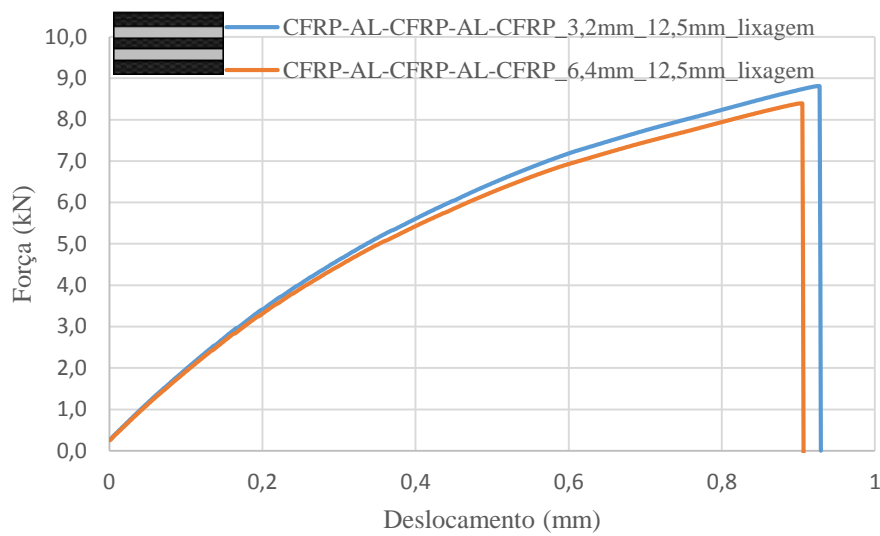


Figura 61: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm.

Para a junta com espessura de 3,2 mm, verificou-se que a falha ocorrida foi do tipo coesiva perto da interface, pois as superfícies da junta apresentam em ambos os substratos zonas com adesivo, Figura 62. A sua força média é ligeiramente inferior à força média obtida pela junta de referência CFRP com uma espessura de 3,2 mm, nomeadamente 2,06%. Para esta junta, mantendo a espessura do substrato e adicionando mais uma placa de CFRP e de alumínio, proporcionou-se uma melhoria das suas propriedades mecânicas.

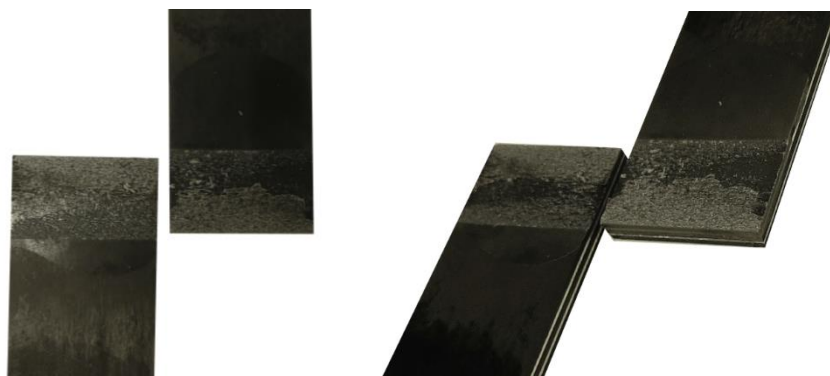


Figura 62: a) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm.

Relativamente à junta com espessura de 6,4 mm, constatou-se que esta apresenta uma falha coesiva na interface, Figura 63. Em comparação com a junta de referência, a junta CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP com uma espessura de substrato de 6,4 mm, apresenta um decréscimo de 8,70% na sua força média de rotura.

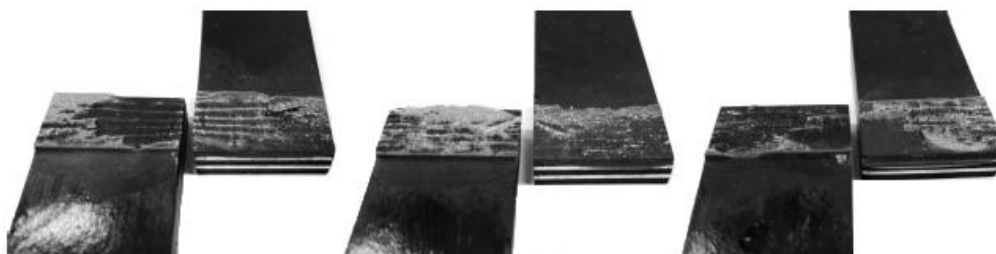




Figura 63: b) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm (Radu, 2015).

Tabela 10: Forças de rotura e tensões médias para CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP.

<i>Tipo de junta</i>	<i>Espessura da amostra [mm]</i>	<i>Força média [kN]</i>	τ [MPa]	<i>Mecanismo de falha</i>	<i>Tratamento superfície</i>
a) 	3,2	8,55 ± 0,20	27,36 ± 0,64	Coesiva perto da interface	Lixagem com grão P320
b) 	6,4	8,40 ± 0,73	26,88 ± 2,34	Coesiva perto da interface	Lixagem com grão P320

4.1.5 Junta do laminado AL-CFRP-AL

A configuração deste laminado consiste na inserção de duas placas de AL nas extremidades do compósito.

Para este tipo de junta com 3,2 e 6,4 mm de espessura e com um comprimento de sobreposição de 12,5 mm, foram estudadas as forças de rotura para os diferentes tipos de tratamento da superfície do alumínio, nomeadamente: a lixagem, a anodização e o ataque químico.

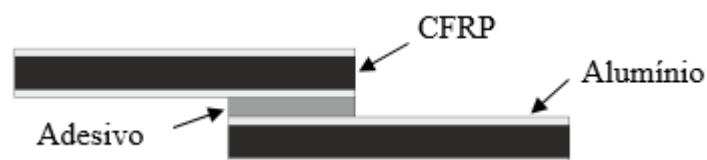


Figura 64: Configuração da junta AL-CFRP-AL, com um comprimento de sobreposição de 12,5 mm.

i) LIXAGEM

As curvas típicas $P-\delta$ obtidas durante os ensaios para juntas com tratamento superficial por lixagem são apresentadas na Figura 65, enquanto os valores médios da força são apresentados na Tabela 11.

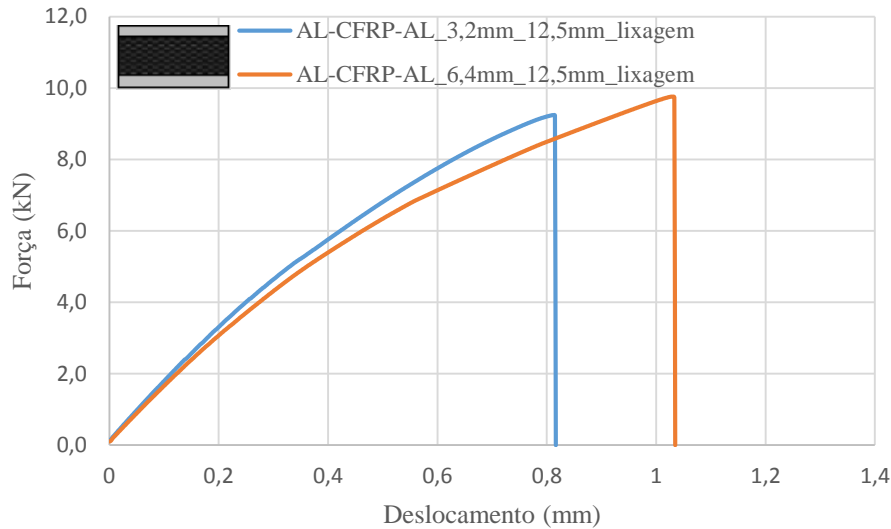


Figura 65: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de AL-CFRP-AL, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de lixagem.

Constatou-se que a força média obtida para esta junta é superior à obtida pela junta de referência CFRP para a espessura 3,2 mm, concretamente 3,67%. O tipo de falha verificada nesta junta com um tratamento da superfície do alumínio por lixagem, é coesiva perto da interface, conforme ilustra a Figura 66.

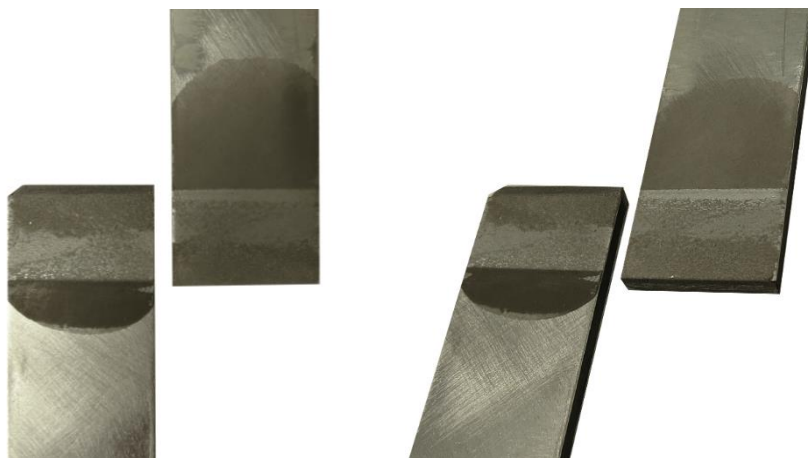


Figura 66: a) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm e com um tratamento da superfície pelo método de lixagem.

Para a junta com espessura de 6,4 mm e com tratamento da superfície do alumínio por lixagem, verificou-se que a falha é do tipo coesiva perto da interface conforme ilustra a Figura 67. A força média obtida para esta junta é 4,35% superior à obtida com a junta de referência CFRP. A adição de placas de alumínio para formar este tipo de junta leva a um aumento da resistência da junta à delaminação.

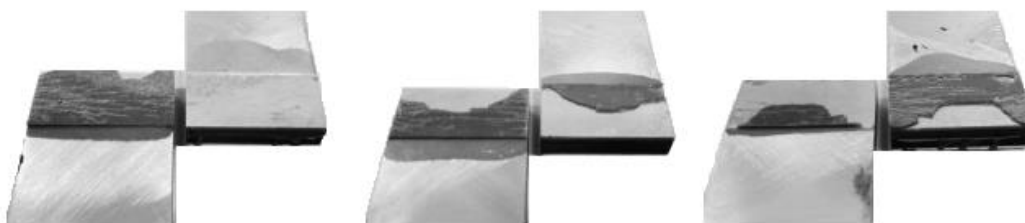




Figura 67: d) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de lixagem (Radu, 2015).

Tabela 11: Forças de rotura e tensões médias para AL-CFRP-AL

	<i>Tipo de junta</i>	<i>Espessura da amostra [mm]</i>	<i>Força média [kN]</i>	τ [MPa]	<i>Mecanismo de falha</i>	<i>Tratamento superfície</i>
a)		3,2	9,05 ± 0,36	28,96 ± 1,15	Coesiva perto da interface	Lixagem com grão P320
d)		6,4	9,60 ± 0,26	30,72 ± 0,83	Coesiva perto da interface	Lixagem com grão P320

ii) ANODIZAÇÃO

As curvas típicas $P-\delta$ obtidas durante os ensaios para juntas com tratamento superficial por anodização são apresentadas na Figura 68, já os valores médios da força são apresentados na Tabela 12.

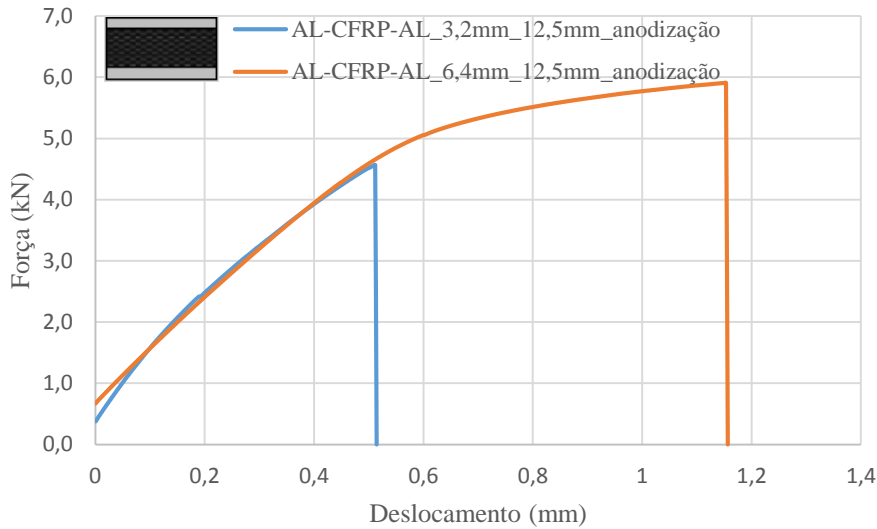


Figura 68: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de AL-CFRP-AL, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de anodização.

O tipo de falha desta junta é adesiva, conforme ilustra a Figura 69, o que estará associado a uma má preparação da superfície dos substratos. Observa-se que uma das superfícies dos substratos que se encontra em contacto com o adesivo não contém qualquer resíduo deste, pois o adesivo fica depositado na sua totalidade na outra superfície, indicando uma falha adesiva.

A força média para esta junta, com tratamento superficial do alumínio pelo processo de anodização, é 32,76% inferior à junta de referência CFRP com 3,2 mm de espessura. O processo de tratamento da superfície do alumínio realizado anteriormente a este tipo de junta poderá ter provocado um enfraquecimento da resistência da junta, devido a esta estar totalmente mergulhada numa solução de ácido fosfórico, onde o contacto do carbono com o ácido poderá ter provocado a contaminação da superfície a anodizar.

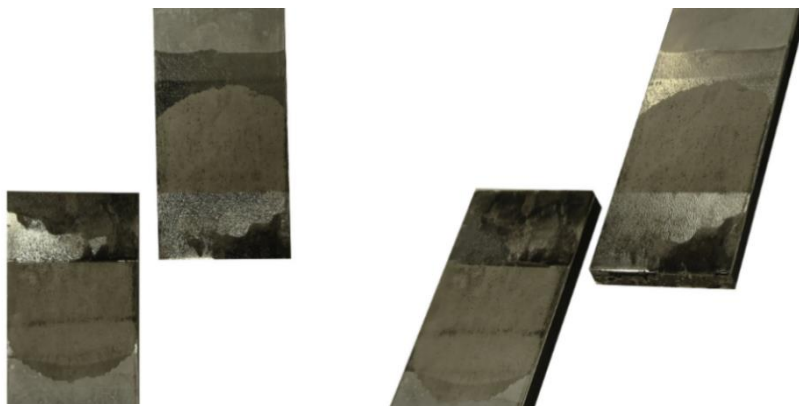


Figura 69: b) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm e com um tratamento da superfície pelo método de anodização.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O tipo de falha desta junta, com um tratamento da superfície do alumínio por anodização, é mista, conforme ilustra a Figura 70. Este tipo de rotura combina as características de uma rotura adesiva e de uma rotura coesiva. A sua rotura ocorre na zona de ligação entre o adesivo e o substrato e no interior do próprio adesivo. A força média para esta junta é 38,37% inferior à junta de referência CFRP com 6,4 mm de espessura. Uma das possíveis causas destes fracos resultados, poderá ser devido ao próprio tratamento de superfície do alumínio, que como referido anteriormente foi o processo de anodização (PAA).

Neste caso, ambas as superfícies da fratura apresentam vestígios de adesivo. Durante o processo de anodização a junta liberta partículas de carbono, que acabam por contaminar a solução e provocar este efeito na falha mista.

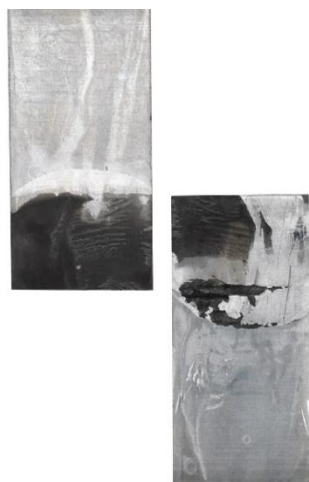




Figura 70: e) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm, com um comprimento de sobreposição de 12,5 mm e com um tratamento da superfície pelo método de anodização.

Tabela 12: Forças de rotura e tensões médias para AL-CFRP-AL

	<i>Tipo de junta</i>	<i>Espessura da amostra [mm]</i>	<i>Força média [kN]</i>	τ [MPa]	<i>Mecanismo de falha</i>	<i>Tratamento superfície</i>
b)		3,2	4,57± 2,51	14,62 ± 8,03	Adesiva	Anodização
e)		6,4	5,67 ± 0,33	18,14 ± 1,06	Mista	Anodização

iii) **ATAQUE COM ÁCIDO**

A Figura 71 representa as curvas típicas $P-\delta$ obtidas nos ensaios realizados com as juntas com tratamento superficial por ataque com ácido, já os valores médios da força são apresentados na Tabela 13.

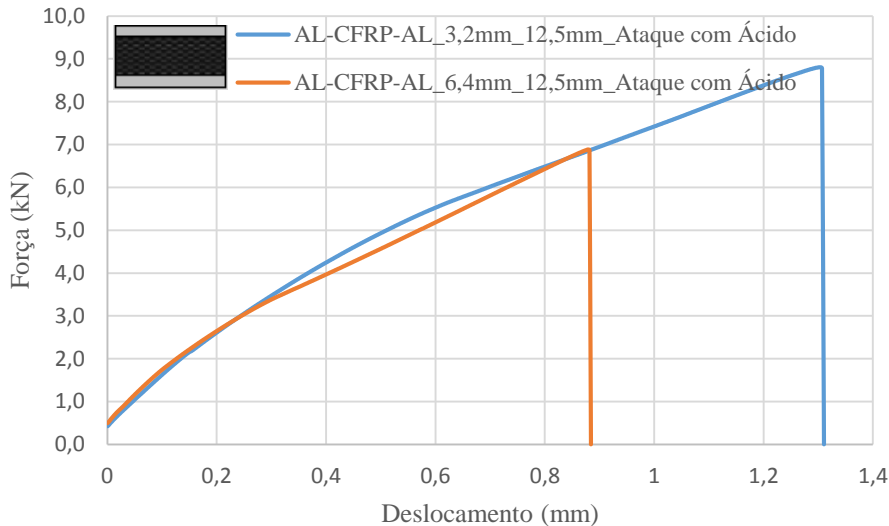


Figura 71: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de AL-CFRP-AL, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm, e com um tratamento da superfície pelo método de “etching” (ataque com ácido).

Para esta configuração de junta e com tratamento da superfície do alumínio por ataque com ácido, verificou-se uma falha coesiva perto da interface, com ambas as espessuras do aderente. A força média apresentou um decréscimo de 2,06% e 25,11% em relação à junta de referência CFRP com 3,2 e 6,4 mm de espessura, respetivamente.

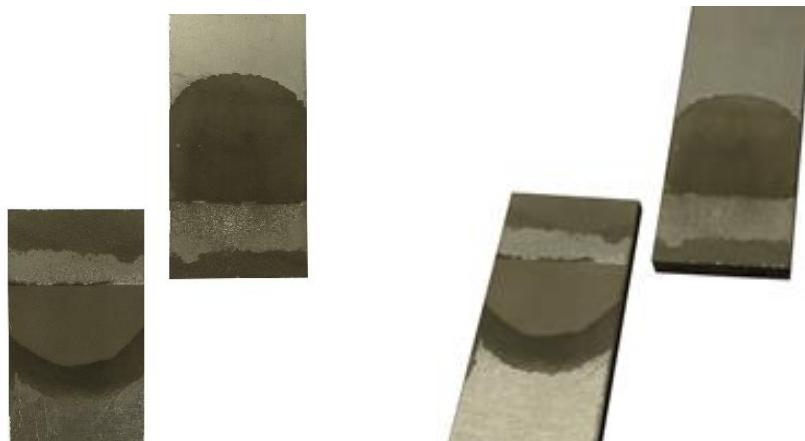


Figura 72: c) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm e com um tratamento da superfície pelo método ataque com ácido.



RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para esta configuração em particular e com o tratamento da superfície do alumínio por ataque com ácido, aumentando a espessura do substrato de 3,2 para 6,4 mm não se verificou uma melhoria na resistência da junta, antes pelo contrário. Aumentando ainda a espessura do substrato para uma sobreposição de 12,5 mm, verificou-se também que o desempenho da junta se agravou.



Figura 73: f) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método ataque com ácido.

Tabela 13: Forças de rotura e tensões médias para AL-CFRP-AL.

	<i>Tipo de junta</i>	<i>Espessura da amostra [mm]</i>	<i>Força média [kN]</i>	τ [MPa]	<i>Mecanismo de falha</i>	<i>Tratamento superfície</i>
c)		3,2	8,55 ± 0,66	27,36 ± 2,11	Coesiva perto da interface	Ataque com Ácido
f)		6,4	6,89 ± 2,90	22,05 ± 9,28	Coesiva perto da interface	Ataque com Ácido

Verificou-se que as curvas $P-\delta$ obtidas para as juntas estudadas anteriormente, não apresentam uma perfeita linearidade. Esta propensão poderá ser devida à utilização de calços nas juntas, que como foi referido pode provocar um deslizamento dos apertos mecânicos sobre os provetes. A não linearidade indica o ponto em que se verifica a rotação da junta devido ao momento fletor que se desenvolve nos extremos da sobreposição.

4.2 Ensaio de tração das JSS com uma sobreposição de 50 mm

Tal como o efetuado nas JSS com um comprimento de sobreposição de 12,5 mm, no final da avaliação do comportamento dos tratamentos das superfícies dos LFM procedeu-se à análise dos ensaios de tração das juntas com um comprimento de sobreposição de 50 mm. De acordo com o estudo realizado por Neto *et al.*, (2012), o comprimento de sobreposição de 50 mm resulta numa delaminação do aderente.

4.2.1 Junta de referência CFRP

As juntas de referência foram testadas por Radu (2015), de modo a estabelecer uma linha de base de comparação com outros ensaios de diferentes combinações entre CFRP e alumínio.



Figura 74: Configuração da junta de referência CFRP, com um comprimento de sobreposição de 50 mm.

As curvas típicas $P-\delta$ obtidas durante os ensaios são apresentadas na Figura 75, e os valores médios da força são apresentados na Tabela 14, para um tratamento superficial por lixagem.

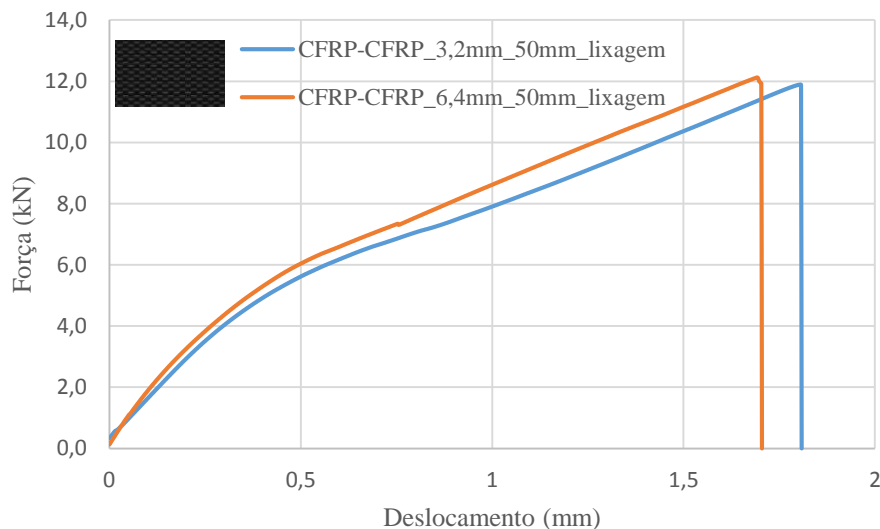


Figura 75: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de referência CFRP, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de lixagem (Radu, 2015).

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As JSS com uma sobreposição de 50 mm e para o substrato CFRP com 3,2 mm de espessura apresentaram delaminação no substrato, conforme ilustra a Figura 76.

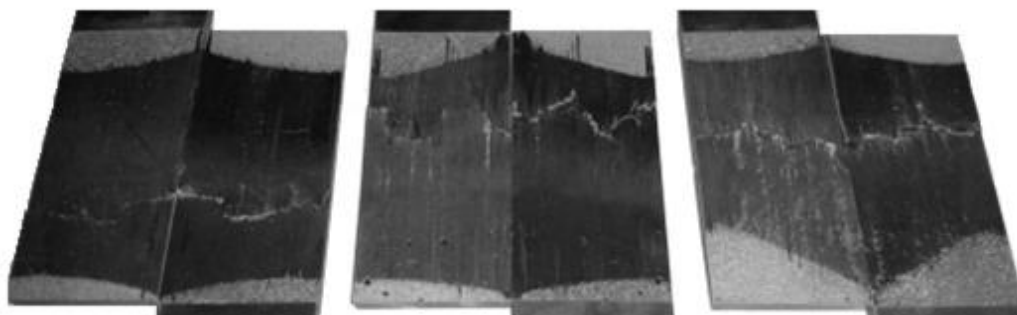


Figura 76: a) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm e com um tratamento da superfície pelo método de lixagem (Radu, 2015).

As juntas de referência com o substrato de 6,4 mm de espessura têm a capacidade de suporte de cargas mais elevadas, comparativamente às juntas com um substrato de 3,2 mm de espessura. Para as juntas de referência de 6,4 mm de espessura, verificou-se uma rotura coesiva no adesivo, conforme ilustra a Figura 77. Nas JSS com um comprimento de sobreposição de 50mm, a tensão de arrancamento do compósito foi inferior à resistência de arrancamento do adesivo.

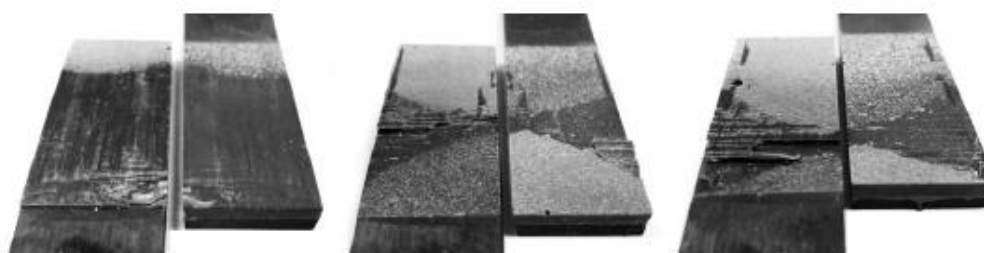


Figura 77: b) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de lixagem (Radu, 2015).

Tabela 14: Forças de rotura e tensões médias para as juntas de referência CFRP (Radu, 2015).

<i>Tipo de junta</i>	<i>Espessura da amostra [mm]</i>	<i>Força média [kN]</i>	<i>τ [MPa]</i>	<i>Mecanismo de falha</i>	<i>Tratamento superfície</i>
a)	3,2	$11,66 \pm 0,35$	$9,33 \pm 0,28$	Delaminação	Lixagem com grão P320
b)	6,4	$12,02 \pm 0,54$	$9,62 \pm 0,43$	Coesiva no adesivo	Lixagem com grão P320

Analisando os resultados das tensões de corte das juntas de referência CFRP, constata-se que os valores são muito semelhantes, isto significa que a resistência do adesivo para substratos com espessuras de 3,2 mm e a resistência transversal do compósito para juntas com substratos de 6,4 mm têm valores idênticos, para o qual se obtêm valores de tensão de corte (força de ruptura) idênticas.

Constatou-se ainda que para este tipo de junta, o aumento da espessura do substrato evitou a delaminação do compósito.

4.2.2 Junta do laminado CFRP-AL-CFRP

Tal como no subcapítulo anterior 4.1.3, a configuração deste laminado (CFRP-AL-CFRP) consiste na inserção de uma placa de alumínio entre duas placas de fibras de carbono, sendo neste caso utilizado um comprimento de sobreposição de 50 mm e uma espessura de substrato de 3,2 mm.

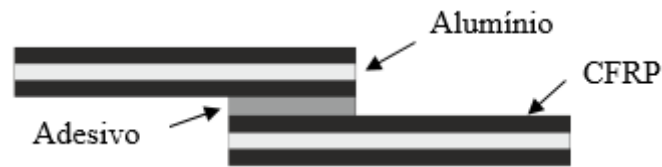


Figura 78: Configuração da junta CFRP-AL-CFRP, com um comprimento de sobreposição de 50 mm.

Os valores da força máxima obtidos para esta junta são cerca de 1,46% superiores aos alcançados pela junta de referência. A curva típica $P-\delta$ obtida durante os ensaios da junta CFRP-AL-CFRP é apresentada na Figura 79 e os valores médios da força são apresentados na Tabela 15.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

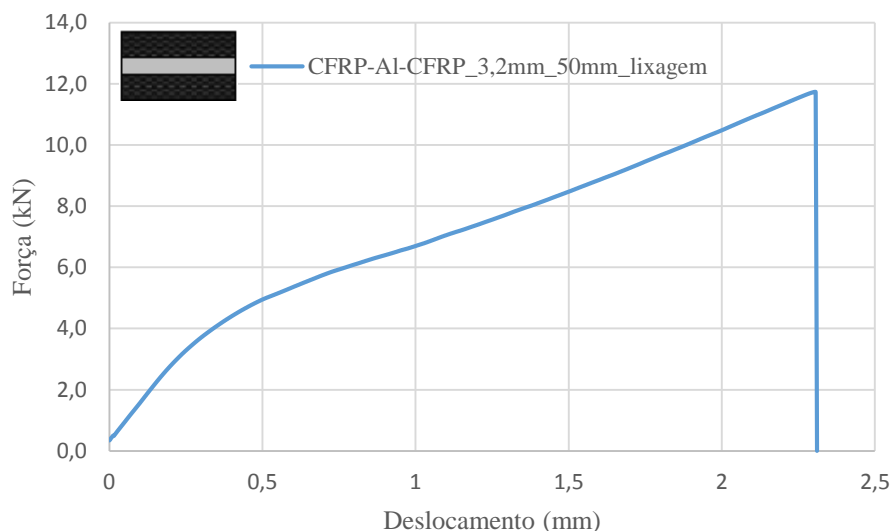


Figura 79: Curva típica $P-\delta$ obtida para as juntas de CFRP-AL-CFRP com uma espessura do aderente de 3,2 mm (Radu, 2015).

Verificou-se que neste tipo de junta ocorreu delaminação, como ilustra a Figura 80. Como já foi referido anteriormente, este tipo de rotura está relacionado com o tipo de adesivo que neste caso é um adesivo frágil.

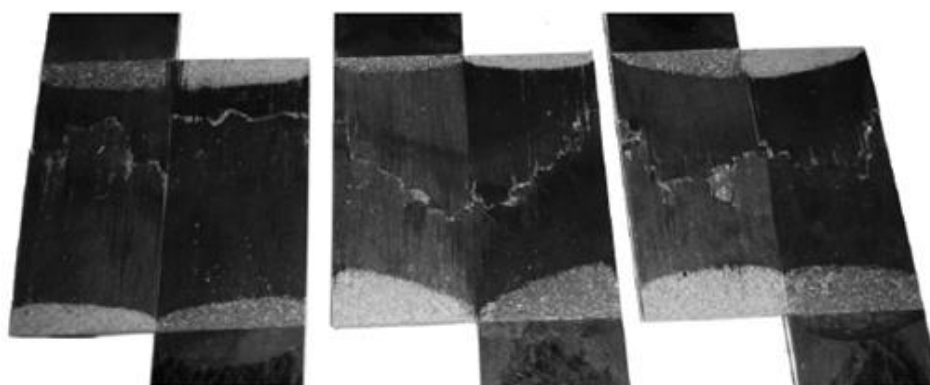



Figura 80: a) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm (Radu, 2015).

Tabela 15: Forças de rotura e tensões médias para CFRP-AL-CFRP (Radu, 2015).

	<i>Tipo de junta</i>	<i>Espessura da amostra [mm]</i>	<i>Força média [kN]</i>	τ [MPa]	<i>Mecanismo de falha</i>	<i>Tratamento superfície</i>
a)		3,2	$11,83 \pm 0,38$	$9,46 \pm 0,30$	Delaminação	Lixagem com grão P320

4.2.3 Junta do laminado CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP

A configuração deste laminado consiste na inserção de duas placas de AL durante a sua produção. A análise experimental foi feita recorrendo às curvas típicas $P-\delta$ obtidas durante os ensaios e estas são apresentadas na Figura 82, enquanto os valores médios da força são apresentados na Tabela 16, para um tratamento superficial por lixagem.

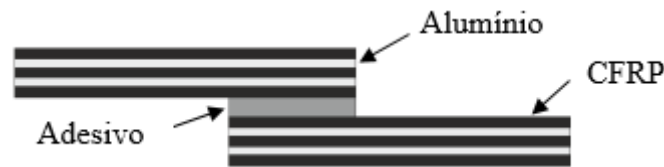


Figura 81: Configuração da junta CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP, com um comprimento de sobreposição de 50 mm.

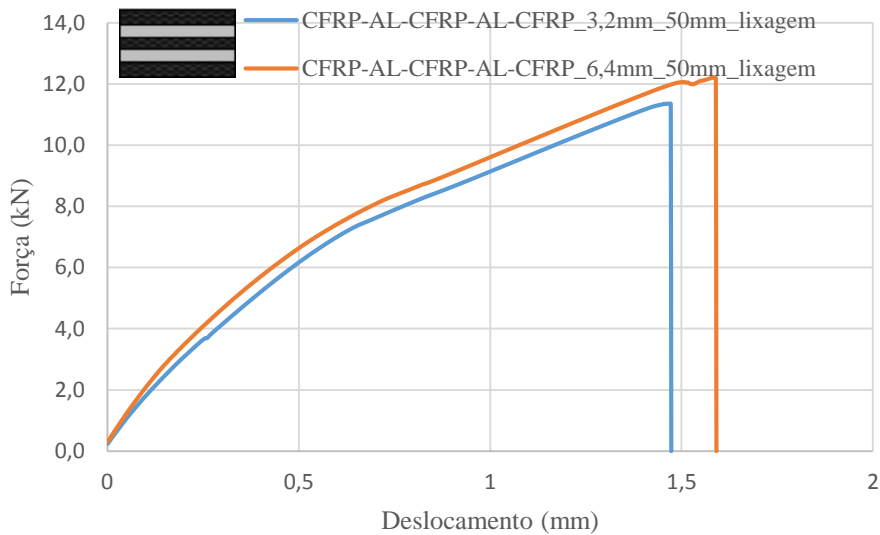


Figura 82: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm.

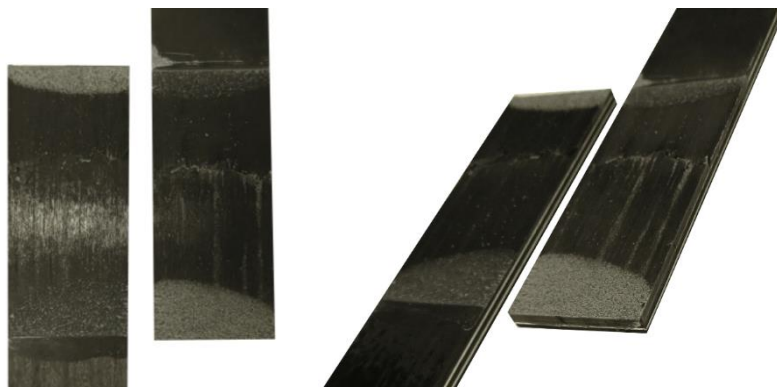


Figura 83: a) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm.

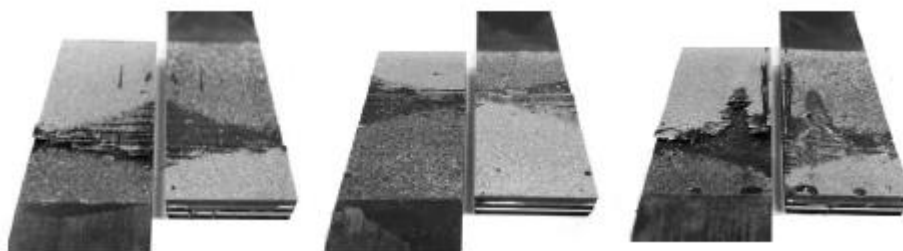




Figura 84: b) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm (Radu, 2015).

Para a configuração da junta com espessura 3,2 e 6,4 mm, verifica-se uma falha do tipo coesiva perto da interface, conforme ilustram as Figura 83 e 84. Os valores da força média de ambas as juntas com espessura de 3,2 e 6,4 mm são muito semelhantes, isto indica que o adesivo atingiu a sua resistência máxima ao arrancamento, localizada nos extremos da sobreposição.

Comparando com as juntas de referência de espessuras 3,2 e 6,4 mm, estas apresentam resultados ligeiramente superiores, o que indica que este tipo de junta cumpre com um dos objetivos propostos, concretamente com o aumento da força de rotura em relação à junta de referência.

Tabela 16: Forças de rotura e tensões médias para CFRP-AL-CFRP-AL-CFRP.

	<i>Tipo de junta</i>	<i>Espessura da amostra [mm]</i>	<i>Força média [kN]</i>	τ [MPa]	<i>Mecanismo de falha</i>	<i>Tratamento superfície</i>
a)		3,2	11,51 ± 0,32	9,21 ± 0,26	Coesiva perto da interface	Lixagem com grão P320
b)		6,4	12,07 ± 0,86	9,66 ± 0,69	Coesiva perto da interface	Lixagem com grão P320

4.2.4 Junta do laminado AL-CFRP-AL

A configuração deste laminado consiste na inserção de duas placas de AL nas extremidades do compósito.

Para este tipo de juntas com 3,2 e 6,4 mm de espessura e com uma sobreposição de 50 mm, foram estudadas as forças de rotura para diferentes tipos de tratamento da superfície do alumínio, tais como: a lixagem, a anodização e o ataque químico.

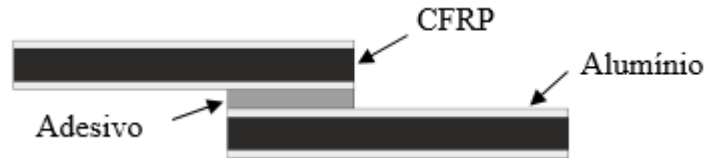


Figura 85: Configuração da junta AL-CFRP-AL, com um comprimento de sobreposição de 50 mm.

i) LIXAGEM

A análise experimental foi realizada através da análise das curvas típicas $P-\delta$ obtidas durante os ensaios para juntas com tratamento superficial por lixagem, sendo estas apresentadas na Figura 86, enquanto os valores médios da força são representados na Tabela 17.

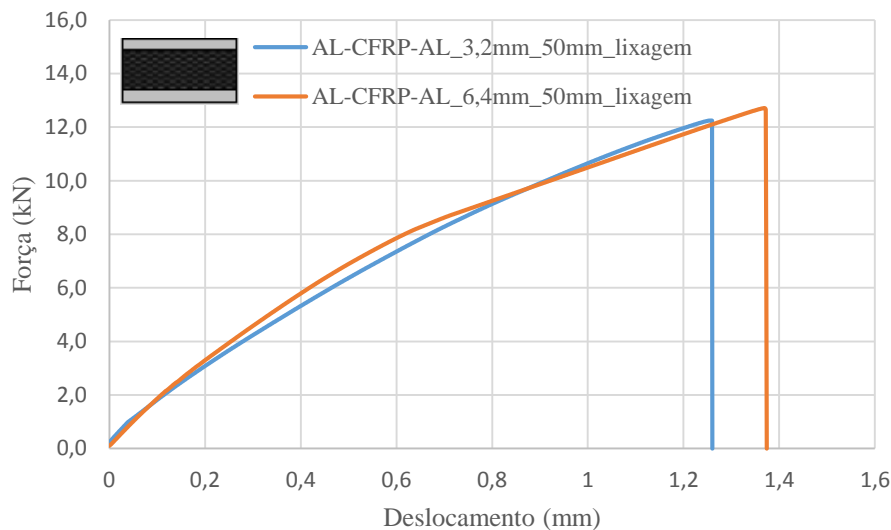


Figura 86: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de AL-CFRP-AL, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de lixagem.

Observou-se que o tipo de falha ocorrido na junta AL-CFRP-AL com o tratamento superficial do alumínio por lixagem é mista, ou seja, é coesiva perto da interface (a pequena área apresenta falha de adesão), conforme ilustra a Figura 87. Para esta junta, a força média apresenta um aumento de 5,15% em relação à junta de referência CFRP com 3,2 mm de espessura.



Figura 87: a) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm e com um tratamento da superfície pelo método de lixagem.

Verificou-se que no caso deste laminado, AL-CFRP-AL, com um comprimento de sobreposição simples de 50 mm, a força de rotura era cerca de 4,58% superior à obtida pela junta de referência. O tipo de falha que ocorreu nesta junta foi uma falha mista, como se pode verificar na Figura 88. Este tipo de falha pode ser devido ao comprimento de sobreposição e à elevada concentração de tensões nas extremidades de sobreposição.

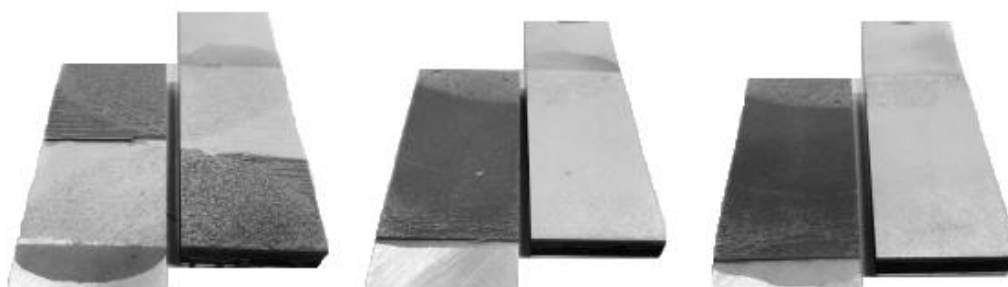




Figura 88: d) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de lixagem (Radu, 2015).

Tabela 17: Forças de rotura e tensões médias para AL-CFRP-AL.

	<i>Tipo de junta</i>	<i>Espessura da amostra [mm]</i>	<i>Força média [kN]</i>	τ [MPa]	<i>Mecanismo de falha</i>	<i>Tratamento superfície</i>
a)		3,2	12,26 ± 0,53	9,81 ± 0,42	Mista	Lixagem com grão P320
d)		6,4	12,57 ± 0,44	10,06 ± 0,35	Mista	Lixagem com grão P320

ii) ANODIZAÇÃO

As curvas típicas $P-\delta$ obtidas durante os ensaios para juntas com tratamento superficial por anodização, são apresentadas na Figura 89 enquanto os valores médios da força são apresentados na Tabela 18.

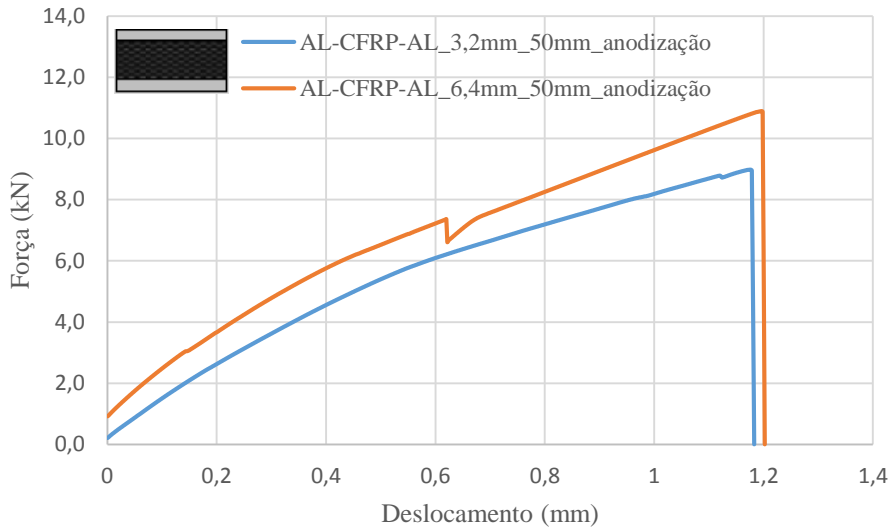


Figura 89: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de AL-CFRP-AL, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de anodização.

O tipo de falha desta junta com uma espessura de 3,2 mm e com um tratamento da superfície do alumínio por anodização é adesiva, conforme ilustra a Figura 90. A força média obtida para esta junta apresenta um decréscimo de 24,19% em relação à junta de referência CFRP com 3,2 mm de espessura. Para as juntas com um comprimento de sobreposição de 12,5 mm, este tipo de tratamento apresentou uma má adesão, provavelmente, devido à presença de carbono durante o processo de anodização.

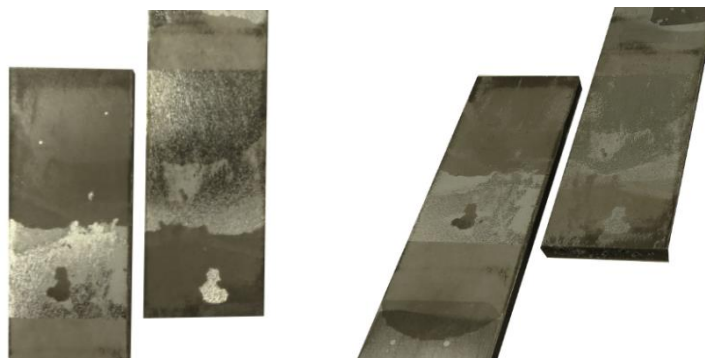


Figura 90: b) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm e com um tratamento da superfície pelo método de anodização.

RESULTADOS EXPERIMENTAIS



A falha ocorrida para esta junta de 6,4 mm de espessura e com um tratamento da superfície do alumínio por anodização é adesiva, conforme ilustra a Figura 91. A força média obtida para esta junta é cerca de 14,31% inferior à obtida pela junta de referência CFRP com 6,4 mm de espessura.

Neste caso, o tratamento superficial utilizado nas placas de alumínio levou a uma diminuição da resistência da junta.



Figura 91: e) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de anodização.

Tabela 18: Forças de rotura e tensões médias para AL-CFRP-AL.

	<i>Tipo de junta</i>	<i>Espessura da amostra [mm]</i>	<i>Força média [kN]</i>	τ [MPa]	<i>Mecanismo de falha</i>	<i>Tratamento superfície</i>
b)		3,2	$8,84 \pm 1,85$	$7,07 \pm 1,48$	Adesiva	Anodização
e)		6,4	$10,30 \pm 1,52$	$8,24 \pm 1,22$	Adesiva	Anodização

iii) ATAQUE COM ÁCIDO

As curvas típicas $P-\delta$ obtidas durante os ensaios para juntas com tratamento superficial por ataque com ácido são apresentadas na Figura 92, enquanto os valores médios da força são apresentados na Tabela 19.

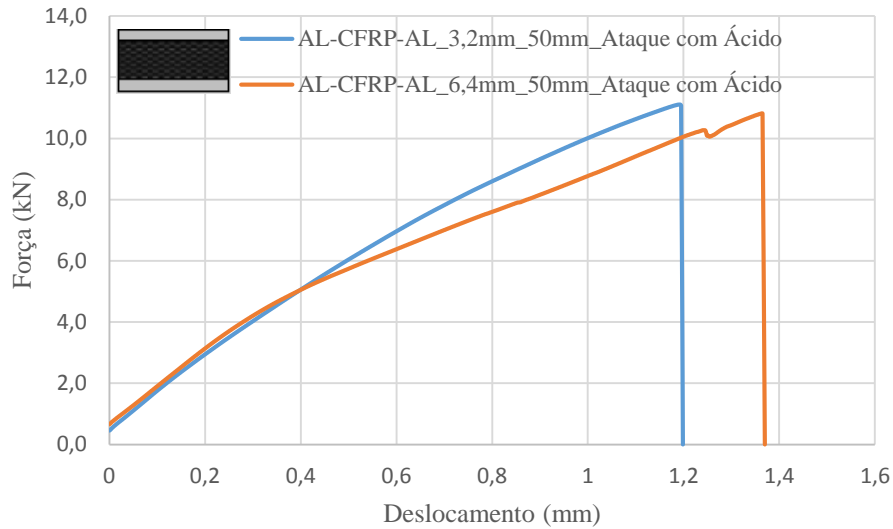


Figura 92: Curvas típicas $P-\delta$ obtidas para as juntas de AL-CFRP-AL, com uma espessura do aderente de 3,2 e 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método por ataque com ácido.

A junta AL-CFRP-AL com uma espessura de 3,2 mm e com um tratamento da superfície do alumínio por ataque com ácido apresenta uma falha mista, ou seja, observa-se falha coesiva junta da interface e adesiva nos extremos da sobreposição, conforme ilustra a Figura 93. A força média para esta junta é 3,86% inferior à obtida pela junta de referência CFRP com 3,2 mm de espessura.





Figura 93: c) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 3,2 mm e com um tratamento da superfície pelo método por ataque com ácido.

O tipo de falha apresentada por esta junta com uma espessura de 6,4 mm e com um tratamento da superfície do alumínio por ataque com ácido é mista, conforme ilustra a Figura 94. Com um tratamento superficial do alumínio pelo processo de ataque com ácido, esta junta apresenta uma força média com um decréscimo de 8,24% em relação à junta de referência CFRP com 6,4 mm de espessura.



Figura 94: f) Falha das superfícies das juntas com uma espessura do aderente de 6,4 mm e com um tratamento da superfície pelo método de “etching” (ataque com ácido).

Tabela 19: Forças de rotura e tensões médias para AL-CFRP-AL.

	<i>Tipo de junta</i>	<i>Espessura da amostra [mm]</i>	<i>Força média [KN]</i>	τ [MPa]	<i>Mecanismo de falha</i>	<i>Tratamento superfície</i>
c)		3,2	11,21 ± 0,33	8,97 ± 0,26	Mista	Ataque com Ácido
f)		6,4	11,03 ± 0,96	8,82 ± 0,77	Mista	Ataque com Ácido

4.3 Discussão de resultados

A distribuição das tensões de corte ao longo do adesivo é mais uniforme para valores de comprimento de sobreposição (L_0) reduzidos. À medida que L_0 aumenta, verifica-se um aumento gradual das tensões de corte desde o centro da junta até às suas extremidades. Já a resistência das juntas não aumenta proporcionalmente com o aumento de L_0 .

Raramente se verifica uma uniformidade na distribuição de tensões ao longo do comprimento de sobreposição, sendo a rotura iniciada quando as tensões locais excedem a resistência naquela região (Hartshorn, 1986).

Para os dois comprimentos de sobreposição 12,5 e 50 mm, a junta AL-CFRP-AL apresentou uma força máxima superior à força da junta de referência. Este tipo de comportamento é normal para as quais o aumento da área de corte não provoca o mesmo aumento da força de rotura (Ahmed *et al.*, 2012).

4.3.1 Comparação das JSS com comprimentos de sobreposição 12,5 mm para um tratamento das superfícies por lixagem

A Figura 95 ilustra as cargas de roturas das diversas configurações de juntas estudadas neste trabalho, com substratos de 3,2 e 6,4 mm de espessura e com sobreposição de 12,5 mm.

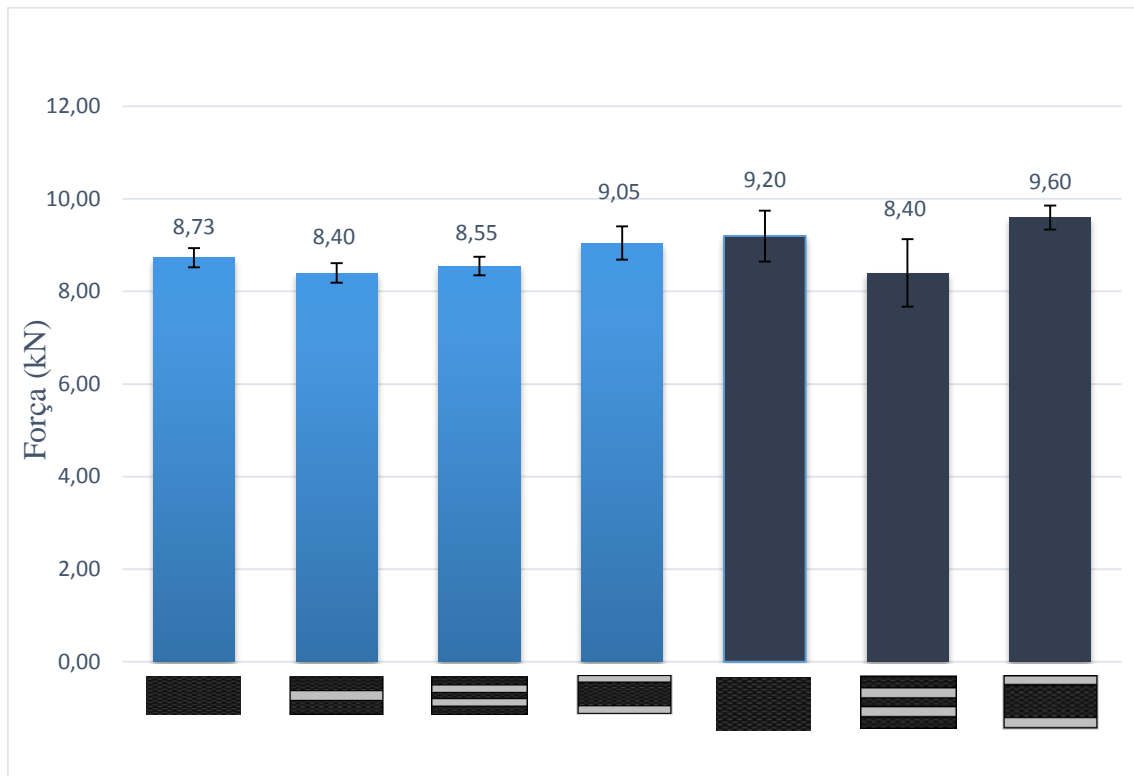


Figura 95: Resumo das forças médias de rotura para as juntas com sobreposição de 12,5 mm, com espessura de substrato de 3,2 e 6,4 mm com tratamento superficial por lixagem.

Para o mesmo comprimento de sobreposição de 12,5 mm da junta de referência CFRP, a força de rotura desta junta de referência com o tratamento superficial por lixagem aumenta cerca de 5,38% com o aumento da espessura de 3,2 mm para 6,4 mm.

Em relação à junta CFRP-AL-CFRP, não foi possível comparar o seu comportamento para os dois tipos de espessura devido às limitações de espessuras de chapas disponíveis para produzir os LFM. No entanto, verifica-se que a junta em

questão tem uma redução da força de rotura de 3,78% em relação à junta de referência CFRP com uma espessura de 3,2 mm.




A configuração da junta CFRP-Al-CFRP-Al-CFRP apresenta para ambas as espessuras de substrato, 3,2 e 6,4 mm, uma redução da força de rotura relativamente à junta de referência com as mesmas características. A junta com o substrato de 3,2 mm de espessura e com um comprimento de sobreposição de 12,5 mm apresenta uma ligeira diminuição de 2,06% em relação à junta de referência com as mesmas configurações. Já para este tipo de junta, com uma espessura de substrato de 6,4 mm, esta apresenta uma redução da sua força de rotura de 8,70%. Esta redução não é proporcional ao aumento da espessura do substrato. Quando se aumenta a espessura do substrato para o dobro, verifica-se uma diminuição da força de rotura. Para esta configuração, CFRP-Al-CFRP-Al-CFRP, o aumento da espessura do substrato leva a uma redução da força de rotura, ou seja verifica-se também uma diminuição da resistência à delaminação.


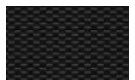


A configuração da junta AL-CFRP-AL, com espessura de 3,2 mm e com um tratamento da superfície do alumínio por lixagem, apresenta um aumento da força de rotura, em comparação com a junta de referência, nomeadamente 3,67%. Comparando com as restantes configurações de juntas, esta junta apresenta melhores resultados em relação à força de rotura. Esta configuração, para uma espessura de 6,4 mm apresenta um aumento da sua força de rotura em relação à junta de referência de cerca de 4,35%.

Verifica-se que este tipo de configuração, AL-CFRP-AL, para um comprimento de sobreposição de 12,5 mm e com espessura de 3,2 e 6,4 mm é a configuração que apresenta um melhor desempenho relativamente aos objetivos pretendidos. Esta junta apresenta ainda uma forte resistência à delaminação, também devido ao facto de apresentar alumínio na parte exterior do LFM, ou seja, o alumínio na parte exterior confere um aumento da resistência da junta.

Na Tabela 20 são apresentados os valores das forças de rotura médias, assim como o seu desvio padrão, o tipo de falha ocorrida para cada junta e ainda o tratamento superficial utilizado.

Tabela 20: Resumo das forças médias de rotura para as juntas com sobreposição de 12,5 mm e com tratamento superficial por lixagem.

<i>Tipo de Junta</i>	<i>Espessura [mm]</i>	<i>Força média [kN]</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>Tipo de falha</i>	<i>Tratamento superfície</i>
	3,2	8,73	0,21	Coesiva	Lixagem com grão P320
	3,2	8,40	0,21	Coesiva	Lixagem com grão P320
	3,2	8,55	0,20	Coesiva perto da interface	Lixagem com grão P320

	3,2	9,05	0,36	Coesiva perto da interface	Lixagem com grão P320
	6,4	9,20	0,55	Coesiva	Lixagem com grão P320
	6,4	8,40	0,73	Coesiva perto da interface	Lixagem com grão P320
	6,4	9,60	0,26	Coesiva perto da interface	Lixagem com grão P320

O aumento da espessura do substrato originou um ligeiro aumento da força média, sendo esta variação estatisticamente pouco relevante. Este comportamento era esperado devido ao facto do aumento da espessura do substrato originar um aumento da resistência específica ao longo da espessura, ou seja, existe um aumento da resistência à delaminação e o adesivo é submetido a uma elevada força de corte.

4.3.2 Comparação das JSS com comprimentos de sobreposição 50 mm para um tratamento das superfícies por lixagem

De uma forma geral, comparando a Figura 95 com a Figura 96, pode verificar-se que o aumento do comprimento de sobreposição das juntas de 12,5 para 50 mm leva a um aumento da força de rotura, ou seja a resistência à delaminação é claramente aumentada.

A Figura 96 representa um resumo das forças de rotura das diversas configurações de juntas com sobreposição de 50 mm e com espessura de substrato de 3,2 e 6,4 mm.

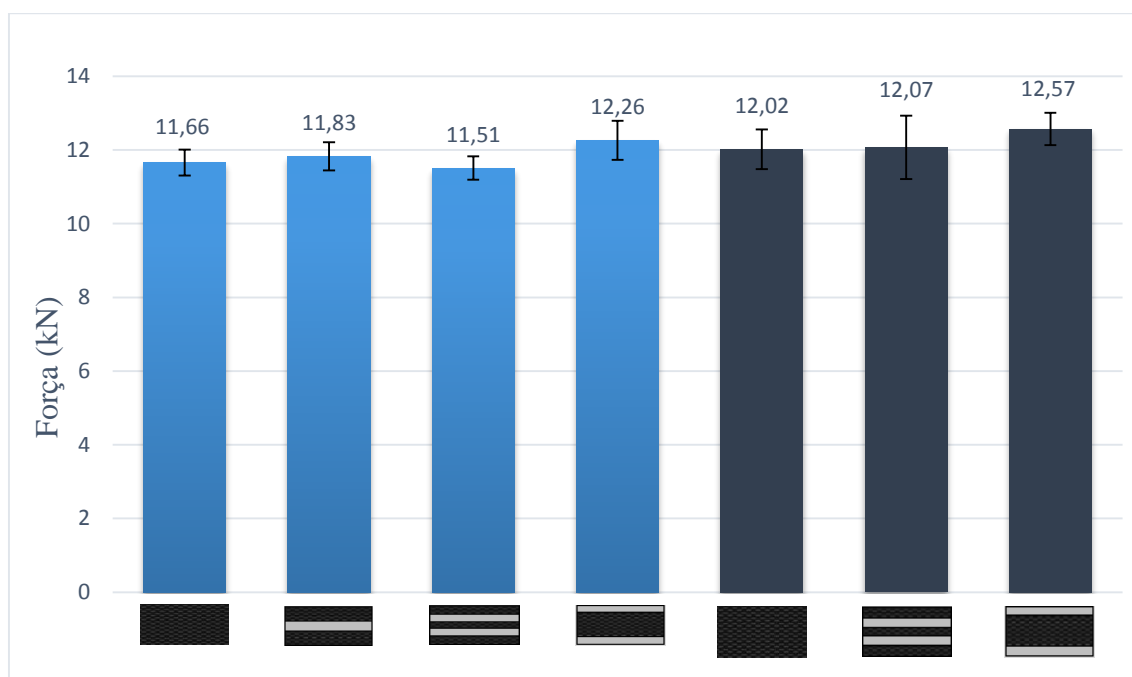


Figura 96: Resumo das forças médias de rotura para as juntas com sobreposição de 50 mm, com espessura de substrato de 3,2 e 6,4 mm com tratamento superficial por lixagem.

Para a junta de referência CFRP com o tratamento superficial por lixagem e com o mesmo comprimento de sobreposição, 50 mm, a força de rotura desta junta aumenta cerca de 3,09% com o aumento da espessura de substrato de 3,2 para 6,4 mm.

Em relação à junta CFRP-AL-CFRP, não foi possível comparar o seu comportamento para os dois tipos de espessura de substrato devido às limitações de espessuras de chapas disponíveis para a produção dos LFM. No entanto, verificou-se que, ao se adicionar uma placa de alumínio, esta junta apresenta um ligeiro aumento da força de rotura, cerca de 1,46% em relação à junta de referência CFRP com uma espessura de 3,2 mm.








Em comparação com a junta de referência, a junta CFRP-Al-CFRP-Al-CFRP apresenta uma redução de 1,29% da força de rotura para a espessura de 3,2 mm e um aumento de 0,42% da força de rotura para a espessura de 6,4 mm. Para a configuração referida anteriormente, constatou-se que o aumento da espessura do substrato leva a um aumento da força de rotura e consequentemente a um aumento da resistência à delaminação. Comparando as configurações CFRP-Al-CFRP-Al-CFRP e CFRP-AL-CFRP com espessura de 3,2 mm, em que a primeira é reforçada com duas placas de alumínio e a segunda apenas com uma, verificou-se que a adição de duas placas de alumínio não resultou num melhoramento da força de rotura. Como neste caso se utilizou um adesivo frágil, o aumento da resistência à delaminação com a adição de placas de alumínio não foi significativo. A utilização de um adesivo mais dúctil teria levado a uma melhoria da resistência à delaminação, pois a tensão de arrancamento no adesivo seria mais uniforme ao longo do comprimento de sobreposição.

A força de rotura das juntas AL-CFRP-Al com espessuras de 3,2 e 6,4 mm e com comprimento de sobreposição de 50 mm é representada na Figura 96. Esta configuração, com ambas as espessuras utilizadas e com um tratamento da superfície do alumínio por lixagem, apresenta excelentes resultados comparativamente às juntas de referência, especificamente um aumento de 5,15% da força de rotura para a junta com espessura de 3,2 mm e um aumento de cerca de 4,58% para a junta com espessura de 6,4 mm. Relativamente às restantes configurações de junta, estas apresentaram igualmente melhores resultados.

A elevada resistência à delaminação conseguida por estas juntas é devida à própria configuração das mesmas, que por apresentarem alumínio na parte exterior do LFM confere-lhe um aumento da resistência.

Na Tabela 21 são apresentados os valores das forças de roturas médias e o desvio padrão, assim como o tipo de falha ocorrente para cada junta e o tratamento superficial utilizado.

Tabela 21: Resumo das forças médias de rotura para as juntas com sobreposição de 50 mm e com tratamento superficial por lixagem.

<i>Tipo de Junta</i>	<i>Espessura [mm]</i>	<i>Força média [kN]</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>Tipo de falha</i>	<i>Tratamento superfície</i>
	3,2	11,66	0,35	Delaminação	Lixagem com grão P320
	3,2	11,83	0,38	Delaminação	Lixagem com grão P320
	3,2	11,51	0,32	Coesiva perto da interface	Lixagem com grão P320
	3,2	12,26	0,53	Mista	Lixagem com grão P320
	6,4	12,02	0,54	Coesiva no adesivo	Lixagem com grão P320
	6,4	12,07	0,86	Coesiva perto da interface	Lixagem com grão P320
	6,4	12,57	0,44	Mista	Lixagem com grão P320

4.3.3 Efeito do tratamento superficial na resistência das JSS

Tendo em conta as análises realizadas anteriormente, identificou-se a junta AL-CFRP-AL como sendo a que apresenta melhores resultados, tanto para as diferentes espessuras como para os diferentes comprimentos de sobreposição. Assim, comparou-se esta junta com outras juntas que apresentam a mesma configuração, mas foram submetidas a diferentes tratamentos superficiais do alumínio, nomeadamente a lixagem, a anodização e o ataque com ácido.

A Figura 97 ilustra a comparação das juntas AL-CFRP-AL com comprimento de sobreposição de 12,5 mm e com espessura de 3,2 e 6,4 mm, com um tratamento da superfície do alumínio por lixagem, anodização e ataque com ácido.

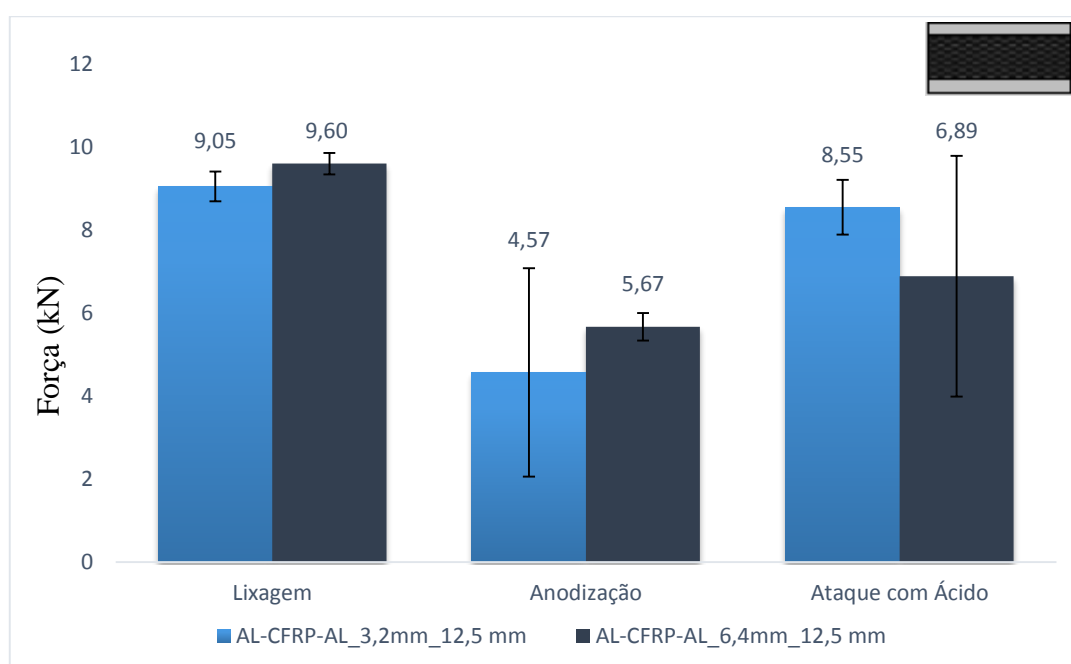


Figura 97: Resumo das forças médias de rotura para as juntas AL-CFRP-AL com sobreposição de 12,5 mm.

Aumentando a espessura do substrato da junta Al-CFRP-Al, com um tratamento superficial por lixagem, verificou-se também um aumento de 6,08%, da força de rotura. Em comparação com a junta de referência CFRP com uma sobreposição de 12,5 mm, o tratamento por lixagem veio melhorar a força de rotura tanto para os substratos de 3,2 mm como para os substratos de 6,4 mm de espessura.

O processo de anodização (PAA) utilizado no tratamento superficial do alumínio da junta AL-CFRP-AL para as espessuras de 3,2 e 6,4 mm, não melhorou a força de rotura destas juntas, apresentando piores resultados comparativamente aos outros tratamentos da superfície do alumínio.







As juntas AL-CFRP-AL com um comprimento de sobreposição de 12,5 mm e com o tratamento superficial por ataque com ácido apresentaram resultados inferiores

aos obtidos pela junta com a mesma configuração mas com tratamento por lixagem; em comparação com as juntas AL-CFRP-AL com tratamento superficial por anodização, as juntas em que se utilizou o tratamento por ataque com ácido apresentaram resultados superiores. Para ambas as espessuras do substrato, 3,2 e 6,4 mm, verificou-se uma redução da força de rotura para a junta AL-CFRP-AL com o tratamento superficial por ataque com ácido, relativamente à junta de referência.

Constatou-se que o tratamento da superfície do alumínio por ataque com ácido equipara-se ao tratamento por lixagem, obtendo-se resultados idênticos. No entanto, a utilização prática do tratamento por ataque com ácido não é justificável pois o processo é demorado. Deste modo, o processo ideal de tratamento das superfícies do alumínio das juntas AL-CFRP-AL é a lixagem.

Na Tabela 22 são apresentados os valores das forças de roturas médias com o seu desvio padrão, assim como o tipo de falha ocorrente para cada junta e o tratamento superficial utilizado.

Tabela 22: Resumo das forças médias de rotura para as juntas AL-CFRP-AL com sobreposição de 12,5 mm e com tratamento superficial por lixagem, anodização e ataque com ácido.

<i>Tipo de Junta</i>	<i>Espessura [mm]</i>	<i>Força média [kN]</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>Tipo de falha</i>	<i>Tratamento superfície</i>
	3,2	9,05	0,36	Coesiva perto da interface	Lixagem com grão P320
	3,2	4,57	2,51	Adesiva	Anodização
	3,2	8,55	0,66	Coesiva perto da interface	Ataque com ácido
	6,4	9,60	0,26	Coesiva perto da interface	Lixagem com grão P320
	6,4	5,67	0,33	Mista	Anodização
	6,4	6,89	2,90	Coesiva perto da interface	Ataque com ácido

A Figura 98 ilustra a influência do tratamento da superfície do alumínio e da espessura do substrato nas juntas de configuração AL-CFRP-Al, com comprimento de sobreposição de 50 mm.

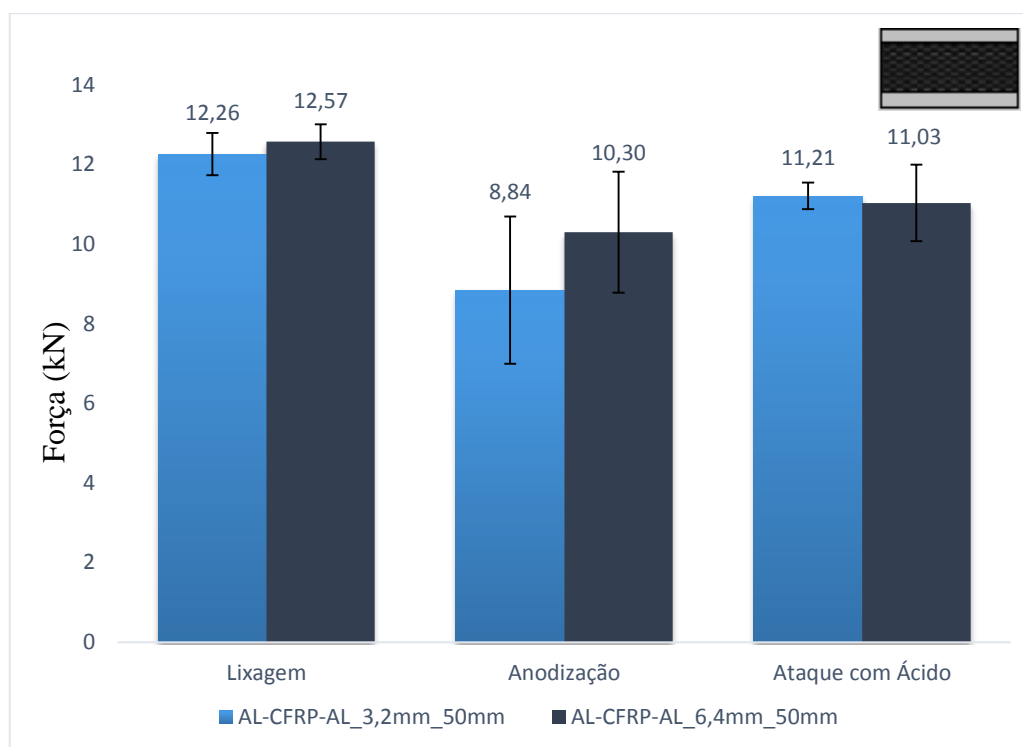


Figura 98: Resumo das forças médias de rotura para as juntas AL-CFRP-AL com sobreposição de 50 mm.

Para a junta AL-CFRP-AL com o tratamento da superfície do alumínio por lixagem, verifica-se que o aumento da espessura do substrato leva a um aumento de 2,53% da força de rotura.

Em comparação com a junta de referência CFRP com uma sobreposição de 50 mm e utilizando o processo de lixagem como tratamento superficial do alumínio, verificou-se um aumento da força de rotura para ambas as espessuras dos substratos.







Nas juntas com configuração AL-CFRP-AL e espessuras de substrato de 3,2 e 6,4 mm, o processo de anodização (PAA) não conduziu a um aumento da força de rotura, tendo sido este o processo de tratamento superficial que apresentou piores resultados.

Comparando os tratamentos superficiais do alumínio realizados à junta AL-CFRP-AL, verificou-se que o processo de lixagem foi o que apresentou melhores resultados e o processo de anodização os piores. Em comparação com as juntas de referência, as juntas AL-CFRP-AL com tratamento superficial por anodização apresentaram uma redução de 24,19% e 14,31% da força de rotura para uma espessura do substrato de 3,2 e 6,4 mm, respetivamente.

Verificou-se, uma vez mais, que o tratamento superficial do alumínio por ataque com ácido apresenta resultados semelhantes ao tratamento por lixagem, sendo este último o processo ideal para o tratamento da superfície do alumínio nas juntas AL-CFRP-AL.

Na Tabela 23 são apresentados os valores das forças de roturas médias e o respetivo desvio padrão, assim como o tipo de falha ocorrente para cada junta e o tratamento superficial utilizado.

Tabela 23: Resumo das forças médias de rotura para as juntas AL-CFRP-AL com sobreposição de 50 mm e com tratamento superficial por lixagem, anodização e ataque com ácido.

<i>Tipo de Junta</i>	<i>Espessura [mm]</i>	<i>Força média [kN]</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>Tipo de falha</i>	<i>Tratamento superfície</i>
	3,2	12,26	0,53	Mista	Lixagem com grão P320
	3,2	8,84	1,85	Adesiva	Anodização
	3,2	11,21	0,33	Mista	Ataque com ácido
	6,4	12,57	0,44	Mista	Lixagem com grão P320
	6,4	10,30	1,52	Adesiva	Anodização
	6,4	11,03	0,96	Mista	Ataque com ácido

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudado um novo conceito de juntas adesivas utilizando LFM, nomeadamente as ligas de alumínio de alta resistência 2024-T3, que permitiram um aumento da resistência à delaminação dos materiais compósitos no sentido da espessura, nomeadamente das fibras de carbono reforçadas com plástico (CFRP). A aplicação de placas finas da liga de alumínio permitiu aumentar a resistência do compósito no sentido da espessura, aumentando deste modo a sua resistência à delaminação.

Para além dos tratamentos superficiais realizados, que tiveram como objetivo garantir uma boa adesão entre os diferentes materiais, foi também necessário voltar a realizar um tratamento superficial aos provetes que continham alumínio na parte exterior, de forma a garantir uma boa adesão entre as placas de alumínio e o adesivo, nas juntas de sobreposição simples (JSS). Verificou-se que o tratamento que conferiu melhores propriedades de adesão aos provetes foi o processo de lixagem, verificando-se também que o processo por ataque com ácido (ácido fosfórico a 85%) apresentou resultados muito semelhantes aos obtidos com o processo de lixagem, contudo em termos práticos e económicos será mais viável a utilização do processo de lixagem. Os comportamentos mecânicos idênticos obtidos pelos processos de lixagem e de anodização não se tornam vantajosos a nível estático, contudo, relativamente à fadiga e ao envelhecimento, o ataque químico será o processo mais adequado.

Para os diferentes ensaios realizados à junta AL-CFRP-AL, verificou-se que o alumínio presente nas partes exteriores da junta, de ambos os comprimentos de sobreposição de 12,5 e 50 mm e de ambas as espessuras de 3,2 e 6,4 mm, apresenta melhor resistência à rotura e à delaminação.

A realização deste trabalho permite concluir que um aumento do comprimento de sobreposição leva a um aumento da força de rotura.

A força de rotura mais elevada foi conseguida para os substratos com espessura de 6,4 mm, devido a estes apresentarem uma rigidez longitudinal superior, o que leva a uma redução do momento fletor do substrato, diminuindo as tensões à delaminação. A relação entre a força e comprimento de sobreposição não é linear, uma vez que se trata de uma junta que utiliza um adesivo frágil.

O estudo realizado veio evidenciar que as tensões térmicas residuais estão presentes nos LFM, devido ao coeficiente de expansão térmica dos CFRP ser muito baixo e o do alumínio ser muito elevado.

Com a produção das juntas adesivas, foi também possível concluir que a junta que apresenta melhores resultados, relativamente à resistência da delaminação e à resistência das forças de rotura em comparação com a junta de referência CFRP, foi a junta com a configuração que apresenta alumínio nas partes exteriores, nomeadamente a combinação AL-CFRP-AL. Em comparação com as restantes juntas, verificou-se que para este tipo de junta a força de rotura foi superior. Este aumento da resistência da junta pode ser devido à elevada resistência do alumínio, uma vez que o alumínio atua

CONCLUSÕES

como um dissipador de energia, criando um caminho secundário às falhas de rotura que poderão surgir durante os ensaios à tração. A falha coesiva, predominante neste tipo de junta, foi verificada perto da interface. Neste caso, o facto do comprimento de sobreposição ser maior e a elasticidade do alumínio ser diferente do CFRP, poderá ter levado a altas tensões localizadas nas extremidades da junta, o que por ventura terá proporcionado a falha coesiva perto da interface.

O tipo de falha predominante é a falha coesiva junto da interface, mas pontualmente verificou-se uma falha adesiva, precisamente nos extremos da junta. É conclusivo que a predominância do tipo de falha coesiva encontra-se nas juntas com tratamento superficial por lixagem, já o tipo de falha adesiva é predominante nas juntas com tratamento superficial por anodização. Quanto à falha mista, esta foi observada maioritariamente nas juntas com tratamento superficial por ataque com ácido (etching).

Durante o processo de anodização com ácido fosfórico (PAA) dos provetes produzidos ocorre libertação de partículas de carbono, que acabam por contaminar a solução e a própria superfície do alumínio. Por este motivo, realizou-se o processo de ataque com ácido para evitar a contaminação da solução. Como o verificado nos resultados experimentais, a utilização de ácido fosfórico com uma concentração de 85% possibilitou uma melhoria significativa nos resultados, sendo estes idênticos aos obtidos pelo processo de lixagem.

Para uma utilização na indústria e tendo em conta os custos de produção para o tratamento superficial do alumínio, o processo de anodização por ácido fosfórico (PAA) não é aconselhável, tal como o processo por ataque com ácido. Sendo o processo de lixagem o mais económico e prático de realizar e tendo-se obtido idênticos resultados com este processo, comparativamente ao ataque com ácido, é aconselhável o uso do processo de lixagem no tratamento superficial do alumínio para a realização de juntas adesivas.

Através do estudo de influência realizado em trabalhos anteriores, dos três processos de tratamento das superfícies do alumínio, a lixagem, a grenalhagem e a anodização, o que possibilitou uma melhor adesão entre as placas de Al e CFRP na produção dos provetes dos LFM, foi o processo de anodização (PAA). Já na produção das juntas adesivas, este processo de tratamento superficial efetuado aos substratos de alumínio não foi o mais adequado, sendo o melhor processo nesta situação a lixagem.

Tendo em conta a revisão de literatura efetuada, o processo de anodização é o mais utilizado na indústria aeronáutica, o que indicaria que este tipo de tratamento seria o mais adequado. Neste trabalho verificou-se precisamente o contrário, pois este processo de anodização por ácido fosfórico foi o que apresentou piores resultados na produção de juntas adesivas de simples sobreposição.

O procedimento utilizado no processo de anodização neste trabalho não foi o mais adequado, existindo outros processos que poderiam ter levado as melhores resultados, como por exemplo a anodização com ácido sulfúrico/bório. Não foi possível realizar o tratamento das superfícies da liga de alumínio por este processo de anodização, devido à indisponibilidade do ácido.

Finalmente, pode concluir-se que nem todas as combinações de juntas produzidas conseguiram cumprir o objetivo proposto neste trabalho, sendo este o

reforço dos compósitos no sentido da espessura, evitando a sua própria delaminação. Verificou-se que a maioria das combinações apresentava resultados inferiores à junta de referência, no entanto destacou-se a junta com a combinação AL-CFRP-AL, que apresentou melhores resultados de resistência à rotura. Este aumento da força de rotura foi conseguido através da adição de chapas finas da liga de alumínio de alta resistência 2024-T3, evitando assim a delaminação das fibras de carbono e proporcionando uma redução do crescimento das fendas. Estas chapas de alumínio permitiram uma dissipação da carga, dificultando a ocorrência de falhas interlaminares.

6 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros recomenda-se a elaboração de análises numéricas, de modo a estudar as propriedades das juntas com as configurações apresentadas neste trabalho.

Neste trabalho reforçaram-se as fibras de pré-impregnado de carbono com a adição placas finas de ligas de alumínio 2024-T3, sendo importante efetuar outros estudos em que o material utilizado como reforço seja, por exemplo, outras ligas de alumínio, titânio ou magnésio.

Devido à forte aplicação deste tipo de soluções de LFM na indústria aeronáutica, as propriedades mecânicas das juntas devem ser estudadas e avaliadas utilizando um adesivo aeronáutico, adesivos em filme (por exemplo FM 73 da Cytec of AF 163 da 3M).

Será importante analisar e submeter as várias configurações de juntas produzidas a diferentes condições de humidade e temperatura.

De modo a verificar a resistência à corrosão das placas de alumínio anodizadas, poderá realizar-se um teste de nevoeiro salino, de acordo com a norma ASTM B 117-95.

Recomenda-se a produção das juntas adesivas utilizando o tratamento superficial do alumínio com outro tipo de anodização para posterior comparação com os resultados obtidos pelo processo de anodização por ácido fosfórico, efetuado neste trabalho.

O ciclo de processamento de cura da matriz polimérica dos compósitos é demorado, levando a um aumento do tempo de produção e conseqüentemente a uma diminuição da produtividade. Como trabalhos futuros poderão ser estudados novos métodos de processamento para melhorar a produtividade do processo de cura. Estas melhorias permitirão tornar os LFM mais atrativos, quer em aplicações industriais quer nos setores aeronáutico, militar e automobilístico.

Com o intuito de melhorar a adesão das juntas e aumentar a resistência da interface do alumínio, sugere-se a utilização de um primário nas suas superfícies antes da aplicação do adesivo.

Para uma melhoria da resistência da ligação adesiva do alumínio, sugere-se ainda a análise de outros tipos de tratamentos superficiais, para além dos utilizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

Lalo de Almeida, 2016, <http://www1.folha.uol.com.br/fsp/inde03122006.shl>, consultado em Março de 2016.

Adams R. D. e Davies R, 2002, in: “*The mechanics of adhesion*”, (Dillard D A e Pocius A V, ed), pp. 111, Elsevier, Amsterdam.

Adams, R.D. e Mallick, V., 1992, “*A method for the stress analysis of lap joints*”, J. Adhesion, 38, pp. 199-217.

Adams, R. D. e Peppiatt, N. A., 1974, “*Stress Analysis of adhesive-bonded lap joints*”, Journal of Strain Analysis, 9, pp. 185-196.

Adams, R.D. e Wake, W.C., 1984, “*Structural adhesive Joints in Engineering*”, Applied Science, 309, pp. 309.

Adams, R. D., Atkins, R.W., Harris, J.A. e Kinloch, A.J., 1986, “*Stress analysis and failure properties of carbon-fibre-reinforced-plastics/steel double-lap joints*”, The Journal of Adhesion, 20, pp. 29-53.

Adams, R.D. e Mallick, V., 1992, “*A method for the stress analysis of lap joints*”, The Journal of Adhesion, 38, 199-217.

Adams, R.D, Comyn, J. e Wake, W., 1997, “*Structural Adhesive Joints in Engineering*”, 2nd Edition, Champan and Hall, London.

Adams, R.D., 2005, “*Adhesive bonding - Science, technology and applications*”, WoodHead Publishing Limited, Cambridge England.

Ahmed, A., Tavakol, B., Das, R., Joven, R., Roozbehjavan, P. e Minaie, B., 2012, “*Study of Thermal Expansion in Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites*”, Proceedings of SAMPE International Symposium, Charleston.

Airbus, 2015, <http://www.plastics.gl/automotive/composites-above-the-clouds/>, consultado em Fevereiro de 2015.

Alcoa Mill Products Inc., “*Alloy 2024 Sheet and Plate*” (product specifications), consultado a 15 Junho de 2015.

REFERÊNCIAS

Alderliesten, R.C, e Benedictus, R., 2007, “*Fiber/metal composite technology for future primary aircraft structures*”, Proceedings of 48th Aiaa/Asme/Asce/Ahs/Asc structures, structural dynamics, and materials conference, Honolulu, Hawaii, April 23-26.

Alderliesten, R.C., 2005, “*Fatigue Crack Propagation and Delamination Growth in Glare*”, Tese de doutoramento em Engenharia Aeroespacial, Universidade Técnica de Delft.

Alderliesten, R.C., 2007, “*Analytical prediction model for fatigue crack propagation and delamination growth in Glare*”, International Journal of Fatigue, 29, pp. 628-646.

Allman D. J., 1977, *Q. J. Mech Appl Math*, 30, pp.415.

Ana Mafalda F.M. Ventura, 2009, “*Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas*”, C. Tecn. Mat. 21, pp. 3-4.

Ashby, M.F. e Jones, D.R.H., 1999, “*Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design*”, Butterworth Heinemann, Oxford, United Kingdom, edition 2006.

ASTM International, *D. 3933 - Standard Guide for Preparation of Aluminium Surfaces for Structural Adhesives Bonding (Phosphoric Acid Anodizing)*, 1998.

ASTM D5573-99, 2012, “*Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced Plastic Joints*”.

ASTM D1002-10, *Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org. 2010.

ASTM D790-15, 2014, “*Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials*”.

ASTM D907-15, 2002, “*Standard Terminology of Adhesives*”, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials.

ASTM-D3433-99, 2012, “*Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*”, Annual book of ASTM standards West Conshohocken, ASTM 15.06: 225 – 231.

Asundi, A. e Choi, A.Y.N., 1997, “*Fiber metal laminates: an advanced material for future aircraft*”, Journal of Materials Processing Technology, 63, pp. 384-94.

- Banea, M.D. e da Silva, L.F.M., 2009, “*Mechanical Characterization of Flexible Adhesives*”, *The Journal of Adhesion*, 85, pp. 261-285.
- Bernhardt, S., Ramulu, M. e Kobayashi, A.S., 2007, “*Low-velocity impact response characterization of a hybrid titanium composite laminate*”, *Journal of Engineering Materials and Technology-transactions of The Asme*, 129, pp. 220-226.
- Berry, N.G. e d’Almeida, J.R.M., 2000, “*Efeito da Presença de Defeitos no Comportamento Mecânico de Juntas Coladas Carbono-Epoxi*”, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 10, pp: 138-148.
- Beumler T., Pellenkofft F., Tillich A., Wohlers W., Smart C. “*Airbus customer benefit from fiber metal laminates*”. Airbus Deutschland GmbH; 2006 May, Ref. no: L53pr0605135-Issue 1. pp. 1-18.
- BMW A.G., “*The all new BMW 7 Series. All you need to know*”, (Press release), 2015.
- Boeing Company, *BAC-5555 - Phosphoric Acid Anodizing of Aluminium for structural bonding (company standard)*, 2001.
- Boeing, 2014, http://modernairliners.com/Boeing787_files/Specifications.html, consultado em Fevereiro de 2015.
- Boisse, P., 2011, “*Composite Reinforcements for Optimum Performance*”, 1st Edition, Woodhead Publishing.
- Botelho, E.C., Silva, R.A., Pardini, L.C. e Rezende, M.C., 2006, “*A review on the development and properties of continuous fiber/epoxy/aluminum hybrid composites for aircraft structures*” *Materials Research*, 9, pp: 247-56.
- Brinson, H.F., 1990, *Engineered Materials Handbook Vol.3: Adhesives and Sealants*, ASM International, New York.
- Campbell, F.C., 2010, “*Structural Composite Materials*”, ASM International.
- Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F. e Domingues, J.J.M.S., 2005, “*Modelling single and double-lap repairs on composite materials*”, *Composites Science and Technology*, 65, pp. 1948-1958.
- Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F. e Domingues, J.J.M.S., 2007, “*Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 21, pp. 855-870.

REFERÊNCIAS

- Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F. e Domingues, J.J.M.S., 2008, “*Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*”, *International Journal of Solids and Structures*, 45, pp. 1497-1512.
- Campilho, R.D.S.G., Pinto, A.M.G., Banea, M.D., Silva, R.F. e da Silva, L.F.M., 2011, “*Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25, pp. 2351-2368.
- Campilho, R. D. S. G., 2009, “*Repair of Composite and Wood Structures*”, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Cardarelli, F., 2008, *Materials Handbook 2nd Edition*, Springer, London, New York.
- Castrodeza, E.M., Bastian, F.L. e Perez, J.E.I., 2003, “*Critical fracture toughness, J_C and δ_{5C} , of unidirectional fibre-metal laminates*”, *Thin-Walled Structures*, 4, pp. 1089–1101.
- Chang, P.Y., Yeh, P.C. e Yang, J.M., 2008, “*Fatigue crack initiation in hybrid boron/glass/aluminum fiber metal laminates*”, *Materials Science Engineering: A*, 496, pp. 273-280.
- Chen D. e Cheng S., 1983, *ASME J. Appl Mech*, 50, pp. 109.
- Cheng, S., Chen D. e Shi Y., 1991, *ASCE J. Eng Mech*, 117, pp. 605.
- Cortés, P. e Cantwell, W.J., 2004, “*Fracture properties of a fiber-metal laminates based n magnesium alloy*”, *Journal Materials Science*, 39, pp. 1081-1083.
- Cortés, P. e Cantwell, W.J., 2006, “*The prediction of tensile failure in titanium-based thermoplastic fibre-metal laminates*”, *Composites Science Technology*, 66, pp. 2306-2316.
- Critchlow, G.W. e Brewis, D.M., 1996, “*Review of surface pre-treatments for aluminium alloys*”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 16, pp. 255-275.
- Crocombe A. D. e Adams R. D., 1981, “*J. Adhesion*”, 13, pp. 141.
- Crocombe A.D., 1989, “*Int. j. adhes Adhes*”, 9, pp. 145.
- da Costa, M.B.S.F.P., 2013, “*Development of a web application for the design of adhesive joints*”, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

- da Silva, L.F.M. e Adams, R.D., 2006, "Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27, pp. 227-235.
- da Silva, L.F.M. e Adams, R.D., 2007, "Join strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature range", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27, pp. 362-379.
- da Silva, L.F.M. e Campilho, R.D.S.G., 2014, "Fatigue and fracture of adhesively-bonded composite joints - Behaviour, simulation and modelling", Woodhead Publishing, Kidlington.
- da Silva, L.F.M. e Magalhães, A. G., 2007, "Juntas Adesivas Estruturais", Publindústria.
- da Silva, L. F. M., das Neves, P. J. C., Adams, R. D. e Spelt, J. K., 2009, "Analytical models of adhesively bonded joints - Part I: Literature survey", *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29, pp. 319-330.
- da Silva, L. F. M., Magalhães, F. A. C. R. G., Chaves, F. J. P. e de Moura, F. S. F., 2010, "Mode II Fracture Toughness of a Brittle and a Ductile Adhesive as a Function of the Adhesive Thickness", *The Journal of Adhesion*, 86, pp. 891-905.
- da Silva, L. F. M., Öchsner, A. e Adams, R. D., 2011, "Handbook of Adhesion Technology", Springer-Verlag, Berlin.
- da Silva, L. F. e Campilho, R. D. S. G., 2012, "Advances in numerical modelling of adhesive joints", Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Maxwell, D. e David B., 1999, "Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs", *International Journal of Adhesion Adhesives*, 19, pp. 91-105.
- de Moura, M.F.S.F., Gonçalves, J.P.M., Marques, A.T., e de Castro, P.M.S.T., 2000, "Prediction of compressive strength of carbon-epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model", *Composite Structures*, 50, pp. 151-157.
- de Moura, M.F.S.F., de Morais, A.B. e de Magalhães, A.G., 2005, "Materiais compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico", Publindústria, Porto.
- de Vries e Vlot, 2001, "Composite Joints and Connections: Principles, Modelling and Testing", Woodhead Publishing.

REFERÊNCIAS

- Fahr, A., Chapman, C. E., Laliberté, J.F., Forsyth D.S. e Poon, C., 2000, “*Non-destructive evaluation methods for damage assessment in Fibre Metal Laminates*”, *Polymer Composites*, 21 (4), pp. 568-575.
- FEICA, 2011, “*The Magic World of Adhesives and Sealants*” (Brochure), Brussels.
- Gettens, R. J., e Stout, G. L., 1942, “*Painting Materials*”, Van Nostrand Reinhold, New York.
- Gleich, D.M., Van, Tooren, M.J.L. e Beukers, A., 2001, “*Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures*”, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 15, pp. 1091-1101.
- Goland, M. e Reissner, E., 1944, “*The Stresses in Cemented Joints*”, *Journal of Applied Mechanics*, 11, pp. A17-A27.
- G.E Thompson, L. Zhang, C.J.E. Smith, P. Skeldon, 1999, “*Boric/ Sulfuric Acid Anodizing of Aluminum Alloys 2024 and 7075: Film Growth and Corrosion Resistance*”, *Corrosion*, 55, 1052.
- Grupo de Estudos de Corrosão e Efeitos Ambientais, Instituto Superior Técnico, 2003 “*Anodização não poluente de ligas de alumínio*”, 1049-001, Lisboa.
- Harris, J. A. e Adams, R. D., 1984, “*Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*”, *International Journal of Adhesives*, 4, pp. 65.
- Hartshorn, S. R., 1986, “*Structural adhesives: chemistry and technology*”, Plenum Press, New York.
- Hart-Smith L.J., “*Adhesive-Bonded Single-Lap Joints*”, NASA CR-112236, January, 1973.
- Her, S.C., 1999, “*Stress analysis of adhesively-bonded lap joints*”, *Composite Structures*, 47, pp. 673-678.
- Huntsman Advanced Materials, *Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998 (Product specifications)*, 2012.
- Ji, G., Ouyang, z., Li G., Ibekwe, S. e Pang, S.S., 2010, “*Effects of adhesive thickness on global and local Mode - I interfacial fracture of bonded joints*”, *International Journal of Solids Structures*, 47, pp. 2445-2458.

- Karač A., 2008, "Testing adhesives and adhesively bonded joints", Universidade de Zagreb.
- Khan, S.U., Alderliesten, R. C. e Benedictus, R., 2008, "Delamination in fibre reinforced metal laminates under Variable amplitude loading", Composites Science and Technology, 69, pp. 2604-2615.
- Karachalios, E.F., Adams, R.D. e da Silva, L.F.M., 2013, "Single lap joints loaded in tension with ductile steel adherents", International Journal of Adhesion and Adhesives, 43, pp. 96-108.
- Liljedahi, C.D.M., Crocombe, A.D., Wahab, M.A. e Ashcroft, I.A., 2006, "Damage modelling of adhesively bonded joints", International Journal of Fracture, 141, pp. 147-161.
- Magalhães, A.G., de Moura, M.F.S.F. e Gonçalves, J.P.M., 2005, "Evaluation of Stress Concentration Effects in Single-Lap Bonded Joints of Laminate Composite Materials", International Journal of Adhesion and Adhesives, 25, pp. 313- 319.
- Mahdi, S., Kinloch, A.J., Matthews, F.L. e Crisfield, M.A., 2003, "The static mechanical performance of repaired composite sandwich beams: part I - experimental characterization", Journal of Sandwich Structures and Materials, 5, pp. 179-202.
- Marceau, J. A., Firminhac, R. H., Moji, Y., 1978, "Method for providing environmentally stable aluminum surfaces for adhesive bonding and product produced".
- Marissen, R., 1988, "Fatigue Crack Growth in ARALL, A hybrid Aluminium- Aramid Composite Material, crack growth mechanisms and quantitative predictions of the crack growth rate", Tese de doutoramento em Engenharia Aeroespacial na Universidade Técnica de Delft.
- Mortensen, F. e Thomsen, O.T., 2002, "Analysis of adhesive bonded joints: a unified approach", Composites Science Technology, 62, pp. 1001-1031.
- Neto, J.A.B.P, Campilho, R.D.S.G. e da Silva, L.F.M., 2012, "Parametric study of adhesive joints with composites", International Journal of Adhesion and Adhesives, 37, pp. 96-101.
- Omar, M. A., 2011, "The Automotive Body Manufacturing Systems and Processes", (John Wiley & Sons, West Sussex, 1st ed., Chap. 3, pp. 144-149.
- Pistonheads, 2016, (<http://www.pistonheads.com>), consultado em Março de 2016.

REFERÊNCIAS

- Pardoen, T., Ferracin, T., Landis, C.M. e Delannay, F., 2005, “*Constraint effects in adhesive joint fracture*”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 53, pp. 1951-1983.
- Pinto, A.M.G., Magalhães, A.G., Gomes da Silva, F., e Monteiro Baptista, A.P., 2008, “*Shear strength of adhesively bonded polyolefins with minimal surface preparation*”, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 28, pp. 452-456.
- Pinto, A.M.G., 2007, “*Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*”, Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Pirovics J., 1974, “*International Journal of Adhesion and Adhesives*”, 6, pp. 207.
- Radu, 2015, “*Optimization of CFRP Joints with Fibre Metal Laminates*”, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Rao, S. S., 2004, “*The Finite Element Method in Engineering*”, Fourth Edition, Elsevier Science & Technology Books, United States of America.
- Renton W. J. e Vinson J. R., 1975, *J. Adhesion*, 7, pp. 175.
- Rodi, R., 2007, “*The effect of external stiffeners on the fatigue crack growth in fibre metal laminates*”, 24th ICAF Symposium, Italy.
- Schijve, J., Vogelesang, L. B. and Marisen, R., 1983, “*Laminate of aluminum sheet material and aramid fibers*” (US Patent US4500589 A).
- Sinmazçelik, T., Avcu, E., Bora, M. Ö. e Çoban, O., 2011, “*A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods*”, *Materials & Design*, 32, pp. 3671-3685.
- Smith, W.F., 1998, “*Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*”, Terceira Edição, McGraw-Hill, Lisboa.
- Srinivas S., 1975, *NASA Technical Note*, NASA TN D-7855.
- Tong, L. e Steven, G. P., 1999, “*Analysis and Design of Structural Bonded Joints*”, Kluwer Academic publishers, Boston/Dordrecht/London.

- Vermeeren, C.A.J.R., 1995, “*The Residual Strength of Fibre Metal Laminates*”, Tese de doutoramento em Engenharia Aeroespacial, Faculdade de Engenharia Aeroespacial da Universidade Técnica de Delft.
- Villanueva, G.R. e Cantwell, W.J., 2004, “*The high velocity impact response of composite and LFM-reinforced sandwich structures*”, *Composites Science Technology*, 64, pp. 35-54.
- Vlot, A. e Gunnink, J.W., 2001, “*Fibre Metal Laminates - An introduction*”, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Vlot, A., Gunnink, J.W., “*Fibre Metal Laminates an Introduction*”, Kluwer Academic Publishers, 2001 e Alderliesten, R.C., “*Fatigue Crack Propagation and Delamination*”, Growth in Glare, PhD Thesis, Delft University of Technology, 2005.
- Vlot, A., 1996, “*Impact loading on fibre metal laminates*”, *International Journal of Impact Engineering*, 18, pp. 291-307.
- Vogelesang, L.B. e Vlot, A., 2000, “*Development of fibre metal laminates for advanced*”, *Journal of Materials Processing Technology*, 103, pp. 1-5.
- Vogelesang, B., Gunnink, J.W., Roebroeks, G.H.J.J. e Muè Ller, R.P.G., 1995, “*Toward the supportable and durable aircraft fuselage structure*”, Proceedings of the 18th symposium of the international committee on aeronautical fatigue, May 3-5, Melbourne, Australia.
- Volkersen O., 1938, “*Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen mit konstanten loschonquerschnitten Luftfahrtforschung*”, pp. 15:4115:4.
- Vries, T.J., 2001, “*Blunt and sharp notch behaviour of Glare laminates*” Tese de Doutoramento em Engenharia Aeroespacial, Universidade Técnica de Delft.
- Wah T., 1973, *ASME J. Eng. Mater Technol* 95, pp. 174.
- Wang, W. X., Takao, Y. e Matsubara, T., 2007, “*Galvanic corrosion resistant carbon fiber metal laminates*”, Proceedings of 16th International Conference on Composite Materials, Kyoto.
- Yang, C. e Pang, S.S., 1996, “*Stress-strain analysis of single lap adhesive joints under tension*”, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 118, pp. 247.
- Yang, Q.D. e Thouless, M.D., 2001, “*Mixed-mode fracture analyses of plastically deforming adhesive joints*”, *International Journal of Fracture*, 110, pp. 175-187.

REFERÊNCIAS

Yeh, H.Y. e Tandjung, D., 2005, “*Mixed mode fracture analysis of the lap shear specimen test per ASTM D1002*”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 24, pp. 839.

