

Perfis Híbridos Metal/Compósito

Rúben Leandro Leitão Pereira

Dissertação de Mestrado

Orientador: Professor António Torres Marques

Co-orientador: Professor Rui Jorge de Lemos Neto



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Março 2018

Resumo

Os componentes híbridos surgem pela possibilidade de combinar os seus materiais constituintes fazendo prevalecer as propriedades mais favoráveis de cada um para uma determinada aplicação. Existem diversas definições de hibridização, este trabalho recai sobre a possibilidade de conjugar um material metálico, o alumínio, com um material compósito constituído por uma matriz de resina epóxico reforçada por fibras de carbono. Esta conjugação tem sido estudada ao longo do tempo, contudo, o seu processo de produção e fenómenos como a adesão e a corrosão entre os materiais não são ainda claros.

O foco principal deste trabalho será, então, perceber melhor a adesão e atribuir alguma sensibilidade à corrosão entre os materiais em questão. Por forma a obter uma previsão da adesão foi feito um ensaio de energia de superfície a ambos os materiais. Também com foco na adesão e determinação das propriedades mecânicas foram realizados ensaios de flexão, tração de junta de sobreposição simples e impacto por queda de peso. Em todos os ensaios referidos foram testados diferentes tratamentos superficiais, alguns deles efetuados por ataque químico. De forma a compreender a influência dos tratamentos realizados foi executada uma análise da rugosidade superficial. Tentou-se também perceber se o aproveitamento de temperaturas, fruto da extrusão dos perfis de alumínio, tinha impacto na adesão e nas propriedades do híbrido. Sabendo que a corrosão entre os materiais é importante foi feito um ensaio de corrosão galvânica. Alguns dos ensaios realizados foram replicados por simulação de modelos numéricos no software Abaqus.

O estudo realizado revelou bons resultados no que toca à adesão do híbrido sem recurso a qualquer adesivo estrutural e ligeiras melhorias nas propriedades mecânicas para alguns dos tratamentos superficiais levados a cabo.

Abstract

Hybrid components arise from the possibility of combining their constituting materials by prevailing the most favorable properties of each for a given application required by the current industry. There are several definitions of hybridization, this work focusses the possibility of conjugating a metallic material, aluminum, with a composite material consisting of an epoxy resin matrix reinforced by carbon fibers. This conjugation has been studied over time, however, its production process and phenomena such as adhesion and corrosion between the materials are not clear yet.

The focus of this work will be to better understand adhesion and to attribute some sensitivity to corrosion between the materials in question. In order to obtain an adhesion prediction a surface energy test was done on both materials. Also, with focus on the adhesion and determination of the mechanical properties were carried out tests of flexion, simple overlap joint traction and impact by weight loss. In all the mentioned tests different surface finishes were tested, some of them done by chemical attack. In order to understand the influence of the treatments, an analysis of surface roughness was made. It was also tried to understand if the use of temperatures due to the extrusion of the aluminum profiles had an impact on the adhesion and the properties of the hybrid. Knowing that corrosion between materials is important, a galvanic corrosion test was done. Some of the performed tests were replicated by numerical model simulation in the Abaqus software.

The study showed good results regarding the adhesion of the hybrid without recourse to any structural adhesive and slight improvements in the mechanical properties for some of the superficial treatments carried out.

Agradecimentos

Gostaria, inicialmente, de agradecer à minha família, namorada e amigos por, de forma própria e única, me ajudarem a ultrapassar os entraves pessoais que surgiram durante a realização do presente trabalho.

Agradeço ao professor António Torres Marques pela oportunidade de realização deste trabalho e pelo apoio e esclarecimentos prestados ao longo do desenvolvimento do mesmo.

Gostaria de agradecer ao professor Rui Lemos Neto pela sua disponibilidade e fornecimento do material necessário.

Agradeço também ao Fábio Neto, à Armanda Teixeira e ao Hugo Ribeiro pelo apoio prestado no processamento e análise material dos provetes, e ao professor Miguel Figueiredo, assim como ao Rui Silva, pelo auxílio e disponibilidade demonstrados durante a execução dos ensaios realizados.

Da mesma forma, agradeço ao Eduardo Marques pelo apoio prestado no processo de simulação efetuado.

O presente estudo foi desenvolvido no âmbito da operação **NORTE-01-0145-FEDER-000022 – SciTech – Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries**, cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE2020), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do projeto e motivação	1
1.2	Objetivos do projeto	2
1.3	Estrutura da dissertação	2
2	Estado da arte	5
2.1	O alumínio	5
2.2	As ligas de alumínio	7
2.3	Os elementos de liga e a extrusão	11
2.4	Processo de obtenção de perfis de alumínio	12
2.4.1	Fundição do billet de extrusão	14
2.4.2	Homogenização	14
2.4.3	Corte e pré-aquecimento	15
2.4.4	Extrusão	15
2.4.5	Arrefecimento	19
2.4.6	Esticamento	20
2.4.7	Envelhecimento	20
2.5	Materiais compósitos	22
2.5.1	Matriz	24
2.5.2	Fibras	27
2.5.3	Formas fibrosas	31
2.6	Híbridos de metal e compósito	35
2.7	Adesão	37
2.7.1	Falha do compósito	41
2.8	Perfis híbridos alumínio/carbono – trabalhos prévios	43
2.8.1	Perfis de alumínio extrudidos reforçados por CFRP	43
2.8.2	Caraterísticas de um perfil híbrido alumínio/CFRP curto e de secção quadrada sob carga quasi-estática transversal	46
2.8.3	Absorção de energia sob impacto num perfil híbrido alumínio/CFRP	50
2.8.4	Laminados de alumínio e fibra de carbono resistentes à corrosão galvânica	52
2.8.5	Tratamento e caraterização superficial da liga de alumínio 6061 para ligações adesivas	54
3	Trabalho experimental	59
3.1	Considerações gerais	59
3.2	Planeamento estrutural e material dos provetes	59
3.3	Caraterização do material utilizado	60
3.3.1	Perfil de alumínio	60
3.3.2	Compósito	62
3.4	Procedimento experimental	63
3.4.1	Acabamentos superficiais	63
3.4.2	Montagem e cura do híbrido	66
3.4.3	Flexão a quatro pontos	69
3.4.4	Energia de superfície	71
3.4.5	Tração de sobreposição simples	73
3.4.6	Análise macroscópica e microscópica	76
3.4.7	Ensaio de impacto	77
3.4.8	Ensaio de corrosão galvânica	79
3.4.9	Análise de rugosidade	81

4	Apresentação e análise dos resultados experimentais.....	85
4.1	Flexão a quatro pontos.....	85
4.2	Energia de superfície	96
4.3	Tração de sobreposição simples e análise macroscópica e microscópica	97
4.4	Ensaio de impacto.....	110
4.5	Ensaio de corrosão galvânica	118
4.6	Análise de rugosidade.....	121
4.7	Discussão e sumário dos resultados experimentais	125
5	Simulação.....	127
5.1	Abaqus	127
5.1.1	Tração de sobreposição simples	128
5.1.2	Flexão a quatro pontos	131
6	Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros	135
6.1	Conclusões	135
6.2	Perspetivas de trabalhos futuros.....	136
	Referências Bibliográficas.....	137
	ANEXO A: Composição química da liga do perfil utilizado	140
	ANEXO B: Propriedades e informações da liga de alumínio 6060.....	142
	ANEXO C: Ficha técnica da matriz EF452.....	143
	ANEXO D: Relatório de trabalho fornecido pela ARCP	149

Lista de Siglas e Acrónimos

ARCP - Associação Rede de Competência em Polímeros

ARALL - Aramidic Aluminium Laminates

ASTM - American Society for Testing and Materials

CARALL - Carbon Aluminium Laminates

CETRIB - Unidade de Tribologia, Vibrações e Manutenção Industrial

CFC - Cúbica de Faces Centradas

CFRP - Carbon Fiber Reinforced Polymer

CRM - Continuous Random Mat

CSM - Chopped Strand Mat

FML - Fiber Metal Laminate

FRP - Fiber Reinforced Polymer

GLARE - Glass Laminated-Reinforced Epoxy

IADS - International Alloy Designation System

INEGI - Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

ISO - International Standards Organization

OWRK - Owens-Wendt-Rable-Kaeble

PAN - Poliacrilonitrilo

PEEK - Poli-Éter-Éter-Acetona

PPS - Poli-Sulfeto de Fenileno

PSUL – Polisulfone

SEM – Scanning Electron Microscopy

Índice de Figuras

Figura 1- Áreas de utilização do alumínio. [3].....	6
Figura 2 - Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio. [5].....	8
Figura 3 - Etapas do processo de obtenção de perfis de alumínio.[9]	13
Figura 4 – Exemplo do efeito da homogenização na microestrutura.[5].....	14
Figura 5 - Temperatura do metal durante o processo de extrusão: (1) pré-aquecimento do “billet”, (2) extrusão, (3) saída da matriz, (4) têmpera. Neste caso o pré-aquecimento não atinge a temperatura de solubilização.[4]	16
Figura 6 - Produção de perfis ocos por uso de billet perfurado e mandril.[11].....	17
Figura 7 - Extrusão direta.[8]	17
Figura 8 - Variação da força a exercer por parte do pistão durante a extrusão.[12].....	18
Figura 9 - Extrusão indireta.[8]	19
Figura 10 - Comparação da força necessária aos processos de extrusão direta e indireta.[12] ..	19
Figura 11 – Curvas de envelhecimento da liga 2014: a) resistência à tração vs tempo, b) elasticidade vs tempo, c) alongação vs tempo. [5]	21
Figura 12 - Curvas tensão-elongação da fibra, da matriz e do compósito.[14]	22
Figura 13 – Comparação de algumas propriedades dos compósitos com outros materiais: a)módulo de Young vs massa volúmica, b)resistência à compressão vs massa volúmica c) resistência à fratura vs módulo de Young.[17].....	23
Figura 14 - Tipos de reforços mais comuns nos materiais compósitos.[22]	28
Figura 15 – Roving.[26]	32
Figura 16 - Tecidos 2D e 3D.[24]	33
Figura 17 - Mantas fibrosas CSM (esq.) e CRM (dir.).[24]	33
Figura 18 - Entrançado fibroso. Adaptado de [27].....	34
Figura 19 - Pré-impregnado.[28]	34
Figura 20 - Hibridização por camadas ou interlayer.[31].....	35
Figura 21 - Classificação dos diferentes tipos de FML.[32]	36
Figura 22 - Vantagens genéricas dos FML.[33]	37
Figura 23 - Perfil de tensões para o substrato de uma junta aparafusada/rebitada e de uma junta colada. [37]	38
Figura 24 - Áreas de estudo da adesão.[35].....	39
Figura 25 - Mecanismos de adesão: a)adsorção, b)difusão, c)ancoragem mecânica, d)adesão eletroestática.[39]	39
Figura 26 - Detalhe do mecanismo de adesão por ancoragem mecânica.[37]	40
Figura 27 - Mecanismos de rotura de uma junta colada: a)falha coesiva, b)falha adesiva, c)falha mista e d)falha por parte do substrato.[41]	40
Figura 28 - Mecanismos de falha estrutural dos materiais compósitos.[43]	42

Figura 29 - Falhas na adesão de materiais compósitos.[45]	42
Figura 30 - Configuração dos perfis testados.[46]	43
Figura 31 - Configuração do ensaio de 4 pontos realizado.[46].....	44
Figura 32 - Curvas força vs deslocamento dos perfis de controlo e dos perfis híbridos. [46] .	45
Figura 33 - Representação do ensaio de flexão a três pontos e apresentação dos seus parâmetros.[47].....	47
Figura 34 - Curva força vs deslocamento dividida em quatro partes distintas. [47]	47
Figura 35 - Curvas força vs deslocamento: a) laminado de 4 camadas, b) laminado de 8 camadas.[47].....	49
Figura 36 - Máquina-teste de impacto por queda de peso criada (esq.) e condições de ensaio praticadas (dir.).[48]	50
Figura 37 - Representação do revestimento utilizado e da sequência de empilhamento.[49]..	52
Figura 38 - Montagem do teste de corrosão galvânica efetuado.[49]	53
Figura 39 - Representação da corrente elétrica verificada nos diferentes provetes.[49]	54
Figura 40 - Imagens SEM de superfície da liga 606: a) após limpeza, e após banho ultrassónico de solução 0,1M de NaOH durante b)5min, c)30min e d)60min.[50]	55
Figura 41- Rugosidade superficial em função do tempo de tratamento.[50]	56
Figura 42 - Influência do tempo de banho na espessura dos substratos.[50]	56
Figura 43 - Influência do tempo de banho na tensão de corte da junta de sobreposição simples.[50]	57
Figura 44 - Aspeto das juntas após a rotura com os substratos previamente: desengordurados e tratados em banho de NaOH durante 5, 30 e 60 min (da esquerda para a direita).[50]	57
Figura 45 - Secção transversal (esq.) e apresentação (dir.) do perfil utilizado.....	60
Figura 46 - Pré-impregnado utilizado, sendo visível o tecido fibroso na forma Twill	63
Figura 47 - Granalhadora.....	64
Figura 48 - Hidróxido de sódio utilizado (esq.) e aspeto da reação do mesmo com o alumínio (dir.).	65
Figura 49 - Ácido muriático utilizado (esq.) e aspeto da reação do mesmo com o alumínio (dir.).	66
Figura 50 – Processo de cura e arrefecimento levado a cabo na prensa de pratos quentes.	67
Figura 51 - Ciclos de cura dos híbridos: a)perfis sem pré-aquecimento, b)perfis com pré-aquecimento.....	67
Figura 52 - Híbrido com adesão conseguida (frente), e híbrido não aderido (atrás).	68
Figura 53 - Perfil híbrido com apenas uma camada de pré-impregnado.....	69
Figura 54 - Ensaio de tração a quatros pontos, representação do instante inicial e de um qualquer instante durante o ensaio.....	70
Figura 55 – Representação do ângulo de contacto entre o líquido e o material solido, neste caso, o alumínio.[40]	72
Figura 56 - Provetes A, B, C, D, E, F, relativos aos diferentes tratamentos superficiais feitos ao alumínio.	73

Figura 57 - Provete G e H, relativos ao pré-impregnado não curado(dir.) e curado (esq.).....	73
Figura 58 - Provete para o ensaio de tração compostos por dois substratos de alumínio unidos uma camada de CFRP.	74
Figura 59 - Processo de corte (esq.) e lixagem (dir.) dos perfis de modo a produzir os substratos.	74
Figura 60 - Representação em a) das dimensões dos provetes e b) da distância entre amarras.	75
Figura 61- Microscópio Zeiss Axiophot e câmara AxioCamICc3.	76
Figura 62 – Provete para ensaio de impacto (esq.) e máquina de ensaio por queda livre de peso (dir.).....	78
Figura 63 - Apresentação geral e em pormenor do ensaio de corrosão galvânica.	80
Figura 64 - Aspeto dos provetes utilizados no ensaio de corrosão galvânica.	80
Figura 65 – Instrumento de metrologia ótica Bruker NpFlex (esq.) e rugosímetro HommelWerke LV-50.	82
Figura 66 - Representação esquemática do parâmetro R_a . [53].....	82
Figura 67 - Amostras para análise de rugosidade.....	83
Figura 68 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo A.	86
Figura 69 – Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo B.....	87
Figura 70 - Vista em pormenor da falha adesiva e rotura das fibras de um provete de flexão tipo B.	87
Figura 71 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo C.....	88
Figura 72 -Vista em pormenor da falha adesiva e rotura das fibras de um provete de flexão tipo C.	88
Figura 73 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo D.	89
Figura 74 - Vista em pormenor da falha adesiva e rotura das fibras de um provete de flexão tipo D.....	89
Figura 75 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo E.....	90
Figura 76 – Aspeto final do provete E3.....	91
Figura 77 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo F.	91
Figura 78 - Aspeto dos provetes F3 (acima) e F2 (abaixo) após ensaio onde se verifica uma peruma falha adesiva total e quase total, respetivamente.	92
Figura 79 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo G.	92
Figura 80 - Provete G2 (acima) com falha adesiva local e provete G3 (abaixo) com falha adesiva segundo um elevado comprimento.	93
Figura 81 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo H.	94
Figura 82 – Aspeto final do provete H2, verificando-se a integridade do mesmo após ensaio.	94
Figura 83 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo TA.....	98
Figura 84 - Provete do tipo TA após ensaio de tração.....	99
Figura 85 - Aspeto microscópico de um substrato do tipo TA após ensaio de tração.	99

Figura 86 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo TB.	100
Figura 87 - Proвете do tipo TB após ensaio de tração.	100
Figura 88 - Aspetto microscópico de um substrato do tipo TB após ensaio de tração.	101
Figura 89 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo TC.	101
Figura 90 - Proвете do tipo TC após ensaio de tração.	102
Figura 91 - Aspetto microscópico de um substrato do tipo TC após ensaio de tração.	102
Figura 92 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo TD.	103
Figura 93 - Proвете do tipo TD após ensaio de tração.	103
Figura 94 - Aspetto microscópico de um substrato do tipo TD após ensaio de tração.	104
Figura 95 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo TE.	104
Figura 96 - Proвете do tipo TE após ensaio de tração.	105
Figura 97 - Aspetto microscópico de um substrato do tipo TE após ensaio de tração.	105
Figura 98 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo TF.	106
Figura 99 - Proвете do tipo TF após ensaio de tração.	106
Figura 100 - Aspetto microscópico de um substrato do tipo TF após ensaio de tração.	107
Figura 101 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo TG.	107
Figura 102 - Provetes do tipo TG após ensaio de tração.	108
Figura 103 - Aspetto microscópico de um substrato do tipo TG após ensaio de tração.	108
Figura 104- Curvas Força vs Tempo dos provetes do tipo a.	110
Figura 105 - Curvas Força vs Tempo dos provetes do tipo b.	111
Figura 106 - Aspetto após ensaio dos provetes do tipo b.	111
Figura 107 - Curvas Força vs Tempo dos provetes do tipo c.	112
Figura 108 - Aspetto após ensaio dos provetes do tipo c.	112
Figura 109 - Curvas Força vs Tempo dos provetes do tipo d.	113
Figura 110 - Aspetto após ensaio dos provetes do tipo d.	113
Figura 111 - Curvas Força vs Tempo dos provetes do tipo e.	114
Figura 112 - Aspetto após ensaio dos provetes do tipo e.	114
Figura 113 - Curvas Força vs Tempo dos provetes do tipo f.	115
Figura 114 - Aspetto após ensaio dos provetes do tipo f.	115
Figura 115 - Curvas Força vs Tempo dos provetes do tipo g.	116
Figura 116 - Aspetto após ensaio dos provetes do tipo g.	116
Figura 117 - Curvas Força vs Tempo dos provetes do tipo h.	117
Figura 118 - Aspetto após ensaio dos provetes do tipo h.	117
Figura 119 – Curvas resultantes de corrente elétrica em função do tempo.	119
Figura 120 – Curvas de tendência aproximadas por uma função polinomial de segunda ordem da corrente elétrica em função do tempo.	119
Figura 121 – Superfície de teste do provete A.	123

Figura 122 – Superfície de teste do provete B.....	123
Figura 123 – Superfície de teste do provete C.....	124
Figura 124 – Superfície de teste do provete D.	124
Figura 125 – Superfície de teste do provete E.....	124
Figura 126 – Superfície de teste do provete F.	125
Figura 127 - Representação do modelo alusivo ao ensaio de tração de sobreposição simples.	129
Figura 128 – Rotação provocada pelo desalinhamento dos apoios no primeiro momento de carga.....	129
Figura 129 – Rotura do provete por falha coesiva.....	129
Figura 130 - Curva força vs deslocamento do modelo simulado para o ensaio de tração de sobreposição simples.	130
Figura 131 - Comparação das curvas força vs deslocamento alusivas aos ensaios e ao modelo simulado.	130
Figura 132 – Rpresentação do modelo para flexão a quatro pontos.....	131
Figura 133 - Representação do instante inicial de aplicação da carga.	132
Figura 134 -Representação do aspeto final do modelo após ensaio.	132
Figura 135 – Representação em pormenor da zona de maior plasticidade do modelo após ensaio.	132
Figura 136 - Curva força vs deslocamento do modelo simulado para o ensaio de flexão a quatro pontos.	133
Figura 137 - Comparação das curvas força vs deslocamento alusivas aos ensaios e ao modelo simulado.	133

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Elementos de liga das ligas de alumínio para trabalho mecânico. [6]	9
Tabela 2 - Elementos de liga das ligas de alumínio para fundição. [7]	10
Tabela 3 - Ligas de alumínio para extrusão. [8]	11
Tabela 4 - Extrudibilidade de algumas ligas relativamente à liga 6063. [8]	12
Tabela 5 - Propriedades generalizadas de uma matriz ideal.[18]	24
Tabela 6 - Valores típicos de algumas propriedades das resinas termoendurecíveis. Adaptado de [19].....	27
Tabela 7 - Vantagens e desvantagens das fibras de vidro.[18].....	29
Tabela 8 - Vantagens e desvantagens das fibras de carbono.[18]	30
Tabela 9 - Vantagens e desvantagens das fibras de aramida.[18]	30
Tabela 10 - Diversas propriedades de algumas fibras.[23][24]	31
Tabela 11 - Variantes do ensaio de flexão a quatro pontos.[46]	44
Tabela 12 - Resultados obtidos. Adaptado de [46].....	45
Tabela 13 - Configuração dos perfis utilizados. [47]	46
Tabela 14 - Resumo dos resultados obtidos.[47].....	48
Tabela 15 - Configuração e dados dos perfis.[48].....	50
Tabela 16 - Resultados experimentais em resumo.[48].....	51
Tabela 17 - Composição química da liga de alumínio dos perfis em causa.	61
Tabela 18 - Composição química das ligas 6060, 6061 e 6063 segundo BS EN 573-3:2009. 62	
Tabela 19 – Síntese e comparação dos resultados do ensaio de flexão.	95
Tabela 20 - Valores de energia superficial das diferentes amostras fornecidos pela ARCP....	96
Tabela 21 - Síntese e comparação dos resultados do ensaio de tração.	109
Tabela 22 – Sumário dos resultados obtidos no ensaio de impacto por queda de peso.	118
Tabela 23 - Valores médios da corrente elétrica verificada no ensaio de corrosão galvânica realizado.....	120
Tabela 24 – Valores de R_a e $R_{máx}$ para os provetes testados e aumento dos mesmos sob a forma de razão.....	121
Tabela 25 - Propriedades dos materiais utilizadas nos modelos concebidos.	128

1 Introdução

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

Os materiais metálicos são vulgarmente utilizados em todo e qualquer tipo de aplicações estruturais, contudo, as suas propriedades específicas não são as melhores. Surgem assim os materiais compósitos que, pelas suas excelentes propriedades de rigidez e resistência associadas a um baixo peso conseguem resultados intangíveis aos metais. No entanto, existem condicionantes na aplicação dos materiais compósitos, desde logo o preço elevado associado a processos de produção complexos e especializados e o parco conhecimento do seu comportamento quando utilizados em certas aplicações.

Os híbridos alumínio/compósito de matriz polimérica podem apresentar-se como uma solução a diversas aplicações, já que, conseguem uma combinação favorável das propriedades específicas dos metais que o constituem.

De forma a atingir tais propriedades o processo de hibridização tem de ser otimizado ao nível do seu custo, da sua demora e de outros fatores como a adesão e a corrosão entre os materiais. Os adesivos estruturais são vastamente utilizados na hibridização entre diferentes materiais, contudo também estes são caros e exigem técnicas refinadas de elevado cariz técnico.

Assim, por forma a obter as propriedades desejadas a um custo aceitável procura-se que o processo de hibridização promova uma boa adesão e bom comportamento corrosivo entre os materiais sem que exista dispendio na utilização de adesivos estruturais, de modo a que, a sua aplicação à produção em larga escala seja viável.

1.2 Objetivos do projeto

O objetivo deste trabalho passa por analisar a adesão de um sistema híbrido composto por alumínio e compósito de matriz polimérica reforçado por fibras de carbono sobre a forma de um perfil híbrido onde o elemento adesivo é a matriz do próprio compósito. Visa-se estudar e garantir a adesão entre os materiais referidos através de processos simples de tratamento superficial dispensando o uso propositado de um adesivo estrutural. Um outro foco será também o de compreender o fenômeno de corrosão galvânica e as propriedades mecânicas resultantes da hibridização efetuada.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos.

No primeiro capítulo é feita uma breve introdução a todo o trabalho realizado onde se demonstram o seu surgimento e pertinência, os pontos a focar no seu desenvolvimento e os objetivos a alcançar.

O segundo capítulo diz respeito ao estado da arte e engloba a pesquisa bibliográfica executada acerca do tema. Inicialmente é feita uma análise ao alumínio, às suas ligas e ao processo industrial de obtenção de perfis de alumínio. Posteriormente, referem-se os materiais compósitos de matriz polimérica e logo de seguida é feita uma abordagem aos materiais híbridos, de forma a compreender as suas características. Por fim, é feito um apanhado de alguns estudos anteriores que se pensam ir no âmbito da presente dissertação, sendo que, alguns deles servirão de base ao trabalho experimental a realizar.

O terceiro capítulo apresenta o trabalho experimental realizado, para tal, é mostrado o propósito e justificação dos ensaios escolhidos. Seguidamente, são enunciados os materiais utilizados, os tratamentos superficiais realizados e os pormenores do processo de hibridização levado a cabo. É também feita uma abordagem aos ensaios efetuados de forma a clarificar as suas condições e a dimensão e nomenclatura dos provetes.

O quarto capítulo diz respeito à apresentação e análise dos resultados obtidos. De início são apresentados e discutidos os resultados de cada ensaio individualmente sendo no fim feito um apanhado sobre as vantagens e inconvenientes de cada variante testada.

O quinto capítulo apresenta a simulação de modelos numéricos realizada, servindo esta como comparação aos resultados experimentais obtidos e abrindo portas a futuros trabalhos de simulação a realizar.

O sexto e último capítulo retrata as conclusões tiradas de todo o trabalho realizado e as propostas/sugestões de trabalhos futuros.

2 Estado da arte

2.1 O alumínio

O alumínio é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre, este é um metal relativamente recente na utilização em escala industrial sendo apenas vulgarizado neste meio nos finais do século XIX. Contudo, a utilização do alumínio e do óxido de alumínio para fins próprios remonta à história antiga, onde na produção de vasos os persas utilizavam barro que continha óxido de alumínio, muito depois os egípcios utilizavam produtos medicinais, corantes têxteis e cosméticos baseados em óxido de alumínio. A cronologia da utilização do alumínio revela que no passado mais longínquo este elemento era usado como forma de transpor a ideia de modernidade e sofisticação aos artefactos. É de realçar que nas primeiras utilizações aqui referidas nada se sabia sobre o metal na forma que o conhecemos hoje, sendo que o alumínio apenas começou a ser produzido para fins comerciais há cerca de 150 anos. [1][2]

O desenvolvimento de indústrias relativas ao ramo automóvel, aeronáutica, entre outras, associado à evolução permanente dos processos industriais de redução do óxido de alumínio (alumina Al_2O_3), nomeadamente o processo de redução de Charles Hall e Paul Heroult (1886), despoletou um crescimento da produção do alumínio graças à redução de custos de produção associados, crescimento este que com o passar do tempo se veio a acentuar com o surgir de novas aplicações para o mesmo, aplicações que acabam por estar direta e indiretamente relacionadas com a vida moderna. As áreas de utilização mais comuns do alumínio são apresentadas na Figura 1.

Tal como a grande generalidade dos metais dúcteis, o alumínio e as suas ligas, apresentam uma estrutura cúbica de faces centradas.

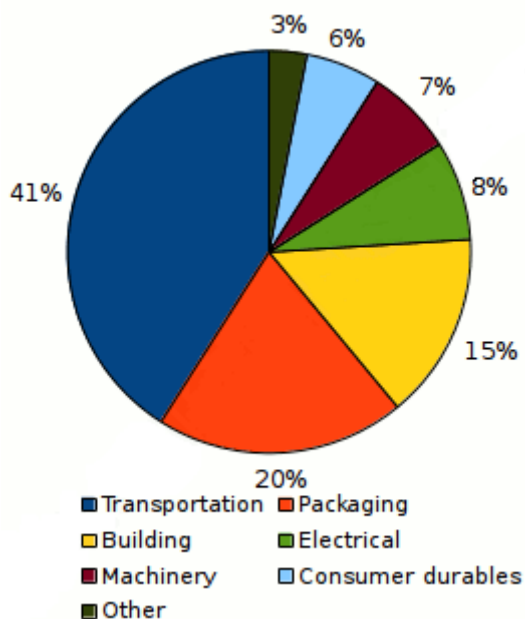


Figura 1- Áreas de utilização do alumínio. [3]

Nos dias de hoje, é um dos metais mais utilizados na indústria devido à generalidade das suas características. Este metal apresenta uma baixa massa específica (2.7g/cm^3), este baixo valor da relação entre massa e volume aliado a uma elevada rigidez, cerca de, 70GPa aproxima o alumínio do aço quando falamos de resistência específica, o que o torna o metal ideal para inúmeras aplicações. Quando se pretende uma fácil conformação e deformação podemos referir o alumínio como um material em vista, graças à elevada ductilidade apresentada que advém da sua estrutura CFC. É, também, um metal com boa condutividade térmica, de baixo coeficiente de expansão térmica e de elevada resistência à corrosão devido à formação de uma fina camada de alumina sob a sua superfície quando exposta, camada esta que se forma graças ao elevado poder redutor deste elemento (resistente a meios aquosos, compostos de enxofre e hidrocarbonetos em geral e atacado pela água do mar e bases alcalinas como o sódio e o potássio).

Possui um baixo ponto de fusão (660.37°C para um grau de pureza de 99.9%), é não tóxico (daí o seu uso alargado em embalagens), não produz ignição, é não magnético, o que traduz uma boa vantagem em aplicações eletrónicas, e é reciclável, sendo este último ponto algo a ter em conta nos dias de hoje.

Graças aos aspectos e propriedades expostos, o alumínio tem agora um papel importante em diversas indústrias e mercados, disto são exemplo os mercados da caixilharia civil, aeronáutica e automóvel.[2][4]

É de realçar que grande parte das propriedades referidas do alumínio puro podem ser significativamente melhoradas por recurso aos seguintes mecanismos de endurecimento:

- Endurecimento por solução sólida (ligas não tratáveis);
- Encruamento (ligas não tratáveis);
- Endurecimento por dispersão de partículas coerentes ou sub-microscópicas (ligas tratáveis termicamente).

Uma forma de melhorar a resistência do alumínio puro é, portanto, a adição de elementos de liga. As propriedades das ligas de alumínio dependem de uma interação complexa entre a composição química e as características microestruturais desenvolvidas durante os processos de solidificação, tratamento térmico e conformação plástica para os produtos forjados. Como referido o alumínio puro apresenta boa resistência à corrosão devido à camada reduzida de alumina na sua superfície. No entanto, a introdução de elementos de liga, de um modo geral, conduz a uma diminuição desta resistência. De modo a minimizar este efeito têm sido desenvolvidas têmperas a aplicar às ligas com elevado teor de elementos de liga adicionados.[5]

2.2 As ligas de alumínio

Com a introdução dos elementos de liga surgem diversas ligas, permitindo assim a obtenção de características tecnológicas apropriadas a diferentes aplicações no que toca ao produto final. Naturalmente, uma só liga não pode combinar todas as propriedades ótimas e necessárias a cada aplicação, sendo por isso necessário conhecer as vantagens e limitações de cada uma delas para que possa ser feita a melhor selecção possível. São vários os elementos de liga adicionados às ligas de alumínio, no entanto, de um modo geral, os principais elementos de liga incluem combinações dos seguintes elementos [1],[2],[5]:

- Cobre (Cu);
- Magnésio (Mg);
- Silício (Si);
- Manganês (Mn);
- Zinco (Zn).

De acordo com o seu modo de processamento, as ligas de alumínio podem ser divididas em [5]:

- Ligas para fundição (*Cast Aluminum Alloys*) , que são utilizadas no estado vazado e se destinam ao fabrico de componentes fundidos;
- Ligas para trabalho e conformação (*Wrought Aluminum Alloys*) , que se destinam ao fabrico de produtos semiacabados como laminados planos (chapas, placas e folhas), laminados não planos (tarugos, barras e arames), perfis e componentes forjados.

Juntando as ligas para fundição e as ligas para trabalho e conformação existem mais de 600 ligas conhecidas industrialmente.

Os grupos acima apresentados subdividem-se em [5]:

- Ligas não-tratáveis (não são endurecíveis por tratamento térmico);
- Ligas tratáveis termicamente (são endurecíveis por tratamento térmico).

A Figura 2 ilustra a relação entre os elementos de liga e a classificação das ligas de alumínio.

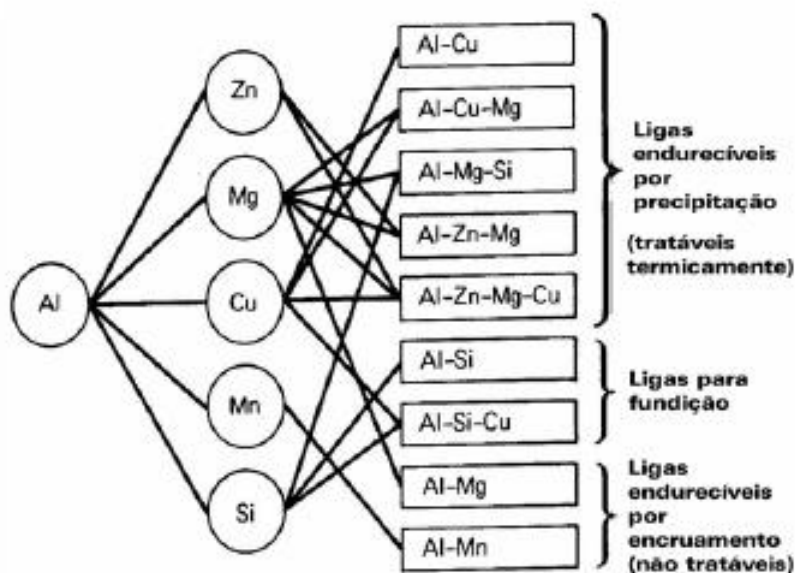


Figura 2 - Principais elementos de liga e classificação das ligas de alumínio. [5]

As ligas de alumínio para trabalho mecânico são agrupadas, segundo a IADS (*International Alloy Designation System*), através de uma designação composta por quatro dígitos com diferentes significados. Como demonstra a Tabela 1, o primeiro dígito corresponde ao principal elemento de liga da série, o segundo está relacionado com

modificações efectuadas à liga, sendo que, à liga original é atribuído o número 0 e às ligas modificadas os números de 1 a 9. Os dois últimos dígitos possuem diferentes significados consoante a série em questão. Na série 1xxx relacionam-se com o grau de pureza da liga, por exemplo, a liga 1145 tem uma pureza de 99,45% enquanto que a 1200 tem uma pureza de 99,00%, para as restantes séries estes dígitos têm pouco significado servindo apenas para identificar diferentes ligas dentro da série. Quando se trata de uma liga em desenvolvimento experimental utiliza-se o prefixo X.

Tabela 1 - Elementos de liga das ligas de alumínio para trabalho mecânico. [6]

<i>Série</i>	<i>Principais elementos de liga</i>	<i>Outros elementos de liga</i>
1xxx	Alumínio puro	-
2xxx	Cu	Mg e Li
3xxx	Mn	Mg
4xxx	Si	-
5xxx	Mg	-
6xxx	Mg e Si	-
7xxx	Zn	Cu, Mg, Cr e Zr
8xxx	Li, Sn, Fe, Cu e Mn	-
9xxx	Reservada para utilização futura	

As ligas para trabalho mecânico podem ainda ser divididas em ligas tratáveis termicamente (séries 2xxx, 6xxx e 7xxx) e ligas não tratáveis termicamente (séries 1xxx, 3xxx, 4xxx e 5xxx). Estas são encontradas sob a forma de lingotes ou tarugos e são posteriormente conformadas plasticamente, a quente ou a frio, por laminagem, extrusão ou forjamento. [6]

A Tabela 2 apresenta a designação das ligas de fundição e os elementos de liga respetivos, esta designação é similar à utilizada para as ligas conformadas, neste caso, o sistema de designação da liga fundida também é composto por quatro dígitos e o primeiro especifica igualmente o ou os elementos predominantes na liga. No entanto, é utilizado um ponto entre o terceiro e quarto dígitos, representando este último dígito a forma física do produto, isto é enunciado de seguida:

- 0 indica peças fundidas;
- 1 ou 2 indicam forma de lingote;
- 3 indica forma de lingote com faixa de composição mais restrita.

A principal diferença das ligas para conformação plástica face às ligas de fundição, prende-se com a percentagem de silício, devido à necessidade de colabilidade do material. As ligas de alumínio para obtenção de produtos fundidos são das mais versáteis de todas as ligas de fundição existentes, esta característica advém dos seguintes factores [7]:

- Boa colabilidade permitindo assim a produção de componentes com espessuras reduzidas ou detalhes minuciosos;
- Rápida transferência de calor da peça para a moldação, permitindo ciclos relativamente curtos;
- Baixo ponto de fusão comparativamente a outros metais;
- Maioritariamente não apresentam problemas de fissuração a quente;
- O único gás que apresenta elevada solubilidade nas ligas fundidas é o hidrogénio e isto pode ser controlado durante o processo;
- Por norma não interagem com a cavidade da moldação o que permite que se obtenham peças com elevada qualidade superficial.

Tabela 2 - Elementos de liga das ligas de alumínio para fundição. [7]

<i>Série</i>	<i>Elemento</i>
1xx.x	Alumínio a 99%
2xx.x	Cobre
3xx.x	Silício e Cobre e/ou Magnésio
4xx.x	Silício
5xx.x	Magnésio
7xx.x	Zinco
8xx.x	Estanho
6xx.x e 9xx.x	Não usado

2.3 Os elementos de liga e a extrusão

As propriedades das ligas de alumínio dependem diretamente dos elementos presentes na composição química. Complexas interações entre a composição química e as características microestruturais decorrentes da solidificação e/ou possíveis tratamentos térmicos, conduzem a diferentes propriedades entre as diversas ligas. Para o caso do presente trabalho, as ligas a realçar serão aquelas cuja produção seja feita pelo processo de extrusão. Na Tabela 3 são agora apresentadas as ligas utilizadas no processo de extrusão.

Tabela 3 - Ligas de alumínio para extrusão. [8]

<i>Série</i>	<i>Ligas</i>
<i>1xxx</i>	1060, 1100, 1350
<i>2xxx</i>	2011, 2014, 2024, 2219
<i>3xxx</i>	3003, 3004
<i>5xxx</i>	5066, 5083, 5086, 5154, 5454, 5456
<i>6xxx</i>	6005, 6005A, 6020, 6021, 6040, 6060, 6061, 6063, 6066, 6070, 6082, 6101, 6105, 6162, 6262, 6351, 6463
<i>7xxx</i>	7001, 7003, 7004, 7005, 7029, 7046, 7050, 7075, 7079, 7116, 7129, 7146, 7178

De uma forma geral, o ritmo de extrusão de uma liga é inversamente proporcional ao teor de elementos de liga e à sua resistência. Na presença de uma baixa percentagem de elementos de liga a velocidade de extrusão pode ultrapassar os 100m/min enquanto que para valores elevados a velocidade de extrusão toma valores na ordem dos 0,6 a 1,2m/min. A Tabela 4 apresenta o ritmo de extrusão de algumas ligas de alumínio, em percentagem, quando comparados com a liga 6063, considerando que o ritmo de extrusão desta é de 100%.

Apesar de possuírem uma elevada extrudibilidade, as ligas da série 1xxx não são as mais utilizadas no processo de extrusão, uma vez que, pelo seu muito baixo teor em elementos de liga não permitem a execução de tratamentos térmicos adjacentes. As ligas mais utilizadas neste processo são as ligas da série 6xxx, pois apresentam uma extrudibilidade aceitável, permitem tratamento térmico, possuem médias/altas resistências, elevada tenacidade, são resistentes à corrosão e permitem conformação e solda facilitadas. [8]

Tabela 4 - Extrudibilidade de algumas ligas relativamente à liga 6063. [8]

<i>Liga(s)</i>	<i>Extrudibilidade (% relativamente a 6063)</i>
1350	160
1060 e 1100	135
3003	120
6063	100
6061	60
2011	35
5086	25
2014 e 5083	20
2024	15
7075	9
7178	7

2.4 Processo de obtenção de perfis de alumínio

Na indústria atual o processo corrente de obtenção de perfis de alumínio é a extrusão pela sua elevada produtividade e pela capacidade de obtenção de longos perfis de secção não variável. Este processo permite obter produtos finais com boa qualidade superficial e rigor dimensional sem comprometer as propriedades mecânicas inerentes às ligas a utilizar, é também um processo segundo o qual podem ser obtidos perfis de outros materiais.

A extrusão é, portanto, um processo de conformação que transforma a matéria em bruto em componentes intermédios que podem posteriormente ser trabalhados e utilizados pelo consumidor mediante a finalidade pretendida.

A Figura 3 apresenta as etapas que constituem o processo de obtenção dos perfis de alumínio.

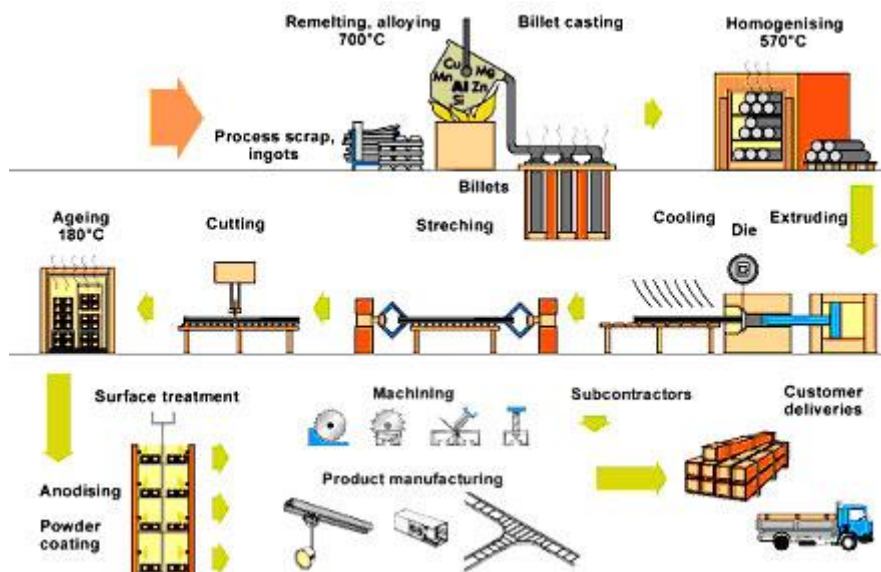


Figura 3 - Etapas do processo de obtenção de perfis de alumínio.[9]

A primeira fase do processo consiste na fabricação dos “billets” à medida por fundição e vazamento da matéria-prima. Denote-se que este primeiro passo pode ou não constar na linha de produção da indústria uma vez que existe a possibilidade de receber os “billets” já na forma e dimensão pretendidas por intermédio de uma indústria de fundição anterior. Os “billets” passam depois por um tratamento de homogenização por aquecimento e são então admitidos na prensa de extrusão, é nesta fase que a matéria-prima ganha a forma de perfil pretendida. Após extrusão os perfis são arrefecidos até à temperatura ambiente numa mesa de arrefecimento para serem depois esticados pelos “pullers” por forma a eliminar empenos e tensões residuais resultantes do processo de extrusão. Procede-se ao corte segundo o comprimento final desejado ou segundo o comprimento dito standard. Já cortados, os perfis são sujeitos a um tratamento de envelhecimento, é neste processo que as propriedades finais do produto são obtidas. Finalmente, pode ou não ser efectuado um tratamento superficial aos perfis, tratamento este que pode ser de lacagem, anodização, pintura ou maquinagem, para que os perfis sejam por fim transportados para os clientes. É de realçar que o processo global é controlado por inspeções ao material e aos perfis, estas instâncias de inspeção encontram-se habitualmente no fim do esticamento dos perfis e depois do tratamento de superfície e maquinagem finais, este controlo é importante pois garante a boa qualidade dimensional e superficial do produto.

De seguida, cada etapa do processo de extrusão será clarificada com o devido detalhe.

2.4.1 Fundição do billet de extrusão

Os “billets” de alumínio para extrusão são fabricados por fundição em comprimentos até sete metros e nos mais variados diâmetros e são o ponto inicial de todo o processo de fabricação de perfis. Inicialmente os lingotes de alumínio puro são fundidos e após edição dos elementos de liga pretendidos efetua-se o vazamento da liga fundida para as moldações de dimensões pretendidas, como referido anteriormente. Este processo pode ou não ser efetuado na mesma fábrica que o processo de extrusão em si, sendo que se o mesmo acontecer as temperaturas de fundição podem ser aproveitadas para a homogeneização.

2.4.2 Homogeneização

A homogeneização é, então, um tratamento térmico que é realizado, normalmente, após fundição e que não é visto como uma etapa direta do processo de extrusão de perfis. É realizado em temperaturas que rondam os 500°C (dependendo das ligas) e tem a função de remover ou reduzir as segregações, produzir estruturas estáveis e controlar certas características metalúrgicas como propriedades mecânicas e tamanho de grão. A Figura 4 mostra esquematicamente o efeito da homogeneização na microestrutura de uma liga de alumínio com precipitados nos contornos de grão.

A realização da homogeneização permite um aumento direto da produtividade da extrusão aumentando a sua velocidade até 40% em relação ao mesmo processo mas com o uso de billets não homogeneizados. Este tratamento traz também mais vantagens como a baixa tendência dos perfis para fraturar a quente, maior rigor superficial dos produtos por permitir uma menor rugosidade dos mesmos. [4][5]

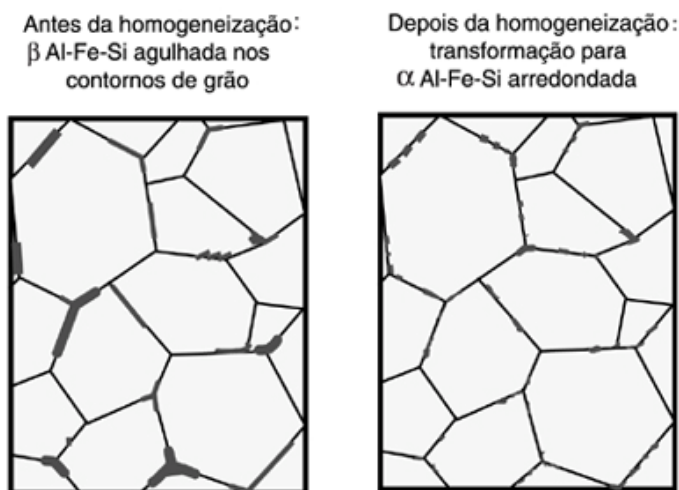


Figura 4 – Exemplo do efeito da homogeneização na microestrutura.[5]

2.4.3 Corte e pré-aquecimento

O processo de corte é encarado como uma etapa direta do processo de extrusão, geralmente consta nas linhas de extrusão das fábricas quer estas possuam ou não ala de fundição, no entanto os billets podem já sair da fundição segundo a dimensão pretendida, para tal, as moldações têm de ter a dimensão adequada.

O corte dos “billets” é feito segundo o comprimento admissível pela unidade de alimentação da prensa de extrusão e também segundo o comprimento pretendido para os extrudidos, geralmente toma valores de 0,4m a 1m. O “billet” cortado é depois pré-aquecido de modo a atingir temperaturas entre os 400°C e os 500°C. É de realçar que esta temperatura irá depender de fatores como as propriedades da liga, a forma final a extrudir, entre outros parâmetros.

Destaque-se que para uma linha de extrusão com fundição e homogenização adjacente tanto o processo de corte como o de pré-aquecimento podem ser contornados, basta que para isso as moldações possuam dimensão de acordo com a alimentação da prensa de extrusão e que sejam aproveitadas as temperaturas de homogenização.[2],[10]

2.4.4 Extrusão

A etapa principal do processo de obtenção dos perfis de alumínio é a extrusão. A extrusão é um processo de conformação plástica onde por recurso a elevadas pressões o billet assume a secção transversal desejada.

Este processo permite obter as mais variadas geometrias por recurso a diferentes matrizes e técnicas de extrusão. É, também, muito versátil no que toca à gama de materiais a processar sendo os aços, as ligas de alumínio e as de cobre as que mais vezes são extrudidas.

Na extrusão de ligas de alumínio, o “billet” previamente aquecido é admitido na prensa de extrusão a uma temperatura a rondar os 400°C e os 500°C, aqui sofre a acção de uma força por parte do punção que aumenta a pressão interna e que o força a passar pela matriz dando assim forma á secção transversal. A velocidade de extrusão de ligas de alumínio possui uma variação considerável uma vez que apresenta valores entre 5-100m/min (valores muito elevados de velocidade exigem maior força por parte do punção, estes factores podem levar ao aparecimento de defeitos e ao desgaste excessivo da matriz) e os comprimentos finais dependeram das instalações e maquinaria utilizadas, da dimensão do “billet” e área de secção pretendida. As temperaturas de saída dos perfis de alumínio extrudidos podem atingir valores além dos 500°C e grande parte das vezes é verificado um aumento da temperatura ao longo do processo pelo aumento de pressão imposto. Após passagem pela matriz os perfis são depois

sujeitos a um esticamento e um complexo processo de arrefecimento que possui diversas variantes. A curva de temperatura do metal ao longo do processo é apresentada na Figura 5. [10]

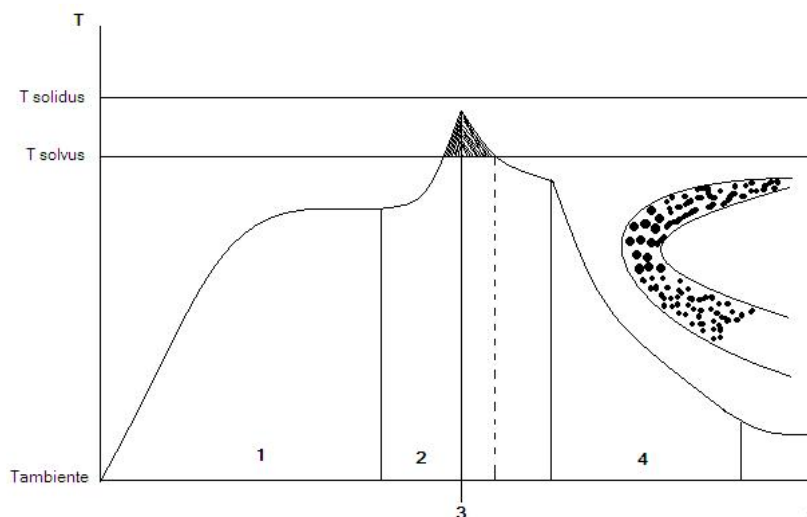


Figura 5 - Temperatura do metal durante o processo de extrusão: (1) pré-aquecimento do “billet”, (2) extrusão, (3) saída da matriz, (4) têmpera. Neste caso o pré-aquecimento não atinge a temperatura de solubilização.[4]

O processo de extrusão pode também ser efetuado a frio, esta variante é praticada à temperatura ambiente ou a uma temperatura inferior à temperatura de recristalização do material. Quando o processo é desenrolado a frio verifica-se um excessivo desgaste da matriz e do cilindro da prensa o que implica a utilização de ferramentas mais robustas por forma a suportar as elevadas tensões adjacentes limitando assim a produção a peças de baixa deformação em relação ao formato inicial.

A extrusão de perfis de alumínio é efetuada isotermicamente e a quente e são atingidas espessuras até 1mm e acabamentos superficiais de boa qualidade. Para a produção de perfis de secção oca podem ser distinguidas duas técnicas, a primeira passa pela utilização de um “billet” perfurado que pode ser produzido por fundição ou maquinado a partir de um “billet” maciço, onde é colocado um mandril de comprimento suficiente para que toda a zona de trabalho da matriz seja atravessada como demonstra a Figura 6, a segunda técnica passa pela utilização de matrizes especiais nas quais há uma segmentação do “billet” na entrada da matriz criando assim uma secção oca, após divisão o material é posteriormente soldado à saída da matriz, esta técnica força o uso de um lubrificante minuciosamente escolhido por forma a não interferir com o processo de soldadura. [10]

De entre as múltiplas variantes deste processo serão agora destacadas a extrusão direta e a extrusão indireta.

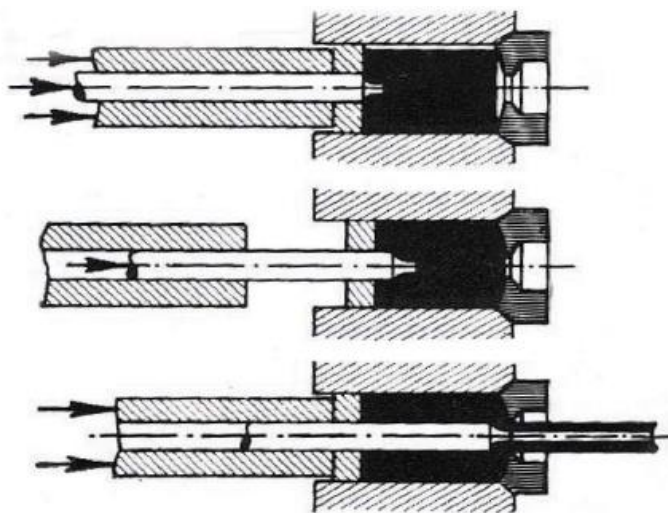


Figura 6 - Produção de perfis ocos por uso de bilhet perfurado e mandril.[11]

2.4.4.1 Extrusão direta

A extrusão direta, representada na Figura 7, é o processo mais popular entre as variantes da extrusão. O bilhet é forçado a passar o orifício da matriz no mesmo sentido em que a força é aplicada pelo punção.

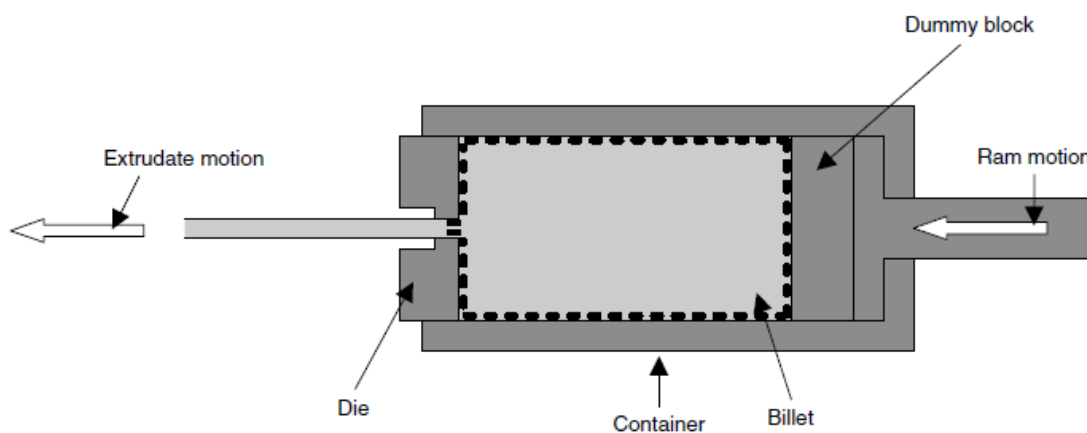


Figura 7 - Extrusão direta.[8]

A maior vantagem deste processo é a sua produtividade dado que o comprimento total permitido é simplesmente limitado pela dimensão do bilhet, a maior desvantagem centra-se no atrito verificado entre o bilhet e as paredes do cilindro de extrusão graças ao deslocamento do mesmo quando empurrado pelo punção, sendo esta área de interface de atrito grande e, portanto, são necessárias elevadas forças ao nível do punção. A aplicação de elevadas forças e o atrito verificado conduzem a um aumento de temperatura durante o processo. Os gradientes de temperatura ao longo do processo geralmente não são algo a desejar, no entanto, atendendo às características das ligas de alumínio em casos específicos podem ser induzidos

intencionalmente. De modo a manter constantes os parâmetros de extrusão é necessário equilibrar os parâmetros variáveis durante a extrusão direta, parâmetros como a velocidade e temperatura tendem a não se manter constantes devido à variação do atrito ao longo do processo por redução da área de contacto à medida que o perfil é extrudido. [8], [10],[12]

A força exercida por parte do punção não é constante e a sua variação está representada no gráfico da Figura 8, é possível distinguir quatro regiões distintas que definem a energia a fornecer por forma a extrudir o perfil:

- Energia necessária à acomodação do “billet” à geometria do cilindro de extrusão;
- Energia necessária ao início da extrusão;
- Energia necessária à deformação plástica;
- Energia necessária de forma a contornar o atrito desenvolvido.

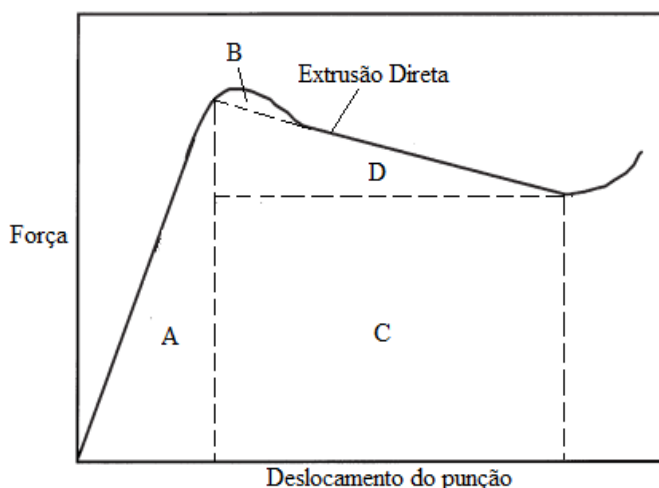


Figura 8 - Variação da força a exercer por parte do pistão durante a extrusão.[12]

2.4.4.2 Extrusão indireta

O processo de extrusão diz-se indireto quando a força exercida pelo punção é no sentido oposto ao sentido da saída do material extrudido, como demonstra a Figura 9. Nesta variante não existe movimento relativo entre o “billet” e o cilindro da prensa pelo que as forças de atrito envolvidas são muito menores o que traduz um gradiente de temperaturas internas mais uniforme que na variante direta da extrusão. No entanto, este processo limita o comprimento das peças a extrudir. É de realçar que o aproveitamento de matéria-prima é superior na extrusão inversa sendo que apenas 5% do volume inicial não é aproveitado e que a qualidade superficial final é superior, contudo exige ferramentas mais complexas e assim

apresenta custos mais elevados o que faz com que não seja o método com maior taxa de utilização. [8],[12]

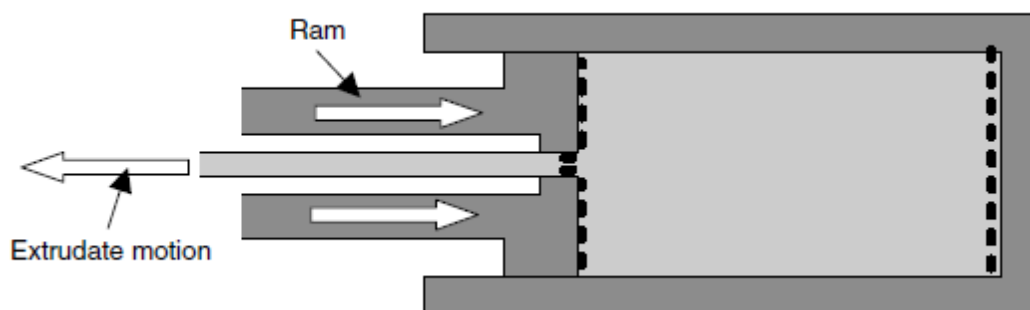


Figura 9 - Extrusão indireta.[8]

No gráfico da Figura 10 está representada uma comparação entre a evolução das forças face ao deslocamento para os processos de extrusão direta e indireta, é fácil verificar que para o caso da extrusão indireta o atrito é mínimo uma vez que a área que representa a força para o vencer é praticamente inexistente.

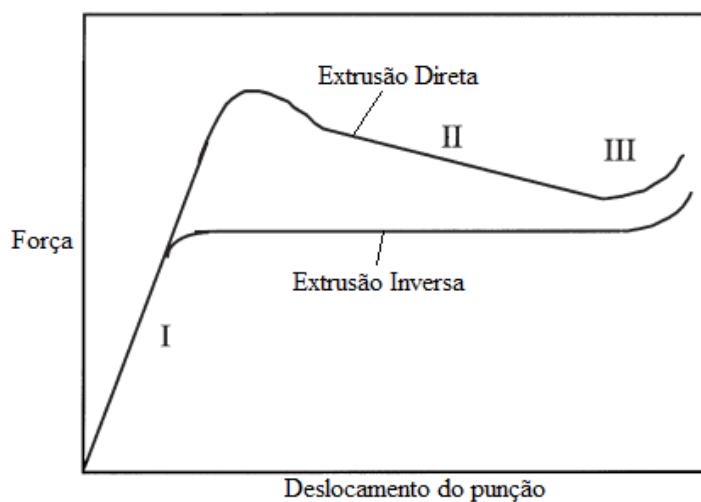


Figura 10 - Comparação da força necessária aos processos de extrusão direta e indireta.[12]

2.4.5 Arrefecimento

De modo a permitir o manuseamento e esticamento dos produtos extrudidos é efetuado um arrefecimento, este pode ser realizado por meio de ar, água ou uma combinação dos mesmos mediante a liga a arrefecer e as propriedades pretendidas.

Geralmente são dois os tipos de arrefecimento adotados (T5 e T6) e o processo a realizar é escolhido consoante as propriedades finais pretendidas. O arrefecimento T5 consiste numa têmpera por arrefecimento rápido de forma a evitar que precipitados grosseiros apareçam na matriz, este é o procedimento mais comum. O arrefecimento T6 é um arrefecimento de carácter lento, onde a temperatura do extrudido baixa segundo um baixo gradiente, seguido de um tratamento de solubilização que promove boas propriedades finais. Recentemente têm sido levados a cabo estudos visando aproximar as propriedades finais dos extrudidos arrefecidos segundo T5 às propriedades dos arrefecidos segundo T6. [13]

2.4.6 Esticamento

O esticamento é feito pelos pullers que agarram os extrudidos através de garras que se fixam aos topos do extrudido e que, após amarração, se movem em sentidos opostos segundo uma velocidade controlada. Este processo implica o arrefecimento prévio e pode ter contributo nas propriedades finais do produto.

2.4.7 Envelhecimento

Depois de esticados, os extrudidos são cortados segundo a dimensão desejada, este corte permite a admissão em fornos de envelhecimento. Geralmente as temperaturas de envelhecimento rondam os 180°C e a duração do processo pode variar entre 4 e 8 horas, a variação dos valores de temperatura e tempo de estágio de envelhecimento variam consoante a liga de alumínio a processar. O envelhecimento visa aumentar a tensão máxima e a tensão de cedência do material, no entanto verifica-se também um aumento da dureza do mesmo, este aumento torna mais fácil avaliar a eficácia do tratamento através de simples ensaios de rotina de dureza. Também é possível efetuar o envelhecimento sem recurso a forno, ou seja, sem reaquecer o extrudido, a este processo dá-se o nome de envelhecimento natural. Neste tratamento o material é mantido à temperatura ambiente durante longos períodos e apresenta bons resultados para determinadas ligas de alumínio.

De uma forma geral, o envelhecimento artificial, isto é, o envelhecimento com aquecimento, resulta em tensões máxima e de cedência mais elevadas que o envelhecimento natural e permite tempos de estágio mais curtos para a obtenção das mesmas tensões do que o tratamento executado à temperatura ambiente. Denote-se, também, que o envelhecimento natural quebra a cadência de extrusão por possuir tempos de estágio mais longos que o artificial. De seguida, apresentam-se na Figura 11, as curvas de envelhecimento de uma liga

2014, sendo esta uma liga usada em extrusão, por forma a clarificar a influência do tratamento nas propriedades referidas. [5]

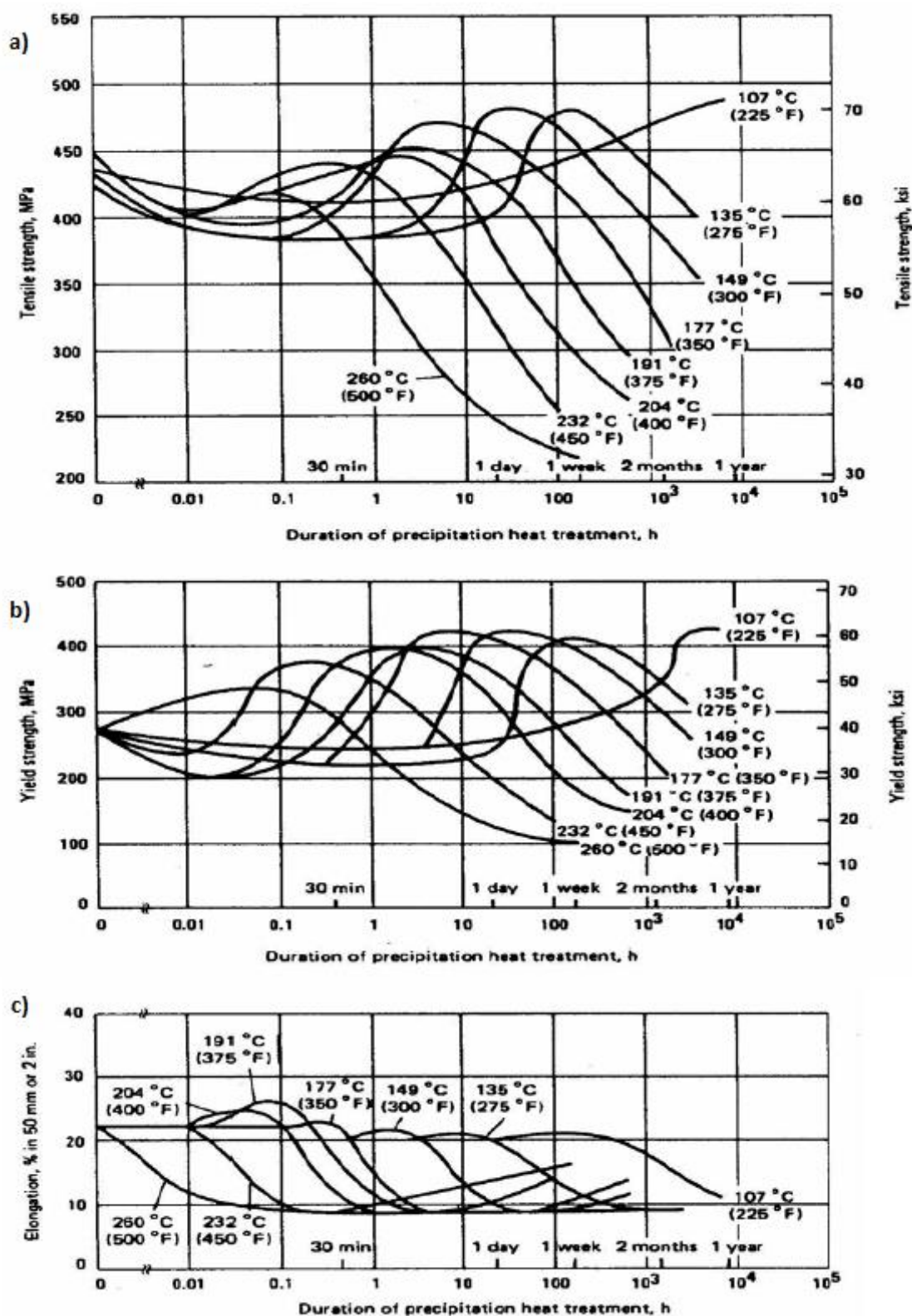


Figura 11 – Curvas de envelhecimento da liga 2014: a) resistência à tração vs tempo, b) elasticidade vs tempo, c) elongação vs tempo. [5]

2.5 Materiais compósitos

Um material compósito não é mais que a conjugação de dois ou mais materiais de propriedades distintas. O propósito do material compósito centra-se no evidenciar das melhores propriedades de cada uma das suas fases constituintes, vulgarmente denominadas de matriz e reforço, resultando num conjunto de propriedades superiores às apresentadas por estas fases quando analisadas separadamente como demonstra a Figura 12. Para que tal aconteça será necessário existir compatibilidade entre as fases do compósito, compatibilidade esta que é conseguida quando uma boa adesão entre a matriz e o reforço é verificada. Um bom exemplo de um material compósito é o betão armado onde as propriedades mecânicas do conjunto combinam as propriedades mecânicas das fases constituintes, sendo que o betão traduz resistência à compressão e o aço resistência à tração.

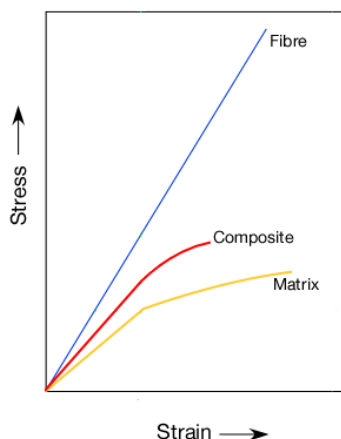


Figura 12 - Curvas tensão-elongação da fibra, da matriz e do compósito.[14]

Os materiais compósitos apresentam, na generalidade, excelentes propriedades específicas quando comparados, por exemplo, aos materiais metálicos o que permite a produção de componentes ou estruturas com boa resistência e peso reduzido, estas características revelam-se particularmente interessantes na indústria automóvel e especialmente nas indústrias aeronáutica e espacial. É, também, possível produzir componentes com bom comportamento à fadiga fazendo assim prolongar o número de ciclos de vida dos mesmos. De uma forma geral, os materiais compósitos apresentam elevada resistência e rigidez e bom comportamento à fadiga e em ambientes corrosivos, estas características aliadas ao baixo peso anteriormente referido fazem com que sejam também muito utilizados em ambientes competitivos e na medicina. A Figura 13 compara as propriedades apresentadas dos materiais compósitos com outros materiais conhecidos e vulgarmente utilizados nas mais variadas

aplicações. Como referido, um material compósito é constituído por fases distintas geralmente apelidadas de matriz e reforço que serão alvo de interesse na presente dissertação.[15],[16]

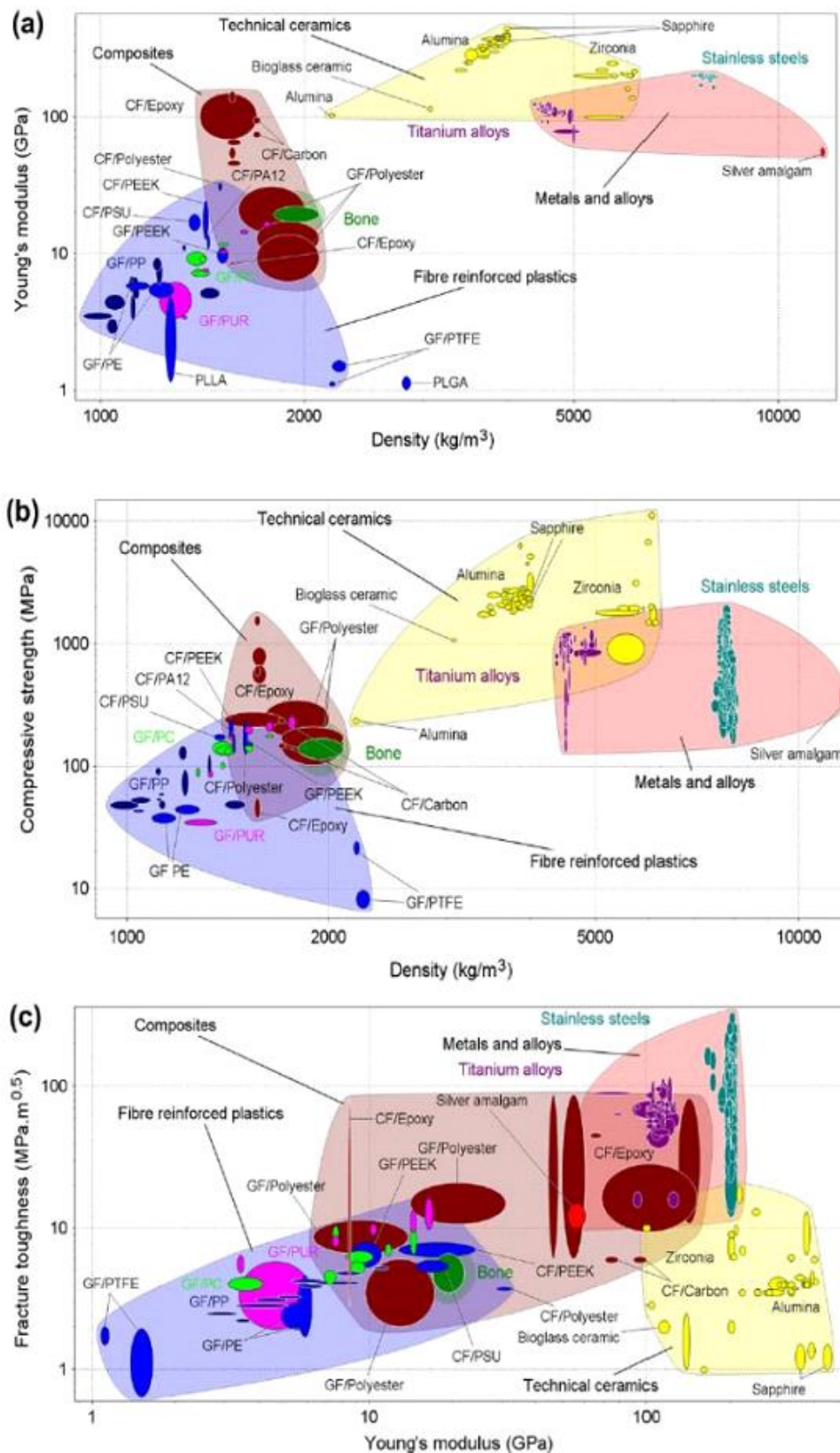


Figura 13 – Comparação de algumas propriedades dos compósitos com outros materiais: a) módulo de Young vs massa volúmica, b) resistência à compressão vs massa volúmica c) resistência à fratura vs módulo de Young.[17]

2.5.1 Matriz

A matriz tem a responsabilidade de proteger as fibras contra ataques químicos e danos mecânicos como o desgaste, distribuir as solicitações ao longo do reforço e promover o correto posicionamento do mesmo. Desempenha também um papel fundamental no acabamento superficial da estrutura. Em geral, as propriedades desejáveis para os materiais utilizados como matriz estão sintetizadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades generalizadas de uma matriz ideal.[18]

<i>Propriedades Mecânicas</i>	Resistência à tração Ductilidade Resistência ao corte Tenacidade Resistência ao impacto
<i>Propriedades Térmicas</i>	Resistência a temperaturas extremas Coeficiente de dilatação térmica próximo da fibra Baixa condutividade térmica
<i>Propriedades Químicas</i>	Boa adesão às fibras Resistência à degradação química Baixa absorção de umidade
<i>Outras Propriedades</i>	Baixo custo Solidificação

Existem três diferentes tipos de matrizes: polimérica, metálica e cerâmica. A escolha da matriz a utilizar prender-se-á sempre aos parâmetros necessários à aplicação da mesma. Na presente dissertação serão destacadas as matrizes poliméricas, vulgarmente chamadas de resinas, que podem ser divididas em termoplásticas e termoendurecíveis.

2.5.1.1 Matriz termoplástica

As matrizes termoplásticas são constituídas por polímeros de estrutura linear e não linear, tornam-se moldáveis e maleáveis a partir de uma determinada temperatura limite e sólidas para temperaturas abaixo desse valor. Como tal, podem sofrer vários ciclos de aquecimento e arrefecimento sem perda significativa de propriedades o que as torna

recicláveis. Em comparação com as resinas termoendurecíveis são, geralmente, mais dúcteis, mais rígidas, apresentam melhor resistência ao impacto, mantêm as suas propriedades consideravelmente inalteradas a temperaturas elevadas e absorvem menos humidade, mas requerem cuidado no processo de impregnação. A modo de exemplo salientam-se três tipos de matrizes termoplásticas com diferentes propriedades e vantagens, a PPS (Poli-sulfeto de Fenileno) de elevada resistência a ataque químico, a PSUL (Polisulfone) apresenta elevado valor de extensão na rotura e estabilidade ao nível das propriedades em ambientes de elevado gradiente de humidade e a PEEK (Poli-éter-éter-acetona) de elevada dureza, e assim, boa resistência ao dano sobre impacto. [19]

2.5.1.2 Matriz termoendurecível

A matriz termoendurecível é o tipo de matriz predominante nos materiais compósitos. Tal como o seu nome sugere, é composta por um polímero termoendurecível de estrutura tridimensional rígida com ligações moleculares garantidas por forças macromoleculares e por ligação química. Estas ligações fazem destacar a matriz termoendurecível no que toca às suas propriedades mecânicas e à estabilidade das mesmas com o aumento de temperatura.

São resinas de viscosidade inicial baixa o que permite elevadas frações de volume de fibras ao nível do compósito, apresentam baixo coeficiente de dilatação térmica e boa estabilidade dimensional. Por outro lado, são caracterizadas pela baixa extensão após rotura, curto período de vida em armazenamento, processamento lento no fabrico, libertação de gases aquando da cura e por serem suscetíveis ao ciclo térmico, isto é, não podem ser curadas e reaproveitadas o que faz com que não sejam recicláveis.

O processamento das matrizes termoendurecíveis é feito por mistura de três componentes fundamentais, a resina, um acelerador e um endurecedor. Estes são misturados nas quantidades corretas e pretendidas e aí ocorre a polimerização que traduz a estrutura tridimensional acima referida, a este processo atribui-se o nome de cura. A cura pode ser efetuada à temperatura ambiente, sendo este ponto uma limitação à vida sobre armazenamento, ou segundo condições de temperatura e pressão (separadamente ou em conjunto) aplicadas mais favoráveis à sua ocorrência.

Quando diretamente comparadas com as matrizes termoplásticas as matrizes termoendurecíveis apresentam um custo superior, maior rigidez, resistência mecânica e à temperatura, e vida à fadiga e viscosidade superiores; por outro lado no que toca à tenacidade e resistência química as matrizes termoplásticas assumem destaque pela positiva.

De entre as variantes das resinas termoendurecíveis destacam-se, na presente dissertação, as de maior utilização que são as resinas epóxico, viniléster e poliéster insaturado. [19],[20]

Resina de epóxico

As resinas de epóxico destacam-se pelas suas boas propriedades mecânicas e são assim as mais utilizadas para o fabrico de polímeros reforçados por fibras (FRP), salientando-se no uso na indústria aeronáutica, recipientes de pressão elevada e isolantes sobre tensão. As principais vantagens deste tipo de resina estão na elevada resistência mecânica, boa resistência térmica e química, tolerância a elevadas temperaturas (admitem temperaturas de serviço que podem chegar aos 220°C), resistência à abrasão, bom comportamento na presença de humidade, possibilidade de possuírem aspeto transparente, não apresentar libertação gasosa durante a cura e boa adesão quer às fibras em geral como a uma vasta gama de substratos. Contudo, apresentam longo período de cura e custo elevado que pode atingir quatro vezes o custo das resinas de poliéster insaturado e duas vezes o das resinas de viniléster. [19], [20]

Resina de poliéster insaturado

As resinas de poliéster podem ser saturadas ou insaturadas, sendo que, as de poliéster insaturado representam praticamente 90% do consumo de resinas termoendurecíveis por aliarem boas propriedades mecânicas, químicas e elétricas a um baixo custo e facilidade de processamento. Estas resinas são também um bom isolante térmico, podem apresentar boa resistência aos raios solares e por adição de determinados elementos são capazes de resistir à corrosão das fibras. São estas as resinas mais utilizadas na indústria automóvel, eletrotécnica e naval.

A família das resinas de poliéster insaturado divide-se nas resinas ortoftálicas, isoftálicas e bisfenólicas. As primeiras têm aplicação geral, as segundas são usadas quando se procura alcançar boa resistência térmica ou quando se trabalha sobre meios desfavoráveis, agressivos e húmidos, as últimas são usadas em meios de características ácidas. [19], [21]

Resina de viniléster

A resina de viniléster é, tal como a resina de poliéster insaturado, uma resina tipicamente de cura rápida e apresenta resistência química e à tração na mesma ordem que a resina de epóxico. Assim, este tipo de resina é visto como um meio-termo entre as apresentadas anteriormente uma vez que as suas propriedades representam bem a combinação das propriedades das mesmas. Apresenta ainda superior valor de contração volumétrica e adesão às fibras e ao substrato moderada comparativamente à resina de epóxico. São um tipo de resinas de uso corrente na indústria química pela sua boa resistência química acima referida e que se mostra de carácter fulcral em processos que envolvem reacções químicas adversas, pode até ser dito que esta aplicação proporcionou a criação deste tipo de resinas. A Tabela 6 mostra uma comparação entre propriedades dos três tipos de resinas termoendurecíveis acima comentados.[19]

Tabela 6 - Valores típicos de algumas propriedades das resinas termoendurecíveis. Adaptado de [19]

<i>Propriedades</i>	<i>Resina</i>		
	<i>Epóxico</i>	<i>Poliéster insaturado</i>	<i>Viniléster</i>
<i>Massa Volúmica [kg/m³]</i>	1200-1400	1200-1400	1150-1350
<i>Resistência à tração [MPa]</i>	55-130	34.5-104	73-81
<i>Módulo elasticidade [Gpa]</i>	2.75-4.10	2.1-3.45	3.0-3.5
<i>Coefficiente de Poisson</i>	0.38-0.40	0.35-0.39	0.36-0.39
<i>Coefficiente de dilatação térmica</i>	45-65	55-100	50-75
<i>Taxa de absorção de humidade</i>	0.08-0.15	0.15-0.60	0.14-0.30

2.5.2 Fibras

O reforço, por sua vez, é responsável pela maioria das propriedades mecânicas dos materiais compósitos, deste modo não será de estranhar que os materiais escolhidos para reforço possuam propriedades mecânicas extremamente elevadas e muitas vezes superiores às dos metais de uso corrente em engenharia. Na Figura 14 estão representados os tipos de reforço mais comuns nos materiais compósitos, esta dissertação irá focar os reforços sobre a forma de fibras.

No caso dos materiais compósitos reforçados com fibras, as propriedades mecânicas finais dependem do tipo de fibra utilizado, fração volumétrica, orientação na matriz, diâmetro e dimensão das mesmas. As fibras podem ser classificadas segundo a sua continuidade como contínuas e descontínuas, segundo o seu comprimento como fibras longas e curtas, sendo que o comprimento que limita esta designação é de 6mm, e segundo a sua natureza como fibras naturais e não naturais sendo as últimas ainda divididas em artificiais, inorgânicas e sintéticas.[20], [22]

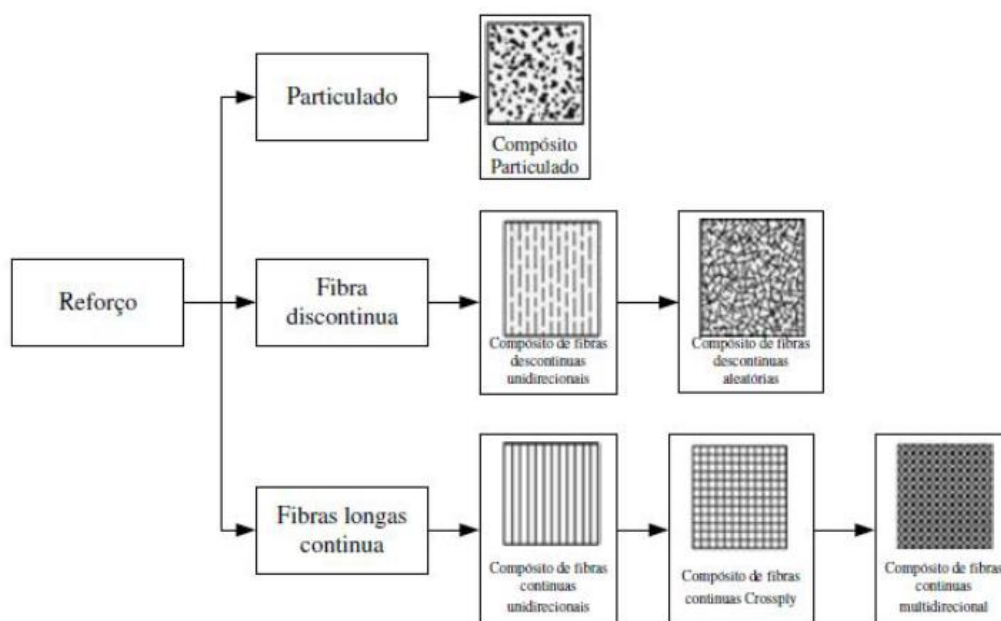


Figura 14 - Tipos de reforços mais comuns nos materiais compósitos.[22]

As fibras mais comuns em materiais compósitos são as fibras de vidro, carbono, aramida e basalto e a escolha depende da relação entre as propriedades pretendidas e do custo a aplicar à produção do material. Estas variantes das fibras serão seguidamente abordadas.

2.5.2.1 Fibra de vidro

As fibras de vidro são as mais utilizadas como reforço nos materiais compósitos e são classificadas como fibras do tipo E, tipo A, tipo S e tipo R onde as fibras do tipo E se destacam pelo seu baixo teor alcalino em relação às fibras do tipo A o que representa melhorias comportamentais quando expostas a agentes químicos ou atmosferas adversas e menos favoráveis. As fibras do tipo S e R apresentam resistência elevada quando comparadas com as restantes e por isto mesmo são as mais utilizadas em condições mais exigentes no que

toca a esforços e solicitações. De uma forma geral, as vantagens e desvantagens das fibras de vidro são apresentadas na Tabela 7.[19]

Tabela 7 - Vantagens e desvantagens das fibras de vidro.[18]

<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
Elevada resistência à tração	Módulo de elasticidade reduzido
Baixo custo	Elevada massa volúmica
Elevada resistência química e à oxidação	Sensibilidade à abrasão
Elevada elasticidade	Baixa resistência à fadiga
Baixo coeficiente de dilatação térmica	Sensibilidade à água e humidade
Isolamento acústico, térmico e elétrico	

2.5.2.2 Fibra de carbono

As fibras de carbono dividem-se em dois grupos maioritários, as fibras com teor de carbono entre 80% e 95% e as fibras de grafite que admitem teores de carbono que podem atingir o valor de 99%. Estas fibras podem ser obtidas através de três precursores, o alcatrão (“pitch”), a celulose (“rayon fibers”) e o poliacrilonitrilo (“PAN”) sendo o PAN o precursor de maior utilização por apresentar o custo de produção mais baixo para as mesmas propriedades mecânicas.

Estas fibras são o reforço utilizado quando o material compósito tem finalidades de elevado grau de exigência. São caracterizadas por um baixo valor de massa específica, elevado módulo de elasticidade, alta resistência à tração e bom comportamento linear até à rotura. São, também, termicamente estáveis mantendo assim as suas propriedades com o aumento da temperatura de trabalho e resistem eficazmente a ambientes agressivos. Apresentam elevada resistência à fadiga e resistência elétrica, são dimensionalmente estáveis e podem ser utilizadas em produtos sujeitos a vibrações uma vez que têm boa capacidade de absorver as mesmas, por outro lado, são de entre as fibras utilizadas as de custo mais elevado. Estas e outras vantagens/desvantagens estão sintetizadas na Tabela 8. Aos polímeros reforçados por fibras de carbono é atribuído o nome de CFRP. [19]

Tabela 8 - Vantagens e desvantagens das fibras de carbono.[18]

<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
Elevada resistência à tração Elevado módulo de elasticidade longitudinal Baixa massa específica Elevada estabilidade dimensional Baixo coeficiente de dilatação térmica Inércia química Amortecimento estrutural Elevada condutividade elétrica	Reduzida resistência ao impacto Elevada condutividade térmica Fratura frágil Baixa deformação antes da fratura Baixa resistência à compressão Custo elevado

2.5.2.3 Fibra de aramida

As fibras de aramida, por sua vez, merecem destaque pela sua elevada ductilidade à compressão, boa resistência ao impacto dada pela sua capacidade de absorver energia, resistência à fadiga e fluência reduzida. São também caracterizadas pela baixa resistência a gradientes de temperatura pois o seu módulo de elasticidade varia linearmente com o aumento da temperatura, são sensíveis à radiação, resistem mal a ambientes de pH não neutro e absorvem alguma água podendo mesmo ser permeáveis, a Tabela 9 sintetiza estas características.[19]

Tabela 9 - Vantagens e desvantagens das fibras de aramida.[18]

<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
Baixa massa específica Elevada resistência à tração Elevada resistência ao impacto Baixa condutividade térmica Elevada resistência à abrasão Resistência a elevadas temperaturas Elevada durabilidade	Baixa resistência à compressão Degradação lenta sobre luz UV Elevada absorção de humidade Custo elevado

2.5.2.4 Fibra de basalto

As fibras de basalto têm um custo inferior às fibras de carbono e melhores propriedades mecânicas que as fibras de vidro. São capazes de exercer a temperaturas de trabalho muito elevadas (a rondar os 982°C), são quimicamente resistentes a ambientes ativos e agressivos, representam bons isolantes acústicos e vibratórios e dado as elevadas temperaturas de trabalho referidas e o elevado ponto de fusão de cerca de 1450°C são consideradas como resistentes ao fogo.[19] Serão agora comparadas algumas propriedades dos diferentes tipos de fibras acima enunciados, esta comparação é demonstrada na Tabela 10.

Tabela 10 - Diversas propriedades de algumas fibras.[23][24]

<i>Tipo de fibra</i>	<i>Propriedades</i>			
	<i>Massa volúmica [kg/m³]</i>	<i>Módulo de Elasticidade [Gpa]</i>	<i>Resistência à tração [Gpa]</i>	<i>Elongação [%]</i>
<i>Vidro E</i>	2.54	72.5	1.72-3.45	2.5
<i>Vidro S</i>	2.49	87	2.53-4.48	2.9
<i>Aramida 29</i>	1.45	85	2.27-3.80	2.8
<i>Aramida 49</i>	1.45	117	2.27-3.80	1.8
<i>Carbono HS</i>	1.80	227	2.80-5.10	1.1
<i>Carbono HM</i>	1.80-1.86	370	1.80	0.5
<i>Carbono UHM</i>	1.86– 2.10	350-520	1.00-1.75	0.2

2.5.3 Formas fibrosas

Após processamento, as fibras, podem ser encontradas sobre diversas formas como: “roving”, tecidos, mantas, entrançados e pré-impregnados. Estas formas fibrosas serão seguidamente apresentadas com algum detalhe. Por forma a sumariar a presente dissertação, o seu processo de obtenção não será aqui enunciado, uma vez que, cada tipo construtivo possui uma forma de produção própria.

2.5.3.1 “Roving”

O “roving”, apresentado Figura 15, é um cordão de filamentos contínuos enrolados helicoidalmente e vulgarmente apresentado sobre a forma de bobine. Estas bobines podem funcionar como alimentação a teares por forma a fabricar os tecidos fibrosos e são vastamente usadas no processo de laminação em pistola onde o cordão do “roving” é cortado em pequenas porções e misturado com a resina dentro da pistola de dispersão sendo depois projetado sobre o molde permitindo preencher ângulos e detalhes de difícil execução. O “roving” é, por norma, composto por fibras de $9\mu\text{m}$ a $13\mu\text{m}$ e o controlo das bobines é feito contabilizando o número de filamentos e o seu diâmetro através da unidade de peso linear TEX que traduz o peso do cordão filamentar por quilómetro de extensão. [24], [25]



Figura 15 – Roving.[26]

2.5.3.2 Tecidos

Como demonstra a Figura 16, existem tecidos segundo disposição 2D e 3D, ambos são compostos por feixes de fibras longas ligados de forma a que a estabilidade seja assegurada, no entanto, os tecidos 3D possuem fibras orientadas na direcção da espessura ao contrário dos 2D, isto confere aos primeiros maior resistência interlaminar. Por outro lado, no que toca às propriedades mecânicas no plano os tecidos 2D apresentam vantagem uma vez que, não necessitam de promover a impregnação de resina na direcção da espessura. Os tecidos são, de uma forma geral, estáveis, fáceis de manusear e cortar e as componentes fabricadas apresentam boa resistência ao impacto. [24], [25]

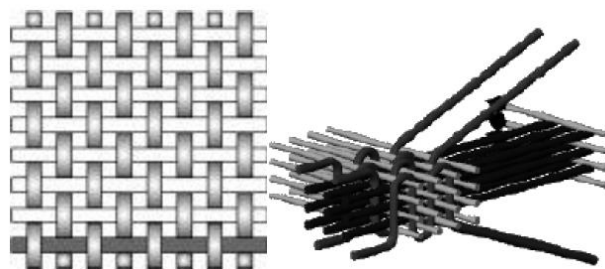


Figura 16 - Tecidos 2D e 3D.[24]

2.5.3.3 Mantas

Existem três tipos de mantas (Figura 17), as de filamentos cortados (CSM – *chopped strand mat*) compostas por fibras de baixos comprimentos (inferiores a 50mm) e de baixas propriedades mecânicas, as de filamentos contínuos (CRM – *continuous random mat*) de boas propriedades mecânicas e conformabilidade e as de superfície que são constituídas por fibras curtas e que se destacam pela sua leveza (20 a 30 g/m²), por promover um bom acabamento superficial e por possuírem boa resistência química. Todos os três tipos de mantas possuem fibras distribuídas aleatoriamente que são agregadas por um ligante sob a forma de pó ou emulsão e que torna a manta estável. [24], [25]



Figura 17 - Mantas fibrosas CSM (esq.) e CRM (dir.).[24]

2.5.3.4 Entrançados

Os entrançados ou “braids” são produzidos por entrelaçamento de fibras de contínuas, geralmente apresentam-se sob a forma tubular. Este processo é dispendioso e difícil pelo que a sua utilização não é muito elevada, no entanto, são dotados de boas conformabilidade e propriedades mecânicas. A Figura 18 mostra um entrançado. [27]

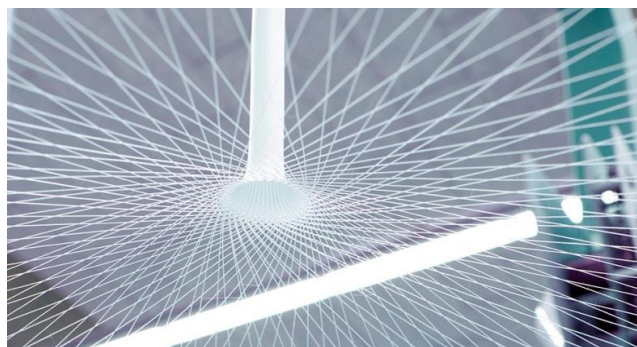


Figura 18 - Entrançado fibroso. Adaptado de [27].

2.5.3.5 Pré-impregnado

Os pré-impregnados (Figura 19) são constituídos por fibras previamente impregnadas em resina para conformação e consolidação posterior. A resina mais comum nos pré-impregnados é a resina de epóxico embora também possam ser utilizadas matrizes termoplásticas. Esta resina é misturada com inibidores que impedem a realização da cura até que o processamento a dadas condições de pressão e temperatura seja efetuado.

Os pré-impregnados são geralmente armazenados e conservados a baixas temperaturas por forma a garantir a estabilidade quer da resina quer dos inibidores e possuem prazos de validade limitados. Como características principais destacam-se a versatilidade de forma fibrosa, a maneabilidade, conformabilidade e posicionamento no molde facilitados e a auto-adesão entre camadas praticamente assegurada. Podem ser encontrados sobre a forma unidireccional, manta, tecido ou roving.

Após empilhamento das camadas de pré-impregnado no molde ou no fabrico próprio de camadas sobre ordem desejada, o material é sujeito a uma cura segundo condições de pressão e temperatura e sobre um estágio de tempo característico de cada pré-impregnado de forma a obter as propriedades mecânicas características. [19], [24]



Figura 19 - Pré-impregnado.[28]

2.6 Híbridos de metal e compósito

Cada vez mais, os materiais compósitos, se tornam importantes em inúmeras aplicações face aos materiais metálicos devido às suas boas propriedades específicas. Contudo, desvantagens como a baixa ductilidade, maquinabilidade e soldabilidade ainda em estudo, durabilidade reduzida, elevado custo e complexo processo de produção fazem com que muitas vezes se opte por utilizar materiais metálicos, especialmente os de baixo peso específico.

No meio da escolha entre os materiais metálicos e compósitos surgiram os sistemas híbridos metal/compósito sob a forma de laminados vulgarmente conhecidos como FML (*Fiber Metal Laminates*). O processo de obtenção dos híbridos denomina-se por hibridização e o seu objetivo assemelha-se ao do material compósito em si, uma vez que se trata de uma junção combinada de dois materiais distintos por forma a fazer prevalecer as melhores características de cada um deles de modo a que o produto final combinado possua características superiores às suas partes. A hibridização pode ser feita segundo diferentes esquemas construtivos, de uma forma geral trata-se de hibridização por zonas, fibras ou camadas, sendo que para a obtenção de FML a hibridização do material metálico e do compósito é executada sobre a forma de camadas como demonstra a Figura 20. [29],[30],[31]

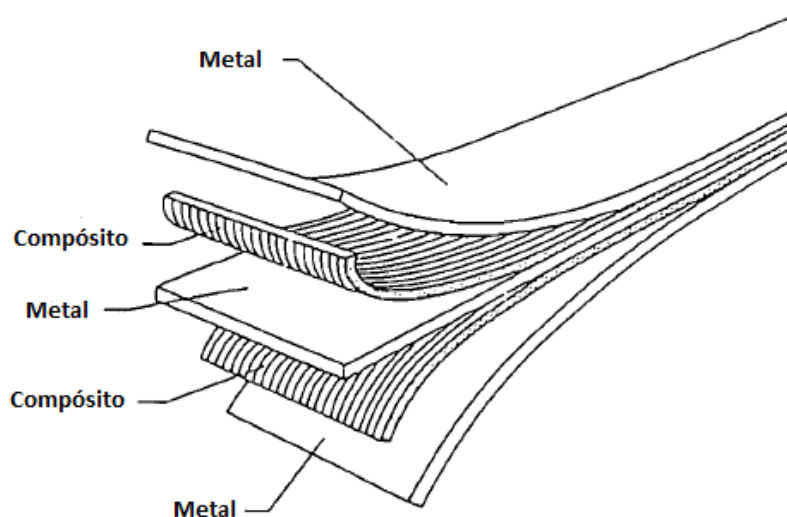


Figura 20 - Hibridização por camadas ou interlayer.[31]

Os primeiros FML foram desenvolvidos na década de 80 na Universidade Tecnológica de Delft situada na Holanda onde se usaram fibras de aramida como reforço a placas metálicas, a esta conjugação material foi dado o nome de ARALL. Posteriormente foram desenvolvidos híbridos de alumínio e fibra de carbono (CARALL) e de alumínio e fibra de

vidro (GLARE). A Figura 21 mostra como é feita a classificação dos diferentes FML baseada no metal que os compõe. [32]

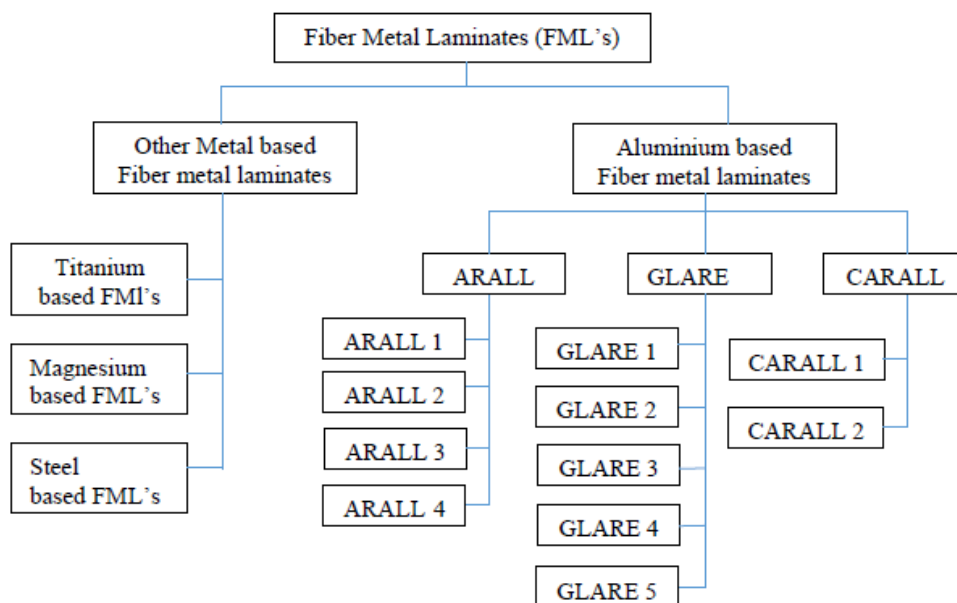


Figura 21 - Classificação dos diferentes tipos de FML.[32]

A combinação dos materiais compósitos com os metais atribui aos FML propriedades mecânicas superiores às dos materiais que os compõe individualmente. As vantagens genéricas compreendidas em estudos anteriores são enunciadas abaixo e apresentadas esquematicamente na Figura 22. [32]

- Resistência mecânica – os metais e a maioria dos compósitos são ambos resistentes o que resulta numa elevada resistência mecânica dos FML;
- Baixa densidade – a presença de material compósito e metal em camadas finas proporciona baixo valor de densidade;
- Resistência à corrosão – a presença de uma base polimérica permite boa resistência à corrosão;
- Resistência à humidade – as camadas metálicas externas proporcionam impermeabilidade para com o exterior e as camadas de pré-impregnado interiores funcionam como barreira à humidade entre as camadas metálicas;
- Resistência ao impacto – a deformação após impacto é melhor do que nos compósitos por si só;
- Absorção de energia – absorção significativa através da fratura localizada das fibras e da falha por cisalhamento das camadas metálicas;

- Fadiga – elevada resistência à fadiga graças à presença de fibras intactas ao longo da falha que funcionam como ponte e restringem a sua abertura. Os FML resistem melhor à fadiga que os metais e os compósitos convencionais.

CFRP	New Material	Metal
+ high stiffness	+ high stiffness	+ high stiffness
+ high strength	+ high strength	+ high strength
+ very low density	+ acceptable density	- high density
- brittle failure	+ optimized failure	+ ductile failure
o moderate tensile energy absorption	+ high tensile energy absorption	+ high tensile energy absorption
- limited crash structure integrity	+ good crash structure integrity	+ superior crash structure integrity
- poor electrical conductivity	+ sufficient electrical conductivity	+ high electrical conductivity

Figura 22 - Vantagens genéricas dos FML.[33]

A maior desvantagem dos híbridos FML é o longo tempo de cura da matriz do compósito que a constitui, uma vez que, torna o processo de fabrico dos mesmos mais demorado diminuindo assim a produtividade. Pode-se ainda referir o desfasamento de propriedades e a interface material como desvantagens.

As vantagens associadas aos FML fazem deles materiais ideais para a utilização nas indústrias aeroespacial e automóvel. É necessário realçar que o estudo deste tipo de materiais ainda se encontra em desenvolvimento e que portanto muitas propriedades não estão claramente definidas e os métodos de fabrico dos mesmos não se encontram otimizados. [32],[34]

2.7 Adesão

Os FML sendo sistemas híbridos conjugam dois materiais distintos que, por forma a trabalharem em conjunto e assim atribuírem melhores características e propriedades, devem estar ligados entre si de forma eficiente. Percebe-se, então, que a interface entre os materiais é um ponto muito importante nos sistemas híbridos uma vez que garante a integridade estrutural e transmissão de forças aquando de uma solicitação. Revela-se importante estudar e melhorar

as uniões entre materiais que geralmente são feitas por ligações aparafusadas/rebitadas ou ligações coladas.

As ligações aparafusadas/rebitadas permitem desmontagem repetida de componentes permitindo assim fácil inspeção e manutenção dos mesmos e não são suscetíveis à humidade ou a ciclos térmicos, no entanto, implicam a furação do material que no caso dos compósitos resulta numa quebra local da continuidade das fibras o que faz dos furos zonas de concentração de tensões. As ligações coladas, por sua vez, permitem boa distribuição de tensões pelo substrato, bom amortecimento de vibrações, isolamento térmico e à humidade, permitem unir substratos irregulares, são de processamento rápido e económico e permitem isolar substratos com tendência à corrosão galvânica. Contudo, requerem tratamento e limpeza prévia ao processamento, este processamento não é possível em peças de grande dimensão no caso do adesivo utilizado possuir ciclo de cura a pressão e temperatura elevadas, são definitivas não permitindo inspeção dos substratos e da junta e apresentam mau desempenho sob solicitações de arrancamento. A Figura 23 demonstra o perfil de tensões vantajoso de uma junta colada face a uma junta rebitada, perfil este que permite maior rigidez e transmissão de carga. [35],[36]

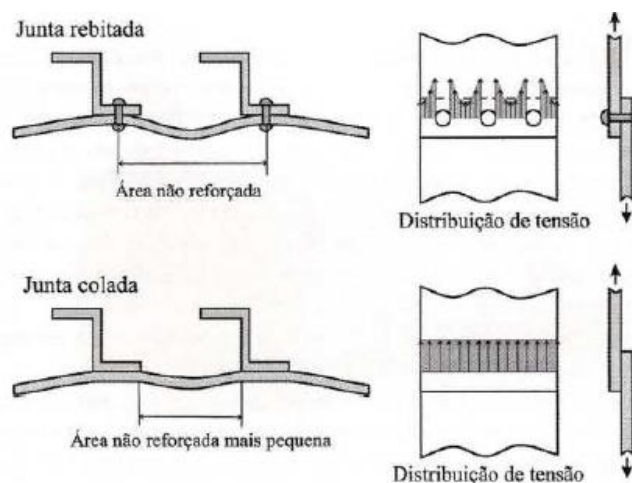


Figura 23 - Perfil de tensões para o substrato de uma junta aparafusada/rebitada e de uma junta colada. [37]

No que toca às juntas coladas, caso de interesse da presente dissertação, é necessário garantir a viabilidade do fenómeno de adesão e para tal convém também compreendê-lo. O estudo da adesão é uma área multidisciplinar, visto requerer a aplicação de conceitos de diversas áreas da ciência e da tecnologia como demonstra a Figura 24. A norma ASTM D 907 define adesão como “o estado em que duas superfícies são unidas por forças interfaciais, as

quais podem consistir de forças de valência ou forças de ancoramento mecânico ou ambas”.[38]



Figura 24 - Áreas de estudo da adesão.[35]

Existem diversos mecanismos responsáveis pela adesão, contudo quatro destes merecem destaque pela sua simplicidade: o mecanismo da adsorção, o mecanismo de difusão ao redor da interface, o mecanismo de ancoragem mecânica e o mecanismo de adesão eletroestática, estes estão representados na Figura 25.

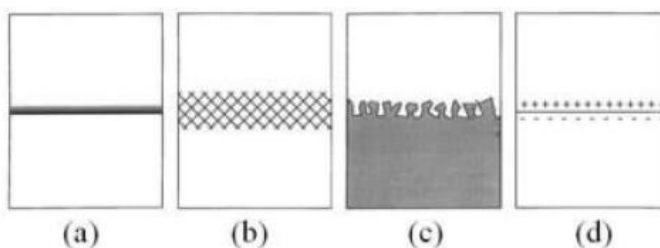


Figura 25 - Mecanismos de adesão: a)adsorção, b)difusão, c)ancoragem mecânica, d)adesão eletroestática.[39]

No trabalho experimental desenvolvido nesta dissertação tentou-se explorar o mecanismo de ancoragem mecânica segundo o qual a adesão é conseguida porque a superfície material nunca é totalmente lisa, ela é composta por picos e vales consoante a rugosidade, assim, uma boa adesão ocorre quando o adesivo penetra nas fendas e sulcos ficando preso mecanicamente, como se estivesse ancorado, isto é demonstrado esquematicamente na Figura 26. Para tal, o adesivo deve molhar convenientemente o substrato e deve apresentar viscosidade adequada para penetrar nos poros e aberturas num tempo razoável. [35]

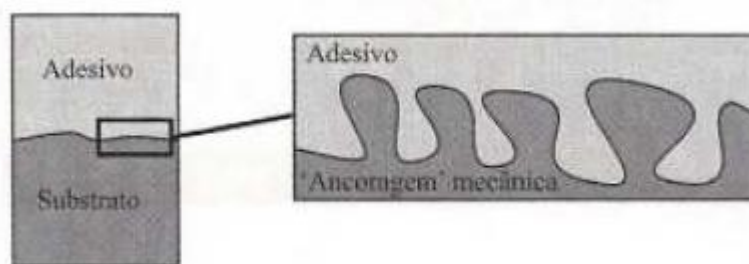


Figura 26 - Detalhe do mecanismo de adesão por ancoragem mecânica.[37]

A aplicação de um carregamento pode levar a junta colada à rotura, os tipos de rotura ou modos de falha são determinados pelo material de cada interface, geometria da junta e carregamento aplicado. É importante que seja feita a caracterização da falha para se ter um entendimento completo das propriedades da junta.

As principais falhas são a de rotura do substrato que significa que a ligação foi a melhor possível, que a integridade do adesivo não foi comprometida e que a sua resistência é superior à dos substratos a ligar, a rotura coesiva que ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte que a resistência interna do próprio adesivo e a rotura adesiva que representa um cenário de adesão sem sucesso provavelmente por má preparação ou limpeza das superfícies a ligar, pode ainda existir uma falha mista onde se evidenciem mais do que um dos mecanismos de rotura anteriores. [24],[40],[41]

Os mecanismos de rotura enunciados são agora apresentados na Figura 27.

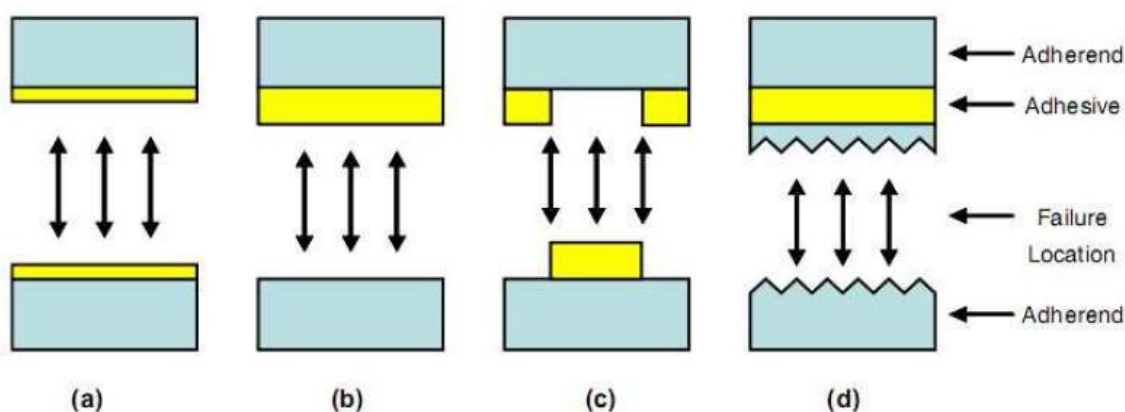


Figura 27 - Mecanismos de rotura de uma junta colada: a)falha coesiva, b)falha adesiva, c)falha mista e d)falha por parte do substrato.[41]

Denote-se que, as juntas coladas devem ser previamente pensadas e projetadas por forma a garantir as melhores propriedades mecânicas do conjunto. O projeto de uma ligação colada deverá seguir vários pontos considerados cruciais[24]:

- Projetar a estrutura de modo a que a junta seja facilmente executável;
- Projetar a junta de modo a que a transferência de carga se processe por corte ou compressão;
- Selecionar devidamente o adesivo adequado às características da aplicação tendo em conta as suas propriedades mecânicas, térmicas, químicas, entre outras;
- Garantir uma espessura ótima do adesivo, espessura esta a necessária à obtenção do melhor desempenho da junta;
- Incluir tensões de origem térmica devido aos coeficientes de expansão térmica dos diferentes materiais em causa;
- Preferir adesivos de alta ductilidade quando os substratos são de diferente rigidez;
- Projetar a junta por forma a que a rigidez axial dos dois substratos seja idêntica;
- Usar valores suficientemente elevados para o rácio entre o comprimento de sobreposição e a espessura do substrato.

2.7.1 Falha do compósito

Os materiais compósitos possuem mecanismos de falhas bem mais complexos que os materiais isotrópicos, até porque, no caso dos primeiros, deve-se considerar todos os tipos de falhas de cada um dos materiais componentes, acrescidos das falhas de degradação do compósito. As falhas nas estruturas de laminados compósitos ocorrem sob quatro formas, que estão representadas na Figura 28: [42],[16]

- Rotura e arrancamento das fibras;
- Rotura da matriz (podem aparecer pontes de fibras);
- Falha de aderência entre a matriz e as fibras;
- Delaminação (ou separação entre as camadas do laminado).

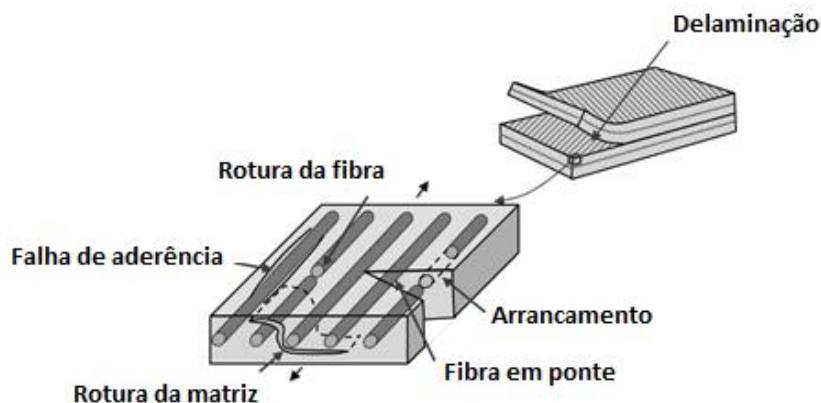


Figura 28 - Mecanismos de falha estrutural dos materiais compósitos.[43]

Nos três primeiros, a falha relaciona-se diretamente com as propriedades dos materiais constituintes do compósito, enquanto que no último, depende do esquema construtivo do laminado e das tensões geradas entre as camadas do mesmo. É interessante destacar que, após a falha de uma camada do laminado, este pode ainda ser capaz de sustentar o carregamento aplicado. O que altera neste caso é a rigidez do laminado, e isto leva à existência de falhas progressivas e não imediatas em alguns materiais.

De acordo com a norma ASTM D5573, relativa a juntas adesivas de compósitos, existem sete modos de caracterizar a falha, falha adesiva, coesiva, coesiva na camada-fina, descolagem da fibra, descolagem leve da fibra, substrato ou uma mistura dos anteriores, como ilustra a Figura 29. [44],[45]



Figura 29 - Falhas na adesão de materiais compósitos.[45]

2.8 Perfis híbridos alumínio/carbono - trabalhos prévios

Os perfis híbridos são correntemente utilizados na engenharia civil e começam agora a ser uma ferramenta útil na indústria aeronáutica pelas propriedades e características evidenciadas nos capítulos anteriores. A melhoria destas propriedades e a diminuição do seu custo de produção têm sido alvo de estudo em diversos artigos científicos, de seguida, será apresentada uma abordagem de alguns desses trabalhos prévios por forma a compreender melhor aquilo que tem sido estudado.

2.8.1 Perfis de alumínio extrudidos reforçados por CFRP

Este estudo foi desenvolvido por (Broughton *et al.*, 1997) e visa a compreensão e desenvolvimento de perfis de alumínio de secção retangular provenientes de extrusão reforçados por um compósito de fibra de carbono e matriz polimérica com a configuração demonstrada na Figura 30.

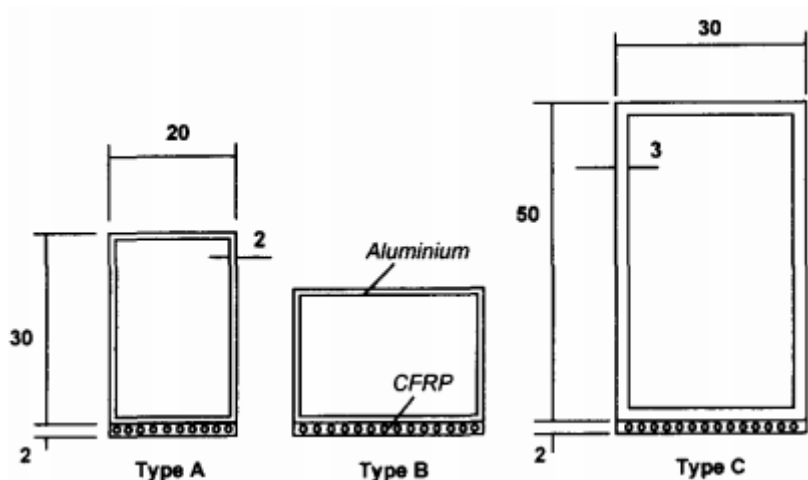


Figura 30 - Configuração dos perfis testados.[46]

Os perfis de alumínio provenientes da extrusão são de uma liga 6063 com têmpera do tipo T6 e o material compósito foi utilizado sob a forma de pré-impregnado unidirecional sobrepostos por forma a criar um laminado com 2mm de espessura. Após empilhamento a cura dos laminados foi feita segundo um estágio de 1 hora a 120°C sendo aplicada uma pressão de vácuo de 1atm. Seguidamente, os laminados previamente curados foram ligados aos perfis de alumínio por meio adesivo utilizando uma resina de epóxico que foi aplicada tanto à superfície do perfil como do compósito previamente curado. Saliente-se que a

superfície do alumínio foi previamente tratada e preparada por forma a melhorar a adesão, este tratamento foi feito por meio de um agente desengordurante e através de granalhagem com alumina (80/120). Os perfis híbridos foram então submetidos a uma pressão de vácuo constante de 1atm durante 16 horas de modo a que a cura do adesivo fosse realizada.

Após cura, os perfis híbridos foram submetidos a um ensaio de flexão a 4 pontos, cuja configuração é representada na Figura 31, sendo que o perfil foi orientado de forma a que o reforço compósito se encontrasse à tração aquando do ensaio.[46]

A Tabela 11 apresenta as variantes do ensaio, por sua vez, a Tabela 12 e a Figura 32 apresentam os resultados obtidos sob a forma de percentagem de melhoria, onde se pode concluir que a aplicação do reforço constitui melhorias relativamente aos perfis não reforçados.

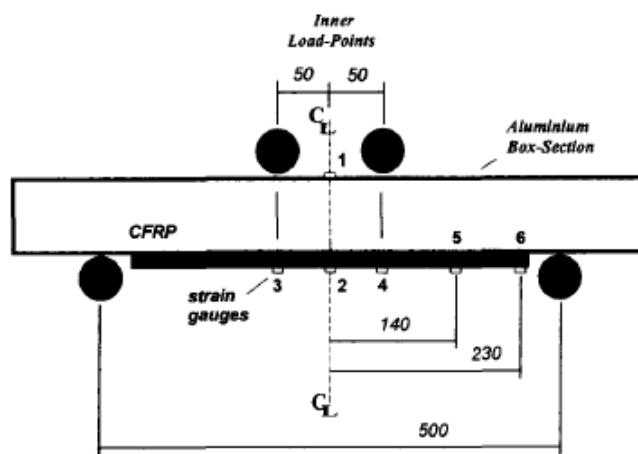


Figura 31 - Configuração do ensaio de 4 pontos realizado.[46]

Tabela 11 - Variantes do ensaio de flexão a quatro pontos.[46]

<i>Tipo de perfil</i>	<i>Secção (altura-largura – espessura) (mm)</i>	<i>Vão (mm)</i>	<i>Espessura CFRP (mm)</i>	<i>Comprimento CFRP (mm)</i>
A	30 - 20 - 2	500	2	475
			0	0
B	20 - 30 - 2	500	0	475
			0	0
C-500	50 - 30 - 3	500	2	475
			0	0
C-1000	50 - 30 - 3	1000	2	975
			0	0

Conclui-se então que o reforço constituiu ganhos até 75% na rigidez e até 63% na força máxima admissível representando um aumento de peso do conjunto de apenas 7%.

Tabela 12 - Resultados obtidos. Adaptado de [46]

<i>Tipo de perfil</i>	<i>Vão [mm]</i>	<i>Rigidez à flexão [%]</i>	<i>Limite Elástico [%]</i>	<i>Força máxima[%]</i>
<i>A</i>	500	61	38	58
<i>B</i>	500	75	18	42
<i>C-500</i>	500	28	33	50
<i>C-1000</i>	1000	31	34	63

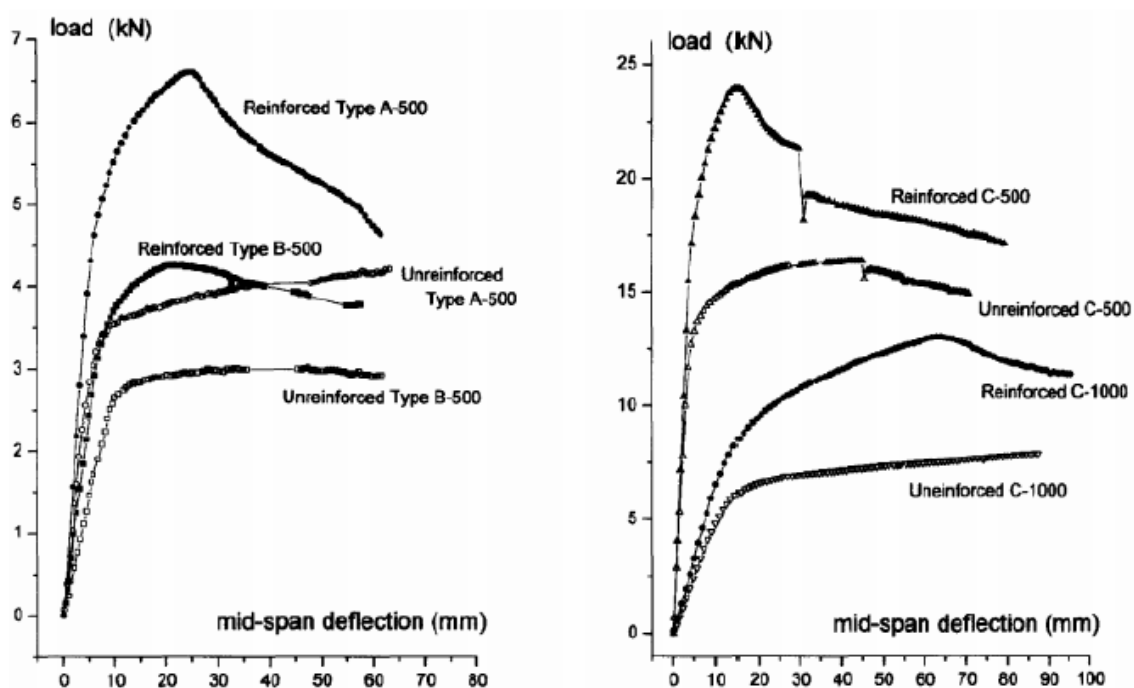


Figura 32 - Curvas força vs deslocamento dos perfis de controlo e dos perfis híbridos. [46]

2.8.2 Características de um perfil híbrido alumínio/CFRP curto e de secção quadrada sob carga quasi-estática transversal

O trabalho realizado por (Kim *et al.*, 2013) é destacado por dar alguma sensibilidade à relação entre a adesão e a orientação das fibras, aqui, foi feita a análise de perfis de alumínio 6063 no estado T5 de comprimento 200mm e secção transversal quadrada e oca de 45mm de lado e 1.4mm de espessura. O compósito utilizado consistia em pré-impregnados unidirecionais de fibra de carbono de elevada resistência e matriz de resina epóxico com a catalogação USN150B derivados da *SK Chemical Corporation*. Como tratamento superficial recorreu-se a lixa de gramagem 60 e limpeza em banho de acetona durante 5 minutos. Os perfis foram então envolvidos com o pré-impregnado a utilizar segundo diversas direções e por forma a perfazer espessuras de compósito diferentes, estes dados estão expostos na Tabela 13. Após empilhamento os perfis foram curados em autoclave sob a pressão e temperatura indicadas ao pré-impregnado.

Tabela 13 - Configuração dos perfis utilizados. [47]

Specimen type	Dimension $a \times b \times t \times l$ (mm)				Weight (g)	b/t	S/b
Without CFRP laminate							
Al SHS beam	45.00	45.00	1.39	200.00	131.12	32.4	3.8
0.584 mm laminate thickness							
Al/CFRP [0°] ₄ SHS beam	45.85	45.85	1.96	200.00	159.77	23.4	3.7
Al/CFRP [90°] ₄ SHS beam	46.16	46.16	1.89	200.00	158.39	24.4	3.7
Al/CFRP [0°/90°] ₂ SHS beam	45.99	45.99	1.95	200.00	158.47	23.6	3.7
Al/CFRP [+45°/-45°] ₂ SHS beam	46.18	46.18	1.96	200.00	160.18	23.6	3.7
Al/CFRP [0°/+45°/90°/-45°] SHS beam	45.89	45.89	1.95	200.00	159.13	23.5	3.7
1.168 mm laminate thickness							
Al/CFRP [0°] ₈ SHS beam	46.90	46.90	2.54	200.00	186.35	18.5	3.6
Al/CFRP [90°] ₈ SHS beam	47.05	47.05	2.49	200.00	187.70	18.9	3.6
Al/CFRP [0°/90°] ₄ SHS beam	47.15	47.15	2.51	200.00	191.01	18.8	3.6
Al/CFRP [+45°/-45°] ₄ SHS beam	47.47	47.47	2.55	200.00	191.54	18.6	3.6
Al/CFRP [0°/+45°/90°/-45°] ₂ SHS beam	47.20	47.20	2.52	200.00	189.83	18.7	3.6
1.752 mm laminate thickness							
Al/CFRP [0°] ₁₂ SHS beam	48.19	48.19	3.03	200.00	222.90	15.9	3.5
Al/CFRP [90°] ₁₂ SHS beam	48.35	48.35	3.02	200.00	222.57	16.0	3.5
Al/CFRP [0°/90°] ₆ SHS beam	48.36	48.36	3.02	200.00	222.57	16.0	3.5
Al/CFRP [+45°/-45°] ₆ SHS beam	48.52	48.52	3.12	200.00	224.00	15.6	3.5
Al/CFRP [0°/+45°/90°/-45°] ₃ SHS beam	48.57	48.57	3.08	200.00	223.58	15.8	3.5

Al: aluminum, CFRP: carbon fiber reinforced plastic, SHS beam: Square hollow section beam.
a: Width, b: height, t: thickness, l: length, S: test span.

Um dos objetivos deste estudo consistia em conseguir um esquema de falha progressiva no híbrido associando o modo de falha frágil dos compósitos à deformação plástica verificada no alumínio, para isto, o perfil de alumínio não reforçado foi submetido a um ensaio de flexão de três pontos cuja configuração se encontra descrita na Figura 33 de forma a perceber o seu comportamento, este pode ser observado na Figura 34 e dividido em 4 fases distintas, a fase I correspondente a um comportamento linear elástico, II a uma comportamento plástico, III ao colapso do perfil por ser ultrapassada a força máxima admissível e IV onde é verificado um comportamento estável e constante uma vez que a ponta

da máquina se encontra completamente inserida na concavidade do perfil, concavidade esta criada pela aplicação da força no centro do mesmo.[47]

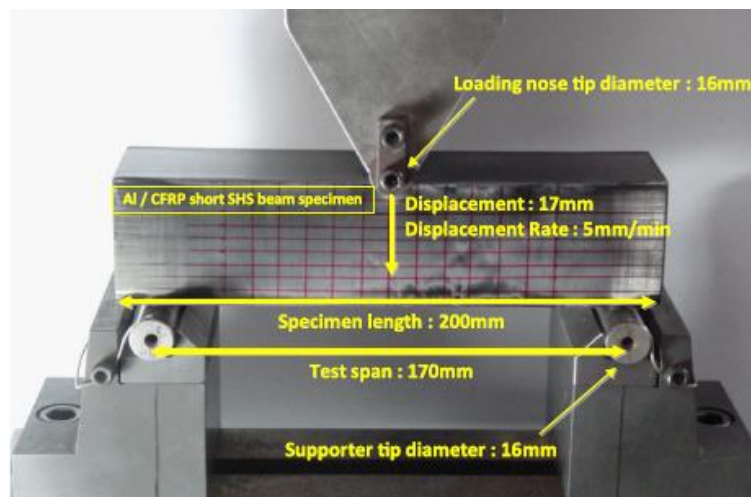


Figura 33 - Representação do ensaio de flexão a três pontos e apresentação dos seus parâmetros.[47]

Nos perfis híbridos verificou-se que nas regiões I e II houve um aumento de rigidez e um aumento da força máxima admissível, nas regiões III e IV ocorreu um decréscimo gradual da força.

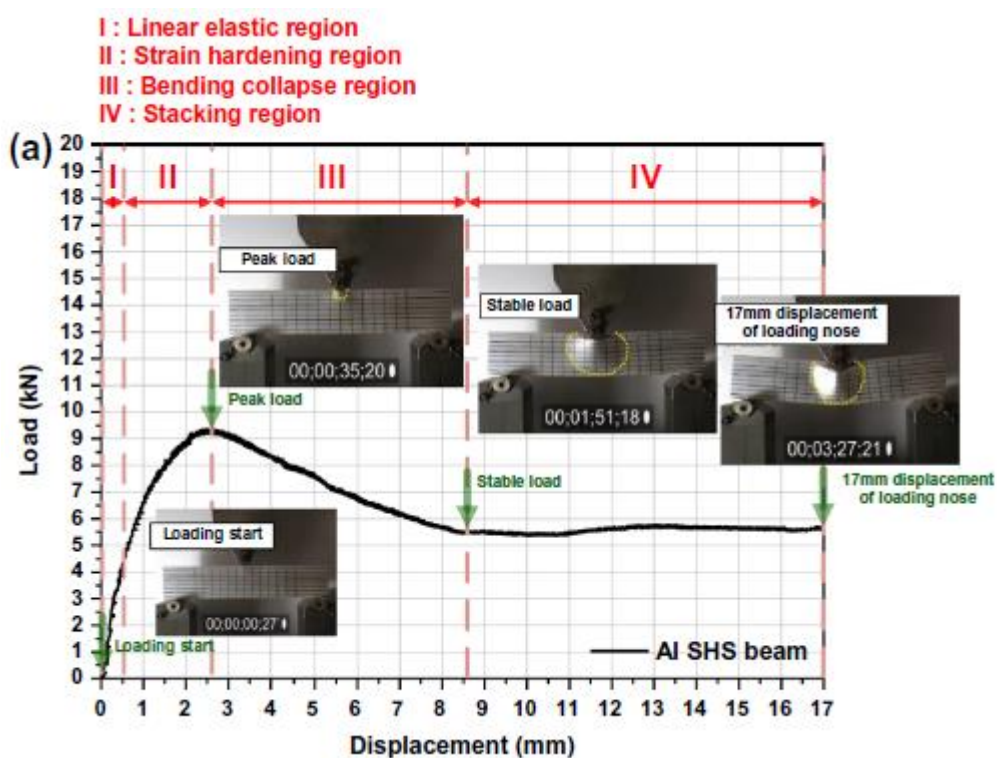


Figura 34 - Curva força vs deslocamento dividida em quatro partes distintas. [47]

Nos gráficos da Figura 35 e na Tabela 14 percebe-se que a hibridização dos perfis acarretou vantagens, verifica-se uma melhoria mínima de 33% na força máxima para o caso do laminado de 4 camadas perfazendo uma espessura de 0.584mm com orientação de fibras de 0° relativamente ao eixo do perfil e observa-se ainda uma melhoria máxima de 126% para o laminado de 8 camadas de espessura final de 1.752mm com orientação alternada de +45° e -45°. Quando a orientação das fibras é de 0° a adesão ao perfil é mais dificultada graças à falta de orientação de fibras na direção transversal ao mesmo. Seria de esperar que para a orientação das fibras de 90° os valores fossem máximos, mas tal não é verificado e pode ser justificado pela ausência de fibras na direcção em que o perfil se deforma, ou seja, a solução ideal seria aquela onde existisse um compromisso entre a adesão e a elongação das fibras por tração.

De uma forma geral, aparenta existir uma relação entre a orientação das fibras e a força máxima obtida uma vez que na presença de fibras segundo todas as direções de ensaio as forças admissíveis resultantes foram máximas, excetuando apenas o caso do laminado de 1,752mm de espessura com orientação alternada de +45° e -45°. Para a aplicação de uma força de valor fixo foram verificados melhores resultados, em todos os laminados testados, quando existiam fibras segundo todas as direções de ensaio.

Como análise final tem-se que o aumento da espessura do laminado traduz um aumento da rigidez e resistência do conjunto e quanto maior o número de orientações das camadas deste laminado melhores serão também os resultados finais. As fibras na direção transversal ao perfil melhoram a adesão e as fibras na direcção axial melhoram as propriedades pelo que é será necessário o uso de um compromisso favorável.[47]

Tabela 14 - Resumo dos resultados obtidos.[47]

Specimen type	P_{max} (kN)	P_s (kN)	CFE (%)	E_t (J)
<i>Without CFRP laminate</i>				
Al SHS beam	9.02	5.39	59.77	104.82
<i>0.584 mm laminate thickness</i>				
Al/CFRP [0°] ₄ SHS beam	12.02	5.10	42.44	133.02
Al/CFRP [90°] ₄ SHS beam	12.53	6.41	51.19	130.38
Al/CFRP [0°/90°] ₂ SHS beam	12.44	6.93	55.69	138.02
Al/CFRP [+45°/-45°] ₂ SHS beam	13.28	6.95	52.34	146.22
Al/CFRP [0°/+45°/90°/-45°] ₄ SHS beam	13.84	7.39	53.4	154.01
<i>1.168 mm laminate thickness</i>				
Al/CFRP [0°] ₈ SHS beam	12.54	5.54	44.21	138.89
Al/CFRP [90°] ₈ SHS beam	14.25	8.72	61.18	169.00
Al/CFRP [0°/90°] ₄ SHS beam	16.42	8.73	53.16	185.59
Al/CFRP [+45°/-45°] ₄ SHS beam	16.94	8.60	50.75	190.48
Al/CFRP [0°/+45°/90°/-45°] ₂ SHS beam	17.36	9.07	52.27	197.06
<i>1.752 mm laminate thickness</i>				
Al/CFRP [0°] ₁₂ SHS beam	16.24	5.83	35.9	173.16
Al/CFRP [90°] ₁₂ SHS beam	16.83	11.46	68.07	211.13
Al/CFRP [0°/90°] ₆ SHS beam	19.25	10.38	53.94	219.30
Al/CFRP [+45°/-45°] ₆ SHS beam	20.40	10.45	51.21	222.33
Al/CFRP [0°/+45°/90°/-45°] ₃ SHS beam	19.41	11.00	56.67	244.25

Al: Aluminum, CFRP: Carbon fiber reinforced plastic, SHS beam: square hollow section beam.
 P_{max} : maximum (peak) load, P_s : stable load, CFE: crush force efficiency, E_t : total absorbed energy.

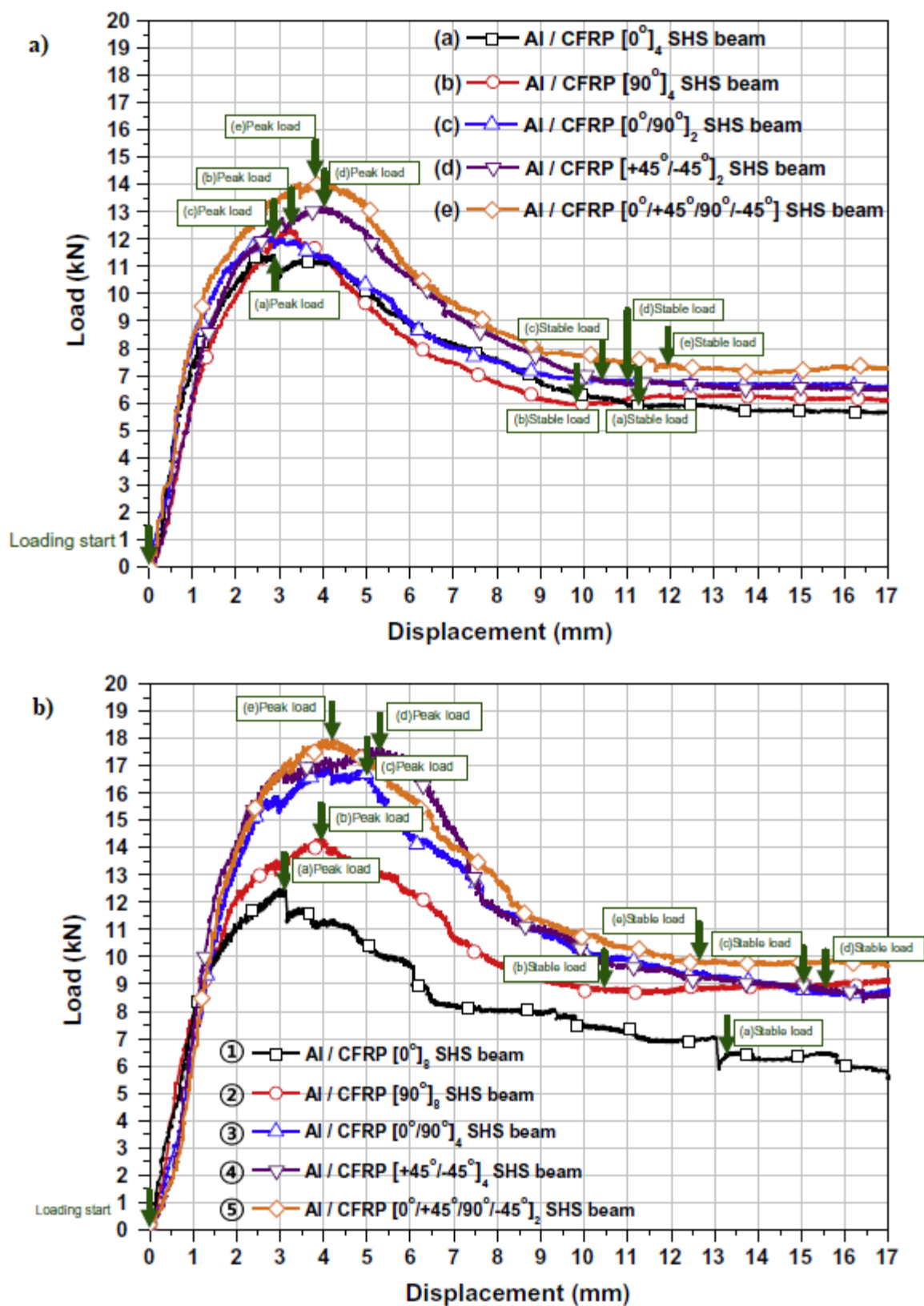


Figura 35 - Curvas força vs deslocamento: a) laminado de 4 camadas, b) laminado de 8 camadas.[47]

2.8.3 Absorção de energia sob impacto num perfil híbrido alumínio/CFRP

Por forma a investigar o efeito de sequência de empilhamento sob impacto a baixa velocidade, (Kim *et al.*, 2016) realizou um estudo similar ao anteriormente apresentado. Os perfis híbridos são compostos por perfis de alumínio 6063-T5 de secção quadrada oca (lado 45mm, comprimento 200mm e espessura 1.4mm) e compósito sob a forma de pré-impregnados unidirecionais de fibra de carbono de elevada resistência e matriz de resina epóxico com a catalogação USN150B derivados da *SK Chemical Corporation*. A configuração e espessura de empilhamento, dimensão e peso dos perfis híbridos estão apresentados na Tabela 15. De encontro ao trabalho anterior foi também efetuado um tratamento superficial por recurso a lixa de gramagem 60 e uma limpeza em banho de acetona durante 5 minutos.[48]

Tabela 15 - Configuração e dados dos perfis.[48]

Specimen type	Dimension (width × height × thickness × length (mm))	Weight (g)	
Without CFRP laminate	Al SHS beam	45.00 × 45.00 × 1.40 × 200.00	130.4
Laminate thickness of 0.584 mm	Al/CFRP [0] ₄ SHS beam	46.55 × 46.10 × 2.20 × 200.00	170.7
	Al/CFRP [90] ₄ SHS beam	46.50 × 46.50 × 2.15 × 200.00	170.6
	Al/CFRP [0/90] ₂ SHS beam	46.70 × 46.70 × 2.25 × 200.00	171.4
	Al/CFRP [+45/−45] ₂ SHS beam	46.55 × 46.50 × 2.15 × 200.00	170.7
	Al/CFRP [0/+45/90/−45] ₁ SHS beam	46.50 × 46.50 × 2.15 × 200.00	170.6
Laminate thickness of 1.168 mm	Al/CFRP [0] ₈ SHS beam	47.70 × 47.70 × 2.65 × 200.00	205.3
	Al/CFRP [90] ₈ SHS beam	47.65 × 47.65 × 2.55 × 200.00	205.3
	Al/CFRP [0/90] ₄ SHS beam	47.70 × 47.70 × 2.65 × 200.00	202.8
	Al/CFRP [+45/−45] ₄ SHS beam	47.85 × 47.85 × 2.70 × 200.00	204.2
	Al/CFRP [0/+45/90/−45] ₂ SHS beam	47.85 × 47.85 × 2.70 × 200.00	204.2

Tendo por base a norma ASTM D7136, foi desenvolvida uma máquina-teste de impacto por queda de peso, esta máquina e as condições de ensaio são as apresentadas na Figura 36. Foram testados três provetes para cada configuração construtiva.

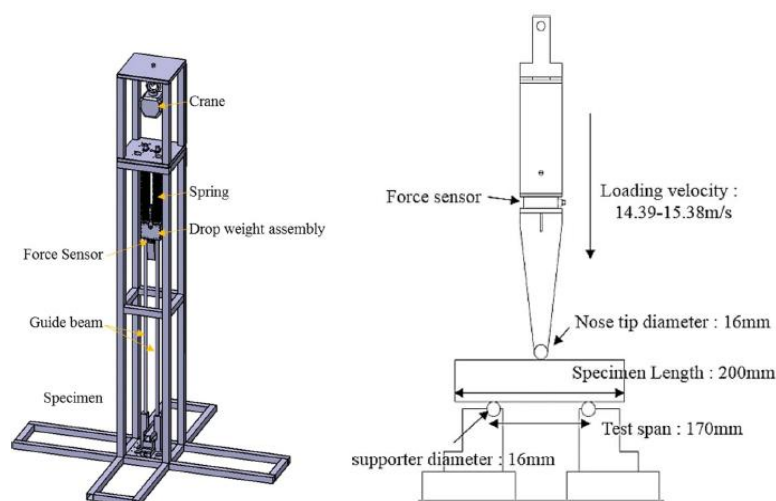


Figura 36 - Máquina-teste de impacto por queda de peso criada (esq.) e condições de ensaio praticadas (dir.).[48]

Os efeitos da sequência de empilhamento e da espessura do laminado foram analisados por observação dos espécimes testados e por comparação das respectivas curvas força-deslocamento, os dados alusivos às referidas curvas, à energia absorvida por cada provete e à eficiência de absorção energética sob impacto estão apresentados na Tabela 16. A eficiência de absorção energética, definida como CFE, foi calculada pela razão entre a carga média e a carga máxima admitidas por cada provete, valores altos de eficiência implicam que o material possa ser visto como um quase ideal absorvedor de energia, o parâmetro SEA representa a absorção de energia específica por forma a que as alterações geométricas derivadas do aumento de camadas de empilhamento não interfiram na análise.

Tabela 16 - Resultados experimentais em resumo.[48]

Specimen type		P_{max} (kN)	P_{mean} (kN)	E_t (J)	SEA (J/g)	CFE (%)
Without CFRP laminate	Al SHS beam	10.98	7.07	123.65	0.94	64.92
Laminate thickness of 0.584 mm	Al/CFRP $[0]_4$ SHS beam	13.77	10.34	177.93	1.03	75.10
	Al/CFRP $[90]_4$ SHS beam	14.44	10.54	180.83	1.06	72.99
	Al/CFRP $[0/90]_2$ SHS beam	15.60	11.10	190.74	1.11	71.15
	Al/CFRP $[+45/-45]_2$ SHS beam	16.08	11.57	196.88	1.17	71.95
	Al/CFRP $[0/+45/90/-45]_1$ SHS beam	15.27	11.29	197.16	1.17	73.93
Laminate thickness of 1.168 mm	Al/CFRP $[0]_8$ SHS beam	15.51	12.36	215.16	1.06	79.69
	Al/CFRP $[90]_8$ SHS beam	16.52	13.25	226.04	1.08	80.20
	Al/CFRP $[0/90]_4$ SHS beam	16.60	12.89	224.74	1.09	77.65
	Al/CFRP $[+45/-45]_4$ SHS beam	18.27	13.64	236.83	1.15	74.65
	Al/CFRP $[0/+45/90/-45]_2$ SHS beam	18.62	14.21	251.24	1.20	76.31

Note : P_{max} : Peak load; P_{mean} : Mean load; E_t : Absorbed energy.

Por análise dos resultados verifica-se que os espécimes Al/CFRP $[0/+45/90/-45]$ de ambas as espessuras foram aqueles que apresentaram maior valor de SEA e de carga máxima sob impacto. O valor da absorção de energia específica desta configuração de empilhamento é 24% superior para a espessura de 0.584mm e 28% superior para a espessura de 1.168mm quando comparados com o perfil de alumínio não reforçado. A carga máxima admissível é também superior, 35% para a menor espessura e 64% para a maior. Como todas as orientações de empilhamento testadas estavam combinadas os mecanismos individuais de resistência à falha trabalharam em conjunto o que resultou num positivo efeito sinérgico de resistência global. Comparando estes resultados com os do estudo anteriormente apresentado percebe-se que a aplicação sob impacto de uma carga resulta em maior dano estrutural sob a forma de delaminação, rotura da matriz e desacoplamento da matriz em relação às fibras e ao alumínio. Os resultados de ambos os testes demonstram uma melhoria muito significativa quando o uso de diferentes orientações é posto em prática e confirma que a adesão é melhor quando as fibras adjacentes ao perfil estão na direção transversal ao mesmo.[48]

2.8.4 Laminados de alumínio e fibra de carbono resistentes à corrosão galvânica

O estudo realizado por (Wang *et al.*, 2007) tem como objetivo solucionar o problema de corrosão galvânica verificada entre o alumínio e a fibra de carbono que ocorre devido à diferença de potencial eletroquímico entre estes materiais. Para tal, foram construídos laminados de alumínio 2024-T3 com a espessura de 0,5mm e CFRP sob a forma de pré-impregnado de matriz de epóxico com 0,219mm de espessura com a sequência de empilhamento [Al/0/90/90/0/Al] e sujeitos ao processo de cura típica do material compósito por si só. De modo a tentar minimizar a corrosão galvânica foi testado um novo tratamento superficial do alumínio que consiste na aplicação de um revestimento nano-compósito, revestimento este composto por duas camadas distintas, uma camada de alumina obtida por anodização com ácido sulfúrico e outra de dióxido de silício reforçado por um revestimento orgânico/inorgânico sob a forma sol-gel. A configuração anteriormente descrita está representada na Figura 37. Realce-se que, geralmente, um tratamento de anodização conduz a uma camada protetora de baixa espessura e a um aspeto poroso por parte da superfície sendo esta normalmente selada por processos hidrotérmicos, contudo, a rugosidade da superfície promove a adesão e portanto esta não sofreu tratamento pós-anodização. [49]

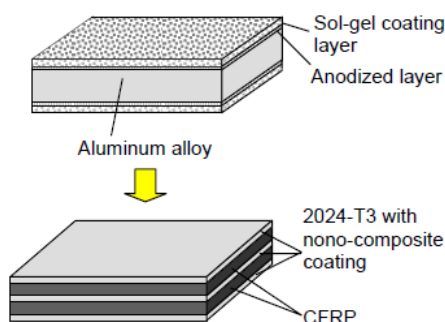


Figura 37 - Representação do revestimento utilizado e da sequência de empilhamento.[49]

De forma a compreender melhor o fenómeno de corrosão no híbrido foram feitos três tipos de testes:

- Teste de potencial eletroquímico de cada material em relação a uma referência dada como nula;
- Teste de corrosão galvânica direta entre os dois materiais usados;
- Teste de corrosão a longo prazo do laminado empilhado.

O teste de potencial eletroquímico em relação a uma referência mostrou que a anodização e a camada de nano-compósito em conjunto conseguem reduzir para metade o valor do potencial eletroquímico do laminado quando comparado com o alumínio não reforçado em relação ao carbono. Por sua vez, o teste de corrosão a longo prazo feito ao laminado mostrou que quanto maior o tempo de ensaio maiores os danos de corrosão em laminados sem tratamento de anodização e sem o revestimento em estudo, no entanto, nos laminados anodizados e revestidos mesmo após um período de 900 horas o comportamento do conjunto à corrosão mostrou-se muito satisfatório.

Quanto ao teste de corrosão galvânica entre os dois materiais, teste este que se tentará replicar no trabalho experimental da presente dissertação e, por isso, merece agora maior destaque, procedeu-se à montagem representada na Figura 38. Neste teste as amostras foram inseridas numa solução aquosa de 3%NaCl continuamente agitada por uma bomba de ar durante o tempo de ensaio de uma hora a uma temperatura constante de 35°C. A corrente elétrica entre os espécimes foi medida e registada e encontra-se representada na Figura 39. Os espécimes de alumínio AS-2024-T3 foram anodizados e revestidos com a camada protectora acima referida, a designação A-2024-T3 trata espécimes somente anodizados enquanto que a designação S-2024-T3 é referente somente à aplicação do revestimento protector, já os espécimes 2024-T3 referem o alumínio no seu estado fornecido, sem qualquer tipo de tratamento posterior. Pode ainda ser referido que, nos espécimes AS-2024-T3, foram feitos dois ensaios e daí foi calculado o valor médio entre os mesmos.[49]

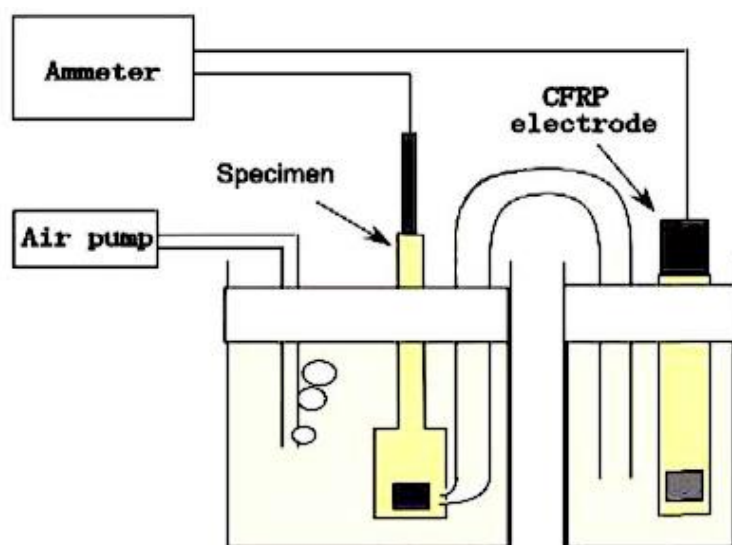


Figura 38 - Montagem do teste de corrosão galvânica efetuado.[49]

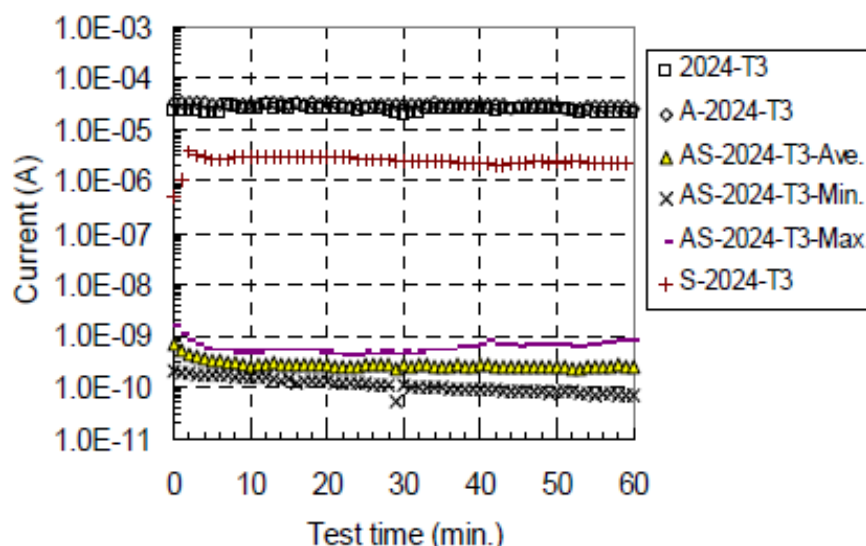


Figura 39 - Representação da corrente elétrica verificada nos diferentes provetes.[49]

Os resultados obtidos mostram que a corrosão entre o alumínio no seu estado fornecido e o anodizado são caracterizados aproximadamente pelo mesmo valor de corrosão para com o CFRP, já o revestimento aplicado reduziu significativamente este valor. Quanto aos espécimes anodizados e revestidos a melhoria de corrosão para com o CFRP foi reduzida em cinco ordens de grandeza quando comparada com o alumínio fornecido o que confirma largamente a viabilidade do tratamento aplicado e a quase prevenção completa da corrosão entre os materiais.

2.8.5 Tratamento e caracterização superficial da liga de alumínio 6061 para ligações adesivas

A experiência realizada por (Saleema *et al.*, 2012) visa compreender a influência da preparação superficial na união de substratos de alumínio por ligação adesiva. Para isso, a remoção da camada nativa de alumina inerente aos substratos foi feita utilizando um banho ultra-sônico de uma solução de hidróxido de sódio de modo a que resultasse uma superfície rugosa fruto da formação de uma nova camada de alumina irregular ao longo do plano do substrato. Foram então testadas as propriedades adesivas das superfícies tratadas através de um ensaio de tração de junta de sobreposição simples.[50]

A solução de hidróxido de sódio utilizada tinha concentração 0,1M e foi preparada utilizando pérolas de NaOH e água destilada e as dimensões dos substratos de alumínio utilizados foram 38mm x 25.4mm x 3.2mm, estes substratos foram devidamente desgordurados e limpos com acetona. Após limpeza foram colocados num banho ultra-

sónico da solução de hidróxido de sódio preparada durante intervalos de tempo de 5, 30 e 60 minutos. Terminado o tempo de imersão foram limpos e mergulhados em água destilada durante 5 minutos de forma a que a reação terminasse, posteriormente foram secos no forno durante 16 horas a 70°C. Por fim, os substratos foram colados por um adesivo de resina epoxy sendo a área de sobreposição de dimensão 12.7mm x 25.4mm e a espessura estimada do adesivo de 250µm. [50] As superfícies resultantes dos diferentes intervalos de tempo de tratamento superficial foram analisadas segundo inúmeros métodos. Nesta instância serão apresentados, na Figura 40, os resultados de microscopia electrónica (SEM), na Figura 41 os resultados de uma análise à rugosidade levada a cabo num perfilómetro ótico, na Figura 42 os resultados da medição da espessura dos substratos antes e após tratamento, na Figura 43 a tensão de corte resultante dos ensaios de tração de sobreposição simples e na Figura 44 o aspeto das juntas coladas após rotura.

A imersão no banho de solução de base forte conduz a uma reação química entre o NaOH e o alumínio, como demonstra a Figura 40 se a duração do banho for de 5 minutos apenas ocorre uma limpeza profunda da superfície havendo remoção de agentes contaminantes de origem orgânica que a acetona por si só não é capaz de remover, com o aumento do tempo de banho para 30 e 60 minutos verifica-se um aparecimento gradual de crateras microscópicas e um aumento na exposição das fronteiras de grão, o que promove o aumento da rugosidade superficial com o avançar do tempo de banho.

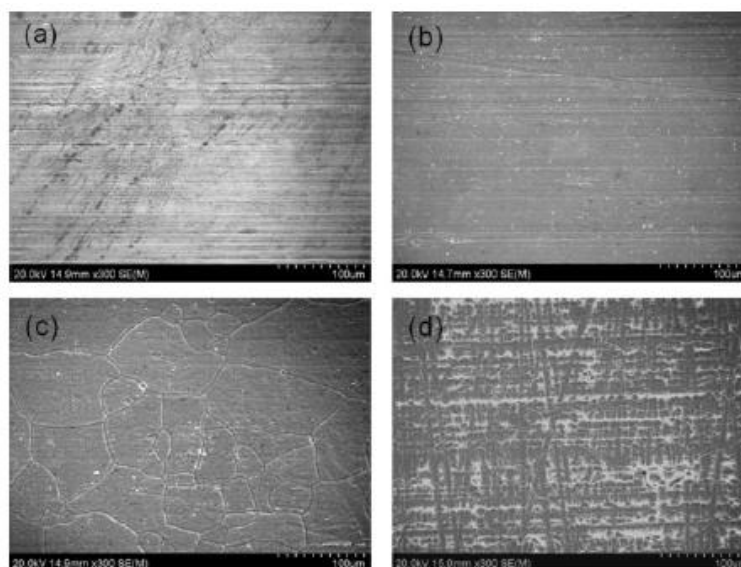


Figura 40 - Imagens SEM de superfície da liga 606: a) após limpeza, e após banho ultra-sónico de solução 0,1M de NaOH durante b)5min, c)30min e d)60min.[50]

No que toca à análise da própria rugosidade verifica-se que um intervalo de tempo de imersão de 5 minutos conduz a um amaciamento da superfície. No entanto, passado este intervalo de tempo limite é observável um aumento do valor da rugosidade com o tempo graças ao intensificar da reação química. O decréscimo inicial da rugosidade justifica-se pela limpeza inicial de superfície anteriormente descrita.

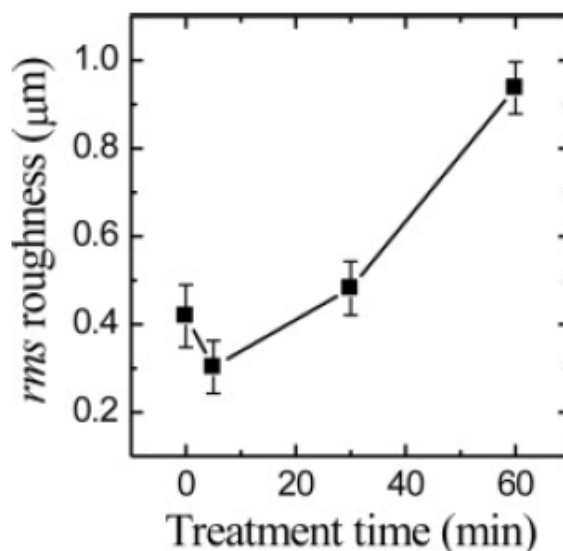


Figura 41- Rugosidade superficial em função do tempo de tratamento.[50]

Com o decorrer da reação química durante o banho seria de esperar que ocorresse perda de material por parte do substrato, no entanto, a medição da espessura após diferentes intervalos de tempo demonstra que a quantidade de material removido é muito pequena podendo até ser considerada desprezável.

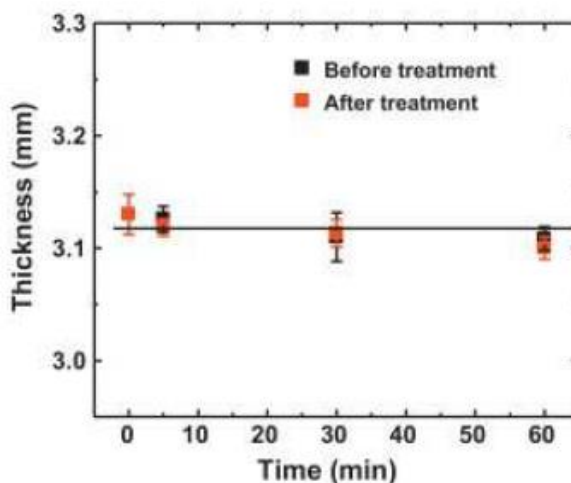


Figura 42 - Influência do tempo de banho na espessura dos substratos.[50]

Quanto ao ensaio de tração de sobreposição simples, é verificado que todos os tratamentos efetuados acarretam melhorias, contudo, o tratamento químico de 30 minutos mostrou ser o que apresenta resultados mais regulares, com tensões a rondar os 21.8MPa com desvios de 0.5MPa e que representam uma melhoria de 50% comparativamente aos provetes não tratados. Para o intervalo de tempo de 30 minutos que apenas foram somente verificadas roturas coesivas. Estes dados podem ser observados na Figura 43 e daqui é possível concluir que o intervalo de tempo de banho de 30 min se mostrou como sendo o mais vantajoso.

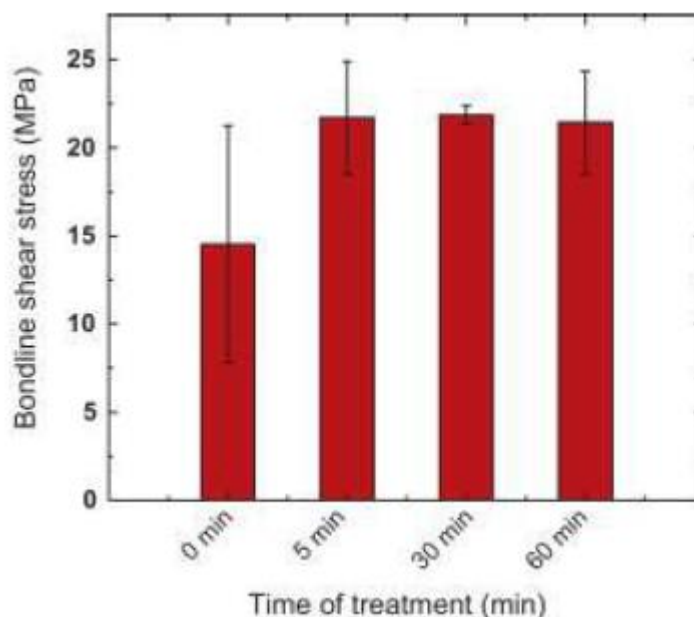


Figura 43 - Influência do tempo de banho na tensão de corte da junta de sobreposição simples.[50]

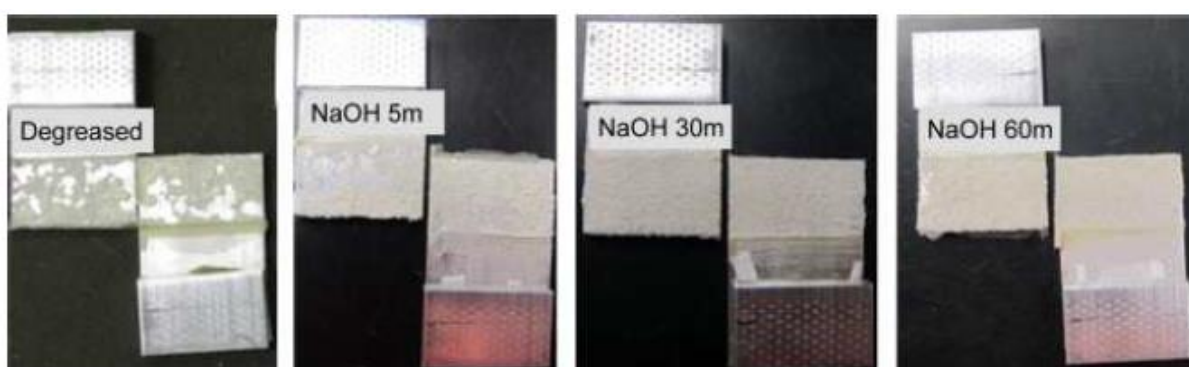


Figura 44 - Aspeto das juntas após a rotura com os substratos previamente: desengordurados e tratados em banho de NaOH durante 5, 30 e 60 min (da esquerda para a direita).[50]

Visualmente verifica-se que qualquer um dos intervalos de tempo praticados promove uma rotura do tipo coesivo ao contrário do observado no caso de os substratos serem apenas desengordurados onde se verifica um mecanismo de falha do tipo misto com zonas de falha adesiva e outras de falha coesiva.

Os resultados apresentados demonstram que o tratamento superficial do alumínio utilizando um banho de NaOH pode ser considerado como um meio simples e eficaz de atingir melhores propriedades adesivas na junção de substratos de alumínio com um adesivo de matriz de epóxico sem quem seja necessário recorrer a técnicas/materiais de elevado custo, ao uso de temperaturas elevadas e sem influenciar a qualidade dos substratos.

3 Trabalho experimental

3.1 Considerações gerais

O trabalho experimental da presente dissertação centra-se, essencialmente, no estudo das propriedades mecânicas e adesivas dos perfis híbridos alumínio/compósito de matriz polimérica. De modo a ganhar sensibilidade sobre o assunto foram produzidos perfis híbridos de alumínio e compósito com matriz de resina de epóxido reforçada por fibras de carbono. Estes perfis foram depois sujeitos a diversos ensaios mecânicos e análises laboratoriais com o intuito de perceber melhor as alterações introduzidas com o processo de hibridização praticado. Para tal, foram comparados os resultados dos perfis produzidos com os do perfil de alumínio não reforçado. Como forma de análise às propriedades adesivas dos provetes foram testados diferentes acabamentos superficiais. Foi também testada a influência do aproveitamento das temperaturas de saída de extrusão na cura do compósito a utilizar.

Este capítulo tem como finalidade enunciar e descrever os métodos, materiais e equipamentos utilizados na presente dissertação, salientar, dentro de cada tópico, as dificuldades e limitações inerentes ao processo e identificar o trabalho preparatório realizado para a execução da atividade experimental.

3.2 Planeamento estrutural e material dos provetes

A estrutura e o material dos provetes a produzir foram pensados com o objetivo de fornecer dados relevantes sobre as propriedades mecânicas do sistema híbrido em causa e, também, de perceber melhor a influência da preparação superficial nas mesmas.

Com base nos ensaios pretendidos a geometria do perfil foi definida e o perfil escolhido foi um perfil quadrangular pela sua versatilidade, o que possibilitaria o uso dos excedentes em trabalhos futuros. Quanto à fibra de carbono a utilizar foram apresentadas

algumas limitações, inicialmente foi escolhido um pré-impregnado de fibra de carbono e matriz epóxico de cura rápida por se achar que este iria exatamente de encontro à vertente real de aplicação do carbono imediatamente após a extrusão do alumínio, no entanto, verificou-se depois que este mesmo pré-impregnado não se encontrava dentro do prazo de validade e por isso acabou por se utilizar um pré-impregnado de fibra de carbono e matriz epóxico de cura média.

As amostras foram planeadas separadamente para cada ensaio por forma a conseguir, desta forma, precisar as propriedades e efeitos a obter.

Após consultar o Laboratório de Ensaio Tecnológicos da FEUP foram definidos limites dimensionais das amostras para os ensaios de flexão, impacto e tração de sobreposição simples, limites estes que foram pensados de acordo com a capacidade das máquinas de ensaios e das próprias ferramentas de teste. Estes limites dimensionais foram então conjugados com as dimensões descritas nas normas de ensaio e nos artigos acima enunciados definindo assim as dimensões das amostras/provetes a produzir. Os restantes ensaios a efetuar, por serem de menor repetibilidade e por possuírem um número muito menor de amostras processadas mostraram-se de planeamento mais simples e menos demorado.

3.3 Caraterização do material utilizado

3.3.1 Perfil de alumínio

Os perfis utilizados são perfis de secção quadrangular de lado 30mm e espessura 2mm como demonstra a Figura 45.

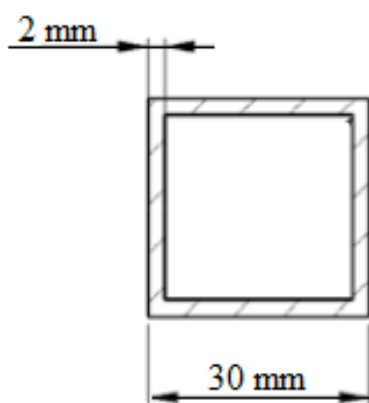


Figura 45 - Secção transversal (esq.) e apresentação (dir.) do perfil utilizado.

Não foi comunicada, por parte do revendedor, a liga de alumínio em questão, como tal, foi feita uma análise à composição química do mesmo. Esta análise foi realizada no laboratório de metalografia do INEGI e os resultados obtidos estão sumariados na Tabela 17 e apresentados na totalidade no Anexo A. Na referida análise foram efetuadas três medições químicas sendo depois calculados os resultados apresentados por média aritmética.

Tabela 17 - Composição química da liga de alumínio dos perfis em causa.

<i>Elemento</i>	<i>% verificada</i>
<i>Alumínio (Al)</i>	98.8
<i>Manganês (Mn)</i>	0.0369
<i>Ferro (Fe)</i>	0.177
<i>Magnésio (Mg)</i>	0.403
<i>Silício (Si)</i>	0.481
<i>Zinco (Zn)</i>	0.0334
<i>Titânio (Ti)</i>	0.0067
<i>Crómio (Cr)</i>	0.0039
<i>Cobre (Cu)</i>	0.0109
<i>Outros (Total)</i>	0.0472

Obtidos os valores para a composição química do perfil em causa foi feita uma comparação destes com os valores tabelados das ligas de alumínio comercialmente mais comuns, as ligas 6060, 6061 e 6063, para tal, recorreu-se à norma BS EN 573-3:2009 que indica as concentrações máximas e mínimas dos elementos de liga presentes nestas ligas. A Tabela 18 apresenta essas mesmas concentrações segundo a norma referida, comparando o teor de alumínio presente foi inicialmente excluída a liga 6061, e olhando para o teor de magnésio o mesmo aconteceu com a liga 6063. A liga 6060 verifica todos os valores obtidos pela análise metalográfica do perfil pelo que se percebeu ser esta a liga em causa. As propriedades desta liga são apresentadas na Anexo B.

Tabela 18 - Composição química das ligas 6060, 6061 e 6063 segundo BS EN 573-3:2009.

<i>Elemento</i>	<i>AA 6060</i>	<i>AA 6061</i>	<i>AA 6063</i>
	%	%	%
<i>Alumínio (Al)</i>	97.8 – 99.25	95.8 – 98.61	97.45 – 99.35
<i>Manganês (Mn)</i>	0 – 0.10	0 – 0.15	0 – 0.10
<i>Ferro (Fe)</i>	0.10 – 0.30	0 – 0.70	0 – 0.35
<i>Magnésio (Mg)</i>	0.35 – 0.60	0.8 – 1.20	0.45 – 0.90
<i>Silício (Si)</i>	0.30 – 0.60	0.40 – 0.80	0.20 – 0.60
<i>Zinco (Zn)</i>	0 – 0.15	0 – 0.25	0 – 0.10
<i>Titânio (Ti)</i>	0 – 0.10	0 – 0.15	0 – 0.10
<i>Crômio (Cr)</i>	0 – 0.05	0.04 – 0.35	0 – 0.10
<i>Cobre (Cu)</i>	0 – 0.10	0.15 – 0.40	0 – 0.10
<i>Outros (Cada)</i>	0 – 0.05	0 – 0.05	0 – 0.05
<i>Outros (Total)</i>	0 – 0.15	0 – 0.15	0 – 0.15

3.3.2 Compósito

Como referido, inicialmente, a escolha do material compósito recaiu sobre um pré-impregnado de fibra de carbono e matriz polimérica de cura rápida pela sua pertinência no que toca ao aproveitamento das temperaturas do alumínio após extrusão sem que existisse quebra de cadência no processo. No entanto, este mesmo pré-impregnado não estava dentro do prazo de validade descrito pelo fornecedor pelo que não foi utilizado. Assim, o compósito utilizado foi, também, um pré-impregnado de fibra de carbono e matriz de resina de epóxido mas de cura média fornecido pelo INEGI e adquirido à SAATI. A fibra de carbono constituinte é , como demonstra a Figura 46, sobre a forma de tecido bi-dimensional e bi-direcional com orientações 0° e 90° designado por TWILL de forma a que, com base no trabalho prévio apresentado realizado por (Kim *et al.*, 2013) fosse conseguido um bom compromisso entre a adesão e as propriedades por existirem fibra orientadas nas direções longitudinal e transversal do perfil. A matriz de resina de epóxido possui a designação EF452 e as suas propriedades e estágio de cura são apresentadas no Anexo C.



Figura 46 - Pré-impregnado utilizado, sendo visível o tecido fibroso na forma Twill .

3.4 Procedimento experimental

O procedimento experimental baseou-se na construção de provetes híbridos de alumínio 6060 e pré-impregnado de fibra de carbono Twill e resina EF45, é sabido que a adesão entre estes materiais não é de todo satisfatória pelo que foram testados diferentes tipos de tratamentos superficiais ao alumínio. Percebe-se também que os tratamentos superficiais executados contribuem para o fenómeno de corrosão galvânica no híbrido, contudo, o maior foco foi conseguir melhorar a adesão entre os materiais tentando depois perceber o impacto dos mesmos tratamentos superficiais na corrosão.

3.4.1 Acabamentos superficiais

Foi testada a influência da não aplicação de qualquer tratamento superficial, da execução de granalhagem, de ataques químicos por recurso a um ácido e a uma base fortes e também da conjugação de alguns processos anteriores. Todos os provetes foram repetidamente desengordurados e limpos com acetona.

3.4.1.1 Granalhagem

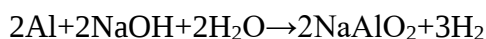
A granalhagem consistiu na projeção de partículas de alumina e foi executada numa granalhadora presente no laboratório de fundição do INEGI apresentada na Figura 47.



Figura 47 - Granalhadora.

3.4.1.2 Ataque básico

O ataque básico consistiu num banho de concentração 0,1M de hidróxido de sódio (NaOH) também conhecido por soda cáustica durante 45 minutos, o ataque químico foi executado na sala limpa do INEGI segundo condições de humidade e temperatura controladas e foram tomadas as devidas precauções experimentais, uma vez que, ocorre libertação de gases por parte da superfície. Quando um substrato de alumínio é imerso numa solução de NaOH ocorre uma reação da qual resultam aluminato de sódio sólido e hidrogénio no estado gasoso segundo a seguinte reação:



A aplicação deste tratamento promove a remoção da camada protetora de alumina presente no perfil sendo depois constituída uma nova camada de espessura inferior e de carácter mais irregular promovendo assim o aumento de rugosidade superficial. A perda material por parte do perfil é muito reduzida pelo que se considera como não influenciável no que toca às propriedades do perfil nos ensaios subsequentes. Com o avançar do tempo após o ataque químico a superfície mostrou-se mais irregular pelo que este tratamento superficial foi sempre executado no momento imediatamente anterior à montagem do híbrido de modo a evitar o aumento da camada de alumina. [50]

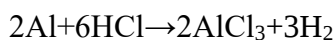
Na Figura 48 é apresentado o hidróxido de sódio utilizado e o aspeto visual da reação em causa.



Figura 48 - Hidróxido de sódio utilizado (esq.) e aspeto da reação do mesmo com o alumínio (dir.).

3.4.1.3 Ataque ácido

O ataque ácido foi feito banhando a superfície durante 5 minutos com ácido muriático que não é mais que ácido clorídrico (HCl) a 33% de diluição, também este tratamento foi executado na sala limpa do INEGI por forma a controlar as condições de temperatura e humidade e foram igualmente tomadas as devidas precauções por ocorrer libertação gasosa e por se estar a manusear um ácido relativamente forte. Este ácido foi escolhido por ser facilmente encontrado em lojas de bricolagem e por ser utilizado em processos de limpeza de alumínio e remoção da sua camada superficial de alumina. Quando um substrato de alumínio é colocado num banho de ácido clorídrico ocorre a libertação gasosa de hidrogénio e de cloreto de alumínio em estado aquoso segundo a reação:



Tal como na reação com a base forte, também no caso de uso de um ácido a rugosidade superficial é visivelmente aumentada e a perda material é de baixo valor sendo desconsiderada quando comparadas as propriedades dos perfis tratados aos não tratados. Foi também controlado o tempo de espera entre a realização do tratamento superficial e a montagem do híbrido de modo a evitar a alteração e corrosão da superfície. Na Figura 49 é apresentado o ácido muriático utilizado e a reação que ocorre sendo visível a libertação gasosa. [51],[52]

Clarifique-se que, quando na presente dissertação, se fizer referência à execução de tratamentos superficiais, os mesmos serão feitos segundo as condições apresentadas anteriormente.



Figura 49 - Ácido muriático utilizado (esq.) e aspecto da reação do mesmo com o alumínio (dir.).

3.4.2 Montagem e cura do híbrido

A adesão entre materiais no processo de montagem do híbrido foi feita sem recurso a qualquer adesivo sendo inteiramente conseguida pela resina do pré-impregnado utilizado. Com a não aplicação de qualquer tratamento superficial ao alumínio a adesão não foi conseguida o que demonstra bem a verdadeira dificuldade em aderir os materiais em questão. Mais adiante serão esclarecidas as dimensões e pormenores dos provetes respectivos a cada ensaio, aqui será feita uma abordagem sobre a sequência de trabalho comum à montagem dos híbridos:

- A. Corte dos perfis segundo as dimensões apropriadas;
- B. Corte do pré-impregnado após estabilização da temperatura do mesmo segundo as dimensões desejadas, uma vez que este se encontrava conservado a -14°C ;
- C. Aplicação dos tratamentos superficiais indicados a cada perfil;
- D. Secagem/sopragem e limpeza abundante com acetona;
- E. Pré-aquecimento dos perfis logo após a limpeza dos provetes de forma a evitar a corrosão da superfície (uma pequena parte dos perfis não foi pré-aquecida);
- F. Empilhamento manual do pré-impregnado no perfil;
- G. Processo de cura e arrefecimento na prensa de pratos quentes do INEGI, apresentada na Figura 50, envolvendo os provetes em desmoldante;
- H. Inspeção visual dos provetes e se necessário repetição do processo.



Figura 50 – Processo de cura e arrefecimento levado a cabo na prensa de pratos quentes.

Foi testado o efeito do aproveitamento das temperaturas de saída do processo de extrusão por este ser um ponto importante para a viabilidade do híbrido, ponto que garante a continuidade e rentabilidade do fabrico de perfis. Para tal, na maioria dos provetes foi feito um pré-aquecimento do perfil de alumínio até à temperatura de cura do pré-impregnado e tentou-se perceber o impacto deste pré-aquecimento criando também provetes onde o empilhamento foi feito a frio.

Quanto ao processo de cura, foi feito de duas formas distintas, uma para os provetes sem pré-aquecimento e outra para os provetes pré-aquecidos, ambos os ciclos de cura estão apresentados na Figura 51.

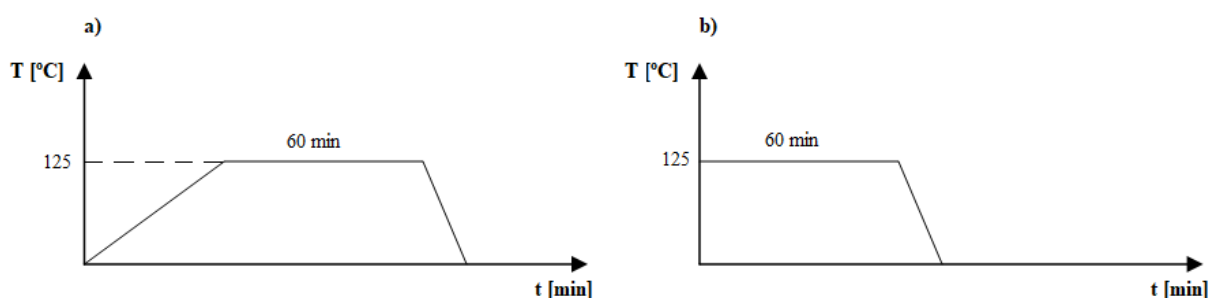


Figura 51 - Ciclos de cura dos híbridos: a) perfis sem pré-aquecimento, b) perfis com pré-aquecimento.

Nos perfis sem pré-aquecimento o empilhamento realizou-se a frio, aquecendo-se o híbrido em rampa até à temperatura de cura de 125°C com a aplicação de uma pressão de 0.2MPa (este aquecimento tinha uma duração de cerca de 20 min). Posto isto, as condições de temperatura mantiveram-se estáveis durante 60 min e, posteriormente, o arrefecimento foi

feito por auxílio de um permutador de água até cerca de 40°C, este arrefecimento demorou cerca de 8 min.

Nos perfis pré-aquecidos procedeu-se ao empilhamento após atingida a temperatura de 125°C sendo depois controlado o intervalo de tempo de 60 min e então aplicado o arrefecimento descrito acima.

É necessário referir que a taxa de sucesso do processo não foi total uma vez que, como dito anteriormente e agora representado na Figura 52, sem preparação superficial a adesão não foi conseguida e o empilhamento do compósito foi dificultado (na maioria dos provetes) por ser feito em perfis pré-aquecidos, a elevada temperatura tornava os perfis difíceis de manusear e promovia a liquidação da resina aquando do toque, assim, por desalinhamento do compósito alguns provetes não passaram na inspeção visual final tendo posteriormente de ser refeitos. Por indicação dos técnicos do INEGI foi aconselhado que não fossem processados mais de dois provetes de cada vez na prensa de pratos quentes, pois, apesar das mesas da prensa serem retificadas podem existir desvios promovendo assim uma distribuição não uniforme de pressão em toda a área processada.

A elevada taxa de ocupação da prensa de pratos quentes promoveu a redução do tempo de cura aconselhado de 90min para 60min e reduziu o número de provetes de cada espécie para três.



Figura 52 - Híbrido com adesão conseguida (frente), e híbrido não aderido (atrás).

A caracterização das propriedades mecânicas e do fenómeno de adesão dos híbridos construídos e processados foram depois avaliadas pelos ensaios imediatamente descritos abaixo.

3.4.3 Flexão a quatro pontos

Por forma a perceber melhor a influência da hibridização e dos tratamentos superficiais efetuados foi realizado um ensaio de flexão a quatro pontos, que consiste na aplicação de uma força em dois pontos num componente simplesmente apoiado noutros dois pontos promovendo a flexão do mesmo até a um ponto pretendido ou até à rotura, no caso dos materiais compósitos e híbridos contendo compósitos a rotura é assinalada pela falha na adesão ou dano/quebra evidente do compósito. Devido à falta de normas próprias para o material em questão os parâmetros de ensaio foram definidos por conjugação do estudo anteriormente apresentado e desenvolvido por (Broughton *et al.*, 1997) e das limitações das máquinas e ferramentas de ensaio presentes no laboratório de ensaios da FEUP, assim as referidas condições de ensaio e dimensões dos provetes foram:

- Provetes de 500mm de comprimento;
- Distância entre rolos inferiores de 450mm;
- Distância entre rolos superiores de 100mm;
- Diâmetros dos rolos da ferramenta e do apoio de 30mm;
- Velocidade de ensaio de 5mm/min;
- Avanço máximo de 35mm.

Tal como no estudo providenciado por (Broughton *et al.*, 1997) foi apenas empilhada uma camada de pré-impregnado numa das faces do provete, face essa que previamente havia sido, ou não, tratada superficialmente, dependendo do tipo de provete, isto é representado na Figura 53.



Figura 53 - Perfil híbrido com apenas uma camada de pré-impregnado.

A Figura 54 representa dois tempos diferentes de ensaio, apesar de não ser completamente visível a face onde o pré-impregnado consta foi orientada para baixo no ensaio de tração por forma a que as fibras do tecido Twill que se encontravam no sentido axial do perfil estivessem à tração.

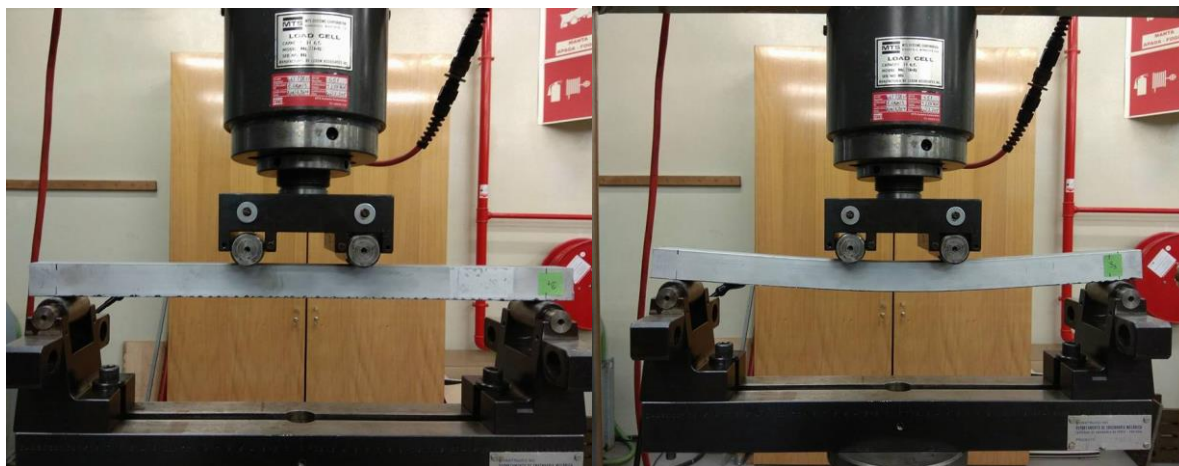


Figura 54 - Ensaio de tração a quatro pontos, representação do instante inicial e de um qualquer instante durante o ensaio.

Os diferentes provetes com diferentes tratamentos de superfície e condições de aquecimento são agora apresentados, lembrando que de cada tipo foram efetuadas 3 amostras de forma a evitar possíveis erros por montagem deficiente ou qualquer tipo de procedimento errado, a preparação das amostras agora referidas e os tratamentos superficiais enunciados vão de acordo aos tratamentos e processo de montagem apresentados acima neste mesmo capítulo.

- **A** – Perfil de alumínio sem qualquer modificação, testado como foi fornecido, servindo assim de controlo;
- **B** – Perfil híbrido com face granalhada, previamente pré-aquecido e com uma camada de pré-impregnado;
- **C** – Perfil híbrido com face granalhada, sem qualquer pré-aquecimento e com uma camada de pré-impregnado;
- **D** – Perfil híbrido com face atacada com ácido, previamente pré-aquecido e com uma camada de pré-impregnado;
- **E** – Perfil híbrido com face granalhada e posteriormente atacada com ácido, previamente pré-aquecido e com uma camada de pré-impregnado;

- **F** – Perfil híbrido com face atacada com base, previamente pré-aquecido e com uma camada de pré-impregnado;
- **G** – Perfil híbrido com face granalhada e posteriormente atacada com base, previamente pré-aquecido e com uma camada de pré-impregnado;
- **H**- Perfil híbrido com face atacada com ácido, sem pré-aquecimento e com uma camada de pré-impregnado.

O resultado de ensaio de flexão a quatro pontos é dado pelo LVDT da própria máquina de ensaio e apresentado no software da mesma sob forma de um gráfico que relaciona a força exercida em função do deslocamento, posteriormente estes dados serão apresentados e discutidos ao pormenor.

3.4.4 Energia de superfície

De modo a perceber a compatibilidade entre o alumínio e o pré-impregnado foi executado, com o auxílio da ARCP (Associação Rede de Competência de Polímeros), um ensaio de energia de superfície. Um baixo valor da energia de superfície indica uma baixa molhabilidade, o que implica uma fraca adesão para a superfície em questão.

A energia de superfície é medida em termos de energia por unidade de área e o seu significado passa pelo trabalho necessário de forma a separar duas superfícies ultrapassando assim as forças que as mantêm unidas. Valores afastados entre a energia de dois materiais promovem uma boa adesão entre eles, assim, quanto maior a diferença entre a energia de superfície do pré-impregnado e a do alumínio melhor será a adesão entre eles, tipicamente o valor de energia dos pré-impregnados CFRP é mais baixo que o dos metais.

De entre os vários métodos possíveis, o escolhido pela ARCP foi o método de determinação do ângulo de contacto entre um líquido e o material em questão como demonstra a Figura 55. No Anexo D são apresentados todos os pormenores sobre o ensaio e os equipamentos utilizados no mesmo.[40]

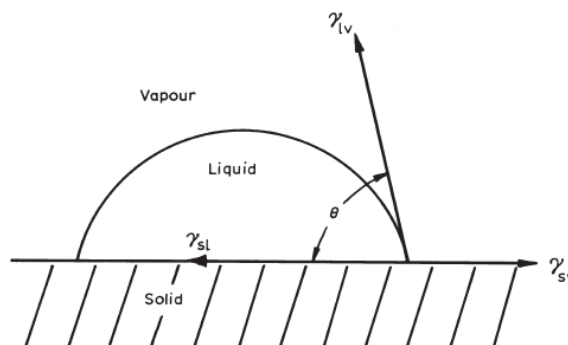


Figura 55 – Representação do ângulo de contacto entre o líquido e o material sólido, neste caso, o alumínio.[40]

Resumidamente o método consiste na deposição de gotas um líquido (água destilada ou n-hexadecano ou etilenoglicol), para tal, é usada uma seringa de Hamilton por forma a conseguir produzir gotas de 4 μ l de volume, posto isto, um software regista o ângulo de contacto de 1 em 1 segundo durante um total de 120 segundos. Para cada amostra e cada líquido são analisadas três gotas sendo depois calculada a média, apesar de serem lidos os valores para o intervalo total foram desprezados os primeiros 50 segundos de ensaio de forma a eliminar valores respetivos à fase de espalhamento da gota na superfície da amostra. Por fim, o resultado da tensão superficial é calculado pelo método Owens-Wendt-Rable-Kaeble (OWRK). Segundo este método quanto maior o ângulo de contacto menor a tendência do líquido de molhar toda a superfície do sólido.

De seguida, são descritas as amostras para o referido ensaio, sendo a dimensão das amostras de 100mm de comprimento para o alumínio e de 900mm² para o pré-impregnado, estas dimensões foram deixadas ao critério pois a dimensão das gotas de ensaio é reduzida.

- **A** – Perfil de alumínio sem tratamento superficial;
- **B** – Perfil de alumínio granalhado;
- **C** – Perfil de alumínio com ataque químico por uso de base;
- **D** – Perfil de alumínio previamente granalhado e posteriormente atacado quimicamente com base;
- **E** – Perfil de alumínio com ataque químico por uso de ácido;
- **F** – Perfil de alumínio previamente granalhado e posteriormente atacado quimicamente com ácido;
- **G** – Pré-impregnado de CFRP não curado;
- **H** – Pré-impregnado de CFRP curado.

As amostras relativas ao alumínio, ou seja, A, B, C, D, E e F, estão representadas na Figura 56, e as amostras relativas ao pré-impregnado, respectivamente G e H, estão representadas na Figura 57.

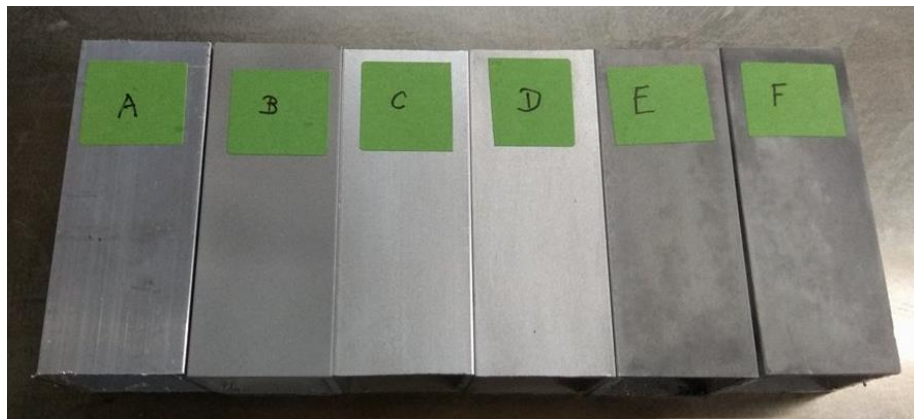


Figura 56 - Provete A, B, C, D, E, F, relativos aos diferentes tratamentos superficiais feitos ao alumínio.



Figura 57 - Provete G e H, relativos ao pré-impregnado não curado(dir.) e curado (esq.).

3.4.5 Tração de sobreposição simples

Sendo a adesão entre o CFRP e o alumínio um ponto de interesse na presente dissertação efetuou-se um ensaio de tração de sobreposição simples onde a interface entre os dois materiais foi solicitada ao corte. Este ensaio consiste em fixar o provete, cujo aspeto e configuração são apresentados na Figura 58, nas suas extremidades submetendo-o depois a uma força de tração uniaxial deslocando uma das suas extremidades na direção longitudinal do provete. Por forma a conseguir um alinhamento de forças mostrou-se necessária a aplicação de dois espaçadores, um em cada extremidade do provete. Visando testar a adesão entre o CFRP e o alumínio não foi, uma vez mais, utilizado qualquer adesivo estrutural entre os substratos de alumínio, sendo a rigidez da estrutura assegurada apenas pela adesão do CFRP aos mesmos.

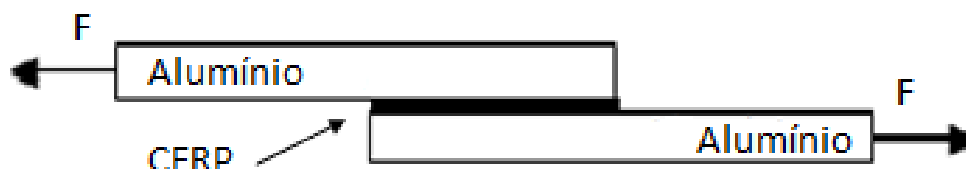


Figura 58 - Provetes para o ensaio de tração compostos por dois substratos de alumínio unidos uma camada de CFRP.

Neste tipo de ensaios, geralmente as velocidades são baixas, contudo, neste caso, usou-se uma velocidade especialmente baixa por se prever que a falha do conjunto ocorre-se rapidamente uma vez que a adesão entre os materiais não é a melhor. A referida falha do conjunto pode ser do tipo adesivo, coesivo ou por parte do material do substrato como visto anteriormente. Os provetes deste ensaio foram construídos segundo os procedimentos e acabamentos superficiais descritos anteriormente, no entanto, é necessário realçar a dificuldade extra de transformar os perfis quadrangulares em chapas de maneira a se assegurar que do mesmo alumínio se tratava. Para tal, os perfis foram cortados transversalmente à sua secção e posteriormente sujeitos a uma demorada lixagem de maneira a eliminar uma pequena espessura de aresta que se mostrou impossível de cortar por causar elevado dano na serra de corte, estes processos de corte e lixagem são representados na Figura 59.



Figura 59 - Processo de corte (esq.) e lixagem (dir.) dos perfis de modo a produzir os substratos.

Por falta de normas especificamente apropriadas a este tipo de materiais optou-se por uma conjugação entre a norma de ligações adesivas ISO 4587 e o estudo prévio de (Saleema *et al.*, 2012) acabando por se utilizar uma área de sobreposição superior à utilizada para as juntas adesivas, este sobredimensionamento é, mais uma vez, justificado pela prevista fraca

adesão entre os materiais. As condições de ensaio foram de 1mm/min no que toca à velocidade e de 120mm de distância entre amarras após aplicação dos espaçadores e centramento do provete, esta distância e as dimensões dos provetes produzidos são apresentadas na Figura 60.

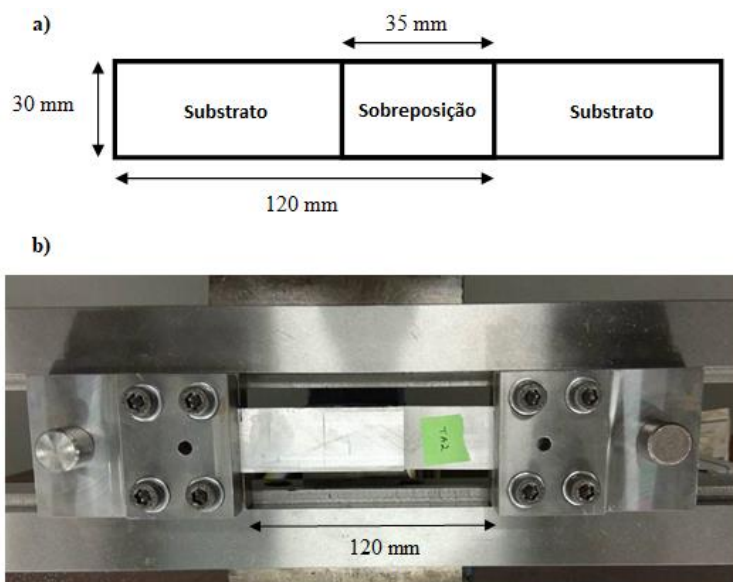


Figura 60 - Representação em a) das dimensões dos provetes e b) da distância entre amarras.

A cura dos provetes foi também feita na prensa de pratos quentes e também aqui foram utilizados pedaços de alumínio como espaçadores para contrariar as diferenças de espessura ao longo do provete e assim garantir uma pressão uniforme. O alinhamento dos provetes revelou-se difícil pelo empilhamento ser feito a quente, a elevada temperatura tornou os substratos difíceis de manusear e fez com que o pré-impregnado aderisse quase imediatamente aos mesmos. De seguida, é feita a descrição dos provetes sujeitos ao ensaio:

- **TA** – Substratos de alumínio granalhados e pré aquecidos, ligados por uma camada de CFRP;
- **TB** – Substratos de alumínio quimicamente atacados com ácido e pré-aquecidos, ligados por uma camada de CFRP;
- **TC** – Substratos de alumínio granalhados e sem pré-aquecimento, ligados por uma camada de CFRP;
- **TD** – Substratos de alumínio granalhados, posteriormente atacados quimicamente com base e pré-aquecidos, ligados por uma camada de CFRP;

- **TE** – Substratos de alumínio quimicamente atacados com base e pré-aquecidos, ligados por uma camada de CFRP;
- **TF** – Substratos de alumínio granalhados, posteriormente atacados quimicamente com ácido e pré-aquecidos, ligados por uma camada de CFRP.
- **TG** – Substratos de alumínio atacados quimicamente com ácido e sem pré-aquecimento, ligados por uma camada de CFRP.

Como resultado, o ensaio fornece uma curva da força exercida em função do alongamento do provete, neste ensaio em particular, pela fraca adesão e pelo facto do CFRP não deformar plasticamente, é espectável que a curva resultante não ultrapasse o limite elástico. Prevê-se também que haja discrepância entre o aspeto gráfico de amostras da mesma espécie pois, como referido, a montagem destas revelou-se muito difícil possibilitando a existência de ligeiros desalinhamentos finais.

3.4.6 Análise macroscópica e microscópica

De forma a analisar as superfícies dos substratos e a interface entre os mesmos e o CFRP realizou-se uma análise macroscópica e microscópica. A análise macroscópica foi feita a olho nú, já para a análise microscópica foi utilizado um microscópio Zeiss Axiophot sob o qual estava anexada uma câmara AxioCamICc3, este conjunto, representado na Figura 61, permitiu captar as imagens microscópicas das superfícies e avaliar a falha dos provetes.

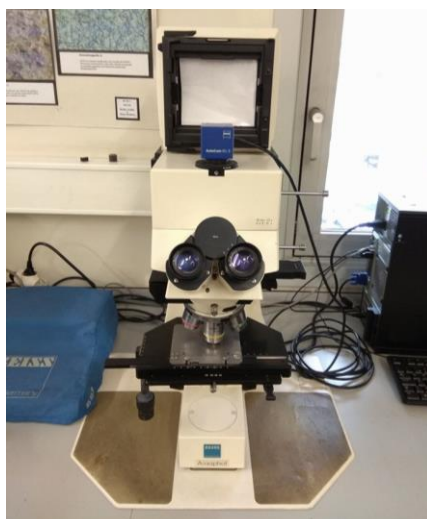


Figura 61- Microscópio Zeiss Axiophot e câmara AxioCamICc3.

3.4.7 Ensaio de impacto

O ensaio de impacto foi levado a cabo com a intenção de perceber visualmente a existência de alterações no dano superficial e a ocorrência, ou não, de falha por delaminação no híbrido e a sua capacidade de absorção de energia por impacto.

Mais uma vez, a falta de normas específicas conduziu a que a definição dos parâmetros de ensaio fosse levada a cabo tendo por base o estudo realizado por (Kim *et al.*, 2016), a norma de ensaio mecânico ASTM D5628 - 96R01 e as limitações apresentadas no laboratório de ensaios. Assim, o teste efetuado foi um ensaio de impacto por queda livre de peso e as condições utilizadas foram:

- Punção de ponta hemisférica de 20mm;
- Massa aplicada de 4,094kg;
- Energia de 5J;
- Altura e velocidade de impacto equivalentes de 0,125m e 1,56m/s respetivamente.

A escolha de um ensaio de baixa energia foi feita por forma a causar apenas algum dano nos provetes, sem que ocorresse perfuração dos mesmos, sendo assim mais fácil avaliar a ocorrência de delaminação/falha de adesão sob solicitações típicas e prováveis em aplicações como as levadas a cabo na indústria aeronáutica e automóvel.

Os provetes consistiram em tubos de 120mm de comprimento nos quais foi empilhada e curada, segundo o procedimento experimental apresentado, uma camada do pré-impregnado utilizado, foi também testada a influência de diversos tratamentos superficiais e foi simulado o efeito do aproveitamento das temperaturas de extrusão nos resultados obtidos. Na Figura 62 está demonstrado o aspeto dos provetes e a máquina Rosand Instrumented Falling Weight Impact Tester Type 5HV onde foram levados a cabo os ensaios.



Figura 62 – Provete para ensaio de impacto (esq.) e máquina de ensaio por queda livre de peso (dir.).

Foi apenas permitido um impacto sobre a superfície sendo o punção apanhado pelo “sticker” da máquina após o primeiro embate de forma a evitar embates posteriores.

A descrição dos provetes testados é igual à apresentada para o ensaio de flexão a quatro pontos, contudo, será descrita de seguida:

- **a** – Perfil de alumínio sem qualquer modificação, testado como foi fornecido, servindo assim de controlo;
- **b** – Perfil híbrido com face granalhada, previamente pré-aquecido e com uma camada de pré-impregnado;
- **c** – Perfil híbrido com face granalhada, sem qualquer pré-aquecimento e com uma camada de pré-impregnado;
- **d** – Perfil híbrido com face atacada com ácido, previamente pré-aquecido e com uma camada de pré-impregnado;
- **e** – Perfil híbrido com face granalhada e posteriormente atacada com ácido, previamente pré-aquecido e com uma camada de pré-impregnado;
- **f** – Perfil híbrido com face atacada com base, previamente pré-aquecido e com uma camada de pré-impregnado;
- **g** – Perfil híbrido com face atacada granalhada e posteriormente atacada com base, previamente pré-aquecido e com uma camada de pré-impregnado;
- **h** - Perfil híbrido com face atacada com ácido, sem pré-aquecimento e com uma camada de pré-impregnado.

Este ensaio fornece inúmeros dados e gráficos que relacionam diversas propriedades uma vez que o software anexado à máquina apresentada está otimizado para esse mesmo efeito, no próximo capítulo serão apresentados apenas alguns destes resultados por se acharem os mais pertinentes.

3.4.8 Ensaio de corrosão galvânica

Tomando por base o estudo de (Wang *et al.*, 2007) previamente apresentado foi realizado um ensaio de corrosão galvânica afim de entender a influência dos tratamentos superficiais aplicados na corrosão dos materiais em questão. As condições aplicadas no referido ensaio foram:

- Banho salino de 3%NaCl;
- Aplicação de banho individual a cada um dos provetes (metálico e CFRP) evitando assim depósitos corrosivos, o banho dos provetes metálicos foi constantemente agitado por uma bomba de ar adaptada de um aquário;
- Temperatura de banho de 35°C;
- Tempo de ensaio de 60min;
- Área de mergulho dos provetes de 1700mm².

A temperatura de banho foi garantida mergulhando parcialmente dois gobelés contendo a solução de 3%NaCl numa tina termostatzada Julabo SW22 contendo água à temperatura referida. Após mergulho dos gobelés aguardou-se pelo equilíbrio térmico, o mesmo foi verificado por recurso a um termómetro. Em ambos os gobelés o provete foi pendurado por molas garantido assim que o mesmo não contactava com as paredes do recipiente.

A passagem de corrente entre os banhos foi assegurada por um fio condutor livre no gobelé que continha o CFRP e preso com um terminal aos provetes de alumínio no outro gobelé.

A corrente elétrica foi medida através de um multímetro digital Leader 856, este equipamento permitia medir correntes na ordem dos 10⁻⁵A. Em alguns casos a corrente era tão baixa que, para a obtenção de resultados mais claros, se mostrou necessário a utilização de um aparelho de maior sensibilidade. Este aparelho não permitia a ligação a um computador pelo que os valores foram manualmente apontados segundo um intervalo de tempo de 30s de

forma a no fim ser possível a execução de um gráfico de variação da corrente elétrica ao longo do tempo. Apesar das limitações apresentadas, este multímetro era o único capaz de atingir a ordem de valores necessária à leitura da corrente. Para que a medição fosse eficiente os provetes de CFRP foram lixados na zona de contacto com a pinça do multímetro de forma a expor as fibras.[49]

A configuração do ensaio realizado é apresentada na Figura 63.



Figura 63 - Apresentação geral e em pormenor do ensaio de corrosão galvânica.

Os provetes de alumínio foram testados segundo diferentes condições de tratamento superficial e os provetes de CFRP foram testados no estado curado de forma a simular a real corrosão ao longo do tempo dos materiais. Os provetes de alumínio foram obtidos por corte e extração de rebarba de uma das paredes do tubo, assegurando assim o uso da mesma liga de alumínio, estes foram cortados segundo a dimensão de 20mm por 120mm. Como demonstra a Figura 64 a mesma dimensão foi utilizada para os provetes de CFRP. De notar que a área mergulhada no banho salino foi controlada medindo e fixando os provetes à distância respetiva. O processo de corte efetuado não é muito preciso pelo que podem surgir ligeiras variações nas áreas consideradas.



Figura 64 - Aspeto dos provetes utilizados no ensaio de corrosão galvânica.

De seguida, apresentam-se, a nomenclatura e descrição dos provetes de alumínio:

- **A** – Provette de alumínio não tratado;
- **B** – Provette de alumínio granalhado;
- **C** – Provette tratado quimicamente com ácido;
- **D** – Provette granalhado e posteriormente tratado com ácido;
- **E** – Provette tratado quimicamente com base;
- **F** – Provette granalhado e posteriormente tratado com base.

A corrente elétrica registada foi tratada graficamente, estes resultados são apresentados no capítulo seguinte.

3.4.9 Análise de rugosidade

Com o intuito de relacionar os resultados adquiridos nos ensaios acima com a adesão e de perceber a influência dos tratamentos superficiais no acabamento dos provetes foi feita uma análise à rugosidade. Para tal, recorreu-se ao instrumento de metrologia ótica Bruker NpFlex presente no CETRIB da FEUP, este aparelho é capaz de medir, com elevada precisão, a rugosidade de uma superfície através da captação e leitura de franjas de interferometria. Os resultados foram ainda confirmados e validados através de um rugosímetro de contacto HommelWerke LV-50. Estes aparelhos estão representados na Figura 65.

As análises realizadas e os parâmetros resultantes foram baseados nas normas ISO4287 e DIN4768, segundo estas normas para o intervalo de rugosidades esperado a área de varrimento de medição a adotar é de 6mm por 2mm. O software da máquina de teste fornece inúmeros parâmetros de rugosidade, no entanto, apenas serão utilizados os parâmetros R_a (*Average Roughness*) e $R_{máx}$ (*Maximum peak-to-valley height*) na comparação dos resultados obtidos. O parâmetro R_a representa a distância média dos pontos da superfície em relação à linha média do mesmo ao longo do comprimento de análise e é calculado por integração. O parâmetro $R_{máx}$ representa a distância máxima encontrada entre um pico e um vale consecutivos da superfície analisada. Geralmente, o parâmetro comparativo de maior valor é o parâmetro R_a , este é representado na Figura 66. [53]

Procurou-se executar a análise de rugosidade superficial imediatamente a seguir à execução dos tratamentos de superfície acima referidos.



Figura 65 – Instrumento de metrologia ótica Bruker NpFlex (esq.) e rugosímetro HommelWerke LV-50.

Os provetes testados são representados na Figura 67 e descritos como:

- **A** – Provette de alumínio não tratado;
- **B** – Provette de alumínio granalhado;
- **C** – Provette tratado quimicamente com base;
- **D** – Provette granalhado e posteriormente tratado com base;
- **E** – Provette tratado quimicamente com ácido;
- **F** – Provette granalhado e posteriormente tratado com ácido.



Figura 66 - Representação esquemática do parâmetro R_a . [53]

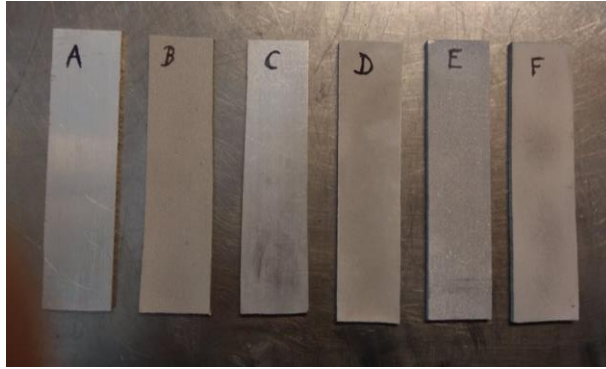


Figura 67 - Amostras para análise de rugosidade.

4 Apresentação e análise dos resultados experimentais

Neste capítulo serão apresentados e analisados os resultados do trabalho experimental realizado no âmbito da presente dissertação.

4.1 Flexão a quatro pontos

Os provetes e os ensaios foram realizados segundo as condições descritas no capítulo anterior. Inicialmente foram testados os provetes dos tipos A, B, C, D, E, F e G, e mais tarde os provetes do tipo H por se achar que esta última configuração poderia ser vantajosa.

Os provetes do tipo A podem ser vistos como provetes de controlo e referência, uma vez que apenas são compostos por um perfil de alumínio sem qualquer espessura de compósito. A curva força vs deslocamento deste tipo é apresentada na Figura 68. Apesar dos provetes híbridos possuírem, na realidade, uma área de secção superior aos provetes do tipo A a comparação entre ambos pode ser tomada como válida considerando que se trata da mesma área de secção pois a espessura do pré-impregnado em questão é muito reduzida.

As curvas força vs deslocamento dos provetes do tipo A representam o comportamento comum da generalidade dos metais, isto é, uma curva suave com parte linear seguida de um limite de cedência para o qual corresponde a força de cedência e, posteriormente, um comportamento plástico. A força de cedência correspondente é cerca de 5000N, neste valor os provetes deixam de se deformar elasticamente e passam a deformar-se plasticamente. Merece também destaque a força máxima admissível dentro do domínio plástico, neste caso de 6230N. Como seria de esperar, todos os provetes demonstraram o mesmo comportamento dentro do domínio elástico. Refira-se que na Figura 68 a linha correspondente ao provete A1 é exatamente coincidente à do provete A2 pelo que se pode erradamente pensar que a primeira não está representada.

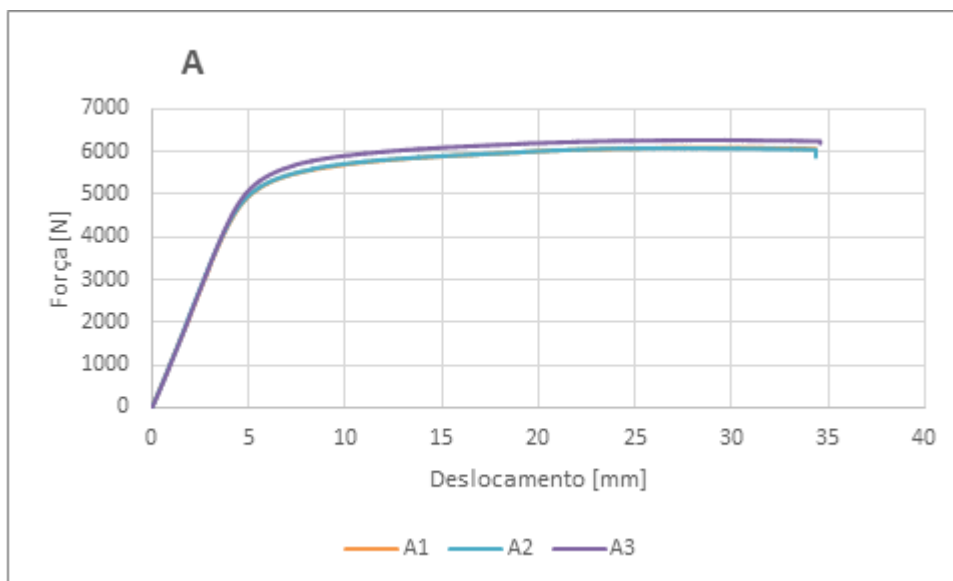


Figura 68 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo A.

Na Figura 69 são apresentados os resultados dos provetes do tipo B onde foi colocada uma camada de pré-impregnado numa face previamente granalhada e aquecida a 125°C. É possível distinguir duas fases distintas nas curvas apresentadas, uma primeira em que os materiais do perfil híbrido resistem conjuntamente à solicitação e outra, em que, após rotura das fibras e/ou perda de adesão das mesmas para com o perfil, apenas o próprio perfil resiste à solicitação. Esta divisão traduz-se graficamente por uma queda abrupta da curva para a qual corresponde habitualmente a força máxima admissível.

É pertinente focar atenções no valor onde as curvas força vs deslocamento apresentam uma queda abrupta, pois foi nesse ponto em que, durante os ensaios de flexão, ocorreu a falha adesiva e sendo um dos objetivos deste trabalho o estudo das propriedades adesivas entre os materiais em questão e a forma como o tratamento e rugosidade superficiais as afetam pensa-se que este seja um dos principais pontos de comparação entre os provetes.

Neste caso ocorre uma rotura total das fibras e falha adesiva localizada a meio tramo do perfil no local de aplicação da força e na direção perpendicular ao eixo do perfil, como demonstra em pormenor a Figura 70, esta falha localiza-se já dentro do domínio plástico do conjunto e a força máxima verificada no fim do domínio elástico manteve-se nos 5000N, algo minimamente expectável uma vez que apenas foi usada uma pequena camada de pré-impregnado. Nos provetes B1 e B3 a rotura das fibras e a falha adesiva ocorreram simultânea e abruptamente, já no provete B2 a falha foi gradual com uma rotura parcial inicial e posterior propagação até à perda adesiva e rotura totais, mas, a falha do conjunto pode ser considerada a partir da primeira depressão da curva respetiva já que a viabilidade de qualquer peça ficaria

comprometida nesta situação. A força máxima para a qual se verificou a falha adesiva das amostras B varia entre 6000N e 6400N e o respetivo deslocamento varia entre 12,8mm e 13,6mm, a dispersão destes valores pode ser considerada como satisfatória.

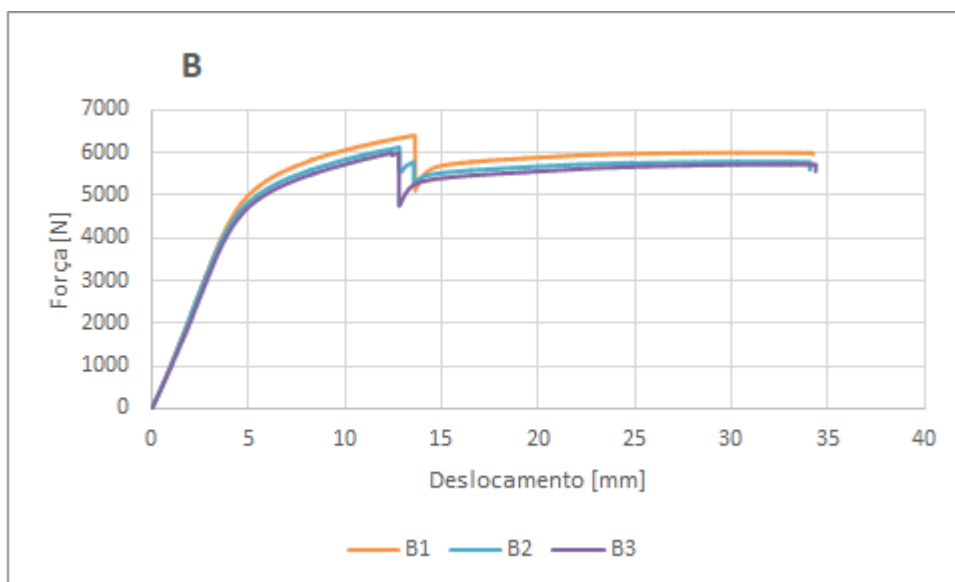


Figura 69 – Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo B.



Figura 70 - Vista em pormenor da falha adesiva e rotura das fibras de um provete de flexão tipo B.

Os resultados dos provetes do tipo C, onde se tentou entender o efeito do pré-aquecimento do perfil montando uma camada de pré-impregnado a frio numa face previamente granalhada, podem ser observados na Figura 71 e o seu aspeto após ensaio é apresentado na Figura 72. O comportamento dentro do domínio plástico mantém-se praticamente inalterado sendo a força limte máxima de cerca de 5000N.

No que toca à perda de adesão, foi mais uma vez verificada no exato momento da rotura das fibras e surge para valores de força máxima entre 5800N e 6500N e deslocamentos

de 11mm e 14,8mm respetivamente. Verifica-se que o provete C3 apresentou melhores resultados que os restantes, que a dispersão de valores é maior que para os casos anteriores e todos os provetes apresentaram falha instantânea sem que algum tipo de propagação de falha ao longo do tempo fosse evidenciado. Pode ser dito que o efeito do pré-aquecimento dos perfis e consequente alteração do ciclo de cura de uma fina camada de CFRP não revelou efeito negativo claro e evidente na adesão, no entanto, verifica-se um melhor acabamento superficial da camada de CFRP e uma maior dispersão da resina ao longo do perfil chegando mesmo a serem verificadas escorrências para as faces adjacentes. Mais uma vez, a rotura ocorreu no alinhamento vertical de um dos dois pontos de aplicação da força e segundo a direção transversal ao eixo do perfil.

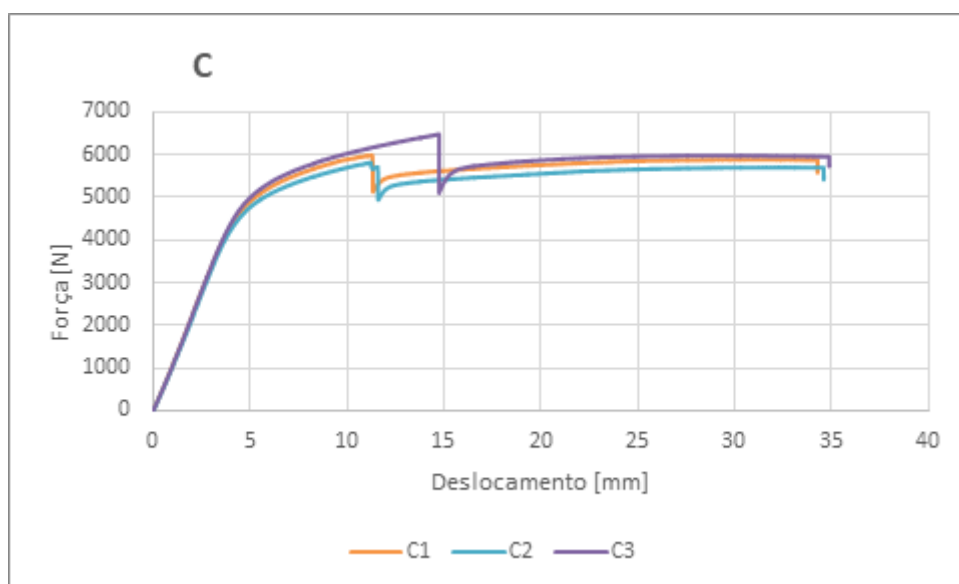


Figura 71 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo C.

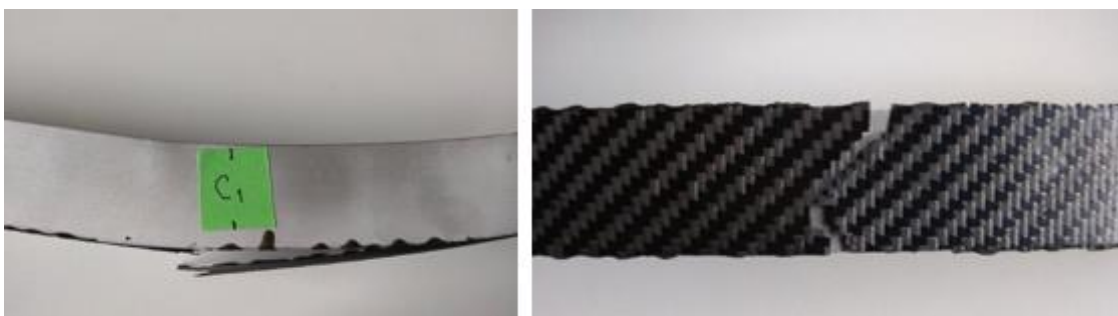


Figura 72 - Vista em pormenor da falha adesiva e rotura das fibras de um provete de flexão tipo C.

A Figura 73 apresenta os resultados dos provetes D, sujeitos a pré-aquecimento e ataque ácido e a Figura 74 apresenta o aspeto de um dos mesmos provetes após ensaio. Como é de esperar a rotura ocorre na direção perpendicular ao eixo do perfil e na zona de aplicação de uma das forças. Por análise gráfica é observável que a força máxima aquando da rotura das fibras varia entre 6000N e 6600N e que os deslocamentos respetivos são 13,9mm e 16mm, não sendo verificada uma grande dispersão entre curvas. A falha adesiva foi instântanea e ocorreu simultaneamente à quebra das fibras de carbono. Por análise destes valores pode ser dito que o tratamento ácido praticado traduz valores de força similares aos resultantes do tratamento por granalhagem e valores superiores de deslocamento até à ocorrência de rotura das fibras. A baixa dispersão de resultados, principalmente na zona elástica dá a entender que o ataque ácido é um tratamento estável e de resultados regulares.

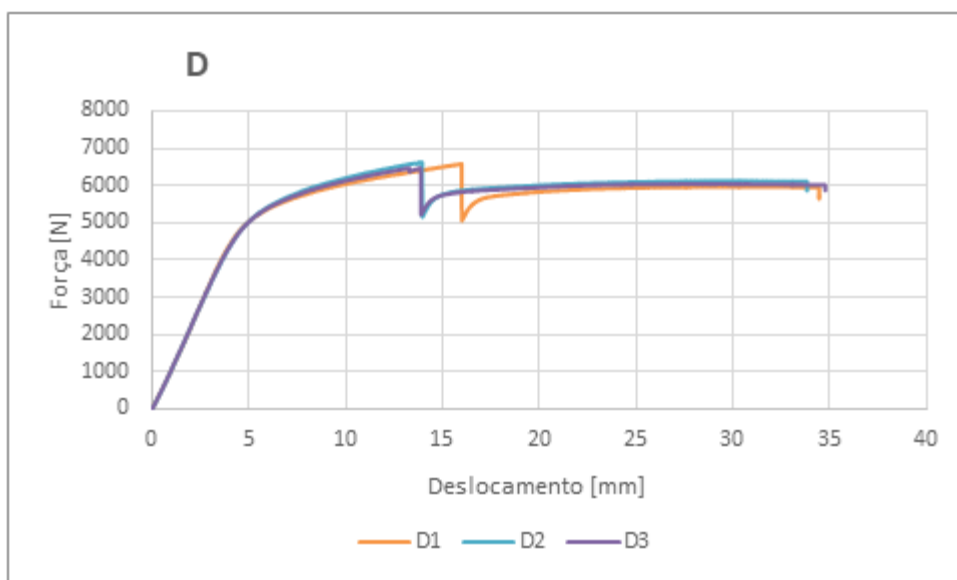


Figura 73 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo D.



Figura 74 - Vista em pormenor da falha adesiva e rotura das fibras de um provete de flexão tipo D.

Os provetes do tipo E (pré-aquecidos, granalhados e atacados com ácido) demonstraram comportamentos um pouco díspares no ensaio de flexão efetuado, isto pode ser observado nas curvas da Figura 75 através da maior dispersão de valores no que toca à falha do híbrido. No domínio elástico, todos os provetes se comportaram da mesma forma e a força de cedência centra-se mais uma vez nos 5000N, já no domínio plástico os provetes comportaram-se de forma distinta. O provete E1 apresenta rotura de fibras e perda de adesão instantânea enquanto que os provetes E2 e E3 apresentam uma falha progressiva com rotura gradual de fibras ao longo do tempo e propagação sucessiva da falha adesiva sendo mesmo que no caso do provete E3 a fibra acabou por descolar completamente do perfil no momento respetivo à última depressão da curva. Contudo, são apenas considerados os valores para o primeiro instante em que os provetes começam a falhar já que tal facto inviabiliza o híbrido. Assim, os respetivos valores de força máxima variam entre 5600N e 6250N e os valores de deslocamento aquando da falha variam entre 8.4mm e 15.4mm. A rotura das fibras ocorre mais uma vez na direção perpendicular ao eixo do perfil e no local de enconsto do rolete da ferramenta da máquina de ensaio. A superfície dos perfis do tipo E (granalha e atacada com ácido) aparenta ser menos rugosa e regular que as superfícies do tipo B (granalhada) e D (atacada com ácido) o que pode explicar a dispersão de valores verificada. Na Figura 76 mostra-se o provete E3 após ensaio, onde se vê a falha completamente adesiva entre os materiais.

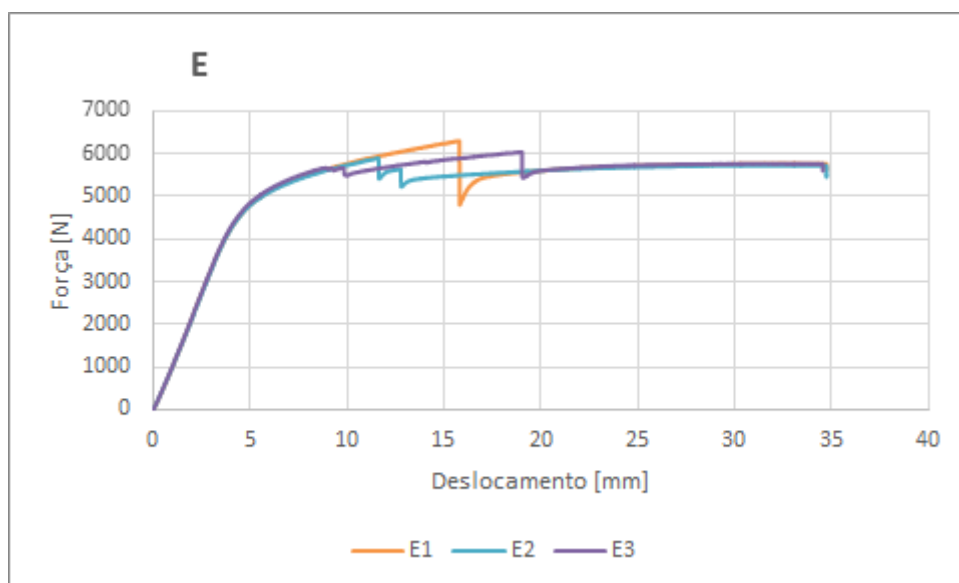


Figura 75 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo E.



Figura 76 – Aspeto final do provete E3.

As curvas da Figura 77 representam os resultados dos provetes do tipo F, pré-aquecidos e nos quais foi feito um ataque básico. Este tratamento superficial não parece atribuir uma rugosidade muito elevada ao perfil, isto vai de encontro ao aspeto final dos provetes que se encontra representado na Figura 78 onde é possível verificar que falha adesiva se verificou ao longo de toda e quase toda a extensão dos provetes F2 e F3, respetivamente, já a falha do provete F1 apesar de adesiva foi apenas local. Como se verifica na curva força vs deslocamento correspondente o provete F2 apresentou uma falha adesiva e rotura de fibras ao longo do tempo enquanto que os restantes falharam instantaneamente. Em todos os provetes do tipo F a falha foi, tal como nos provetes anteriores, perpendicular ao eixo do perfil.

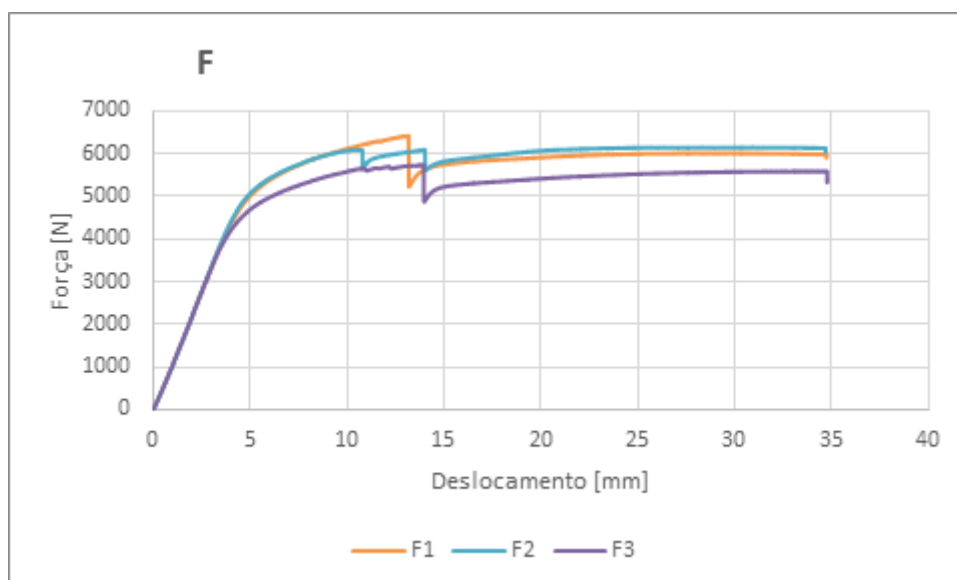


Figura 77 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo F.



Figura 78 - Aspeto dos provetes F3 (acima) e F2 (abaixo) após ensaio onde se verifica uma peruma falha adesiva total e quase total, respetivamente.

O comportamento elástico do híbrido mostrou-se igual aos restantes provetes existindo apenas uma ligeira diminuição da força de cedência do provete F3 e o comportamento plástico mostrou dados minimamente dispersos sendo que os valores de força para os quais se verificou a falha adesiva e rotura do conjunto variam entre 5750N e 6400N com deslocamentos correspondentes de 13.2mm e 13.9mm.

Na figura 79 estão apresentadas as curvas e na Figura 80 o aspeto após ensaio dos provetes do tipo G (pré-aquecidos, granalhados e atacados com uma base) revelam elevada dispersão de valores de deslocamento para o qual se verifica rotura das fibras e falha adesiva, sendo o intervalo correspondente de 9mm a 13,9mm para forças máximas respetivas de 6100N e 6500N. Assim, percebe-se que, apesar de a falha ocorrer para deslocamentos muito diferentes os mesmos, correspondem a forças relativamente próximas.

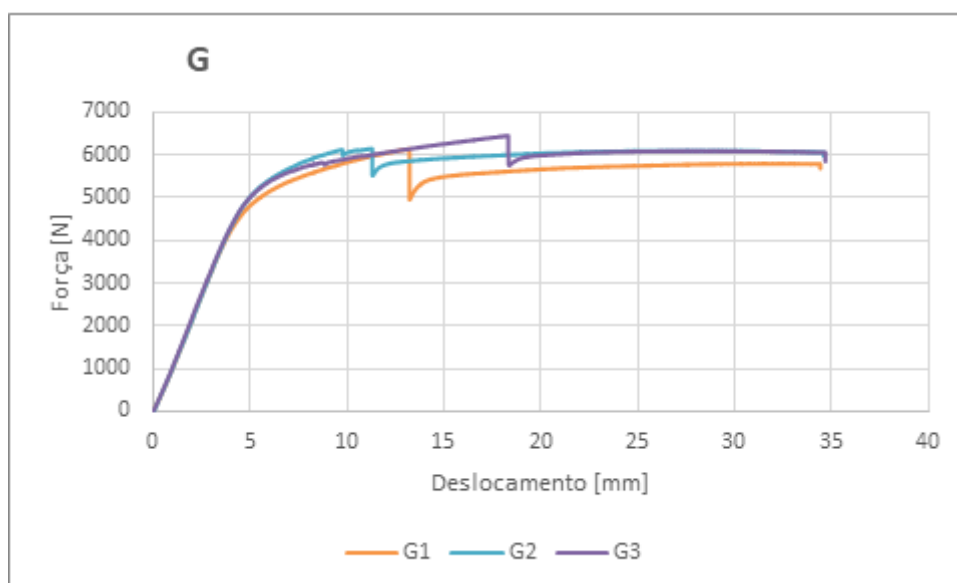


Figura 79 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo G.

É observável que a dispersão de valores para o primeiro momento de falha é elevada e pode também ser visto que o provete G2, ao contrário de G1 e G3, apresentou propagação de falha ao longo do tempo. Como em todos os provetes até então, também o CFRP dos provetes do tipo G rompeu na direcção perpendicular ao eixo do perfil. No que toca ao aspeto final destaca-se que o provete G3 teve falha adesiva sobre grande parte da sua extensão enquanto que os restantes provetes não.



Figura 80 - Provete G2 (acima) com falha adesiva local e provete G3 (abaixo) com falha adesiva segundo um elevado comprimento.

Aquando dos ensaios, a análise visual dos provetes testados fez parecer que de entre os tratamentos químicos efetuados o tratamento ácido promovia ligeiras melhorias na adesão entre os materiais já que apenas um dos provetes sujeitos ao mesmo apresentou falha adesiva segundo uma longa extensão. Então, como último ensaio, foi testado este mesmo tratamento químico em provetes nos quais o pré-impregnado seria empilhado a frio surgindo assim a espécie H. As suas curvas força vs deslocamento encontram-se representadas na Figura 81.

Todos os provetes H demonstraram o comportamento elástico e força de cedência esperados. Apenas dois provetes possuíram falha na adesão (H1 e H3), no entanto, esta falha correspondeu a um aceitável valor de força máxima de 6100N e um valor de deslocamento de 15mm, já no provete H2 não existiu falha de adesão nem rotura de fibras evidente até ao fim do ensaio, como demonstra a Figura 82, e a força máxima verificada é de 6400N. Saliente-se que, apesar das curvas não serem iguais entre si, a adesão deste tipo de provetes foi bastante aceitável quando comparada com a de todos os anteriores já que, por um lado, o valor do deslocamento de H1 e H3 é igual e superior à maioria dos outros tipos de provetes e por outro lado o provete H2 mostrou ser o único capaz de manter a adesão entre materiais após ensaio. Estes dados levam a querer que o tratamento ácido promove melhores propriedades adesivas que a própria granalhagem e que o aproveitamento de temperaturas de extrusão, simuladas

neste caso por pré-aquecimento dos perfis antes da montagem do pré-impregnado, prejudica a adesão.

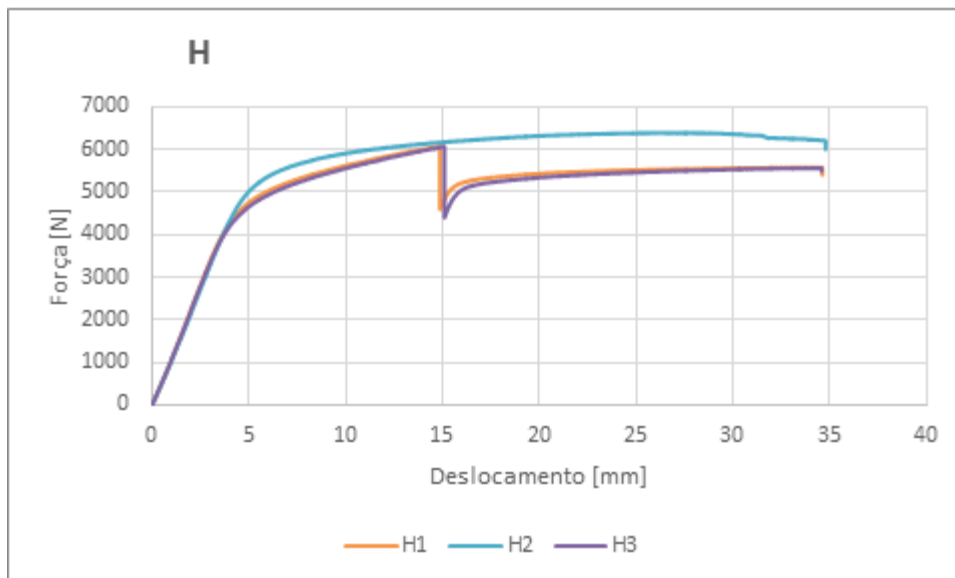


Figura 81 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo H.



Figura 82 – Aspecto final do provete H2, verificando-se a integridade do mesmo após ensaio.

A Tabela 19 sintetiza os resultados do ensaio de flexão realizado, clarifique-se que, este foi executado no âmbito de perceber a carga máxima admitida até que ocorresse rotura das fibras ou falha de adesão entre os materiais. Na referida tabela são apresentados, de forma aproximada: a força para a qual se inicia a plasticidade do conjunto, a força máxima para a qual ocorreu rotura das fibras e/ou falha adesiva do híbrido, o respetivo deslocamento e a melhoria desta força máxima e do deslocamento tendo por base os provetes não híbridos do tipo A. Seria também pertinente efetuar comparação entre os valores alusivos aos diferentes

tratamentos superficiais e um perfil híbrido não tratado, contudo, como referido não foi conseguida adesão no caso do perfil virgem. Os valores apresentados representam a média dos provetes de cada tipo.

Tabela 19 – Síntese e comparação dos resultados do ensaio de flexão.

<i>Tipo de provete</i>	<i>Força limite elástico [N]</i>	<i>Força máxima [N]</i>	<i>Deslocamento [mm]</i>	<i>Melhoria de Força [%]</i>	<i>Melhoria de deslocamento [%]</i>
<i>A</i>	5000	6100	28	-	-
<i>B</i>	4900	6170	13	1.2	-53.6
<i>C</i>	4933	6100	12.5	0	-55.4
<i>D</i>	5000	6555	14.6	7.5	-47.9
<i>E</i>	5000	5970	12	-1.3	-57.1
<i>F</i>	4933	6080	12.8	0.3	-54.3
<i>G</i>	4950	6233	13.8	2.2	-50.7
<i>H</i>	4900	6200	19.1	1.7	-31.8

Tendo em conta que os valores de força e deslocamento apresentados são fruto de uma média aritmética as melhorias calculadas podem não evidenciar claramente o ganho de cada tipo de provete pois na mesma média foram incluídos todos os provetes, por otimização do processo experimental é possível que se consigam valores superiores ou próximos do máximo de cada tipo de provete. Interessa também destacar que no cálculo da média efetuado foram considerados os valores respetivos ao primeiro momento de falha para o caso dos provetes que apresentaram uma falha progressiva. Assim, em alguns o valor considerado não é propriamente o valor máximo de ensaio mas sim o valor que aparenta ter maior interesse e aplicabilidade já que se considera que após o início da falha os provetes não traduzem dados viáveis para futura aplicação e estudo.

Perceba-se que, o uso de perfis de alumínio de comprimento elevado e de uma fina espessura de CFRP não traduz elevadas diferenças na força máxima admissível e que o comportamento à tração típico das fibras de carbono não permite melhorias no deslocamento uma vez que estas apresentam elevada capacidade de sustentar forças de tração mas baixos valores de elongação, no entanto, pode ser concluído que quanto maior o deslocamento

apresentado para a força máxima e consequente rotura, melhores as propriedades adesivas uma vez que as forças de adesão permitem que o perfil híbrido trabalhe como um todo aumentando o valor de força máxima admitido pelo perfil de alumínio por si só e a elongação das fibras quando, também, vistas isoladamente.

Assim, o ataque ácido aparenta ser o tratamento superficial de maior interesse no âmbito de trabalhos futuros por apresentar uma agradável melhoria no valor da força máxima e uma menor diminuição do deslocamento para o qual ocorre a falha do processo de hibridização nos provetes H e D e por ter sido o único tratamento segundo o qual um híbrido se manteve aderido após a realização do ensaio.

4.2 Energia de superfície

São agora apresentados na Tabela 20 os valores do ensaio de energia de superfície levado a cabo pela ARC. Refira-se mais uma vez, que quanto maior a diferença das energias superficiais entre os dois materiais em questão melhor a molhabilidade e consequentemente a adesão entre os mesmos. No relatório fornecido pela ARCP é salientado que a amostra G (pré-impregnado não curado) pode ser trespassada pelo líquido de teste e que a amostra B possui diferentes valores para diferentes pontos ao longo do seu comprimento, o primeiro facto pode ser justificado pela porosidade do pré-impregnado não curado e o segundo pela dificuldade demonstrada em conseguir um acabamento superficial regular em toda a dimensão no processo de granalhagem.

Tabela 20 - Valores de energia superficial das diferentes amostras fornecidos pela ARCP.

<i>Amostra</i>	<i>Energia superficial [mJ/m²]</i>
<i>A</i>	46.15 ± 0.25
<i>B</i>	57.61 ± 0.50
<i>C</i>	48.01 ± 0.37
<i>D</i>	64.50 ± 0.58
<i>E</i>	54.94 ± 0.61
<i>F</i>	43.12 ± 0.47
<i>G</i>	27.53 ± 0.28
<i>H</i>	25.01 ± 0.03

Relativamente ao CFRP, percebe-se que o valor de energia superficial decai ligeiramente com o processo de cura, assim, é de esperar que a adesão durante a montagem do híbrido seja fraca quer o perfil seja ou não pré-aquecido. Contudo, na realidade para o caso onde a montagem do pré-impregnado foi feita sob perfis pré-aquecidos a adesão ocorria com alguma facilidade por liquidação da resina.

No que toca ao alumínio, é verificável que os diferentes tratamentos superficiais conduzem a diferentes valores de energia superficial, tomando o valor da amostra A (não tratada superficialmente) por base percebe-se que todas as amostras excepto a F revelaram maior valor de energia superficial, esta exceção relativa à amostra F dita que o ataque ácido, quando efetuado após a granalhagem, conduz a uma pior adesão entre os materiais relativamente aos perfis não tratados, no entanto, na prática tal não se verifica uma vez que a adesão entre a superfície granalhada e atacada com ácido foi conseguida ao contrário do que aconteceu para a superfície não tratada. Pode ainda ser observado que: o maior valor foi verificado para a amostra do tipo D que havia sido granalhada e atacada por uma base forte, os valores das amostras B e E (amostras granalhas e atacadas com ácido, respetivamente) apresentam valores similares e que a aplicação de um tratamento químico após granalhagem demonstrou diferentes tendências de energia superficial mediante o uso de um ácido e uma base já que para as amostras granalhadas e atacadas com uma base o valor da energia superficial subiu ao contrário do verificado para as amostras granalhadas e atacadas com ácido. Pela diferença apresentada entre os valores do CFRP e do alumínio com diferentes acabamentos superficiais seria de esperar boa adesão na maioria dos provetes, principalmente nos provetes granalhados e posteriormente atacados por uma base, somente granalhados e apenas atacados por um ácido (por ordem decrescente de adesão esperada).

4.3 Tração de sobreposição simples e análise macroscópica e microscópica

Como medida comparativa no que toca à adesão entre materiais foram feitos ensaios de tração de junta de sobreposição simples conforme as condições apresentadas no capítulo anterior. Não se mostrou possível a adesão entre o pré-impregnado e o perfil de alumínio virgem pelo que todos os provetes abaixo apresentados foram alvo de diferentes tratamentos superficiais.

A Figura 83 apresenta as curvas força vs deslocamento dos provetes do tipo TA (substratos granalhados e pré-aquecidos), apenas se apresentam duas curvas já que o provete TA2 descolou aquando do aperto na ferramenta de teste, este episódio verificou-se mais tarde

noutros provetes, contudo a demora associada à sua produção e a pouca disponibilidade do Laboratório de Ensaios Tecnológicos impossibilitaram a execução dos ensaios em falta.

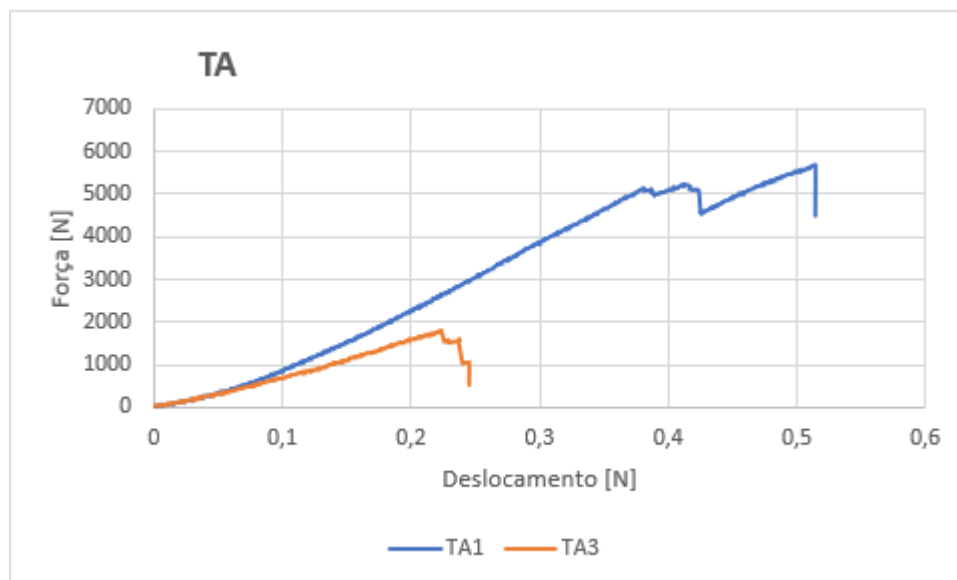


Figura 83 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo TA.

Das curvas apresentadas percebe-se a existência de uma grande dispersão de valores visto que a força máxima oscila entre 1779N e 5226N para deslocamentos respetivos de 0.224mm e 0.414mm, tal como no ensaio de flexão estes valores máximos são considerados para a primeira falha visível do híbrido já que os provetes apresentaram uma falha gradual ao longo do tempo. No entanto, é perceptível que a ocorrência de uma falha gradual conduz a valores menores de força máxima que os esperados para uma falha instantânea e mais tardia. Da curva TA1 é visível que, apesar da falha ser gradual, após a primeira depressão do gráfico o valor da força atinge depois um patamar superior ao verificado previamente, este valor apesar de por análise gráfica direta ser o valor máximo foi desconsiderado já que na realidade interessa que as juntas coladas apresentem um comportamento estável. O mau desempenho do provete TA3 pode ser justificado pela fraca adesão conhecida entre os materiais, pela baixa área de sobreposição ou por erros de alinhamento do provete já que a montagem do mesmo foi feita a elevada temperatura. Apesar da dispersão e do pequeno deslocamento ambos provetes apresentaram um comportamento inicial próximo do linear.

Na Figura 84 é apresentada em detalhe a área de sobreposição do provete TA1 após ensaio onde se observa uma falha do tipo misto uma vez que a falha aparenta ser coesiva junto à ponta do provete e adesiva na restante área. Macroscopicamente podem ser observados vestígios de resina e também pedaços de variada dimensão de fibras que foram arrancadas do

tecido Twill em ambas as direções do mesmo. Isto é confirmado com a vista microscópica apresentada na Figura 85 onde para além das fibras e dos vestígios da matriz pode ainda ser observado o aspeto rugoso da superfície.



Figura 84 - Provete do tipo TA após ensaio de tração.

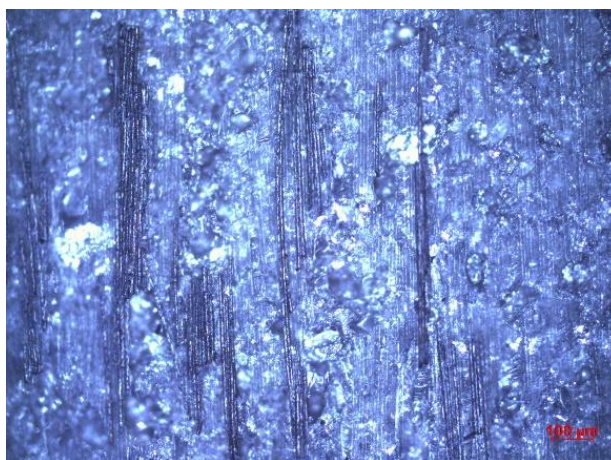


Figura 85 - Aspeto microscópico de um substrato do tipo TA após ensaio de tração.

A Figura 86 representa as curvas força vs deslocamento dos provetes do tipo TB (substratos atacados com ácido e pré-aquecidos) onde se pode observar que apesar das forças máximas dos três provetes não serem iguais, mais uma vez, ambos apresentam um comportamento que pode ser visto como linear. As falhas podem ser ditas como instantâneas, verificando-se apenas uma ligeira quebra antes da rotura final no caso do provete TB2.

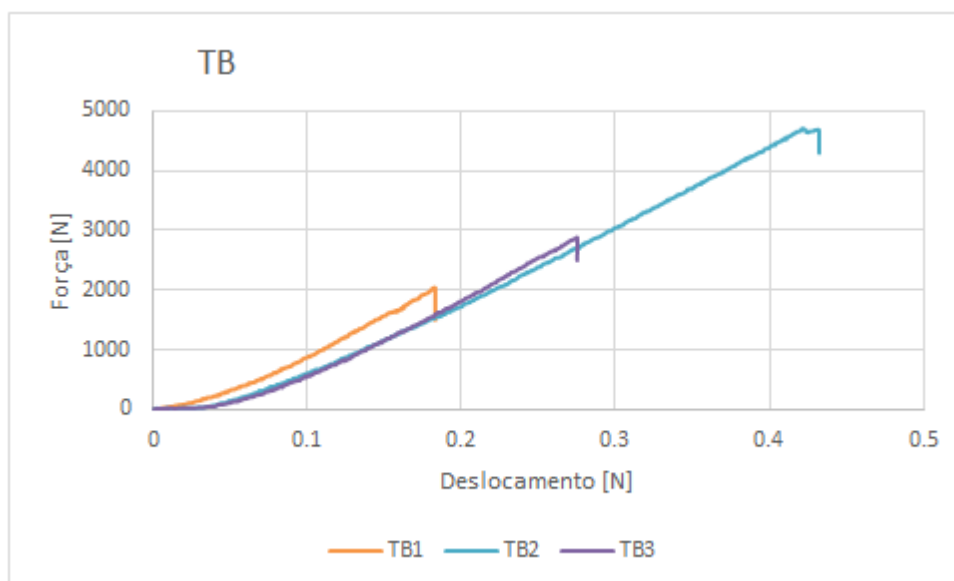


Figura 86 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo TB.

A força máxima varia entre 2042N e 4671 e os deslocamentos máximos entre 0.276mm e 0.432mm o que revela uma elevada dispersão de valores provavelmente associada à dificuldade de montagem a quente, da área de sobreposição que, apesar de ter sido sobredimensionada pode ser pequena e da fraca adesão entre os materiais em questão como anteriormente referido para o caso TA. O aspeto de um provete do tipo TB após ensaio encontra-se apresentado na Figura 87. Aqui é visível que a rotura foi adesiva uma vez que a olho nú é difícil encontrar resíduos de resina ou fibras no substrato representado à direita. Já microscopicamente, como demonstra a Figura 88, é possível visualizar a presença de algumas fibras o que indica a proximidade a uma possível rotura coesiva.



Figura 87 - Provede do tipo TB após ensaio de tração.

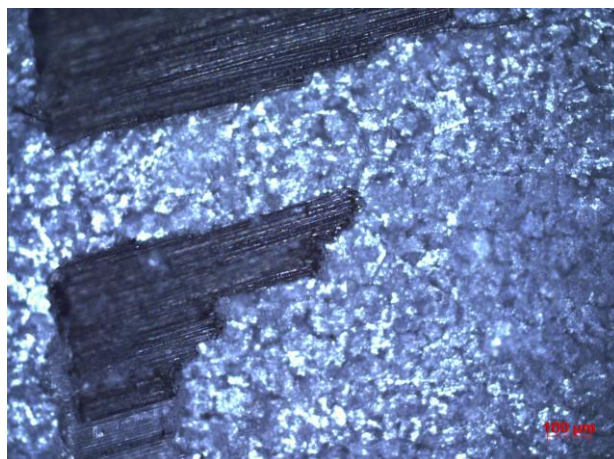


Figura 88 - Aspeto microscópico de um substrato do tipo TB após ensaio de tração.

No que toca aos provetes granalhados e montados a frio, do tipo TC, como se verifica na Figura 89 a força máxima varia entre 1379N e 2786N e os deslocamentos máximos entre 0.161mm e 0.270mm, os valores gráficos apresentam alguma dispersão que pode ser justificada pelos fatores acima descritos para os provetes anteriores. Contudo, todas as curvas são aproximadamente lineares e apenas a curva TC2 possui falha progressiva ao longo do deslocamento.

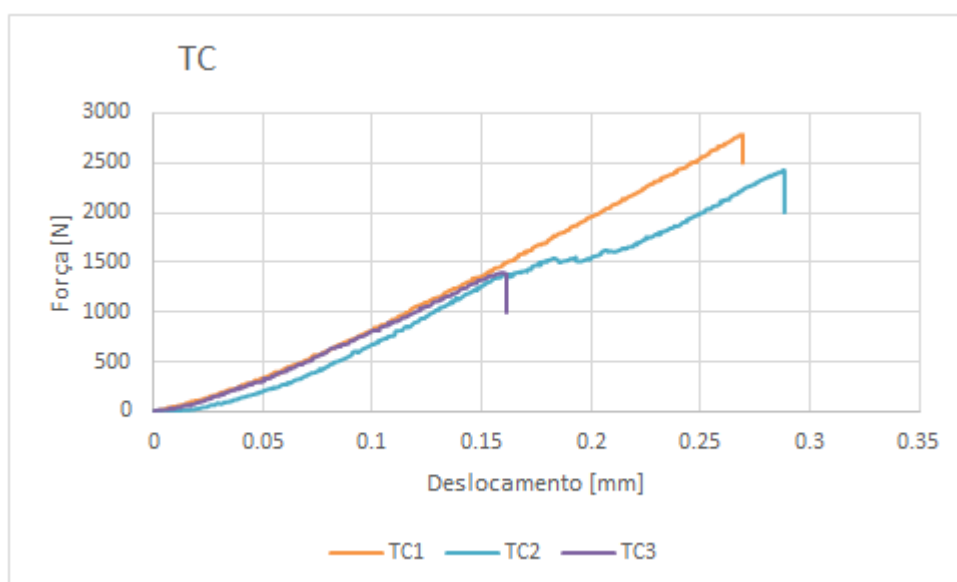


Figura 89 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo TC.

A Figura 90 apresenta o aspeto do provete TC3 após ensaio, apesar de este verificar os menores valores de força durante o ensaio foi ao mesmo tempo o único onde a falha é do tipo misto já que nos provetes TC1 e TC2 a falha verificada é do tipo adesivo.

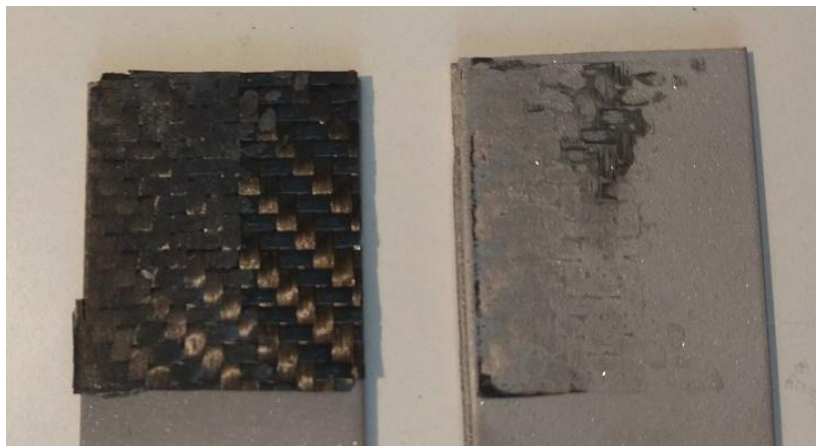


Figura 90 - Provete do tipo TC após ensaio de tração.

Mesmo nas zonas onde macroscopicamente a falha foi adesiva é possível, microscopicamente, visualizar algumas fibras e zonas onde a matriz está presente. Isto está representado na Figura 91.

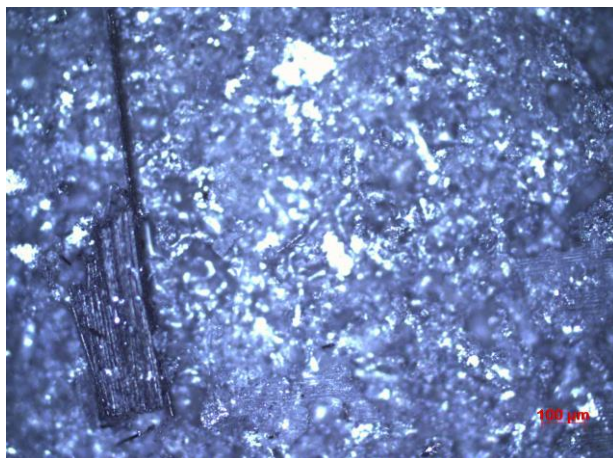


Figura 91 - Aspeto microscópico de um substrato do tipo TC após ensaio de tração.

Apenas foram testados dois provetes do tipo TD pois o provete TD2 descolou durante o aperto, assim, as curvas dos provetes TD1 e TD3 são apresentadas na Figura 92. Ambas apresentam um aspeto próximo do linear com pequenas oscilações que podem estar ligadas a microroturas de fibras ou a falhas adesivas de muito pequena dimensão que aumentam em dimensão ou quantidade ao longo do tempo até à falha final. O provete TD1 apresentou falha progressiva pelo que os valores máximos considerados são de 1057N e 1464N para a força e 0.144mm e 0.163mm para o deslocamento. Apenas com duas curvas a análise dos resultados torna-se mais complicada contudo pode ser dito que os valores apresentam dispersão.

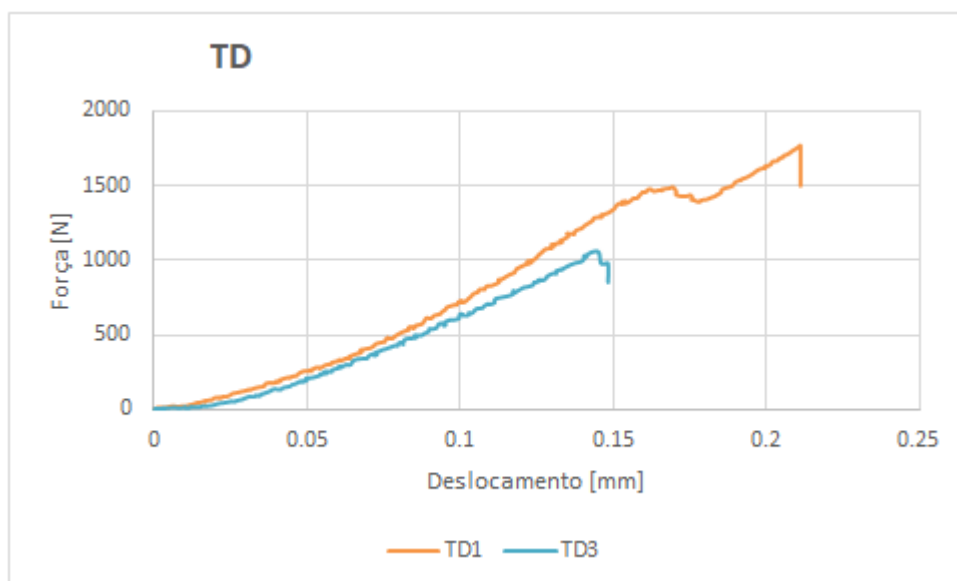


Figura 92 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo TD.

A Figura 93 apresenta o aspecto macroscópico de um provete do tipo TD após ensaio onde se verifica uma falha totalmente adesiva não sendo possível visualizar nenhuma zona contendo resina ou fibras no substrato apresentado à direita.

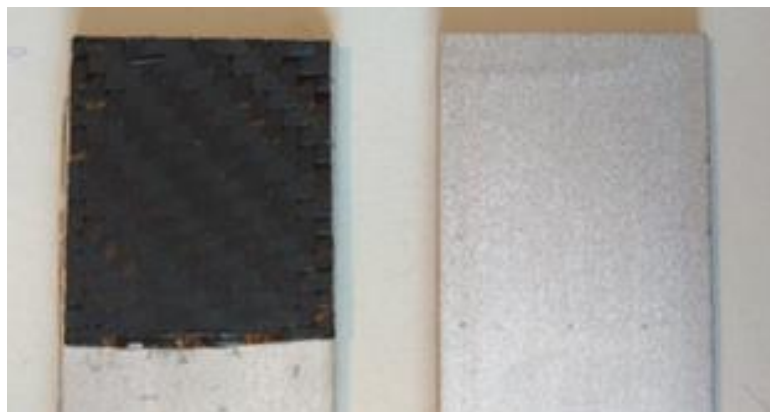


Figura 93 - Provede do tipo TD após ensaio de tração.

A Figura 94, por sua vez, apresenta o aspecto microscópico de um provete do tipo TD onde se observam apenas pedaços de matriz aderidos. Destaque-se que após observação de todos os provetes apenas num foi possível observar o descrito numa zona de um dos provetes pelo que se considera a falha deste tipo construtivo como totalmente adesiva.

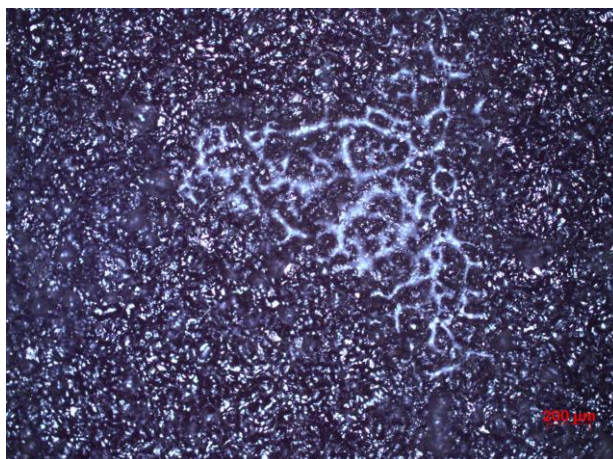


Figura 94 - Aspeto microscópico de um substrato do tipo TD após ensaio de tração.

A Figura 95 apresenta as curvas alusivas aos provetes TE1 e TE3 já que não foi possível ensaiar TE2 por rotura do mesmo na montagem sobre a ferramenta, saliente-se que a dispersão de valores neste caso é enorme e como os valores de TE3 são muito baixos este provete será ignorado supondo-se que algo de errado aconteceu aquando da sua montagem, assim a força máxima para TE1 é de 1446N e o deslocamento máximo tem valor 0.161mm. Durante a produção dos provetes TE fez parecer que a adesão entre os substratos atacados por hidróxido de sódio e a matriz seria bastante dificultada esperando-se assim valores baixos de força máxima, tal foi verificado.

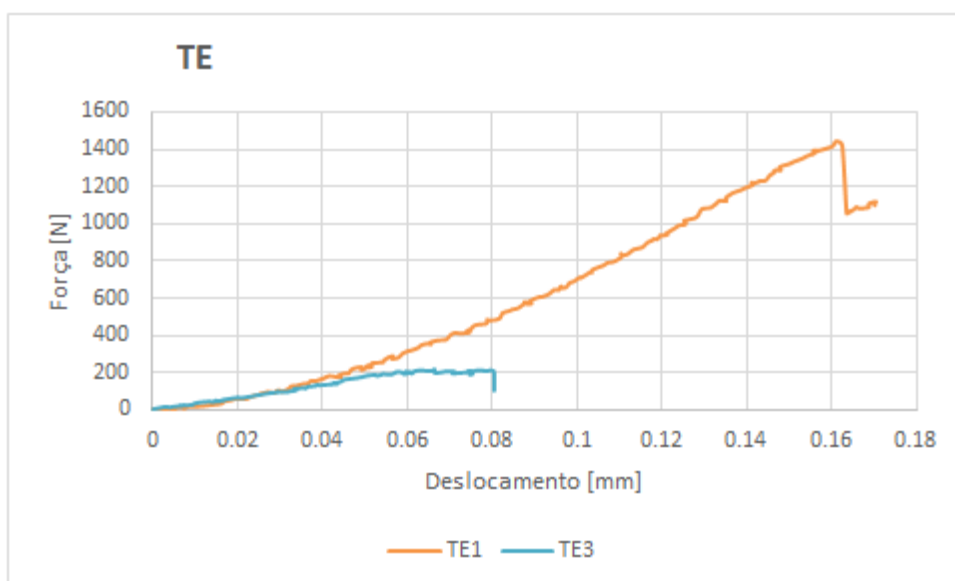


Figura 95 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo TE.

Mais uma vez a curva Força vs Deslocamento apresenta um aspeto linear com alguma ondulação proveniente das microroturas ou falhas adesivas de muito pequena dimensão. Tanto macroscópica como microscópicamente, a falha deste provete foi do tipo adesivo, isto encontra-se representado nas Figura 96 e Figura 97, respetivamente. O CFRP descolou de ambos os substratos no momento da rotura, conclui-se assim que, pela baixa rugosidade aparente e pelo baixo valor de força máxima este tratamento superficial não é muito satisfatório no âmbito da melhoria de adesão.



Figura 96 - Provete do tipo TE após ensaio de tração.



Figura 97 - Aspeto microscópico de um substrato do tipo TE após ensaio de tração.

As curvas da Figura 98 correspondem aos provetes do tipo TF cujos substratos foram granalhados, atacados com ácido e pré-aquecidos, nestas curvas verifica-se um aspeto praticamente linear até ao início da rotura. A amostra TF2 será desconsiderada de análise já que os seus valores levam a querer que ocorreu um qualquer erro de montagem, teste ou procedimento experimental. Os valores de Força máxima admissível são de 1852N e 2916N e surgem para deslocamentos de 0.240mm e 0.271mm, mais uma vez a falha mostra um

caráter progressivo e estes valores foram lidos no primeiro instante em que a curva apresenta uma depressão.

A Figura 99 demonstra a falha do tipo misto do provete TF1, onde, para além da existência de grandes áreas de resina em ambos os substratos de alumínio se podem também observar pedaços inteiros de tecido Twill de carbono o que leva a querer que neste caso a adesão foi bastante satisfatória. No provete TF3 a falha também foi adesiva e coesiva mas de forma muito menos visível e evidente.

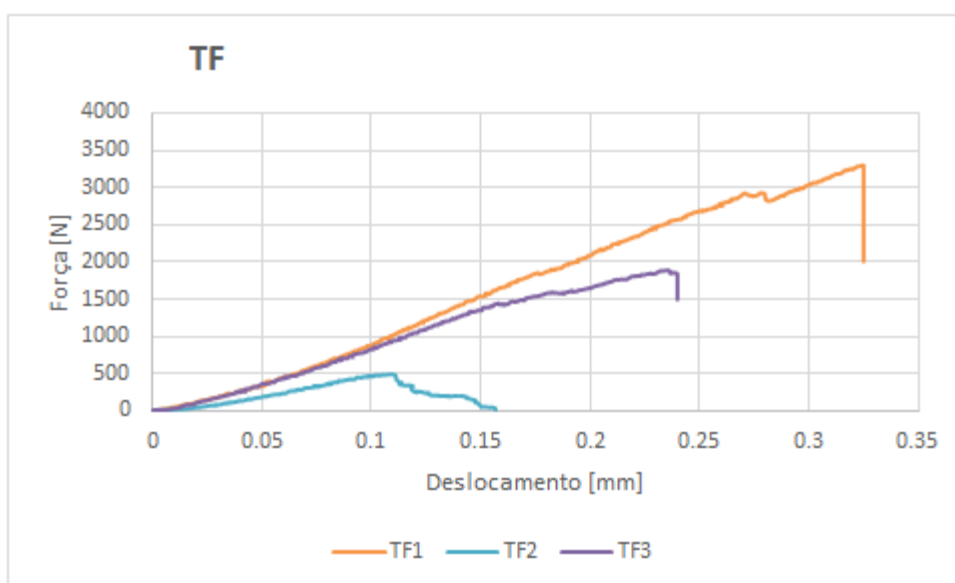


Figura 98 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo TF.



Figura 99 - Provede do tipo TF após ensaio de tração.

O aspeto microscópico presente na Figura 100 mostra que mesmo nas zonas aparentemente adesivas existem pedaços de fibras e matriz ligados ao substrato de alumínio.

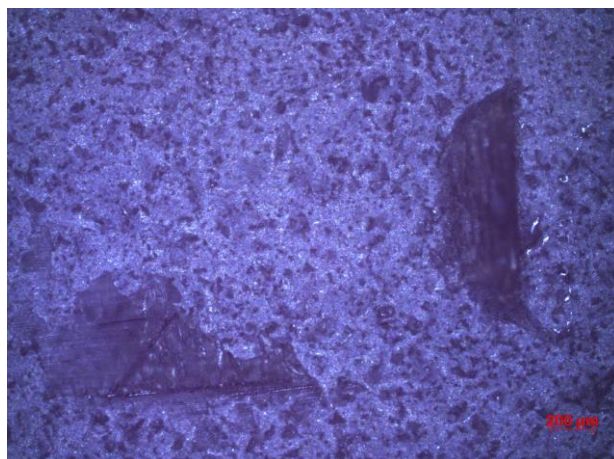


Figura 100 - Aspeto microscópico de um substrato do tipo TF após ensaio de tração.

A Figura 101 mostra as curvas força vs deslocamento das amostras do tipo G (atacadas com ácido e montadas a frio), os valores são dispersos, a força máxima varia entre 1502N e 3805N e o deslocamento varia entre 0.179mm e 0.315mm. Os provetes TG3 e TG2 apresentam falha gradual enquanto que a falha do provete TG1 é instantânea, no entanto, até ao primeiro momento de falha as curvas apresentam um comportamento próximo do linear.

Na Figura 102 são apresentados os três provetes após ensaio de tração e visualmente verifica-se que todas as falhas foram do tipo misto, nos provetes TG2 e TG3 esta falha é mais evidente. Assim, o tratamento ácido dos substratos com consequente montagem a frio dos pré-impregnados parece ser a junção de fatores que evidência melhor adesão segundo análise visual. Este foi também o procedimento onde os provetes aparentavam ser mais sólidos.

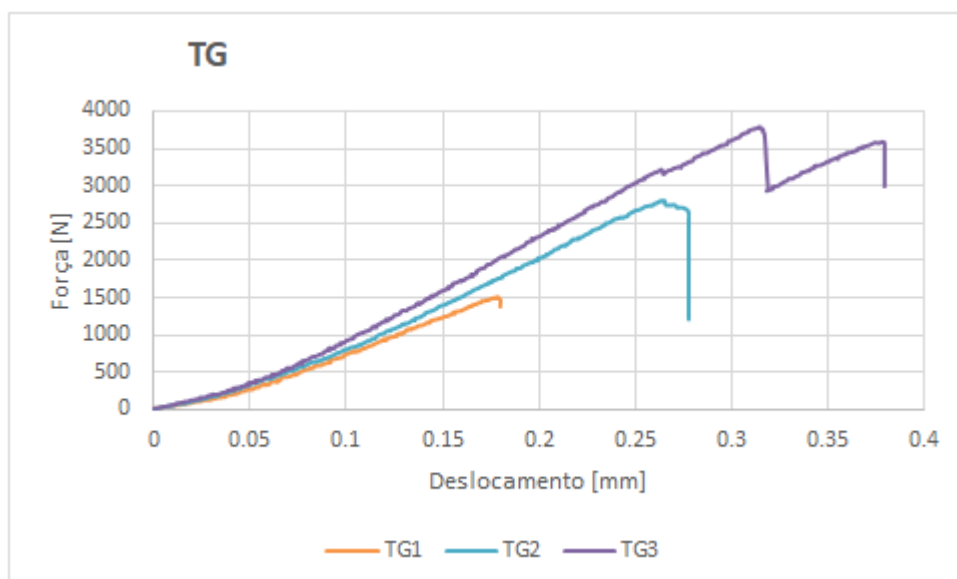


Figura 101 - Curvas Força vs Deslocamento dos provetes do tipo TG.



Figura 102 - Provete do tipo TG após ensaio de tração.

A Figura 103 demonstra o aspecto microscópico de um provete do tipo TG onde pode ser visto que, mais uma vez, existem fibras de pequena dimensão mesmo nas zonas de aparente falha adesiva a nível macroscópico. Assim, mesmo nestas zonas a falha esteve próxima de ser coesiva.



Figura 103 - Aspecto microscópico de um substrato do tipo TG após ensaio de tração.

A Tabela 21 apresenta o sumário e comparação dos resultados obtidos no ensaio de tração de junta de sobreposição simples, os valores apresentados foram obtidos por média aritmética dos provetes considerados como viáveis e que foram enunciados acima na apresentação dos resultados de cada tipo construtivo. Tendo em conta que em muitos casos o número de provetes considerados é baixo é de esperar que algumas comparações numéricas de resultados possam não ser inteiramente conclusivas. Infelizmente não foi conseguida a adesão entre os substratos de alumínio virgem e o pré-impregnado utilizado, assim, em jeito de comparação, será tomado por base o tratamento granalhado sem pré-aquecimento dos

substratos (TA) por ser um processo comum e de baixo custo. Apresentam-se então a Força máxima, o deslocamento respectivo e as alterações em percentagem destes parâmetros para o caso de cada tipo de provete quando comparados com os provetes TA.

Tabela 21 - Síntese e comparação dos resultados do ensaio de tração.

<i>Tipo de provete</i>	<i>Força máxima [N]</i>	<i>Deslocamento [mm]</i>	<i>Alteração de Força [%]</i>	<i>Alteração de deslocamento [%]</i>
TA	3502.5	0.319	-	-
TB	3199.2	0.297	-8.7	-6.9
TC	2196.3	0.240	-37.3	-24.8
TD	1260.5	0.154	-64	-51.7
TE	1446	0.161	-58.7	-49.5
TF	2384	0.256	-31.9	-19.8
TG	2682.67	0.254	-23.4	-20.4

De notar que a dispersão dos valores gráficos indica que a área de sobreposição pode ser de pequena dimensão e suscetível a imperfeições superficiais revelando assim pressão não constante aquando da cura. Pelos valores apresentados os provetes granalhados revelaram melhor comportamento durante o ensaio no que toca à força máxima admitida e ao deslocamento, contudo, por análise visual os provetes atacados com ácido proporcionaram modos de falha um pouco mais interessantes.

Interessa reparar que os provetes TB, TF e TG que, ainda que diferentes têm em comum o ataque ácido, mostraram ser aqueles que mais se aproximaram dos resultados dos provetes granalhados TA. No ensaio de tração a influência da temperatura de montagem não pareceu refletir evidentes melhorias nos resultados. Os provetes atacados com uma hidróxido de sódio refletiram maus resultados no que toca à força máxima, ao deslocamento e ao modo de rotura já que apresentaram na totalidade roturas adesivas. A ausência de dano no substrato revela também que todos os deslocamentos medidos correspondem a deformações ao nível do material compósito e na sua interface com os substratos de alumínio. Destaque-se que, excluindo os provetes tratados com hidróxido de sódio, todos os provetes apresentam fibras de dimensão microscópica mesmo nas zonas onde, macroscopicamente, a rotura aparentava ser adesiva.

4.4 Ensaio de impacto

Os ensaios de impacto foram realizados de modo a compreender melhor o comportamento dos perfis híbridos sob impacto de baixa velocidade quanto à resistência e à adesão. Todos os ensaios foram levados a cabo segundo o procedimento exposto no capítulo anterior. O software da máquina de ensaio apresenta inúmeros resultados no que toca à força, distância e energia em função do tempo, estes dados foram tratados e selecionados e apenas serão apresentados aqueles que aparentaram ser mais pertinentes. Para além dos dados de ensaio pareceu também interessante avaliar o dano visual dos provetes e a falha ou não de adesão após impacto. Apresentam-se de seguida os gráficos força vs tempo de cada um dos provetes ensaiados sendo mais tarde analisados os valores de energia e distância de penetração de forma sumariada numa tabela.

Os provetes do tipo (a) foram utilizados como controlo por forma a perceber a influência da presença da camada de pré-impregnado sob a solicitação em causa. A Figura 104 representa as curvas força vs tempo dos provetes deste tipo. A força máxima de cada um dos provetes varia entre 2857N e 3049N. Em todos os tipos de provetes a força decai após o valor máximo, ou após um valor perto do máximo, de forma quase linear até zero, este decaimento representa o ponto em que o punção deixa de penetrar no provete. Deixando de penetrar no provete o punção ressalta por restituição o que levaria a cabo um embate consecutivo. No entanto, como referido no procedimento experimental, este não foi permitido já que o “sticker” da máquina foi ativado agarrando assim o punção.

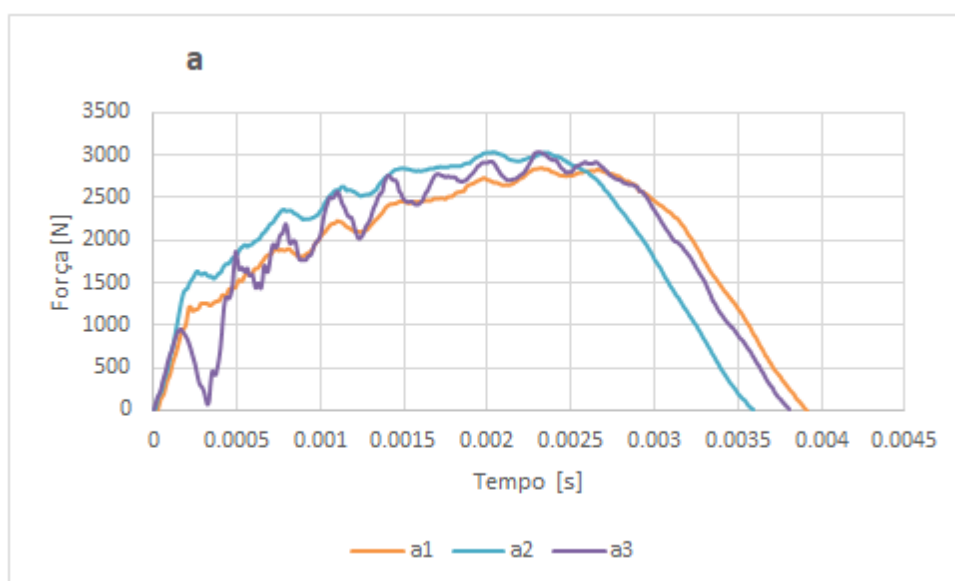


Figura 104- Curvas Força vs Tempo dos provetes do tipo a.

A Figura 105 apresenta as curvas força vs tempo dos provetes do tipo b, provetes estes onde o pré-impregnado foi montado numa face granalhada e pré-aquecida. É observável uma diminuição do número de picos gráficos pela atenuação de força levada a cabo pelas fibras, os valores máximos de cada provete definem o intervalo de força máxima para este tipo construtivo de 2956N a 3014N sendo observável uma menor discrepância de valores do que para os provetes não híbridos. Na Figura 106 está representado o aspeto do provete b2 após ensaio onde se julga ser possível visualizar um levantamento da camada de pré-impregnado associado a uma falha por delaminação, contudo, as fibras não apresentaram dano evidente. A falha por delaminação verificou-se nos três provetes do tipo b.

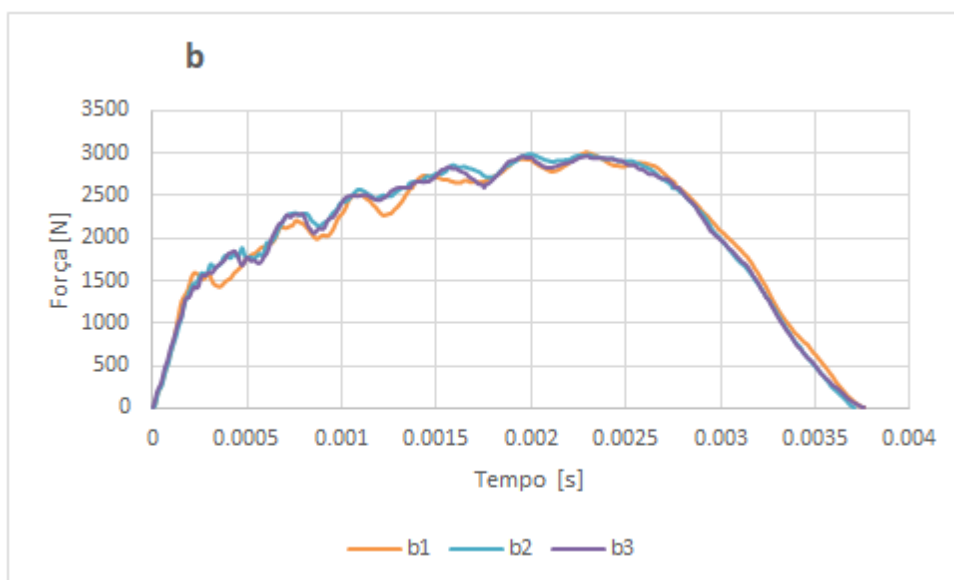


Figura 105 - Curvas Força vs Tempo dos provetes do tipo b.



Figura 106 - Aspeto após ensaio dos provetes do tipo b.

Das curvas da Figura 107, alusivas aos provetes granalhados e com montagem do compósito a frio, do tipo c, é retirado que a força máxima varia entre 2989N e 3050N. A Figura 108 mostra o aspeto final dos provetes do tipo c, verifica-se um ligeiro dano de fibras mas boa adesão mesmo após o impacto em todas os espécimes, isto leva a querer que a montagem a frio melhora as propriedades adesivas sob impacto.

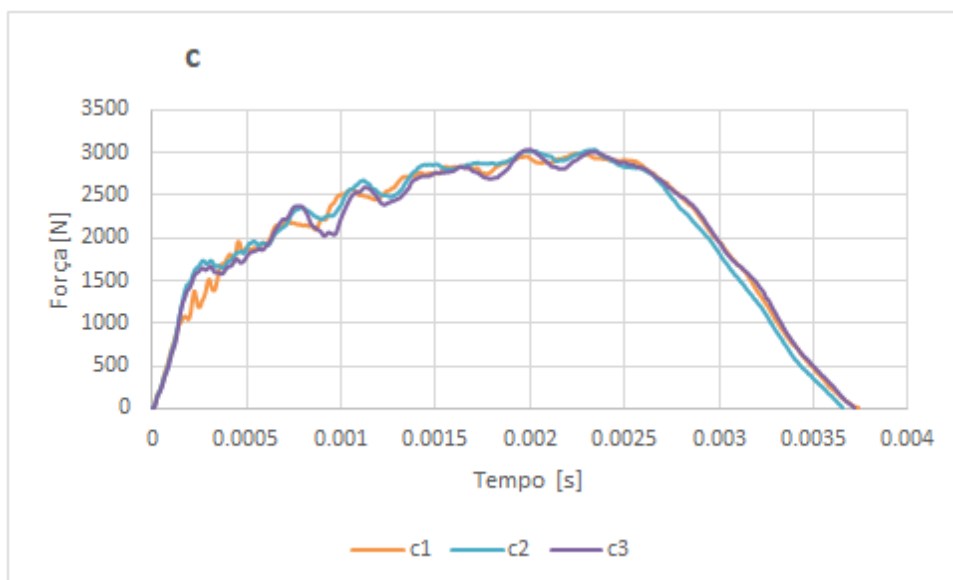


Figura 107 - Curvas Força vs Tempo dos provetes do tipo c.



Figura 108 - Aspeto após ensaio dos provetes do tipo c.

Os provetes atacados com ácido e pré-aquecidos antes da montagem do híbrido, denominados de provetes do tipo d apresentam, na Figura 109, valores máximos de força entre 2951N e 3136N, este é o valor de força mais elevado até então, no entanto, também a amplitude do mesmo intervalo é a maior.

Na Figura 110 demonstra-se que na zona de impacto do punção o compósito acompanhou o alumínio mantendo-se a adesão. No entanto, na zona periférica ao impacto verificam-se pequenas zonas de delaminação.

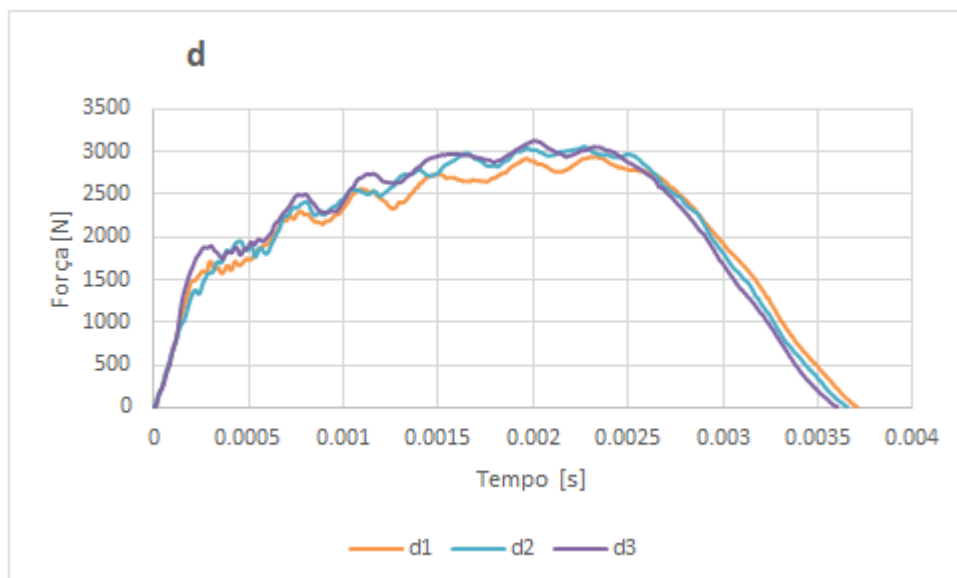


Figura 109 - Curvas Força vs Tempo dos provetes do tipo d.



Figura 110 - Aspecto após ensaio dos provetes do tipo d.

As curvas dos provetes granalhados, atacados com ácido e pré-aquecidos (tipo e) estão apresentadas na Figura 111, aparentemente as oscilações de força do provete e3 são menores que todas verificadas até então e a força máxima varia entre os valores de 2817N e 2956N, sendo este o intervalo de valores mais baixo até agora.

Na Figura 112 apresenta-se o provete e1. Todos os provetes deste tipo construtivo apresentaram delaminação após impacto o que é visível pela formação de uma bossa de compósito, este fato justifica os menores valores de força máxima adquiridos.

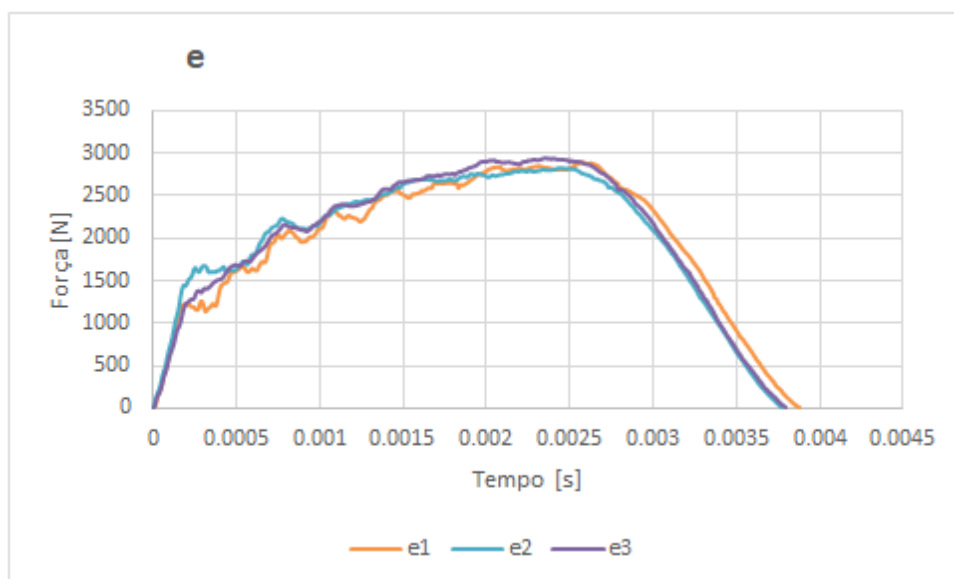


Figura 111 - Curvas Força vs Tempo dos provetes do tipo e.



Figura 112 - Aspeto após ensaio dos provetes do tipo e.

Os provetes do tipo f, provenientes de ataque com base e pré-aquecidos, apresentaram forças máximas num intervalo de 2868N a 3151N. Estes valores são os de maior discrepância geral e levam a querer que a absorção das forças é irregular pela adesão entre os materiais também não aparentar ser a melhor. Estes dados foram retirados das curvas força vs tempo que se encontram apresentadas na Figura 113.

O aspeto final após ensaio é apresentado na Figura 114 sendo visível uma falha do híbrido por delaminação já que o compósito se encontra completamente descolado do alumínio em toda a zona de impacto e na zona periférica. Aparentemente quando ocorre falha por delaminação as fibras permanecem intactas, uma vez soltas praticamente todo o impacto é absorvido por parte do perfil de alumínio.

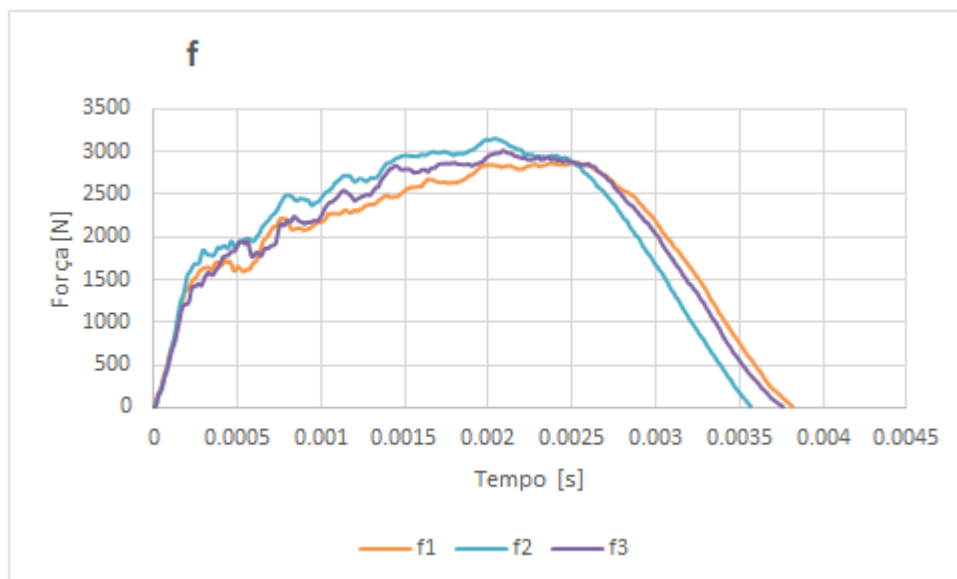


Figura 113 - Curvas Força vs Tempo dos provetes do tipo f.



Figura 114 - Aspecto após ensaio dos provetes do tipo f.

O comportamento dos provetes do tipo g (granalhados, atacados com hidróxido de sódio e pré-aquecidos antes da montagem do compósito) é demonstrado no gráfico da Figura 115. Todos os provetes se comportaram da mesma forma e as curvas chegam a ser praticamente coincidentes durante grande parte do intervalo de tempo. As forças máximas variam entre 2842N e 2870N, também aqui os provetes se mostraram regulares já que a dispersão de valores apresentada é baixa.

Após impacto ocorreu delaminação do híbrido tanto na zona de embate do punção como na periferia, tal pode ser visto na Figura 116. O aspecto apresentado foi mais uma vez comum aos três provetes.

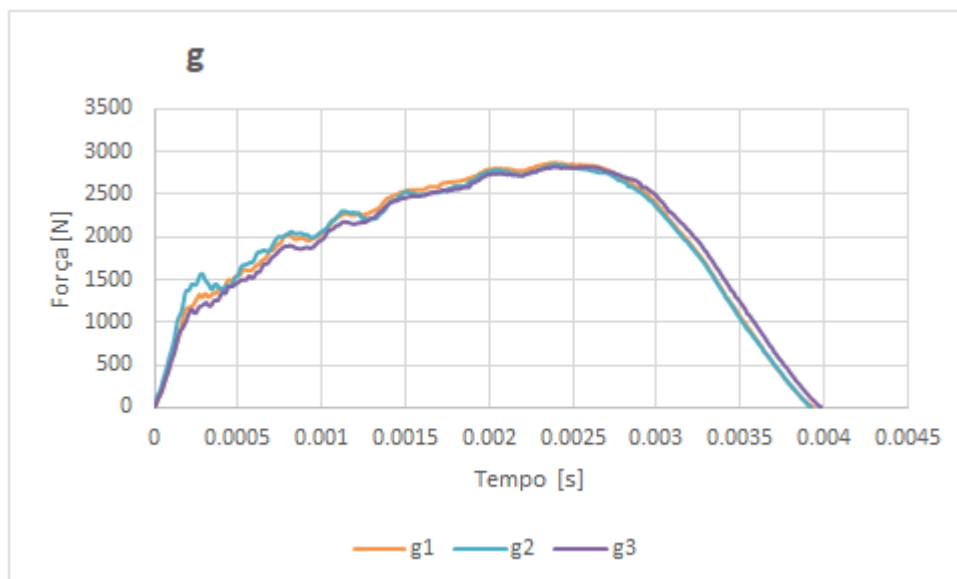


Figura 115 - Curvas Força vs Tempo dos provetes do tipo g.



Figura 116 - Aspeto após ensaio dos provetes do tipo g.

O gráfico respetivo aos provetes do tipo h (atacados com ácido e com montagem do compósito feita a frio) está representado na Figura 117, foram verificados valores máximos para a força que oscilam entre 2928N e 3055N. Na Figura 118 encontra-se representado o aspeto de um provete do tipo g após ensaio de impacto. Todos os provetes deste tipo apresentaram ausência de laminagem e dano nas fibras em qualquer zona ao longo da sua extensão, isto leva a querer que o fator principal para que a delaminação não ocorra é a montagem ser feita a frio com consecutiva cura do híbrido a partir da temperatura ambiente como é indicado pelo fornecedor.

A Tabela 22 apresenta a força máxima, os valores de distância e energia absorvida para o instante em que ocorre essa mesma força máxima e para o instante em que se dá a falha material, todos estes valores são obtidos calculando a média dos três provetes correspondentes a cada tipo construtivo.

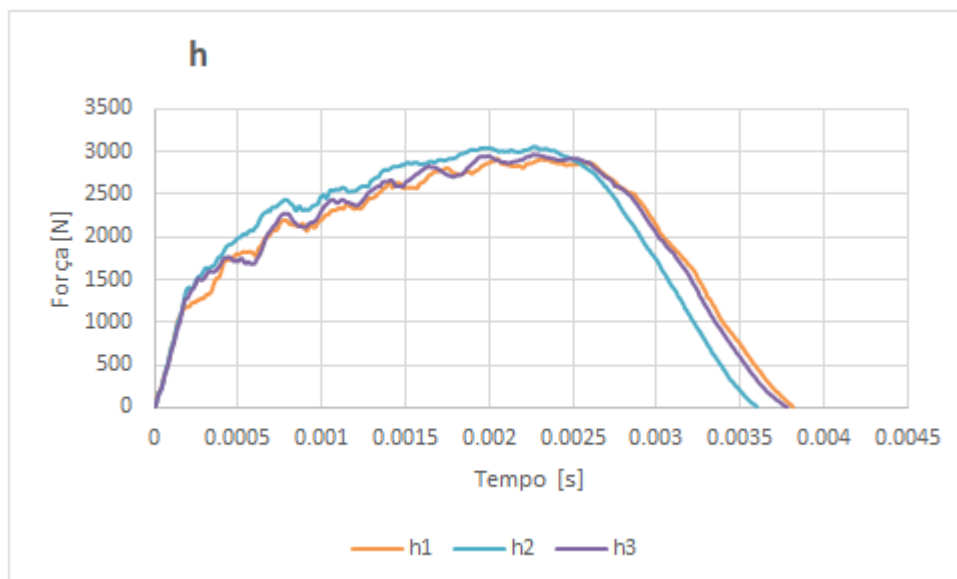


Figura 117 - Curvas Força vs Tempo dos provetes do tipo h.



Figura 118 - Aspeto após ensaio dos provetes do tipo h.

Como seria de esperar para um ensaio de impacto de baixa energia as diferenças da energia absorvida entre provetes não são completamente evidentes. Ainda assim, podem ser tiradas algumas conclusões: toda a energia aplicada durante a queda (5J) é praticamente absorvida durante o ensaio e os valores de energia do pico máximo de força são inferiores mas próximos dos valores de energia da falha já que, neste caso o pico ocorre muito próximo da penetração máxima do punção. No que toca à distância de penetração, a presença de uma fina camada de compósito não mostra ser suficiente para que a penetração seja amplamente reduzida tanto no pico máximo de força como na falha, contudo, de uma forma geral, pode ser observado ligeiro decréscimo do seu valor. A força máxima do provete não híbrido foi superior à maioria dos restantes provetes. Em todos os provetes híbridos a força é atenuada de forma gradual ao longo do tempo. Visualmente a adesão é melhorada quando não se efetua pré-aquecimento aos perfis e o pré-impregnado é montado a frio, os provetes com tratamento

ácido de superfície e montagem a frio mostraram bons resultados não existindo qualquer vestígio de delaminação.

Tabela 22 – Sumário dos resultados obtidos no ensaio de impacto por queda de peso.

<i>Tipo de proveite</i>	<i>Valores de pico máximo</i>			<i>Valores de falha</i>	
	<i>Força máxima [N]</i>	<i>Distância [mm]</i>	<i>Energia [J]</i>	<i>Distância [mm]</i>	<i>Energia [J]</i>
<i>a</i>	3013	2.547	4.796	2.585	5.170
<i>b</i>	2985	2.410	4.888	2.381	5.137
<i>c</i>	3023	2.355	4.847	2.279	4.994
<i>d</i>	3047	2.333	4.883	2.249	4.9967
<i>e</i>	2889.6	2.543	5.003	2.435	5.022
<i>f</i>	3011	2.373	4.835	2.202	4.993
<i>g</i>	2847	2.6	4.851	2.536	5.011
<i>h</i>	2981	2.373	4.796	2.315	4.987

4.5 Ensaio de corrosão galvânica

Os ensaios de corrosão galvânica foram realizados no âmbito de atribuir alguma sensibilidade à corrosão que ocorre entre os materiais utilizados que, como sabido, é um problema comum entre os mesmos. Todos os ensaios foram levados a cabo segundo o procedimento exposto no capítulo anterior.

Apresentam-se, nas Figuras 119 e 120, os resultados relativos ao referido ensaio sob a forma de curvas corrente elétrica vs tempo. Como referido anteriormente, o multímetro disponibilizado mostrou-se sensível ao ponto de traduzir a leitura dos valores de corrente nas suas duas menores ordens de grandeza possíveis, este facto, aliado à ausência de aquisição computacional de dados por parte do aparelho, proporciona o aspeto ondulado das curvas da Figura 119. Por sua vez, a Figura 120, apresenta o aspeto gráfico expetável das mesmas curvas no caso de o multímetro permitir leituras de maior rigor. Estas curvas foram obtidas

por aproximação de linhas de tendência recorrendo a uma função polinomial de segunda ordem.

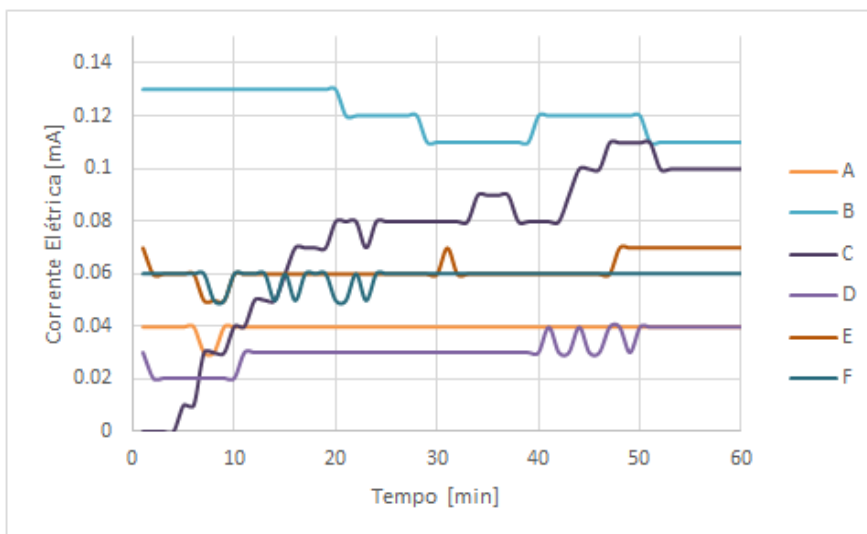


Figura 119 – Curvas resultantes de corrente elétrica em função do tempo.

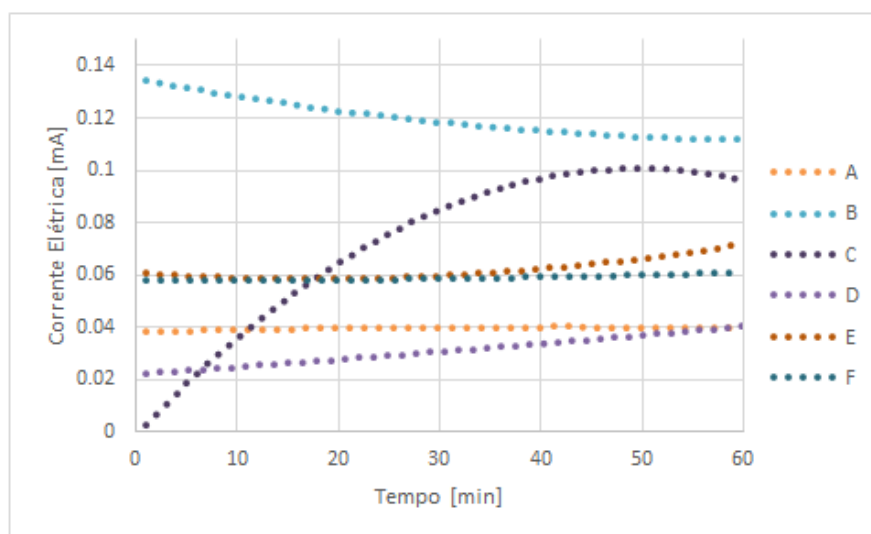


Figura 120 – Curvas de tendência aproximadas por uma função polinomial de segunda ordem da corrente elétrica em função do tempo.

Verifica-se que, à exceção da curva C, todas as curvas apresentam um formato próximo do linear, isto significa que durante o intervalo de ensaio de uma hora a corrosão galvânica se manteve praticamente constante. O teste ao provete do tipo C foi repetido de forma a obter confirmação do aspeto gráfico obtido, contudo, mais uma vez os resultados demonstraram uma tendência crescente de corrosão até, aproximadamente, ao minuto 50 de ensaio. Neste provete salienta-se também o muito baixo valor de corrosão inicial.

Como seria de esperar, em geral, foram verificados maiores valores de corrosão galvânica nos provetes que possuem maior rugosidade. Apenas o provete do tipo B (granalhado) apresentou uma descida dos valores de corrente elétrica, contudo, este foi também o provete cuja corrente foi superior, sendo assim de esperar que seja a pior solução construtiva no que toca à corrosão. Apenas o provete D (granalhado e atacado com ácido) verificou, durante todo o intervalo de ensaio, valores de corrente inferiores aos do provete não tratado A.

De forma a analisar a corrosão galvânica média ao longo de todo o intervalo foram calculados os valores médios de corrente elétrica verificados durante o tempo de ensaio, estes são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Valores médios da corrente elétrica verificada no ensaio de corrosão galvânica realizado.

<i>Provete</i>	<i>Corrente elétrica média [mA]</i>
<i>A</i>	0.040
<i>B</i>	0.120
<i>C</i>	0.073
<i>D</i>	0.031
<i>E</i>	0.062
<i>F</i>	0.059

Todos os valores verificados são de muito baixa ordem, o que indica baixa condutividade elétrica entre os provetes de alumínio e o CFRP, isto pode ser justificado pela presença da matriz polimérica em torno das fibras na zona imersa do provete de CFRP. Atendendo aos valores médios calculados pode ser visto que:

- o provete C (atacado com ácido), apesar do seu aspeto gráfico crescente, apresenta um valor médio de corrente elétrica aceitável quando comparado com os restantes;
- os provetes E e F, que têm em comum o ataque por recurso a uma base forte, mostraram valores baixos de corrente, pouco acima dos verificados para o provete não tratado A;

- o provete D (granalhado e atacado com ácido) revela um valor médio de corrente inferior ao do provete não tratado A;
- o provete B (granalhado) revelou um valor médio de corrente três vezes superior ao do provete A, esperando-se assim uma elevada corrosão adjacente à granalhagem.

Pode então ser dito que, excluindo o provete D, em todos os restantes provetes serão expetáveis fenómenos de corrosão galvânica superiores aos verificados no alumínio não tratado.

4.6 Análise de rugosidade

Uma vez que, os resultados do ensaio de energia superficial se mostraram duvidosos e de forma a compreender melhor os resultados obtidos nos ensaios mecânicos e no ensaio de corrosão foi feita uma análise de rugosidade superficial. Esta análise foi de encontro ao procedimento descrito no capítulo anterior.

De seguida, na Tabela 24, são apresentados os parâmetros R_a (*Average Roughness*) e $R_{máx}$ (*Maximum peak-to-valley height*) para cada um dos provetes testados e a razão entre cada um deles e o valor do provete A do parâmetro em questão.

Tabela 24 – Valores de R_a e $R_{máx}$ para os provetes testados e aumento dos mesmos sob a forma de razão.

Proвете	R_a [μm]	Razão $R_a X/R_a A$	$R_{máx}$ [μm]	Razão $R_{máx} X/R_{máx} A$
A	0.204	-	2.664	-
B	4.813	23.6	46.106	17.3
C	0.350	1.7	8.470	3.2
D	4.473	21.9	32.824	12.3
E	5.595	27.4	32.685	12.3
F	2.478	12.2	22.060	8.3

Os tratamentos superficiais realizados aumentaram a rugosidade, tanto segundo o parâmetro R_a como segundo o parâmetro $R_{máx}$. Verifica-se que, em praticamente todos os tratamentos aplicados, o aumento da rugosidade média foi superior ao aumento da rugosidade máxima.

Entre os provetes tratados superficialmente pode ser dito que:

- o provete A (não tratado) apresenta baixos valores de rugosidade;
- o provete C (tratado com hidróxido de sódio) revelou os menores valores de rugosidade média e de rugosidade máxima;
- o provete E (tratado com ácido muriático) revelou o maior valor de rugosidade média e alto valor rugosidade máxima;
- o provete B (granalhado) revelou o maior valor de rugosidade máxima e elevado valor de rugosidade média;
- os provetes D e F (granalhados e posteriormente atacados, respetivamente, com hidróxido de sódio e ácido muriático) demonstraram menores valores de rugosidade média e máxima quando comparados com o provete simplesmente granalhado.

O primeiro ponto apresentado justifica a falha de adesão verifica durante o procedimento experimental, quando se tentou aderir o CFRP aos perfis de alumínio não tratados.

O último ponto apresentado leva a querer que os tratamentos químicos, quando realizados após granalhagem, conduzem a uma diminuição dos parâmetros de rugosidade e, assim, a um aspeto mais uniforme da superfície que pode ser confirmado macroscopicamente.

De entre todos os tratamentos realizados o tratamento ácido foi aquele que resultou em parâmetros de rugosidade mais apelativos quando se procura atingir boa adesão entre materiais, pois, para conseguir boa adesão interessa que os parâmetro de rugosidade média e máxima sejam elevados. Importa perceber que um valor excessivo da rugosidade máxima pode ser prejudicial para a adesão pois pode promover o aparecimento de zonas onde os materiais não contactem entre si.

De seguida, nas Figuras 121 a 126, são apresentadas as imagens alusivas a cada um dos provetes, imagens estas que foram retiradas do instrumento de metrologia ótica Bruker NpFlex. Como este aparelho funciona por reflexão luminosa e a rugosidade medida em alguns provetes é elevada, é normal que nas imagens seguintes apareçam pontos negros de

descontinuidade, uma vez que, quando o declive entre um pico e/ou um vale consecutivos é muito acentuado, a reflexão luminosa é feita segundo um ângulo que dificilmente permite a captação por parte do aparelho. Assim, como se aprecia nas figuras abaixo, leituras mais eficazes são conseguidas para baixas rugosidades. Destaque-se que, esta falha de leitura dos valores intermédios não influencia o cálculo dos parâmetros de rugosidade pois este é feito através dos valores alusivos aos picos e aos vales sendo até possível, posteriormente, interpolar os valores intermédios referidos.

A escala apresentada foi definida pelo provete B, por ser aquele que apresenta, tanto o pico mais alto como o vale mais baixo de entre todos os provetes analisados. Esta escala foi tomada como comum a todas as figuras de modo a permitir uma comparação direta entre as mesmas.

Nos provetes de baixa rugosidade, nomeadamente A e C, é possível observar as linhas de extrusão do perfil e a dimensão de teste de 2mm por 6mm assinalada no capítulo anterior.

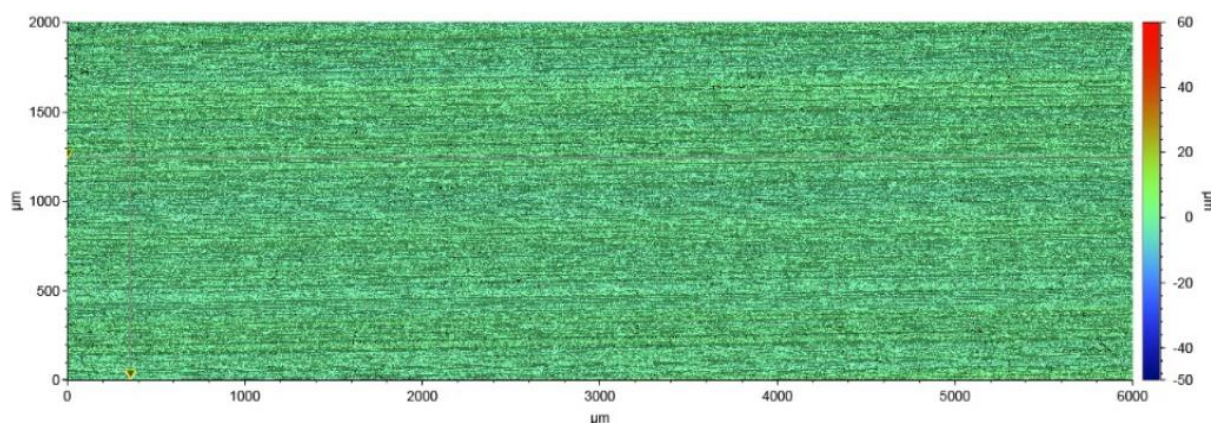


Figura 121 – Superfície de teste do provete A.

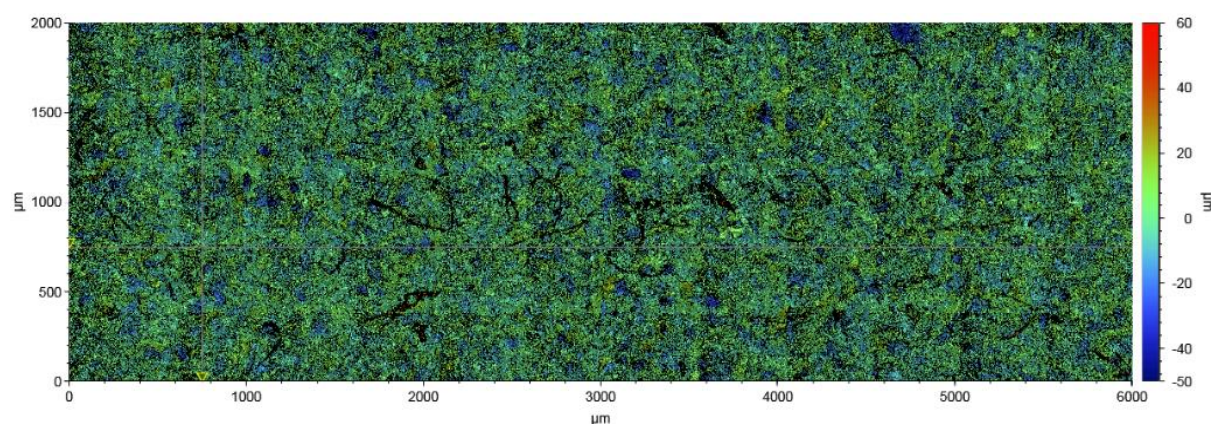


Figura 122 – Superfície de teste do provete B.

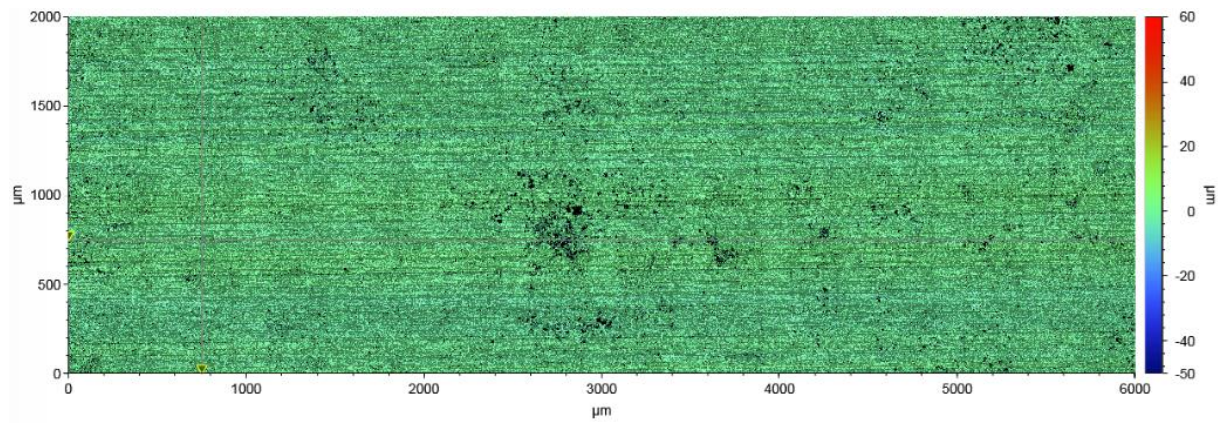


Figura 123 – Superfície de teste do provete C.

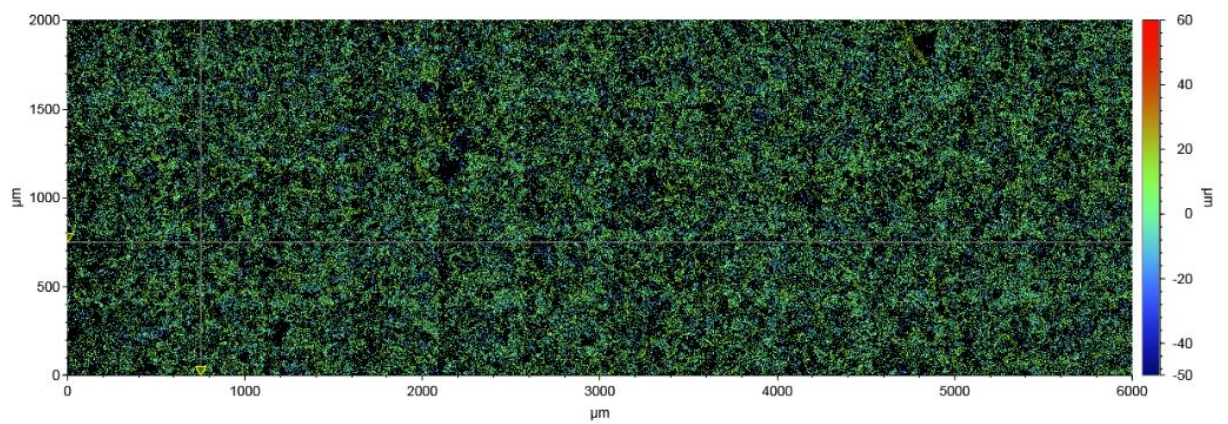


Figura 124 – Superfície de teste do provete D.

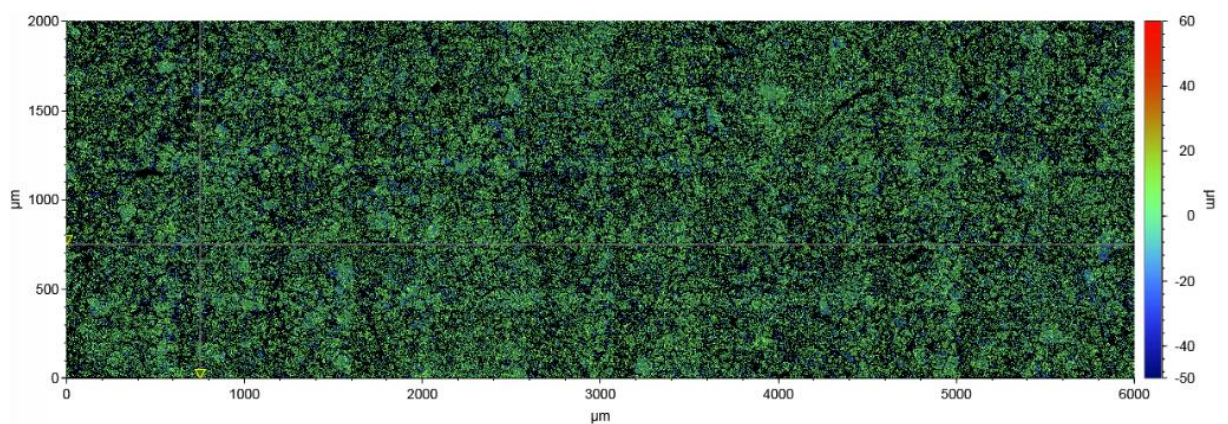


Figura 125 – Superfície de teste do provete E.

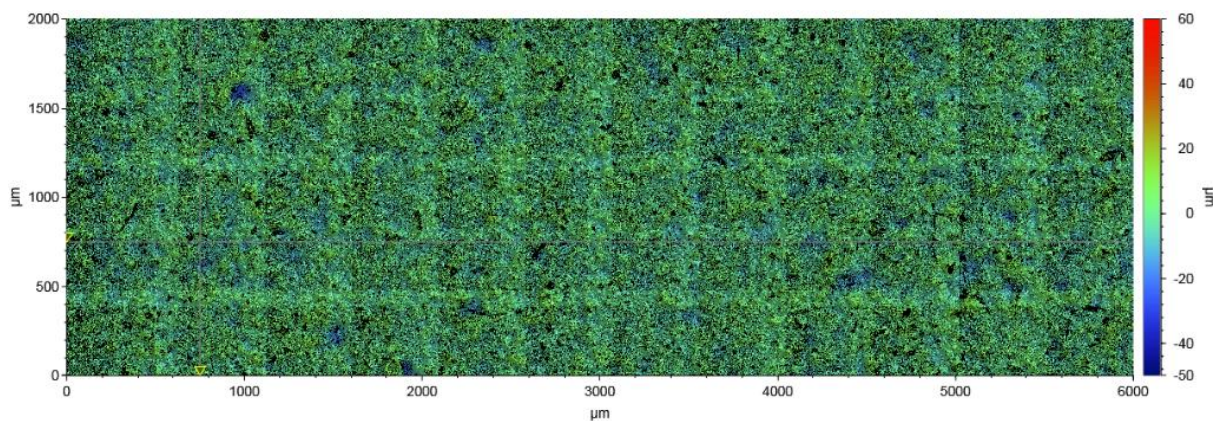


Figura 126 – Superfície de teste do provete F.

4.7 Discussão e sumário dos resultados experimentais

Resumem-se, nesta instância, as análises efetuadas acima de forma a simplificar as conclusões retiradas.

Denote-se que, no ensaio de flexão realizado, o ataque ácido levado a cabo demonstrou um bom potencial, já que, proporcionou valores mais elevados de força máxima admissível e um deslocamento até à rotura aceitável. Foi segundo a conjugação deste tratamento ácido com a montagem a frio do compósito que se mostrou evitar a falha de adesão e/ou rotura de fibras até ao final do ensaio.

No que toca ao ensaio de tração, os provetes granalhados apresentaram os melhores resultados de força máxima e respetivo deslocamento. No entanto, mais uma vez, os provetes atacados com ácido também revelaram um bom comportamento pois foram aqueles que mais se aproximaram dos resultados obtidos nos provetes granalhados. Neste ensaio a temperatura de montagem não pareceu influenciar as propriedades adesivas do híbrido. A aplicação de um tratamento básico revelou, aqui, maus resultados. Na maioria dos provetes que, macroscopicamente, aparentavam falha adesiva é possível observar a presença de fibras e zonas de matriz acopladas aos substratos recorrendo ao microscópio.

O ensaio de impacto por queda livre de peso deu a entender que, a temperatura segundo o qual o híbrido é montado influencia diretamente os resultados. Os provetes montados a frio mostraram bons resultados não existindo praticamente nenhum tipo de problema de adesão no fim do ensaio. O melhor resultado foi conseguido para os provetes tratados com ácido e montados a frio.

O ensaio de corrosão galvânica revelou que, de uma forma geral, a corrosão tende a aumentar com o aumento da rugosidade. Os provetes tratados quimicamente revelaram melhores resultados que o provete granalhado, esperando-se que o fenómeno de corrosão resultante destes tratamentos químicos seja ligeiramente superior ao do alumínio não tratado

Os dados obtidos não vão de encontro à previsão efetuada no teste de energia de superfície. Segundo este ensaio seria de esperar má adesão nos provetes tratados com ácido, boa adesão nos provetes granalhados e atacados por uma base e adesão moderada nos provetes simplesmente granalhados. Relembre-se que, como referido, a rugosidade superficial dos provetes varia ao longo do tempo e, por isso, foi solicitado que este ensaio fosse efetuado com a maior brevidade possível, contudo, pensa-se que o mesmo não tenha acontecido.

No que toca à análise de rugosidade, pode ser dito que a adesão verificada e os dados obtidos nos ensaios mecânicos estão de acordo com os parâmetros de rugosidade calculados. Por estes parâmetros previa-se que a adesão fosse superior nos provetes granalhados e nos provetes tratados com ácido, tal foi verificado visualmente e confirmado pelos resultados dos ensaios acima descritos.

5 Simulação

Nesta instância são apresentados os resultados de uma simulação de alguns dos ensaios realizados, nomeadamente, os ensaios de tração de sobreposição simples e flexão a quatro pontos. Saliente-se que, nos modelos seguidamente apresentados a adesão entre os materiais é considerada perfeita, uma vez que, para determinar as propriedades adesivas e de superfície dos materiais são necessários ensaios específicos e intangíveis ao estudo efetuado. Assim, a falha dos provetes ocorrerá apenas por falha coesiva ou material. Apesar de tudo, as simulações efetuadas permitem, não só a comparação de valores experimentais, mas também, demonstrar a possibilidade de previsão dos mesmos por via computacional.

5.1 Abaqus

Como forma de comparação dos valores experimentais de força e deslocamento e do aspeto gráfico dos resultados obtidos nos ensaios de flexão a quatro pontos e tração de sobreposição simples foi realizada uma simulação pelo método de elementos finitos no software Abaqus. As simulações apresentadas não servem para corroborar ou invalidar os resultados dos ensaios, pois, para tal, seria necessário definir as propriedades adesivas e de superfície dos materiais o que implica a realização de análises específicas. Assim, os modelos apresentados servem de aproximação ao comportamento do híbrido ao nível material.

Para a realização dos modelos foram utilizadas propriedades mecânicas e coesivas baseadas na literatura fornecida pelo Laboratório de Adesivos do Departamento de Engenharia Mecânica da FEUP. Estas estão presentes na Tabela 25, e são definidas como:[54],[55]

- E – módulo de Young;
- ν – coeficiente de Poisson;
- G – tensão de corte coesiva;

- t_n^0 – tensão normal coesiva;
- t_{s1}^0 – tensão de corte coesiva da primeira direção;
- t_{s2}^0 – tensão de corte coesiva na segunda direção;
- G_n^0 – resistência à fratura normal;
- G_{s1}^0 – resistência à fratura de corte na primeira direção;
- G_{s2}^0 – resistência à fratura de corte na segunda direção.

Tabela 25 - Propriedades dos materiais utilizadas nos modelos concebidos.

<i>Propriedades</i>	<i>Pré-impregnado</i>	<i>Alumínio 6060</i>
E [MPa]	10500	69500
ν	0.35	0.33
G [MPa]	3700	-
t_n^0 [MPa]	40	-
t_{s1}^0 [MPa]	35	-
t_{s2}^0 [MPa]	35	-
G_n^0 [N/mm]	0.59	-
G_{s1}^0 [N/mm]	1.17	-
G_{s2}^0 [N/mm]	1.17	-

5.1.1 Tração de sobreposição simples

Atendendo às dimensões dos provetes, às propriedades apresentadas e à montagem efetuada foi construído o modelo numérico apresentado na Figura 127. A zona de sobreposição em que se encontra o CFRP é de muito pequena dimensão, podendo não ser clara na mesma representação. Na Figura 128 representa-se, em detalhe, o primeiro momento de aplicação da carga de tração e a consequente rotação da zona de sobreposição do provete provocada pelo momento adjacente ao desalinhamento do aperto do mesmo. A fratura do provete é representada na Figura 129 sob a forma de uma falha do tipo coesivo.

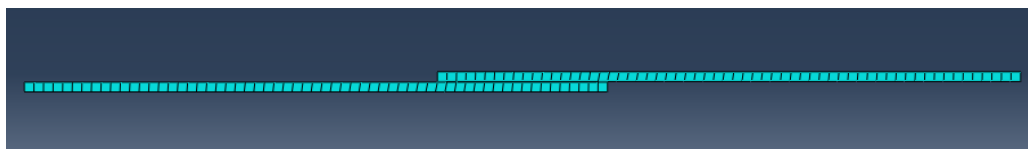


Figura 127 - Representação do modelo alusivo ao ensaio de tração de sobreposição simples.

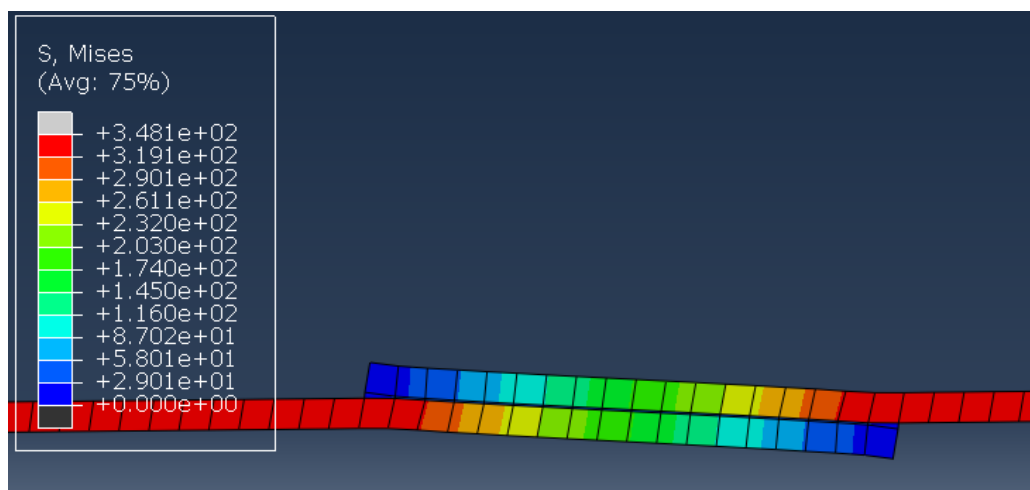


Figura 128 – Rotação provocada pelo desalinhamento dos apoios no primeiro momento de carga.

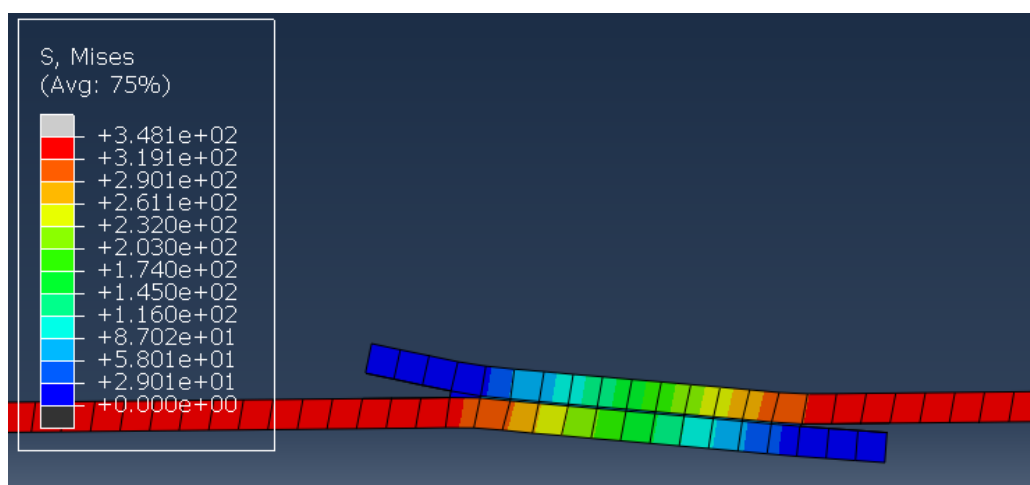


Figura 129 – Rotura do provete por falha coesiva.

A curva força vs deslocamento obtida a partir da simulação do modelo concebido está representada na Figura 130. Desta curva podem-se retirar a força máxima admissível de cerca de 23500N e o deslocamento respetivo de, aproximadamente, 1.075mm, estes valores afastam-se dos obtidos experimentalmente.

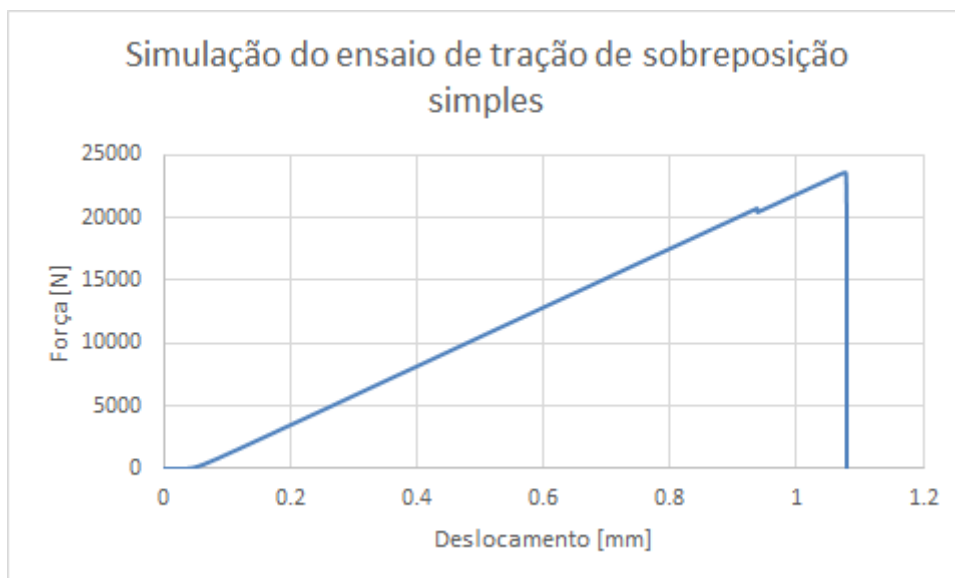


Figura 130 - Curva força vs deslocamento do modelo simulado para o ensaio de tração de sobreposição simples.

Como forma de comparação, são demonstradas na Figura 131, as curvas força vs deslocamento do modelo simulado e dos provetes ensaiados. Denote-se que, dentro de cada tipo construtivo, apenas se utilizou o provete cujos resultados foram os melhores, acreditando que, por aperfeiçoamento do procedimento experimental estes resultados podem ser replicados várias vezes. Os intervalos de força e deslocamento a apresentar foram definidos de forma a que a comparação seja mais facilitada.

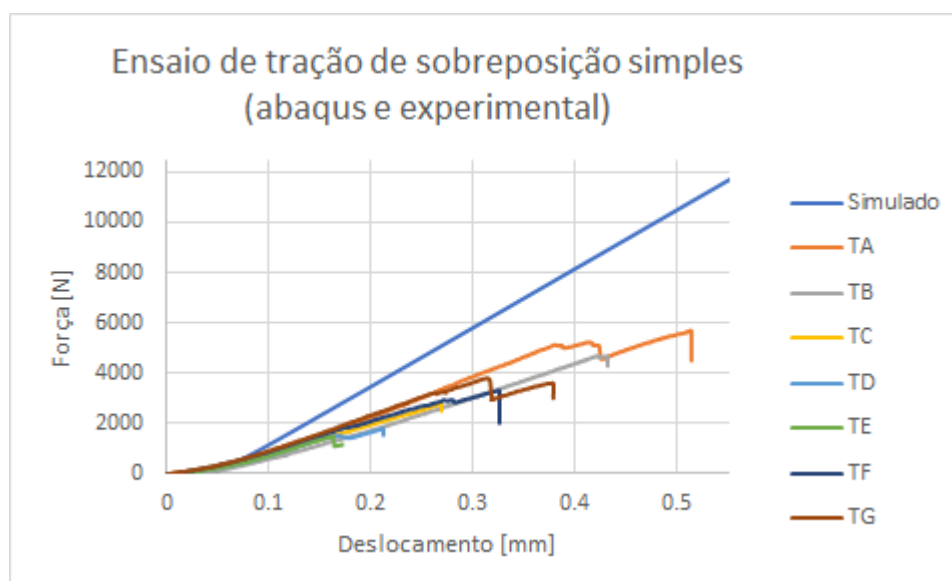


Figura 131 - Comparação das curvas força vs deslocamento alusivas aos ensaios e ao modelo simulado.

Por análise das curvas apresentadas, pode ser dito que o comportamento dos provetes ensaiados não se aproxima verdadeiramente da resposta do modelo simulado, existindo grande discrepância entre as forças máximas e os deslocamentos adquiridos experimentalmente e a força de rotura do modelo. Também a relação entre estes parâmetros, descrita pelo declive das curvas, não é a mesma. Pode ser dito que, a caracterização da falha adesiva do conjunto por exigência de propriedades específicas apenas possíveis de obter segundo ensaios apropriados, é um ponto crucial para a aproximação dos resultados experimentais e numéricos, uma vez que, experimentalmente, grande parte das falhas foram mistas e/ou adesivas. Acredita-se que, após definição destas propriedades, o modelo utilizado sirva de muito boa aproximação ao ensaio levado a cabo.

5.1.2 Flexão a quatro pontos

Foi concebido um modelo numérico para o ensaio de flexão a quatro pontos realizado tendo em conta as dimensões do provete e os parâmetros de ensaio utilizadas. Para o caso apresentado foram consideradas as propriedades plásticas do alumínio já que a deformação plástica ocorreu em todos os provetes ensaiados, para tal, foram definidos, por iteração de uma curva tensão vs deformação do material, os parâmetros necessários à simulação. A Figura 132 apresenta o modelo e malha concebidos, é de salientar que a grande dimensão e refinamento da malha utilizada no mesmo resultaram numa difícil análise por parte do software Abaqus. A falta de propriedades próprias do pré-impregnado segundo as suas direções principais também limitou a análise. Uma vez mais, a zona de malha correspondente ao CFRP é de muito pequena espessura, tornando-se assim difícil a sua observação.

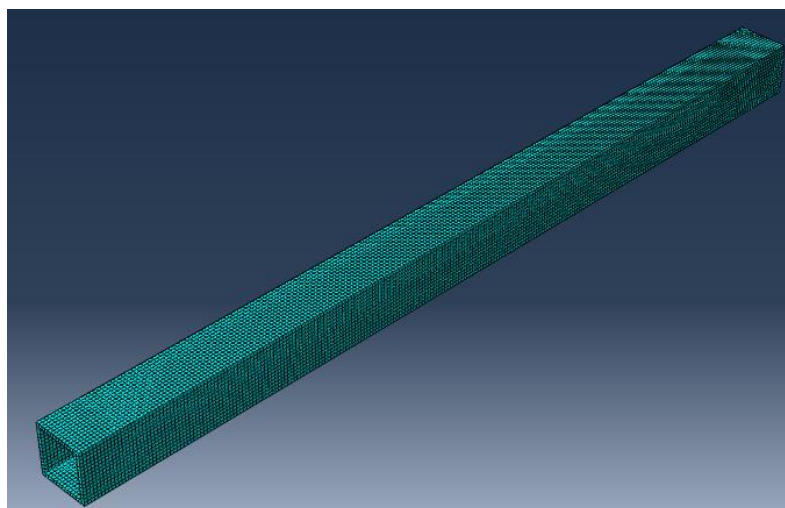


Figura 132 – Rpresentação do modelo para flexão a quatro pontos.

Na Figura 133 está representado o momento inicial de aplicação do carregamento e nas Figuras 134 e 135 é possível observar o aspeto final do modelo, como um todo e destacando a zona de maior plasticidade final, respetivamente.

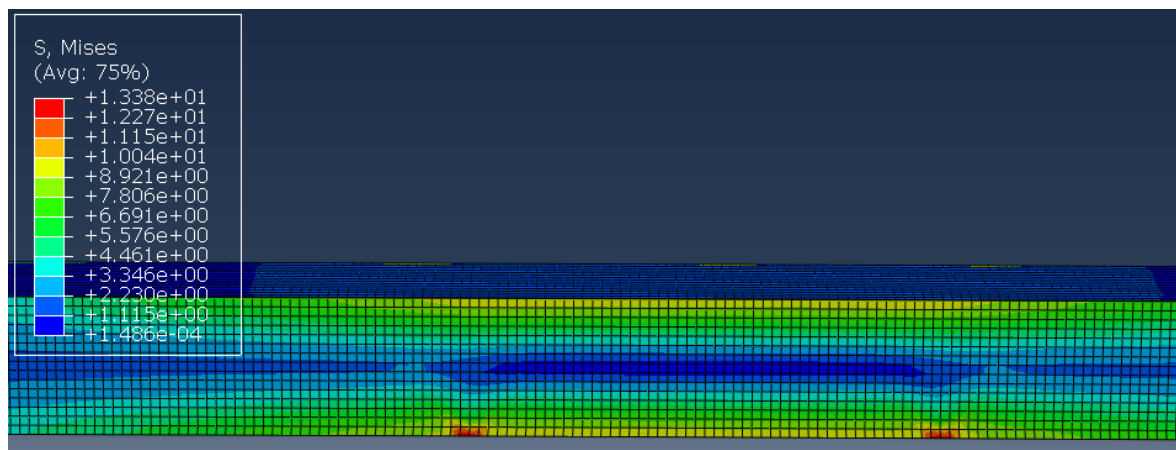


Figura 133 - Representação do instante inicial de aplicação da carga.

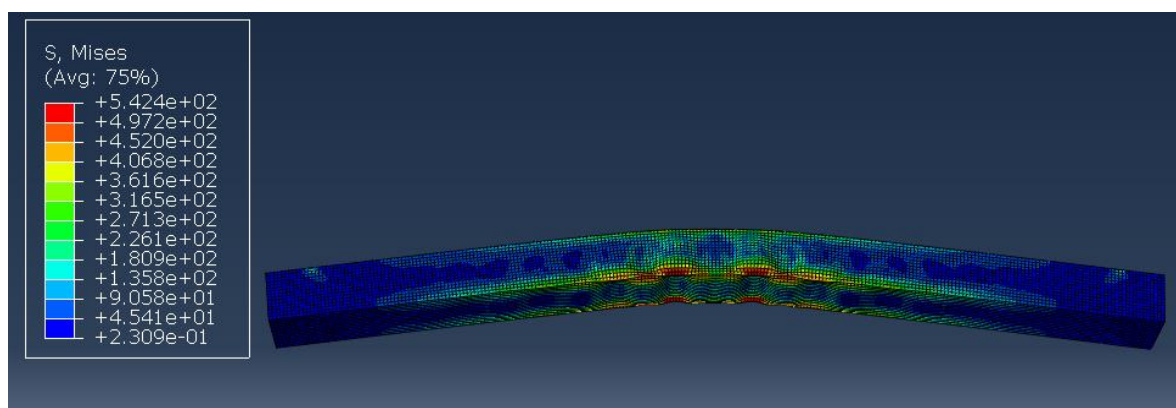


Figura 134 -Representação do aspeto final do modelo após ensaio.

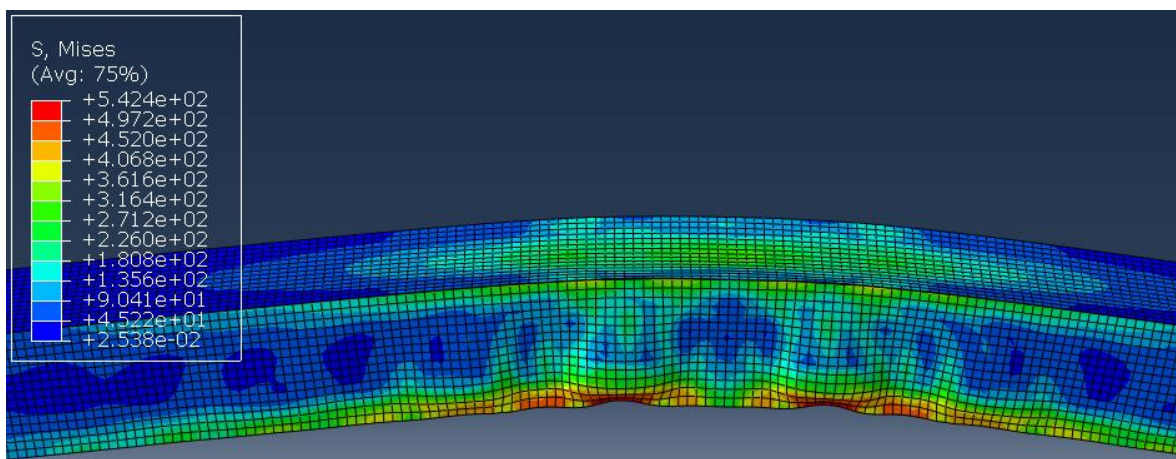


Figura 135 – Representação em pormenor da zona de maior plasticidade do modelo após ensaio.

A curva força vs deslocamento obtida pode ser observada na Figura 136. Do gráfico podem ser tirados os valores de, aproximadamente, 6200N para a força limite elástico e 7000N para a força máxima admissível. Pode ser dito que não ocorreu a falha do modelo por meio coesivo ou rotura de fibras, no entanto, foi facilmente atingido o domínio plástico.

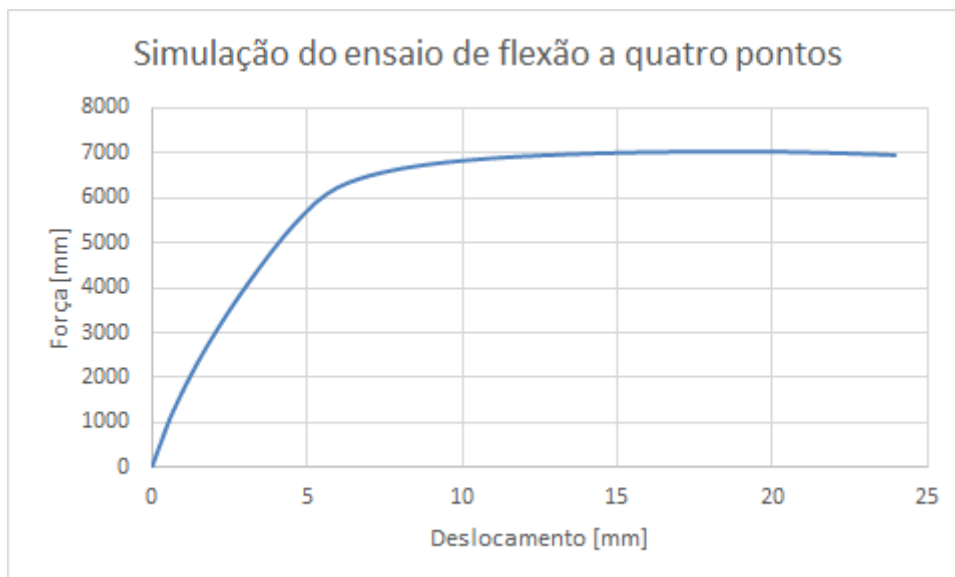


Figura 136 - Curva força vs deslocamento do modelo simulado para o ensaio de flexão a quatro pontos.

Mais uma vez, em jeito de comparação, são demonstradas na Figura 137, as curvas força vs deslocamento do modelo simulado e do melhor provete ensaiado dentro de cada tipo construtivo. O intervalo das curvas foi ajustado de forma a permitir uma melhor análise.

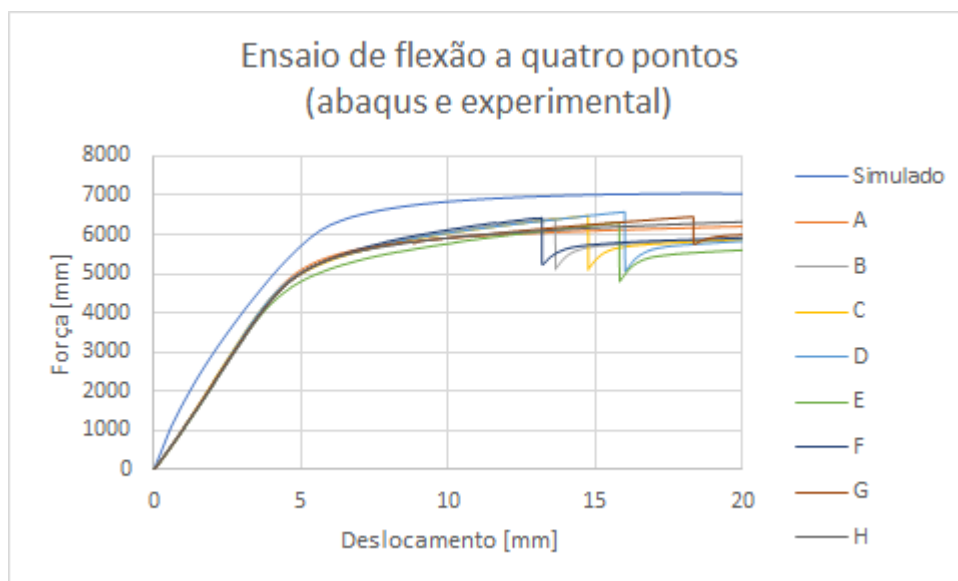


Figura 137 - Comparação das curvas força vs deslocamento alusivas aos ensaios e ao modelo simulado.

De acordo com os resultados obtidos anteriormente, os provetes ensaiados apresentam um comportamento próximo do simulado. Em todos os provetes ensaiados a força máxima admissível é menor que a do modelo simulado, tal como o limite elástico. Quanto ao aspeto das cruvas, o provete do tipo H foi aquele que mais se aproximou do modelo simulado já que não ocorreu a rotura de fibras. A coerência apresentada revela rigor no procedimento experimental e o na execução do modelo, mesmo sem o total conhecimento dos materiais em questão. Assim, este modelo pode ser considerado como uma base válida para a validação de resultados de ensaios de flexão a quatro pontos e pode ser visto como algo a desenvolver.

6 Conclusões e perspectivas de trabalhos futuros

6.1 Conclusões

A presente dissertação permitiu clarificar conhecimentos acerca dos materiais em questão e dos sistemas híbridos metal/compósito onde a adesão é assegurada pela matriz do compósito. Assim, os fenômenos de adesão, corrosão e a influência do tratamento superficial nos mesmos foram também aprofundados.

Na construção do híbrido utilizaram-se pré-impregnados de matriz de resina de epóxico de matriz polimérica e perfis de alumínio de secção quadrada sob diferentes tratamentos superficiais (granalhagem, ataques químicos por ácido e por base e conjugação de ambos) e diferentes condições de montagem ao nível da temperatura. Os híbridos construídos foram testados segundo ensaios de flexão, impacto e tração de sobreposição simples. A interação entre os materiais e a influência do seu estado superficial foi investigada através de ensaios de corrosão galvânica e rugosidade e energia superficiais.

Quanto ao trabalho experimental, conclui-se que a hibridização com adesão garantida pela matriz do compósito é viável e os híbridos assim construídos revelaram melhorias em alguns dos ensaios efetuados. Em relação à adesão, conclui-se que, nesta conjugação de materiais, o tratamento de superfície é necessário, já que de outra forma não se conseguiu produzir híbridos. Com a alteração da superfície, quer através de granalhagem quer através de ataque químico, verificaram-se resultados interessantes, sendo conseguida a adesão em todos os tratamentos efetuados. De entre os tratamentos descritos o ataque químico por recurso a ácido muriático e a granalhagem foram aqueles que revelaram evidentes melhorias nos resultados dos ensaios mecânicos realizados. No que diz respeito ao pré-aquecimento dos perfis, simulando assim o aproveitamento das temperaturas de extrusão, chegou-se a resultados inconsistentes, uma vez que, foram verificadas melhorias apenas em alguns casos. Não se devem, contudo, retirar conclusões precipitadas relativamente a esta variável pois a montagem a quente do híbrido mostrou-se muito difícil e isto pode ter impacto nos resultados

obtidos. No que toca à corrosão, todos os provetes atacados quimicamente revelaram resultados aceitáveis. Os tratamentos superficiais realizados conduziram a grandes diferenças de energia e rugosidade superficiais que estão diretamente relacionadas com a adesão dos híbridos.

A simulação numérica realizada revelou-se difícil pela ausência de propriedades necessárias ao software utilizado, contudo, consideram-se os modelos concebidos como razoáveis aproximações ao problema que se pretende replicar.

6.2 Perspetivas de trabalhos futuros

De forma a dar seguimento a toda a abordagem realizada nesta dissertação, existem alguns trabalhos que se podem perspetivas e sugerir para o futuro.

Sugere-se o estudo da adesão por influência de outros acabamentos superficiais, especificamente por recurso a tratamentos químicos já que estes conseguem ser rápidos e apresentaram resultados satisfatórios.

Aconselha-se o estudo de outro tipo de hibridização, recorrendo a outra forma fibrosa como os braids compósitos pois, estes, parecem ser adequados a hibridizações tubulares.

Propõem-se o estudo do comportamento do híbrido à conformação plástica e essencialmente à fadiga.

Olhando para o trabalho experimental realizado sugere-se o aprofundar do tema corrosão galvânica e a repetição do ensaio de tração de junta de sobreposição simples utilizando uma área de sobreposição maior. Será também possível experimentar o uso de um material que funcione como ânodo de sacrifício ou mesmo de um revestimento polímero sob o alumínio minimizando assim a corrosão.

Mostra-se também pertinente a definição das propriedades materiais e adesivas em falta na simulação efetuada.

Referências Bibliográficas

- [1] J. King, *The Aluminium Industry*, 1st ed. Woodhead Publishing, 2001.
- [2] D. S. Mackenzie, *Handbook of Aluminum*. Marcel Dekker, 2003.
- [3] “Aluminium.” [Online]. Available: <http://www.explainthatstuff.com/aluminum.html>. [Accessed: 24-Sep-2017].
- [4] J. Pires, “Otimização do processo de extrusão de perfis cilíndricos ocos numa liga AA6082 Relatório de Dissertação do MIEMM Orientador na FEUP : Professor Doutor Manuel Vieira Orientador na Extrusal: Eng^a Margarida Martins Faculdade de Engenharia da Universidade d,” 2009.
- [5] C. Sergio, A. Sérgio, R. C. De Mello, C. Oliveira, D. Souza, and N. L. Citeli, “Alumínio e Suas Ligas,” 2009.
- [6] F. M. F. Nascimento, “Processamento por Fricção Linear - Caracterização e análise de ligas de alumínio processadas AA5083-O e AA7022-T6,” *Inst. Super. Técnico Lisboa*, 2007.
- [7] T. Azevedo, “Processamento de ligas Al7Si0 , 3Mg na firmago.”
- [8] W. Z. Misiolek, R. M. Kelly, and W. Co, “Extrusion of Aluminum Alloys,” vol. 14, no. 1972, pp. 522–527, 2014.
- [9] “Extrusion Process.” [Online]. Available: http://www.pankaj.co.in/ab_process.htm. [Accessed: 10-Oct-2017].
- [10] P. Saha, *Aluminium extrusion technology*. ASM International.
- [11] Extrusal, “Processo de extrusão,” 1986.
- [12] J. Rodrigues and P. Martins, *Tecnologia Mecânica - volume II - Tecnologia da Deformação Plástica - Aplicações Industriais*. Escolar Editora.
- [13] J. Røyset, U. Tundal, and O. Reiso, “Comparison of properties of extruded 6xxx alloys in T5 temper versus T6 temper,” *Mater. Forum*, vol. 28, pp. 300–304, 2004.
- [14] “Tensile Behaviour of Continuous Fibre Reinforced Metal Matrix Composites.” [Online]. Available: <http://www.mse.mtu.edu/~drjohn/my4150/compositesdesign/cd2/cd3.html>. [Accessed: 20-Nov-2017].
- [15] M. F. Moura, A. M. Morais, and A. G. Magalhães, *Materiais compósitos : materiais, fabrico e comportamento mecânico*, Edições Té. Porto, 2011.
- [16] J. M. Whitney, *Composite materials - testing and design*. ASTM 893, 1986.
- [17] M. Scholz *et al.*, “The use of composite materials in modern orthopaedic medicine and prosthetic devices: A review,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 71, no. 16, pp. 1791–1803, Nov. 2011.
- [18] M. Anabela, “Materiais Compósitos,” p. 12, 2009.
- [19] P. K. Mallick, *Fiberreinforced composites - Materials, Manufacturing, and Design*. CRC Press, 2008.
- [20] M. Biron, *Thermoplastics and Thermoplastic Composites (2nd Edition)*. William Andrew, 2013.
- [21] H. S. P. da Silva, “Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras de curauá e híbridos com fibras de vidro,” p. 72, 2010.

- [22] I. M. Daniel and O. Ishai, *Engineering Mechanics of Composite Materials*. Oxford University Press, 2005.
- [23] I. Corazza and J. Sinosa, “Características e Desempenho para materiais compósitos,” p. 61, 2012.
- [24] A. T. Marques, “Sistemas_Compositos_UC_2016-2017_P.” p. 456, 2015.
- [25] Sercel, “Os três tipos de fibra de vidro usados na indústria de Fiberglass.” [Online]. Available: <http://www.sercel.com.br/blog/os-3-tipos-de-fibra-de-vidro-usados-na-industria-de-fiberglass.html>. [Accessed: 05-Dec-2017].
- [26] “Fiberglass Roving - Fiber Glass Roving - Fiberglass Woven Roving,” 2010. [Online]. Available: <http://www.fiberglass-supplier.com/fiberglass-roving.html>. [Accessed: 10-Oct-2017].
- [27] Vetrotex, “Braiding.” [Online]. Available: <https://www.vetrotextiles.com/technologies/braiding>. [Accessed: 15-Dec-2017].
- [28] Zoltek, “Zoltek Prepreg.” [Online]. Available: <http://zoltek.com/products/px35/prepreg/>. [Accessed: 20-Dec-2017].
- [29] A. Asundi and A. Y. N. Choi, “Fiber metal laminates: An advanced material for future aircraft,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 63, no. 1–3, pp. 384–394, 1997.
- [30] J. Bieniaś, “Fibre Metal Laminates - some aspects of manufacturing process, structure and selected properties,” *Compos. theory Pract.*, vol. 11, pp. 39–43, 2011.
- [31] S. Krishnakumar, *Fiber Metal Laminates — The Synthesis of Metals and Composites*, vol. 9, no. 2. 1994.
- [32] A. Salve, R. Kulkarni, and A. Mache, “A Review: Fiber Metal Laminates (FML’s) - Manufacturing, Test methods and Numerical modeling,” *Int. J. Eng. Technol. Sci.*, vol. 6, no. 1, pp. 71–84, 2016.
- [33] U. Breuer and S. Schmeer, “Carbon and Metal fibre reinforced airframe structures - A new approach to composite multifunctionality,” vol. 0, pp. 1–6, 2013.
- [34] P. Kim, “A comparative study of the mechanical performance and cost of metal, FRP, and hybrid beams,” *Appl. Compos. Mater.*, vol. 5, pp. 175–187, 1998.
- [35] L. Silva, A. Magalhães, and M. Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. Porto: Publindústria, 2007.
- [36] J. Wang *et al.*, “Bond strength between carbon fiber-reinforced plastic tubes and aluminum joints for racing car suspension,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 8, no. 10, pp. 1–7, 2016.
- [37] G. França de Souza and B. Soares da Silva, “Efeito Do Adesivo E Do Comprimento De Sobreposição Em Juntas Coladas,” p. 51, 2015.
- [38] D. E. Packham, *Handbook of Adhesion: Second Edition*, vol. 1. 2005.
- [39] A. Poncius, *Adhesion Science and Engineering*. Elsevier, 2022.
- [40] A. Kinloch, *Adhesion and Adhesives*. 2001.
- [41] Y. Ma, K. Zhang, Z. Yang, and Y. Li, “Effects of impact on the failure of CFRP/Al bonded single-lap joints with different overlap length,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 181–182, pp. 814–819, 2011.
- [42] UFCSPA, “Falha em compósitos.” [Online]. Available: <https://www.coursehero.com/file/23592807/Falha-em-compositos/>. [Accessed: 10-Jan-2018].

- [43] L. Noels, “Brittle and Ductile Materials.” [Online]. Available: http://www.ltas-cm3.ulg.ac.be/FractureMechanics/overview_P3.html. [Accessed: 11-Jan-2018].
- [44] K. Diharjo, M. Anwar, R. A. P. Tarigan, and A. Rivai, “Effect of adhesive thickness and surface treatment on shear strength on single lap joint Al/CFRP using adhesive of epoxy/Al fine powder,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1710, pp. 1–8, 2016.
- [45] M. D. Banea and L. F. M. da Silva, “Adhesively bonded joints in composite materials: An overview,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, vol. 223, no. 1, pp. 1–18, 2009.
- [46] J. G. Broughton, A. Beevers, and A. R. Hutchinson, “Carbon-fibre-reinforced plastic (CFRP) strengthening of aluminium extrusions,” vol. 17, no. 3, pp. 269–278, 1997.
- [47] H. C. Kim, D. K. Shin, and J. J. Lee, “Characteristics of aluminum/CFRP short square hollow section beam under transverse quasi-static loading,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 51, pp. 345–358, 2013.
- [48] S. Y. Kim *et al.*, “Energy absorption characteristics of aluminium/CFRP hybrid beam under impact loading,” *Int. J. Crashworthiness*, vol. 22, no. 2, pp. 190–201, 2017.
- [49] W. Wang, Y. Takao, and T. Matsubara, “Galvanic Corrosion-Resistant Carbon Fiber Metal Laminates,” pp. 1–10, 2007.
- [50] N. Saleema, D. K. Sarkar, R. W. Paynter, D. Gallant, and M. Eskandarian, “A simple surface treatment and characterization of AA 6061 aluminum alloy surface for adhesive bonding applications,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 261, no. November, pp. 742–748, 2012.
- [51] H. J. Oh *et al.*, “Etching characteristics of high-purity aluminum in hydrochloric acid solutions,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 448–451, pp. 348–351, 2007.
- [52] Reference.com, “Does Aluminum React With Hydrochloric Acid.” [Online]. Available: <https://www.reference.com/science/aluminum-react-hydrochloric-acid-e255263d4e172855>.
- [53] L. Mummery, *Surface Texture Analysis: The Handbook*. Hommelwerke GmbH, 1992.
- [54] H. Araújo, “Impact and Damping Behaviour of Composite Adhesive Joints,” no. July, 2016.
- [55] ResearchGate, “Values to be taken for yield strength and plastic strain for aluminium in plasticity,” 2015. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/post/What_values_are_to_be_taken_for_yield_strength_and_plastic_strain_for_aluminium_in_plasticity_section_of_material_property_in_Abaqus. [Accessed: 15-Mar-2018].

ANEXO A: Composição química da liga do perfil utilizado



Sample Result Name	Type	Measure Date Time	Recalculation Date Time	Origin	Method Name	Method Version	Operator Name	Correction Type	Type Cor Sample Name
Perfil híbrido Metal/Compósito Alum. 24.1.18	Unknow	25/01/2019 09:46:01	25/01/2019 09:47:44	MATERIA	AL-G1-F			None	
Check Type	Check Status	Grade Verification Name		Grade Verification Similarity		Grade Search Name		Grade Search Similarity	
None	Released			0 %				0 %	
Nome amostra	Referencia	Cliente							
Perfil híbrido Metal/Compósito Alum. 24.1.18									

Elements Conc.

Mass	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ag
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.
1	0.478	0.177	0.0109	0.0373	0.405	0.0039	0.0034	0.0326	0.0067	<0.00010
2	0.481	0.178	0.0113	0.0365	0.403	0.0038	0.0033	0.0330	0.0068	<0.00010
3	0.483	0.177	0.0106	0.0370	0.402	0.0039	0.0034	0.0346	0.0067	<0.00010
<X>	0.481	0.177	0.0109	0.0369	0.403	0.0039	0.0034	0.0334	0.0067	<0.00010

Mass	B	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Ce	Co	Ga	Hg
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.
1	0.00077	<0.00010	0.00020	<0.00100	0.00015	<0.00010	<0.0015	<0.00050	0.0078	<0.00100
2	0.00078	<0.00010	0.00020	<0.00100	0.00019	<0.00010	<0.0015	<0.00050	0.0079	<0.00100
3	0.00073	<0.00010	0.00019	<0.00100	0.00024	<0.00010	<0.0015	<0.00050	0.0078	<0.00100
<X>	0.00075	<0.00010	0.00020	<0.00100	0.00019	<0.00010	<0.0015	<0.00050	0.0078	<0.00100

Mass	In	La	Li	Na	P	Pb	Sn	Sr	V	Zr
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.
1	<0.00030	<0.00030	<0.00010	0.00046	<0.00100	0.0057	<0.00100	<0.00010	0.0079	0.00085
2	<0.00030	<0.00030	<0.00010	0.00049	<0.00100	0.0057	<0.00100	<0.00010	0.0080	0.00048
3	<0.00030	<0.00030	<0.00010	0.00084	<0.00100	0.0056	<0.00100	<0.00010	0.0078	0.00089
<X>	<0.00030	<0.00030	<0.00010	0.00060	<0.00100	0.0056	<0.00100	<0.00010	0.0079	0.00074



Meas	Bg	Al %																	
		Conc.																	
1		98.8																	
2		98.8																	
3		98.8																	
<X>		98.8																	

ANEXO B: Propriedades e informações da liga de alumínio 6060



SPECIFICATIONS

Commercial	6060
EN	6060

Aluminium alloy 6060 is a medium strength heat treatable alloy with a strength slightly lower than 6005A. It has very good corrosion resistance and very good weldability plus good cold formability especially in temper T4. It is commonly used alloy for very complex cross sections and has very good anodizing response.

Applications

Alloy 6060 is typically used for extrusions with complex cross sections and/or requiring anodising:

- ~ Architectural sections for windows, doors, curtain walls
- ~ Interior fittings, frame systems, lighting, ladders, railings, fences
- ~ Heat sink sections, electronic modules, electro motor housings
- ~ Flexible assembly systems, special machinery elements
- ~ Truck and trailer flooring, pneumatic installation, railway, inside applications
- ~ Irrigation, heating and cooling pipes
- ~ Furniture, office equipment.

CHEMICAL COMPOSITION

BS EN 573-3:2009 Alloy 6060	
Element	% Present
Magnesium (Mg)	0.35 - 0.60
Silicon (Si)	0.30 - 0.60
Iron (Fe)	0.10 - 0.30
Zinc (Zn)	0.0 - 0.15
Others (Total)	0.0 - 0.15
Titanium (Ti)	0.0 - 0.10
Manganese (Mn)	0.0 - 0.10
Copper (Cu)	0.0 - 0.10
Other (Each)	0.0 - 0.05
Chromium (Cr)	0.0 - 0.05
Aluminium (Al)	Balance

TEMPER TYPES

The most common temper for 6060 aluminium is:

- T5 - Cooled from an elevated temperature shaping process and artificially aged

SUPPLIED FORMS

Alloy 6060 is typically supplied as extrusions, specially those with complex shapes and/or requiring anodizing

- Extrusions

GENERIC PHYSICAL PROPERTIES

Property	Value
Density	2.70 g/cm ³
Melting Point	655 °C
Thermal Expansion	23.4 x10 ⁻⁶ /K
Modulus of Elasticity	69.5 GPa
Thermal Conductivity	209 W/m.K
Electrical Resistivity	54 % IACS
Electrical Resistivity	0.032 x10 ⁻⁶ Ω .m

MECHANICAL PROPERTIES

BS EN 755-2:2008 Extrusions Up to 150mm Dia., 15mm WT tube, 5mm WT profiles	
Property	Value
Proof Stress	120 Min MPa
Tensile Strength	160 Min MPa
Elongation A50 mm	6 Min %
Hardness Brinell	60 HB
Elongation A	8 Min %

The properties listed above are for material in the T5 condition

WELDABILITY

Weldability - Gas: Good
Weldability - Arc: Very Good
Weldability - Resistance: Good
Brazability: Very Good
Solderability: Good

[1 OF 2] CONTINUED ➞

ANEXO C: Ficha técnica da matriz EF452

SAATI

Composites
technical dataEF452
EPOXY MATRIX**GENERAL FEATURES**

EF452 is a fire retardant, self adhesive prepreg system which contains no halogenated flame retardants. It is suitable for sandwich panels or solid laminates where low FST properties are needed. It can be supplied on a variety of reinforcements including, carbon, aramid, and glass and in fabric and unidirectional forms. It can be processed by press and autoclave cure cycles.

Laminates produced with this resin comply with the following specifications for fire/smoke behavior:

- ✓ ATS 1000.001 (smoke density and toxicity)
- ✓ FAR 25.853 Part 25 App. F (flammability)
- ✓ Contains no halogenated flame retardants or halogenated resins

MAIN CHARACTERISTICS

- ✓ Cure @ 120 °C (248 °F)
- ✓ Solvent free
- ✓ Autoclave, press or vacuum bag processing.
- ✓ Available on a wide range of reinforcements (carbon, glass, aramide and hybrids, UD, fabrics and multi-axial).

QUICK REFERENCE TIPS

The standard cure cycle of 125 °C (257 °F) for 1,5 hours achieves high conversion and optimal mechanical performance.

SAATI

Composites
technical data**OPERATIONAL INSTRUCTIONS****CURE PROCESS RECOMMENDATIONS**

This epoxy matrix system can be processed under a very wide range of temperature, but it is recommended as described below:

Temperature °C (°F)	Time	Tg °C (°F) DSC
125 (257)	90'	150 (302)

The SAATI Technical Department can develop custom cure cycles tailored to specific applications and customer requirements

SAATI

Composites
technical data**AUTOCLAVE**

The following (suggested) cure cycle is shown below:

Step	Temperature °C (°F)	Time (min)	Heating rate to isothermal °C/min (°F/min)	Pressure bar (psi)
1	25 (77)	–	1÷3 (1.8-5.4)	Vacuum -0.8 (-11.6)
2	125 (257)	90	–	3÷7 (43-102)*
3	70 (158)	–	1÷3 (1.8-5.4)	3÷7 (43-102)
4	25 (77)	–	–	–

* Vent the vacuum when the pressure reaches 1 bar.

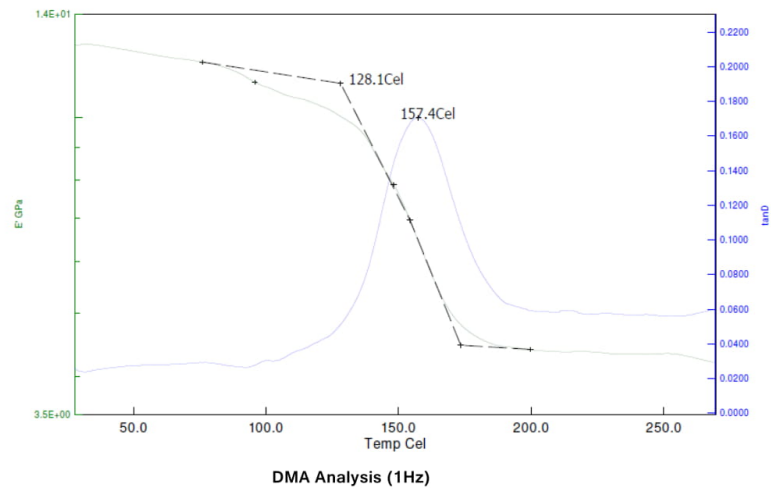
RESIN MATRIX**GENERAL PROPERTIES**

Property	Unit	Value	Standard
Storage life @ -18°C (0°F)	months	12	
Out life @ 23°C (73°F)	days	21	
Prepreg volatiles	%wt	< 1	ASTM D3530-97R03
Cured resin density	g/cm ³	-	ASTM D792-00
Tg (DSC)	°C (°F)	150 (302)	ASTM D3418-03
On-set E' (DMA)	°C (°F)	128 (262)	ASTM E1640-09
Tg Peak Tan δ (DMA)	°C (°F)	157 (315)	ASTM E1640-09
Tack		Low	

SAATI

Composites
technical data**THERMO-MECHANICAL DMA ANALYSIS**

DMA trace of EF452 laminate cured in autoclave 1,5h@125°C.



SAATI

Composites
technical data**CURED PREPREG****MECHANICAL PROPERTIES OF PREPREG LAMINATES**

Test carried out on a EE300 Glass Fabric Prepreg. Values are normalized to 60% F.V.

Cured Material Property	Unit	Value Actual 45%F.V.	Value Normalized 60%F.V.	Standard
Tensile Modulus	GPa (Msi)	24.2 (3.51)	32.3 (4.68)	ASTM D3039-00
Tensile Strength	MPa (ksi)	295 (42.8)	393 (57)	
Interlaminar Shear Strength	MPa (ksi)	61.1 (8.86)	—	ASTM D2344-00
Climbing Drum Peel	mm*kg/mm (in*lb/in)	3.54 (7.79)	—	ASTM D1781

SAFETY HAZARD

- This product contains epoxy resin.
- May cause allergic reaction.
- Avoid prolonged contact with skin.
- The use of latex gloves for handling is suggested.
- The work environment should be well ventilated.
- Waste must be disposed according to local regulations.

Note: For further information check the Material Safety Data Sheet.

DELIVERY FORM AND PACKAGING

The **prepreg fabrics** are supplied on 75 mm diameter cardboard cores with release paper on one side and polyethylene film separator on the other side. Rolls are sealed in plastic bags and packed in cardboard boxes.

Standard width: 100 cm. **Standard length:** 50 m.

The **prepreg UD** is supplied on 300 mm of diameter cardboard cores with release paper on one side and smooth polyethylene film separator on the other side. Alternatively, the prepreg can be supplied with polyethylene film on both sides. Rolls are sealed in plastic bags and packed in cardboard boxes. The product is shipped at $< -12^{\circ}\text{C}$.

Standard width: 60cm (available 30cm to 100cm).

Standard length: 100 m.

HANDLING AND CONDITIONING

- Store rolls at -18°C , sealed in original packages.
- Shop life at 23°C refers to rolls sealed in original packages.
- Before the using the prepreg, remove the roll from the freezer and let it warm up to room temperature for 6 hours sealed in its original package.

Important notice:

The data and statements in this datasheet are met to provide an overview of this product and its properties. Users should perform their own verification and testing to determine suitability of this material for their specific end use applications. NO WARRANTY OF FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE IS EXPRESSED OR IMPLIED. Nothing herein is to be taken as permission to practice any patented invention without a licence.

(RDS 06.001, Rev. 1 of December, 2011)

SAATI S.p.A.

Phone: (+39) 031 9711

Fax: (+39) 031 933392

E-mail: info.IT@saati.com

SAATI Americas

Phone : (+1) 914.7679300

FAX : (+1) 914.232.4004

E-mail: info.IT@saati.com

SAATI
www.saati.com

ANEXO D: Relatório de trabalho fornecido pela ARCP



Relatório de trabalho

Teste/Análise:

Determinação da Energia Superficial

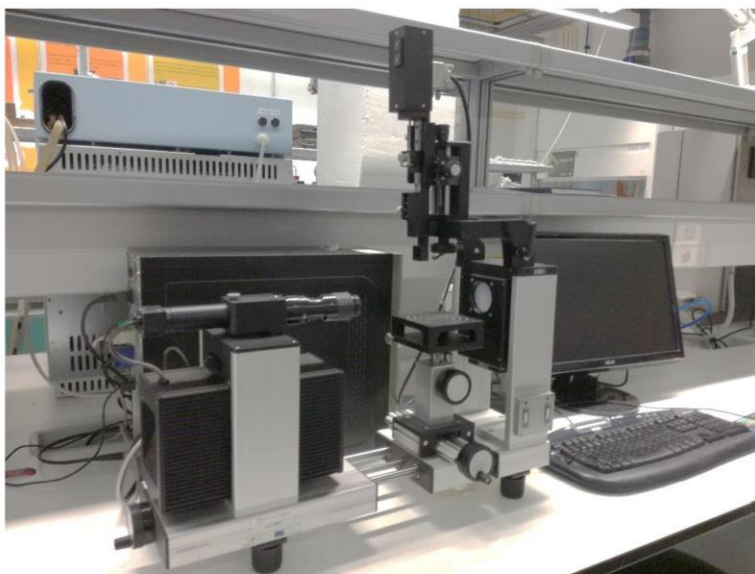
Cliente: INEGI

Descrição da(s) amostra(s): A; B; C1; D1; E1; F1; G; H.

Técnico responsável: Ana Gomes

1. Procedimento

Os ângulos de contacto foram medidos utilizando o equipamento OCA20 da *Dataphysics* representado na Figura 1.



Os líquidos utilizados para medição dos ângulos de contacto das amostras foram água destilada, n-hexadecano e etilenoglicol. Estes líquidos de teste foram colocados, conforme o ensaio, numa seringa Hamilton com capacidade para 500 μL .

As amostras a testar foram colocadas no suporte do equipamento e a objetiva captou as imagens da gota depositada em cima da amostra. A gota, com 4 μL de volume, foi depositada através do abaixamento e levantamento manual da seringa.

O software registou o ângulo de contacto de 1 segundo em 1 segundo durante 120 segundos.

Para cada amostra e cada líquido de teste foram analisadas 3 gotas.

No o tratamento de dados apenas se considerou a média dos ângulos de contacto registados ao final de 50 segundos para garantir que a medição do ângulo de contacto ocorresse após a fase de espalhamento da gota na superfície da amostra.

O resultado final de tensão superficial de cada amostra foi determinado recorrendo ao modelo Owens-Wendt-Rable-Kaelble (OWRK).

2. Resultados obtidos

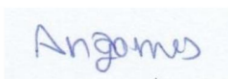
Os resultados da amostra G poderão não ser os esperados visto que esta é perfurada e por vezes o líquido passava através do material.

Para além disso, na amostra B verificou-se que ao longo da amostra o ângulo de contacto tem uma variação considerável o que se pode dever à distribuição do revestimento.

Assim, da análise feita pode-se observar os seguintes resultados, apresentados na tabela:

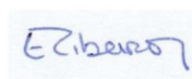
Amostra	Tensão de superficial (mJ/m ²)
A	46.15 ± 0.25
B	57.61 ± 0.50
C1	48.01 ± 0.37
D1	64.50 ± 0.58
E1	54.94 ± 0.61
F1	43.12 ± 0.47
G	27.53 ± 0.28
H	25.01 ± 0.03

Técnico Responsável:



(Ana Gomes)

Responsável ARCP:



(Eva Ribeiro)

Data: 14/02/2018