



**Estudo experimental do comportamento mecânico  
de compósitos em fibras de basalto**

**Rafael António Martins Preto**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Mestrado Integrado - Engenharia Mecânica**

**Júri**

Presidente:	Doutor Luís Manuel Varejão Oliveira Faria
Orientador:	Doutor Luís Filipe Galvão dos Reis
Co-Orientador:	Doutor Luís Alberto Gonçalves de Sousa
Vogal:	Doutora Rosa Maria Marquito Marat-Mendes

**Maio de 2013**







## **Agradecimentos**

Como autor desta dissertação desejo expressar os meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que me apoiaram e que contribuíram para o seu desenvolvimento, e em particular:

Aos meus pais, que estiveram sempre ao meu lado durante toda esta jornada e que graças à sua dedicação tornaram este momento possível.

Ao meu orientador, Professor Luís Reis pela dinâmica que introduziu no desenvolvimento deste trabalho, pela disponibilidade e pelo empenho sempre demonstrados nas suas várias etapas e pela oportunidade dada de o realizar.

Ao meu orientador, Professor Luís Sousa, pelo espírito inquisitivo com que analisava todas as situações apresentadas, a ajuda imprescindível na parte de simulação dos elementos finitos e pela correção final da tese.

Ao Bruno Soares pela enorme ajuda prestada no desenvolvimento do todo o trabalho, pelos conhecimentos partilhados, essenciais para a compreensão de vários fenómenos que foram ocorrendo durante o trabalho e pelo tempo e ajuda despendidos na fabricação dos provetes.

A todos as outras pessoas que deram o seu contributo, direto ou indireto, e graças as quais esta se tornou experiência agradável e enriquecedora.



## Resumo

Com a aplicação cada vez maior de materiais compósitos, novas matrizes e materiais de reforço entraram no mercado a um ritmo cada vez maior. Estes novos materiais têm de ser cuidadosamente testados, para determinar as suas propriedades mecânicas e possíveis aplicações. Fibras de basalto oferecem algumas vantagens face a materiais atuais, resistência à prova de fogo, não necessita de adição de material durante o seu processo de fabrico, tem melhores propriedades mecânicas que a maioria dos tipos de E-Glass e é mais barato do que fibras de carbono.

O objetivo desta tese é compreender a viabilidade das fibras de basalto, como parte de um compósito, determinando as suas propriedades mecânicas. Os compósitos foram testados numa matriz de resina de poliéster, produzido por moldagem por transferência de resina e submetidos a testes de tração, compressão, corte e flexão.

Os resultados foram geralmente bons e em linha com os resultados da regra das misturas, embora com um coeficiente de variação elevado. Foi feita uma análise C-Scan nos compósitos, para determinar quais as suas origens, mostrando que o problema era o método de produção, pois as camadas de fibras não estavam uniformemente espaçadas, e possuíam espaçamentos diferentes entre amostras.

Foi criada uma pá do caiaque usando hand lay-up, para comparar os resultados com um modelo de elementos finitos criado a partir dos dados obtidos. Os resultados são consistentes exceto na zona onde o veio, feito de alumínio, liga à lâmina de compósito. Na área da lâmina, os resultados são semelhantes aos do modelo, validando ainda mais os testes realizados.

### Palavras Chave:

Compósitos

Fibras de Basalto

Propriedades Mecânicas

C-Scan

Método de Elementos Finitos



## **Abstract**

With the growing adoption of composite materials, new matrix and reinforcement materials have been entering the market at an ever growing rate. These new materials have to be thoroughly tested in order to determine its mechanical properties and possible applications. Basalt fibers offer some advantages versus current materials, it is fireproof, requires no material addition, has better mechanical properties than most types of E-Glass, and it is cheaper than Carbon Fiber.

The goal of this thesis is to understand the viability of basalt fibers as part of a composite, by determining its mechanical properties. The composites were tested with a Polyester resin matrix, produced by Resin Transfer Molding. The composites were subjected to tensile, compression, shear and flexural tests.

The results were generally good and in line with the mixing rules predicted results, although with a somewhat high coefficient of variance. C-Scan Analysis was performed on the composites, to determine its origin. The analysis showed that the problem was the production method, since the composite layers were not evenly spaced, and possessed different spacing from specimen to specimen.

Finally a kayak paddle was created using Hand lay-up in order to compare the results with a finite element model created from the data obtained. The results are consistent with the exception of the area where the shaft, made of aluminum, is connected to the composite blade. In the blade area the results are quite close to those of the model, further validating the tests performed.

### **Keywords:**

Composites

Basalt Fibers

Mechanical properties

C-Scan

Finite element methods



# Índice

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	iii
Palavras Chave .....	iii
Abstract .....	v
Keywords.....	v
Índice .....	vii
Índice das Figuras .....	x
Índice das Tabelas .....	xiv
Lista de Siglas .....	xv
Lista de Símbolos.....	xv
Lista de Programas .....	xvi
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento, Motivação e Objetivos .....	1
1.2. Disposição do Trabalho Desenvolvido .....	2
2. Materiais Compósitos .....	3
2.1. Definição de Materiais compósitos.....	4
2.1.1. Matriz .....	4
2.1.2. Reforço.....	5
2.2. Processos de fabrico de materiais compósitos .....	6
2.2.1. Moldação por Transferência de Resina .....	8
2.2.2. Moldação por Hand Lay-Up .....	10
2.3. Regra das misturas .....	11
2.4. Fibras.....	12
2.4.1. Fibras de Basalto .....	13
Processo de fabrico .....	13
2.4.1. Campos de aplicação das fibras.....	14
2.4.2. Fibras de Vidro.....	16
Processo de fabrico .....	17
2.4.3. Fibras de Carbono .....	17
Processo de fabrico .....	18
2.5. Matrizes poliméricas.....	19
2.5.1. Termoplásticos e Termoendurecíveis.....	19
2.5.2. Bio Resinas .....	20
2.6. Estruturas Sandwich.....	22
2.6.1. Faces .....	23
2.6.2. Núcleo .....	23
2.6.3. Adesivos.....	24
3. Materiais e métodos experimentais.....	25

3.1. Introdução e Normas .....	25
3.1.1. Norma ASTM D 790.....	25
3.1.2. Norma ASTM D 3039.....	26
3.1.3. Norma ASTM D 3518.....	27
3.1.4. Norma ASTM D 3410.....	28
3.1.5. Norma ASTM D 4255.....	29
3.2. Compósito poliéster-basalto .....	30
3.2.1. Fibra de basalto .....	30
3.2.2. Poliéster .....	31
3.2.3. Processo RTM .....	31
3.2.4. Processo Hand Lay Up .....	34
3.3. Provetes utilizados .....	36
3.4. Equipamentos de ensaio .....	40
3.4.1. Equipamento de ensaios não-destrutivos C-Scan.....	40
3.4.2. Máquina de ensaios Instron 3369.....	41
3.5. Metodologia dos ensaios realizados .....	42
3.5.1. Ensaio não destrutivo C-Scan .....	42
3.5.2. Ensaio de tração .....	43
3.5.3. Ensaio de compressão .....	44
3.5.4. Ensaio de flexão em 3 pontos.....	45
3.5.5. Ensaio de corte com guias.....	46
4. Apresentação e discussão dos resultados .....	47
4.1. Ensaio não destrutivo C-Scan .....	47
4.2. Regra das misturas .....	52
4.3. Ensaio de tração dos provetes com alinhamento 0/90° .....	52
4.3.1. Apresentação dos resultados .....	52
4.3.2. Análise dos resultados.....	54
4.4. Ensaio de Compressão .....	55
4.4.1. Apresentação dos resultados .....	55
4.4.2. Análise dos resultados.....	58
4.5. Ensaio de Flexão em 3 pontos .....	59
4.5.1. Apresentação dos resultados .....	59
4.5.2. Análise dos resultados.....	61
4.6. Ensaio de tração com orientação das fibras a $\pm 45^\circ$ .....	62
4.6.1. Apresentação dos resultados .....	62
4.6.2. Análise dos resultados.....	64
4.7. Ensaio de corte com guias .....	65
4.7.1. Apresentação dos resultados .....	65
4.7.2. Análise dos resultados.....	67
4.8. Ensaio de deformação da pá do remo .....	68

4.8.1. Ensaio das pás .....	68
4.8.2. Simulação em Abaqus .....	71
4.8.3. Análise de resultados.....	78
5. Conclusões e Futuros Desenvolvimentos .....	79
5.1. Conclusões Finais .....	79
5.2. Propostas de Desenvolvimento Futuro .....	80
Referências .....	83
Anexos.....	89
Anexo A - Gráficos comparativos entre os resultados dos ensaios e da simulação em Abaqus. .	89
Anexo B - Gráficos das curvas resultantes dos ensaios de flexão em três pontos. ....	90
Anexo C - Gráficos das curvas resultantes dos ensaios de Compressão .....	91
Anexo D - Gráficos das curvas resultantes dos ensaios de Compressão .....	92
Anexo E - Folha de dados da Fibra de Basalto .....	93

## Índice das Figuras

Figura 1 - Compósito que tem na sua constituição epóxi e vidro, utilizado para minimizar transferências térmicas [4] .....	4
Figura 2 - Exemplo de distribuição de fibras em compósitos [6] .....	6
Figura 3 - Exemplos de fibras contínuas laminadas em compósitos [6].....	6
Figura 4 - Exemplo de duas formas diferentes de partículas em compósitos [6] .....	6
Figura 5 - Processo de Spray Lay Up [17] .....	7
Figura 6 - Processo de moldação por compressão [18] .....	8
Figura 7 - Processo de moldação por vácuo [19] .....	8
Figura 8 - Esquema do processo de RTM, onde A e B são as resina e o catalisador [22] .....	9
Figura 9 - Molde de RTM de grandes dimensões [23].....	9
Figura 10 - Aplicação do processo HLU num molde de grandes dimensões [25].....	10
Figura 11 - Esquema de aplicação do processo HLU [27] .....	11
Figura 12 - Ilustração da simplificação introduzida com a regra das misturas [28]. .....	11
Figura 13 - Variação do fator de Krenchel em função da orientação das fibras [29].....	12
Figura 14 - Vários tipos de entrelaçados de fibras de basalto [33].....	13
Figura 15 - Comparação entre os diferentes módulos de Elasticidade dos compósitos de basalto e E-glass, com a mesma fração volúmica [34].....	14
Figura 16 - Gráfico da evolução do comportamento dos diferentes compósitos com o aumento da temperatura [41] .....	15
Figura 17 - Reservatórios de gás natural comprimido com aplicação de fibras de basalto [41] ...	15
Figura 18 - Utilização de fibra de vidro nas pás de torres eólicas [37]. .....	17
Figura 19 - Aplicação de fibras de carbono na construção do chassis do Lamborghini Aventador V12L [39] .....	18
Figura 20 - Automóvel desenvolvido por Henri Ford usando materiais biológicos [50].....	21
Figura 21 - Relação entre aumento da espessura do núcleo e as grandezas relativas à flexão e peso numa estrutura sandwich [51] .....	22
Figura 22 - Elementos da estrutura sandwich [53].....	23
Figura 23 - Duas estruturas sandwich: a) núcleo de espuma polimérica b) núcleo Favo de Abelha [51].....	24
Figura 24 - Tipos de ruturas que ocorrem na zona do adesivo: a) rutura coesiva, b) rutura adesiva, c) rutura coesiva/adesiva [57] .....	24
Figura 25 - a) Malha de basalto. b) Malha de basalto com uma distorção .....	30
Figura 26 - Em a) seção do remo inferior cortada e uma seção superior do remo delineada, b) um padrão de delimitação para as placas com alinhamento $\pm 45^\circ$ .....	31
Figura 27 - Base do molde de alumínio com uma camada de cera desmoldante, com o aro de alumínio e os quatro pinos-guia .....	32

Figura 28 - Elementos da máquina ISOJET utilizada no processo de RTM: a) prensa de bases de temperatura regulável, b) bomba de vácuo, c) reservatório ligado ao canal de injeção .....	33
Figura 29 - a) - Processo de corte com a serra elétrica. b) - Marcação das margens de corte das placas de compósito.....	34
Figura 30 - Furação dos provetes: a) marcação de pontos b) furação c) provete final.....	34
Figura 31 - Dimensões utilizadas na pá do remo (mm) .....	35
Figura 32 - a) Imagem da primeira aplicação de resina no molde, b) aplicação da primeira camada de fibra e passagem do rolete c) aplicação da resina para a segunda camada de fibras.....	36
Figura 33 - a) Imagem da colocação da primeira camada de fibra sobre o cabo, b) pá do remo com todas as camadas aplicadas c) molde sobre a ação do vácuo.....	36
Figura 34 - Representação da atribuição das dignações aos provetes.....	38
Figura 35 - Alguns dos passos da instrumentação dos provetes: a) polimento da superfície, b) colagem do extensômetro b) aplicação do verniz.....	39
Figura 36 - Imagem da ligação da roseta ao aparelho de aquisição de dados .....	40
Figura 37 - Máquina de ensaios C-Scan.....	41
Figura 38 - Máquina de ensaios eletromecânica Instron 3369.....	42
Figura 39 - Imagem da montagem da norma ASTM D 790 [58].....	26
Figura 40 - a) Dimensões do provete e localização dos furos [59], b) Elementos que compõem o dispositivo de fixação fabricado no âmbito deste trabalho.....	29
Figura 41 - Ensaio de tração .....	43
Figura 42 - Ensaio de compressão .....	44
Figura 43 - Ensaio de flexão em 3 pontos .....	45
Figura 44 - Ensaio de corte por guias .....	46
Figura 45 - Imagem ensaio de TOF do C-Scan: a) - Placa 1, b) - Placa 2.....	48
Figura 47 - Imagem ensaio de TOF do C-Scan: a) Placa 5, b) Quatro seções da Placa 6.....	48
Figura 49 - Imagem com o plano preferencial de escoamento da resina, a qual empurra as fibras contra a superfície do molde, estando apenas 35% da espessura da placa com resina.....	49
Figura 50 - Imagem que mostra um plano preferencial de escoamento da resina .....	49
Figura 51 - Imagem que mostra um plano preferencial de escoamento localizado no centro do provete que promove um afastamento das fibras para a superfície da placa .....	49
Figura 52 - Imagem que mostra três planos preferenciais de escoamento da resina que introduz uma pequena distorção na distribuição das fibras.....	50
Figura 53 - Imagem de uma distribuição uniforme das fibras pela espessura do compósito.....	50
Figura 54 - Fissura decorrente do processo de cura, e que se inicia na superfície da placa e se propaga até à primeira camada de fibra .....	50
Figura 55 - Comparação do provete 315 com a imagem obtida pelo C-Scan da placa 3.....	51
Figura 56 - Comparação do provete 223 com a imagem obtida pelo C-Scan da placa 2.....	51
Figura 57 - Gráfico com os resultados do ensaio de tração aos provetes da placa 3.....	53
Figura 58 - Gráfico de comparação das retas provenientes de três placas diferentes .....	53

Figura 59 - a) Imagem onde a rutura ocorreu na zona onde começou a fissurar b) Imagem onde é visível que a rutura ocorreu fora da zona onde estava a fissurar .....	55
Figura 60 - Sequência de fases do ensaio de tração: a) - Início da fissuração b) - Aumento do número de fissuras c) - Rutura violenta do provete .....	55
Figura 61 - Gráfico com os resultados do ensaio de tração aos provetes da placa 2.....	56
Figura 62 - Gráfico com os resultados do ensaio de tração aos provetes da placa 3.....	56
Figura 63 - Gráfico de comparação das retas provenientes de 5 placas diferentes .....	56
Figura 64 - Curva Tensão extensão dos 2 ensaios à compressão do provete instrumentado .....	57
Figura 65 - Curva força deslocamento dos 2 ensaios à compressão do provete instrumentado..	57
Figura 66 - Ensaio de compressão: a) Início da deformação do provete, b) - Rutura típica verificada na maioria dos ensaios. ....	59
Figura 67 - Três tipos de rutura observados: a) - O provete fissura a meio indo cada metade para seu lado, b) - Devido a uma grande concentração de resina esta fratura e as fibras apenas dobram, c) - Aparecimento de uma fissura no meio do provete. ....	59
Figura 68 - Gráfico da curva de força deflexão dos provetes com alinhamento $\pm 45^\circ$ .....	61
Figura 69 - Dois tipos de situações que aconteceram no ensaio de flexão: a) Imagem de um provete quanto atingiu a rutura, b) Um provetes de alinhamento $\pm 45^\circ$ que não cedeu durante o ensaio. ....	62
Figura 70 - Imagem do único provete com alinhamento $\pm 45^\circ$ que fraturou.....	62
Figura 71 - Gráfico das curvas tensão extensão resultante do ensaio de tração.....	63
Figura 72 - Gráfico das curvas tensão extensão resultante do ensaio de tração nos momentos iniciais do ensaio .....	63
Figura 73 - Fases típicas de um ensaio de tração de um provete da placa 2: a) e b) - Desprendimento da resina localizada na superfície, c) Estricção do provete numa zona localizada e por fim cedência nesse ponto. ....	65
Figura 74 - Fases típicas de um ensaio de um provete da placa 1: a) - Fissuração ao meio ao longo do meio da espessura da placa, b) - Início da estricção ao longo de todo o provetes das fibras c) e d)- Expulsão da camada de resina do interior da placa até à cedência do provete. ....	65
Figura 75 - Gráfico da curva força deslocamento dos 4 ensaios de corte .....	66
Figura 76 - Gráfico da curva tensão extensão da roseta nas 3 direções .....	66
Figura 77 - Gráfico da curva força deslocamento do ensaio do provete instrumentado .....	66
Figura 78 - a),b),c) e d) - Sequência de imagens do ensaio de corte por guias.....	68
Figura 79 - a) Imagem dos provetes 61 e 63 depois de ensaiados, b) - O provetes 61 a ser tracionado onde é visível a zona afetada pelos parafusos, c) - O provete 62 instrumentado com a roseta.....	68
Figura 80 - Localização dos pontos de medição: a verde o "Ponto 1" e a vermelho o "Ponto 2" .	69
Figura 81 - Gráfico com o deslocamento dos 2 pontos da pá do remo durante o carregamento no ensaio 2 e 3 .....	70
Figura 82 - Imagens das 3 montagens: a) - Pá 1 posição invertida, b) - Pá 1 posição normal, c) - Pá 2 posição normal.....	71

Figura 83 - Duas imagens que mostram a pá do remo sob carregamento: a) - Imagem onde é possível ver os pontos de referência utilizados, b) - Deslocamento provocado pelo carregamento....	71
Figura 84 - a) - Vista isométrica, b) - Vista do plano xz, c) - Vista do plano xy .....	72
Figura 85 - Definição das características do material do compósito de basalto.....	72
Figura 86 - Imagem com o empilhamento utilizado na seção da Pá Superior e Inferior .....	73
Figura 87 - O cabo que tem as propriedades do alumínio, na pá as propriedades do compósito espessura 0.5mm e a amarelo as propriedades do compósito com espessura 1mm.....	73
Figura 88 - Malha gerada pelo Abaqus e utilizada nas simulações.....	74
Figura 89 - Ponto de aplicação do carregamento e direção do ensaio 1 .....	74
Figura 90 - Encastramento do cabo, condição de fronteira usada nas simulações .....	74
Figura 91 - Gráfico com os resultados do terceiro ensaio, com a Pá do Remo-2 em posição normal e da respetiva simulação no Abaqus .....	75
Figura 92 - Gráfico com os deslocamentos das simulações dos Ensaio 1 e 2 no Abaqus .....	77
Figura 93 - Gráfico com os deslocamentos resultantes dos Ensaio 1 e 2.....	77
Figura 95 - Gráfico com os resultados do primeiro ensaio, com a Pá do Remo-1 na posição invertida e da respetiva simulação no Abaqus.....	89
Figura 96 - Gráfico com os resultados do segundo ensaio, com a Pá do Remo-1 em posição normal e da respetiva simulação no Abaqus .....	89
Figura 97 - Gráfico da curva de força deflexão dos provetes com alinhamento 0/90 .....	90
Figura 98 - Gráfico da curva de tensão deflexão dos provetes com alinhamento 0/90 .....	90
Figura 99 - Gráfico com os resultados do ensaio de tração aos provetes da placa 1 .....	91
Figura 100 - Gráfico com os resultados do ensaio de tração aos provetes da placa 4.....	91
Figura 101 - Gráfico com os resultados do ensaio de tração aos provetes da placa 5.....	91
Figura 102 - Gráfico com os resultados do ensaio de tração aos provetes da placa 4.....	92
Figura 103 - Gráfico com os resultados do ensaio de tração aos provetes da placa 5.....	92

## Índice das Tabelas

Tabela 1 - Propriedades do Poliéster insaturado e das Fibras de Basalto.....	31
Tabela 2 - Alinhamento das placas fabricadas .....	38
Tabela 3 - Dimensão dos provetes usados.....	38
Tabela 4 - Resultados do ensaio de tração dos provetes com alinhamento 0/90 .....	53
Tabela 5 - Valores do Módulo de Elasticidade calculados com base nos resultados dos ensaios.....	54
Tabela 6 - Valores dos ensaios de compressão dos provetes $\pm 45^\circ$ .....	57
Tabela 7 - Valores dos ensaios de compressão dos provetes 0/90 $^\circ$ .....	57
Tabela 8 - Valor do módulo de compressão do provete instrumentado .....	58
Tabela 9 - Valores resultantes dos ensaios de flexão dos provetes $\pm 45^\circ$ .....	60
Tabela 10 - Valores do Módulo de Elasticidade dos provetes $\pm 45^\circ$ .....	60
Tabela 11 - Valores resultantes dos ensaios de flexão dos provetes 0/90 $^\circ$ .....	60
Tabela 12 - Valores do módulo de elasticidade dos provetes 0/90 $^\circ$ .....	61
Tabela 13 - Resultados do ensaio de tração dos provetes com alinhamento $\pm 45^\circ$ .....	63
Tabela 14 - Valores do módulo de corte calculados com base nos resultados dos ensaios .....	64
Tabela 15 - Tabela com os valores de tensão máxima obtidos nos ensaios .....	67
Tabela 16 - Valores dos dois pontos utilizados no cálculo do módulo de corte e o respetivo valor.....	67
Tabela 17 - Dados do ensaio realizado à pá do remo 1, em posição invertida .....	69
Tabela 18 - Dados dos deslocamentos resultantes dos ensaios realizados à pá do remo 1 e 2, para os mesmos valores de carregamento .....	70
Tabela 19 - Valores do deslocamento após descarregamento progressivo do remo .....	70
Tabela 20 - Propriedades atribuídas ao alumínio .....	72
Tabela 21 - Resultados da simulação realizada no Abaqus do Ensaio 1 .....	75
Tabela 22 - Resultados dos deslocamentos da simulação realizada no Abaqus dos Ensaio 2 e 3 .....	75
Tabela 24 - Diferença em percentagem dos valores obtidos no Ensaio 2 e no Abaqus 2 .....	76
Tabela 25 - Diferença em percentagem dos valores obtidos no Ensaio 3 e no Abaqus 3 .....	76

## Lista de Siglas

ASTM	American Society for Testing and Materials
Coef.	Coeficiente
EN	Normas Europeias
HLU	Hand Lay Up
IST	Instituto Superior Técnico
Máx	Máximo
MDF	Medium Density Fiberboard
PAN	Poliacrilonitrilo
RTM	Moldação por Transferência de Resina (Resin Transfer Molding)
TOF	Time of Flight
UP	Poliéster Insaturado
PVC	Policloreto de vinila
PMI	Polimetacrilamida

## Lista de Símbolos

$A$	Área
$D$	Deflexão
$E$	Módulo de Elasticidade
$G$	Módulo de Rigidez ao Corte
$M$	Massa
$P$	Carga Aplicada ao provete
$R$	Velocidade de Ensaio
$V$	Volume
$d$	Espessura do Provete
$l$	Comprimento do provete
$\vartheta$	Fração Volúmica
$\varepsilon$	Extensão
$\eta$	Fator de Krenchel

$\rho$	Densidade ou Massa Específica
$\sigma$	Tensão Normal
$\tau$	Tensão de Corte
$\Omega$	Resistência Elétrica
$\gamma$	Extensão de Corte

## Lista de Programas

Solidworks 2012

Abaqus 6.10





# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento, Motivação e Objetivos

A preocupação com a preservação do meio ambiente e a sustentabilidade dos recursos explorados estão cada vez mais presentes na sociedade atual. A utilização de fontes renováveis ou a diversificação da origem das materiais primas tornaram-se um fator de extrema importância para a manutenção do sistema produtivo de uma forma sustentável ao mesmo tempo que promove uma vantagem competitiva a curto prazo.

O aparecimento recente das fibras de basalto no mercado oferece uma nova gama de soluções na área dos materiais compósitos, que se encontra em franca expansão e que ganha cada vez mais importância nas indústrias aeroespaciais e automóvel. Têm sido feitos alguns estudos de comparação e caracterização do comportamento das fibras de basalto, com o objetivo de fornecer mais dados que permitam substituir em algumas das aplicações as fibras agora utilizadas, aumentando o leque de opções disponíveis e diversificando a origem das matérias-primas para a produção de fibras.

O trabalho realizado nesta tese pretende caracterizar o comportamento das fibras de basalto como elemento de reforço de um compósito de matriz de poliéster. Para esse efeito o compósito foi produzido por moldação por transferência de resina (Resin Transfer Molding - RTM) e sujeito a ensaios mecânicos de tração, compressão, flexão e de corte. Foram efetuados ensaios com a técnica de C-Scan para averiguar a existência de defeitos no interior das placas, que permitiram detetar zonas com alta concentração de resina.

Complementarmente foram desenhadas e fabricadas, pelo processo Hand Lay Up (HLU), duas pás de remo, utilizando o mesmo compósito de fibras de basalto e resina poliéster. O objetivo foi testar experimentalmente as pás para comparação com a modelação computacional usando um programa comercial de elementos finitos. Neste teste as pás foram encastradas e colocadas sobre esforços dirigidos, tendo sido medidas as deformações resultantes. As duas pás foram modeladas em computador ( no programa Abaqus versão 6.10). Foi feita uma réplica dos ensaios anteriores para se poder efetuar uma comparação entre os dois resultados.

## 1.2. Disposição do Trabalho Desenvolvido

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos, os quais se encontram descritos da seguinte maneira:

### **Capítulo 1**

Neste capítulo é apresentado o enquadramento, a motivação e os objetivos da presente dissertação e uma descrição da sua estrutura.

### **Capítulo 2**

Neste capítulo é apresentado o estado da arte em relação às estruturas dos materiais compósitos, mencionando as suas vantagens e desvantagens, área de utilização e processos de fabrico. Será feita uma apresentação das fibras de basalto, vidro e carbono e uma comparação entre elas no que diz respeito às áreas de aplicação. É feita uma apresentação das resinas poliméricas com um enfoque em relação às bio resinas e por fim uma apresentação dos tipos de elementos e princípio de funcionamento das estruturas sandwich.

### **Capítulo 3**

Neste capítulo é descrito o material que foi testado bem como o seu processo de fabrico. É feita uma descrição dos ensaios realizados e da respetiva norma, bem como uma descrição geral das funcionalidades e características dos equipamentos utilizados nos mesmos.

### **Capítulo 4**

Neste capítulo são apresentados todos os resultados experimentais obtidos referentes aos ensaios realizados ao material compósito de poliéster e basalto. Também são apresentados e comparados os resultados obtidos por uma simulação da pá do remo no programa de elementos finitos Abaqus, com os resultados experimentais obtidos em laboratório.

### **Capítulo 5**

Neste capítulo são apresentadas as conclusões mais relevantes em relação aos resultados obtidos pelos vários tipos de ensaios realizados ao material compósito analisado, bem como algumas propostas de desenvolvimento futuro que possibilitem dar continuidade a este trabalho e permitam a obtenção a melhor caracterização mecânica dos compósitos com fibra de basalto.

## 2. Materiais Compósitos

Os materiais compósitos estiveram sempre presentes no nosso mundo, e hoje continuam sob diferentes formas e desempenhando uma vasta gama de funções. Os compósitos podem ser encontrados na natureza, dando como exemplo do reino vegetal a madeira, constituída por uma matriz de lenhina que envolve as fibras de celulose e no âmbito dos animais vertebrados, os seus ossos são um compósito constituído por uma matriz de colagénio e hidroxiapatita, onde, devido a um processo natural de evolução, as fibras se foram orientando segundo a direção que melhor permitia contrariar os esforços impostos[1].

O ser Humano, respondendo ás solicitações que o Mundo lhe colocava e tirando o melhor proveito dos materiais em redor, acabou por recorrer a este tipo de materiais. Numa perspetiva histórica, uma das primeiras referências à utilização de materiais compósitos foi concretizada pela civilização do antigo Egito na criação do contraplacado, onde devido à escassez de madeira eram intercaladas tiras de madeira mais resistente com outras de qualidade inferior. Uma segunda referência foi consubstanciada nos tijolos, onde o barro tinha a função de matriz, reforçado com palha, ambos elementos abundantes naquela zona. Outro compósito antigo é o betão, que é constituído por uma mistura de agregado e areia, com cimento, o qual era muito apreciado pela sua capacidade de resistir a esforços de compressão. Já nos tempos modernos com a adição de um novo material de reforço sob a forma de armações de ferro, o betão melhorou a resistência à tração[2].

No séc. XX foram desenvolvidos novos materiais que levaram à criação dos chamados compósitos modernos, constituídos por uma matriz de base polimérica e reforço de fibras de diversos materiais. Estes envolvem a utilização de materiais de reforço como a fibra de vidro, kevlar, fibras de carbono e de matrizes normalmente de polímeros termoendurecíveis como a resina epóxi ou o polietileno. Com estes materiais conseguiu-se uma relação resistência/densidade mais favorável, que foi essencial para o enorme desenvolvimento de tecnologia de ponta em indústrias várias como a automóvel, aeronáutica e aeroespacial,(Figura 1). Também em aplicações onde existem esforços muito grandes e é necessário uma boa dispersão de calor, a combinação de várias camadas de materiais com características diferentes é a única solução possível para garantir a integridade da estrutura [3].

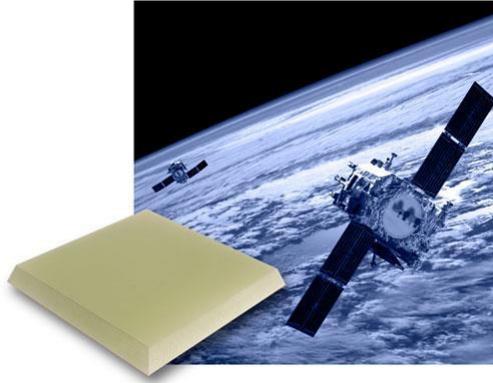


Figura 1 - Compósito que tem na sua constituição epóxi e vidro, utilizado para minimizar transferências térmicas [4]

## 2.1. Definição de Materiais compósitos

Quando se fala em material compósito entende-se por um material resultante, macroscopicamente, de uma combinação de dois ou mais materiais. No caso mais específico de compósitos fibrosos os diversos materiais vão desempenhar cada um uma função específica que pode ser de elementos de reforço ou matriz ligante. Os seus constituintes não se dissolvem ou fundem completamente um no outro, mantendo assim as suas identidades iniciais, embora passem a agir em conjunto no que diz respeito ao comportamento mecânico do novo material. Na maioria dos casos, os componentes podem ser fisicamente identificados e exibem uma interface entre um e outro[5].

As propriedades físicas e mecânicas do compósito dependem das propriedades, geometria e concentração de cada constituinte. Existem assim muitos fatores a considerar quando se fabrica um material compósito, como o tipo de material da matriz e reforço, a organização e fração de cada constituinte, tendo em consideração os esforços a que vai estar sujeito, e o meio onde vai operar entre outros fatores [6], [7]. Uma das principais vantagens dos materiais compósitos é que normalmente apresentam melhores qualidades do que as dos componentes que os constituem e até algumas características que não estavam presentes em nenhum deles separadamente.

### 2.1.1. Matriz

A matriz tem a função de agregar todo o material de reforço ao mesmo tempo que mantém a sua organização e posicionamento, dando a forma ao compósito e impede que o reforço seja atacado por elementos que possam provocar a sua degradação. A matriz vai promover a transmissão e distribuição dos esforços aplicados sobre o compósito, a todas as fibras que constituem o elemento de reforço. A matriz tem tipicamente propriedades mecânicas inferiores de densidade, rigidez e tensão, comparando com as fibras. Em termos de comportamento ela pode ser frágil, dúctil, elástica ou plástica, podendo ter ou não um comportamento linear mesmo a baixos níveis de deformação [6], [8].

Os compósitos podem ser agrupados em três grupos no que diz respeito ao material que constitui a sua matriz, podendo esta ser de matriz cerâmica, metálica ou polimérica, cada um com as suas especificidades e limitações [9].

- Matriz cerâmica - Costumam ter um comportamento frágil, e têm uma elevada capacidade térmica por unidade de peso. Têm aplicação em ambientes onde altas temperaturas são esperadas e em meios altamente corrosivos [10].
- Matriz metálica - Aplicada em compósitos que sejam utilizados em aplicações sujeitas elevada temperatura e em ambientes oxidantes. A maioria desses compósitos apresenta uma massa específica de um terço da do aço e uma tensão específica e rigidez elevada, podendo promover a redução de peso global do compósito até 25% [11].
- Matriz polimérica- Tipo de matriz mais comum e mais barata. Possuem uma grande facilidade de processamento, e têm boas propriedades mecânicas impregnando e aderindo aos elementos de reforço com facilidade. Possuem uma baixa densidade, e são processadas a baixa temperatura, o que permite a utilização de alguns reforços orgânicos. Uma matriz polimérica tem um comportamento visco-plástico ou viscoelástico, sendo por isso afetada com uma deformação ao longo do tempo, temperatura e humidade. Os polímeros usados podem ser termoplásticos ou termoendurecíveis [6].

### 2.1.2. Reforço

Os elementos de reforço proporcionam resistência e rigidez ao compósito e ajudam suportar o esforço estrutural [8]. Os materiais compósitos são usualmente classificados segundo o tipo de material de reforço usado, destacando-se duas grandes classes: reforços de fibras e de partículas.

Fibras - Podem ser fibras contínuas se tiverem uma razão comprimento/diâmetro muito elevada e apresentam um diâmetro que varia tipicamente entre 3-200 $\mu\text{m}$ , dependendo da fibra[12]. As fibras descontínuas podem ser definidas como tendo uma razão comprimento/diâmetro entre  $5 < l/d < 1000$ , e apresentam diâmetros geralmente entre 0.02-100  $\mu\text{m}$  [13].

No caso das fibras contínuas, podem estar distribuídas na matriz em várias camadas, designados normalmente por laminados, ou numa só camada tendo uma distribuição unidirecional ou em malha. Em ambos os casos a resposta das fibras é geralmente ortotrópica. Nas fibras descontínuas estas podem apresentar uma orientação em determinada direção ou uma distribuição aleatória, considerando-se em ambos os casos como uma única camada. A resposta destas fibras pode produzir uma resposta anisotrópica, mas em alguns casos

apresentam um comportamento isotrópico [6]. Nas Figuras 2,3 e 4 são apresentados exemplos da distribuição de fibras e partículas em compósitos.

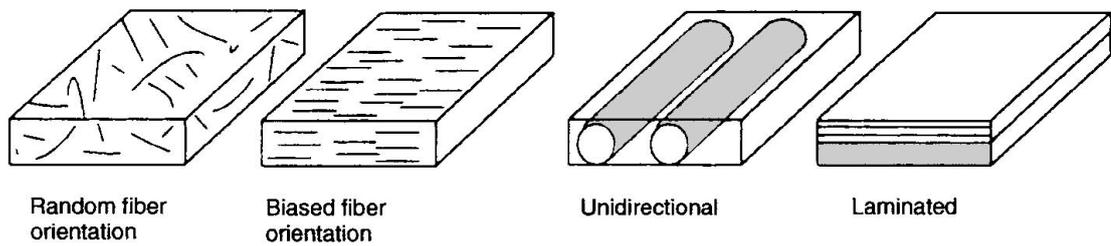


Figura 2 - Exemplo de distribuição de fibras em compósitos [6]

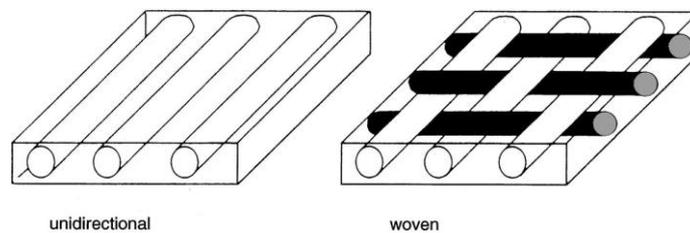


Figura 3 - Exemplos de fibras contínuas laminadas em compósitos [6]

Partículas - Consiste numa distribuição aleatória de elementos suspensos na matriz. Estas partículas podem ter vários tamanhos, forma ou configuração. A resposta do reforço pode ser anisotrópica ou ortotrópica, e são usados em aplicações onde a força não é um componente significativo dos requisitos.

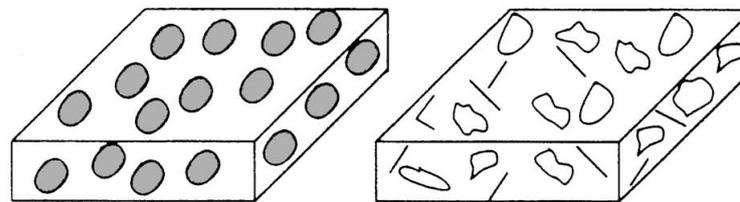


Figura 4 - Exemplo de duas formas diferentes de partículas em compósitos [6]

## 2.2. Processos de fabrico de materiais compósitos

Os compósitos, considerando agora os de matriz polimérica reforçada com fibras, apresentam uma grande variedade e diversidade de soluções que permitem a substituição de materiais como aço, madeira e cerâmicos em aplicações que vão desde estruturas de alta performance até bens comuns do quotidiano. Mas para que seja possível uma implantação com sucesso destes materiais, é necessário que seja empregue um processo de fabrico viável e que garanta uma boa qualidade do produto final, em conjunto com outros parâmetros como o

valor do capital investido, tempo de ciclo de fabrico, possibilidade de automação, e a capacidade de produção de peças de grandes dimensões e complexidade [14].

Existe uma grande variedade de processos de fabricação de compósitos, uns através de molde fechado como a moldação por compressão, injeção e transferência, e outro recorrendo a molde aberto como o HLU, Spray-up, sendo o processo manual ou automático.

Quando se consideram as opções de compósito por molde fechado existem várias possibilidades. Um processo de moldação por compressão é indicado para a produção de um elevado número de peças e baixo custo por unidade, mas requer um grande investimento. No caso do processo de infusão de resina por vácuo, este requer pouco investimento inicial mas tem tempos de produção baixos [15]. O processo de Moldação por Transferência de Resina (RTM) é um processo que está localizado no meio dos anteriores no que diz respeito a volume de produção e investimento. O RTM pode ser usado na construção de uma grande variedade de produtos de compósitos poliméricos, e aplicável a uma gama alargada de resinas e de materiais de reforço[16]. Nos seguintes parágrafos encontra-se uma breve descrição que alguns processos, e as suas aplicações mais comuns.

Spray Up - é um método comum e utilizado em pequenas séries de produção, simples e que possibilita a sua aplicação em estruturas com formas complexas e de grandes dimensões, sendo o seu processo muito semelhante ao HLU, ver Figura 5. Utiliza um molde aberto económico, e necessita uma sala com temperatura regulável, para os processos de cura. As principais desvantagens são a grande emissão de gases para a atmosfera, pode apresentar um mau acabamento superficial numa das superfícies e uma distribuição irregular das fibras pela espessura.

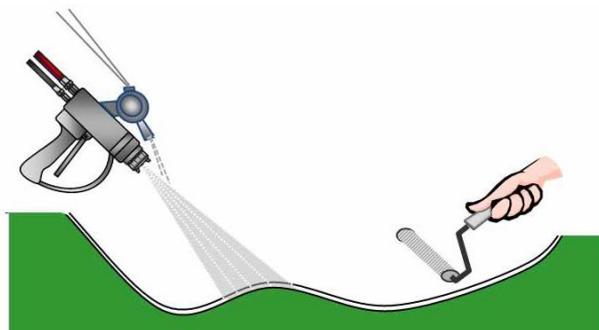


Figura 5 - Processo de Spray Lay Up [17]

Moldação por compressão - Este é um método de molde fechado e utilizam-se moldes de aço para garantir a longevidade do molde, ver Figura 6. O material compósito a ser moldado coloca-se numa das cavidades do molde, onde é ajustado e aquecido entre os 80-170°C. O molde é depois fechado pela ação de grandes pressões que força as fibras e a resina contra as cavidades do molde. A pressão e a força são mantidas constantes até curar a resina. Geralmente este processo é utilizado para peças com grandes quantidades de reforço com distribuição aleatória e resinas termoendurecíveis. Por ser necessário um grande investimento para adquirir o molde este processo destina-se a séries médias de produção.

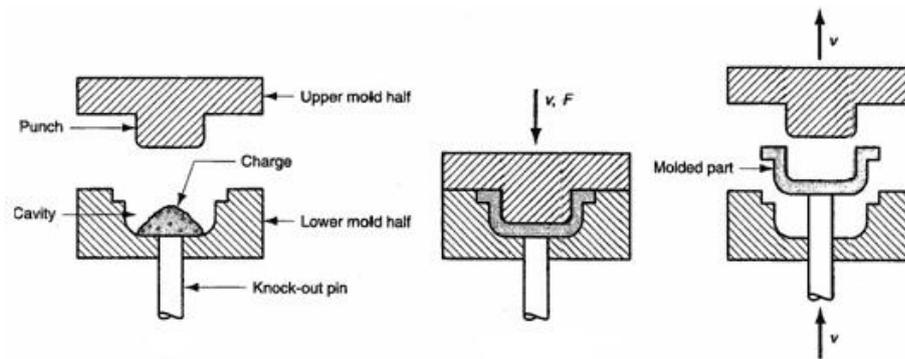


Figura 6 - Processo de moldação por compressão [18]

Moldação por vácuo - Trata-se de um processo de molde fechado, onde é imperativo que este quando fechado seja completamente estanque, ver Figura 7. O primeiro passo é a aplicação das fibras sobre uma das concavidades do molde que depois é encerrado e aquecido. A resina é injetada no molde e ao mesmo tempo é aplicado o vácuo no interior do molde. A utilização do vácuo permite a obtenção de bons acabamentos superficiais, e aumento das características mecânicas do compósito devido à redução da percentagem de bolhas de ar nas fibras até 70%.

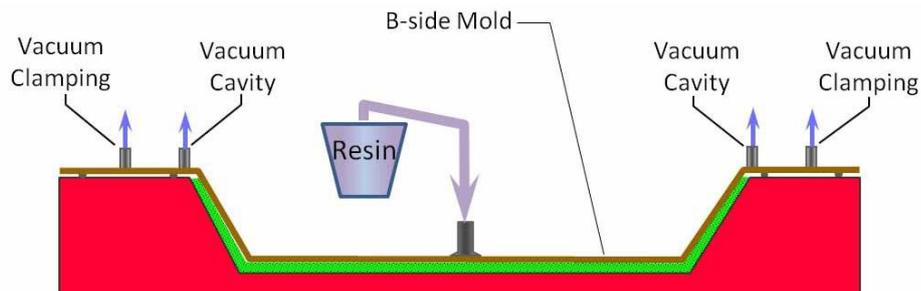


Figura 7 - Processo de moldação por vácuo [19]

### 2.2.1. Moldação por Transferência de Resina

O processo de RTM pode ser dividido em 2 fases distintas, uma de enchimento do molde e a outra de cura do compósito. O material de reforço é colocado no molde, com as dimensões da peça. O molde é colocado numa prensa para o manter unido. Durante a fase de enchimento do molde, a resina pré-catalisada é introduzida por ação de pressão controlada, onde vai impregnar o material de reforço e preencher o molde, ver Figura 8. Com o molde preenchido, a resina é catalisada, e o excesso é posteriormente retirado do molde e deixado a curar um certo período de tempo. Para obter um bom produto final é necessário que haja um completo preenchimento das cavidades do molde e que todo o ar no seu interior seja expelido, assim como uma boa impregnação do material de reforço. A impregnação das fibras é influenciada por fatores como as propriedades químicas e reológicas da resina líquida, orientação ou anisotropia da estrutura de reforço, temperatura do molde, pressão de injeção e a própria afinidade entre a fibra e a resina [20], [21].

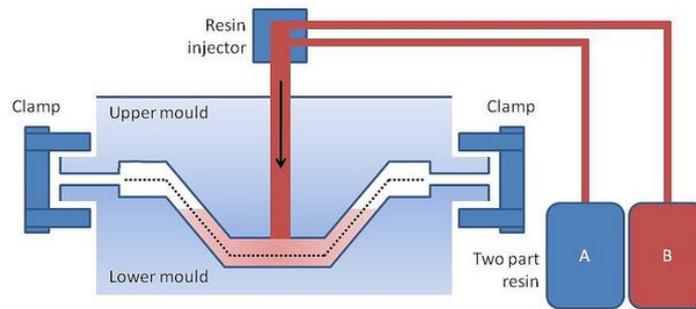


Figura 8 - Esquema do processo de RTM, onde A e B são as resina e o catalisador [22]

Este processo tem sido escolhido para a produção de compósitos de alto desempenho na indústria automóvel mas também começa a ganhar espaço em indústrias como a militar e aeroespacial. O RTM apresenta como vantagens competitivas em relação aos outros processos de fabricação de compósitos o baixo custo da mão-de-obra necessária, a simplicidade das ferramentas utilizadas no processo, ciclos de tempo de produção satisfatórios, e a fabricação de estruturas complexas com qualidade, além de não requerer o uso de pré-impregnados, ou prépreqs [20]. A Figura 9 apresenta um exemplo de um molde de RTM de grandes dimensões.



Figura 9 - Molde de RTM de grandes dimensões [23]

Este método apresenta muitos pontos fortes no que diz respeito ao seu processo e no resultado final dos produtos. Quanto ao processo ele apresenta tempos de ciclos bastante satisfatórios, apresenta também a possibilidade da automatização do processo produtivo, pouco desperdício de material e uma reduzida emissão de gases comparando com os processos de molde aberto. Por outro lado a complexidade e o custo dos moldes de RTM apenas o torna apetecível no caso de séries de produção médias. Pelo facto de se tratar de um processo onde há cura parcial dos compósitos no molde, leva a que o tempo de ciclo de produção dependa do tempo de cura da resina.

## 2.2.2. Moldação por Hand Lay-Up

Este processo de molde aberto, ver Figura 10, um dos mais antigos e simples, é utilizado na produção de produtos de dimensões variadas, mas estando bem qualificado para peças de grandes dimensões como, por exemplo, casco de barcos e pás para torres eólicas. Normalmente encontra-se limitado a produtos que apenas exijam que uma das faces tenha uma superfície lisa, condição esta que está inerente ao processo de fabrico. Requer um investimento mínimo no que diz respeito a molde e equipamento[24].



Figura 10 - Aplicação do processo HLU num molde de grandes dimensões [25]

Antes de iniciar o processo de HLU, realiza-se a preparação do molde limpando-o e aplicando o desmoldante. Pode-se recorrer à cobertura da superfície do molde com gel coat, caso se pretenda um bom acabamento superficial. A seguir o material de reforço é colocado manualmente sobre o molde e a resina, já misturada com o catalisador, é vertida sobre o mesmo. Utiliza-se de seguida um rolete para uniformizar a dispersão da resina sobre o molde, ao mesmo tempo que se expulsam as bolhas de ar que ficaram na estrutura de laminado. Através da passagem do rolete também se promove a total impregnação do material de reforço, e retira-se o excesso de resina entre as camadas para se poder obter uma distribuição uniforme das fibras pelo compósito. O controlo da espessura da resina e a qualidade da impregnação dependem muito do técnico responsável pela operação do processo. A utilização deste processo em conjunto com outros como o de moldação por vácuo, RTM por vácuo e moldação por compressão, podem levar à melhoria da qualidade do compósito e melhoria do tempo de fabrico [26].

Como qualquer outro processo o HLU, apresenta vantagens e áreas mais propícias para a sua aplicabilidade. A favor deste processo está o facto de ser um processo muito simples e que não implica um grande investimento inicial. Devido à sua utilização durante vastos anos os seus processos são amplamente conhecidos. A diversidade no que diz respeito à dimensão das peças fabricadas e da possibilidade de materiais utilizados é um outro fator que torna o HLU um processo tão utilizado. As suas desvantagens são também bem conhecidas limitando a aplicação em determinados processos industriais. A primeira desvantagem é o facto de que

os processos que compõem este método consomem muito tempo, levando a que este seja um processo com uma baixa cadência de produção de peças. Outro inconveniente é que este processo pode resultar numa orientação das fibras inconsistente que resultam da colocação das camadas de fibras superiores e até provocar a distorção da própria malha resultante do constante manuseamento das mesmas, podendo resultar numa alteração das propriedades mecânicas do compósito. O controlo da espessura do compósito final é também algo difícil de realizar, influenciando negativamente o controlo do peso e aplicações onde a tolerância dimensional seja rigorosa.

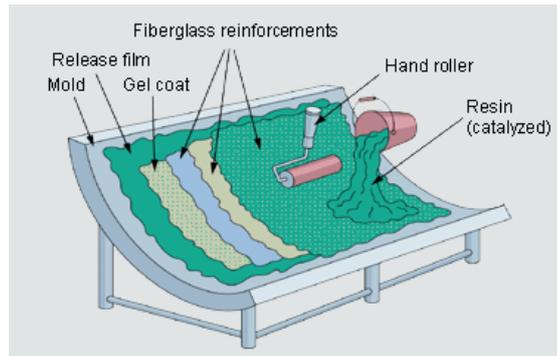


Figura 11 - Esquema de aplicação do processo HLU [27]

### 2.3. Regra das misturas

No caso dos compósitos laminados, a fração volúmica do material de reforço relaciona-se com as propriedades do material compósito de que faz parte. Neste caso as propriedades mecânicas sofrem influência com a orientação espacial, podendo a mesma propriedade ter ou não diferentes valores consoante a direção. No caso dos materiais compósitos laminares o módulo de elasticidade pode ser obtido utilizando a equação 1:

$$E_c = E_f \vartheta_f + E_m \vartheta_m \quad (1)$$

Sendo  $E_f$  e  $\vartheta_f$  o módulo de elasticidade e a fração volúmica das fibras e  $E_m$  e  $\vartheta_m$  as mesmas propriedades referentes ao material da matriz. A determinação da fração volúmica das fibras pode ser feita através do valor da densidade e do peso das fibras, presentes num determinado volume do compósito.

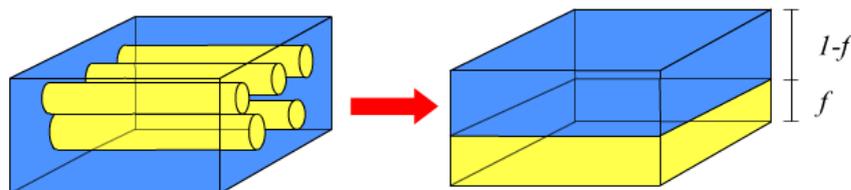


Figura 12 - Ilustração da simplificação introduzida com a regra das misturas [28].

A regra das misturas assume que as fibras são uni-direcionais sendo necessária a utilização de um fator de eficiência do material de reforço chamado fator de Krenchel. Quando as fibras estão todas orientadas na mesma direção este tem o valor máximo de 1, mas no caso em que as fibras estão alinhadas perpendicularmente umas às outras a eficiência do reforço reduz-se para 0,5. No caso do material ter uma distribuição aleatória a eficiência do reforço é de apenas 0.2 [29]. A equação 1 toma assim a seguinte forma:

$$E_c = \eta E_f \vartheta_f + E_m \vartheta_m \quad (2)$$

Onde  $\eta$  é o fator de Krenchel. A Figura 13 mostra exemplos de utilização de do fator de Krenchel.

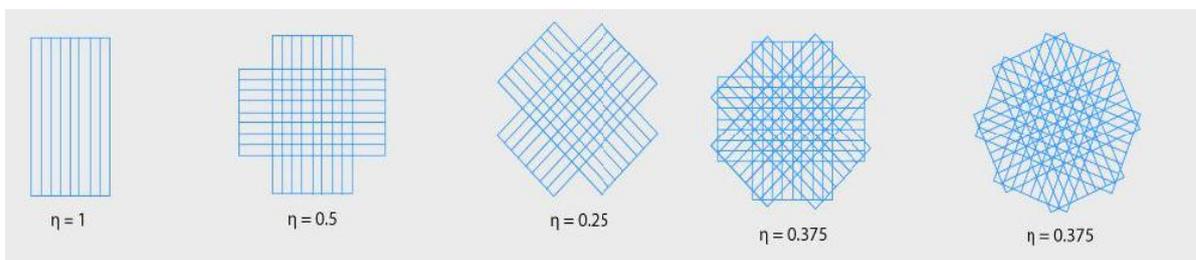


Figura 13 - Variação do fator de Krenchel em função da orientação das fibras [29]

## 2.4. Fibras

As fibras têm sido o tipo de material mais utilizados como reforço em materiais de matriz polimérica. Materiais como o carbono, aramida, boro e vidro, que representam cerca de 90% do volume total de fibras de reforço utilizadas, devem o seu sucesso às suas elevadas propriedades específicas, por exemplo, a sua elevada rigidez e resistência em relação ao seu peso, comparativamente aos outros materiais convencionais [30]. Este tipo de fibras devido ao seu elevado custo apenas tem até agora sido utilizado em aplicações relacionadas com indústrias aeronáuticas e aeroespaciais, ou então em aplicações específicas onde o desempenho tenha mais importância que o custo do produto, como equipamentos de desporto de alta competição e em certos ramos da indústria automóvel. Tem sido feito um esforço no âmbito da introdução de fibras naturais como a fibra de juta, banana, coco, entre outras, na produção de bens como casas de baixo custo e outras estruturas civis, pois em alguns casos o tipo de compósito que formam apresentam melhores propriedades de isolamento térmico e acústico, e maior resistência à fratura.

### 2.4.1. Fibras de Basalto

A conceção do processo capaz de sintetizar as fibras de basalto deve-se ao francês Paul Dhé, o qual no ano 1924 obteve a primeira patente sobre o método de extrusão de fibras de basalto[31]. Mas foi preciso esperar até à década de 50 para despertar o interesse no seu desenvolvimento, primeiro pela União Soviética, e mais tarde, durante as décadas de 60/70, por parte dos Estados Unidos da América, nomeadamente na parte noroeste do país, onde estão localizados os grandes depósitos de basalto do Columbia Plateau [32]. Devido ao grande interesse demonstrado pelas chefias da União Soviética, com vista às suas possíveis aplicações nas indústrias militares e espaciais, a sua pesquisa e desenvolvimento obteve um grande impulso financeiro, levando a que no final se obtivessem resultados que tornassem possível a sua aplicação. No entanto, devido à sua importância, esta nova tecnologia foi mantida fora do âmbito civil até que nos princípios da década de 90, com a chegada da Perestroika, foi desclassificada.



Figura 14 - Vários tipos de entrelaçados de fibras de basalto [33].

### Processo de fabrico

O basalto, enquanto mineral, está presente em muitos locais no mundo. Apesar disso, a combinação dos elementos que constituem o basalto varia consoante as condições específicas da taxa de arrefecimento da lava quando esta atinge a superfície. O facto descrito anteriormente juntamente com o facto de no processo de fabricação das fibras de basalto ser apenas utilizado um tipo de matéria-prima, faz com que apenas o basalto de algumas pedreiras tenham as características essenciais para a sua aplicação a nível industrial [30].

O processo de obtenção das fibras de basalto é muito similar ao utilizado na obtenção das fibras de vidro. A rocha basáltica é lavada e esmagada, sendo introduzida no forno de fundição onde passa ao estado líquido. Ao contrário do vidro, que é transparente, o basalto é opaco e assim absorve a energia sob forma de radiação infravermelha, tendo os produtores contornado esse problema através da abordagem de novas estratégias como a imersão de eléctrodos no líquido, ou com o aumento do tempo de permanência do basalto no reservatório para obterem uma uniformização da temperatura do líquido. O basalto líquido passa depois por um crivo que

contém centenas de pequenos orifícios. O basalto ao passar pelos orifícios passa a ter a forma de filamentos, que são arrefecidos e puxados por um rolo que pode, através da variação da velocidade de recolha das fibras, regular a grossura dos filamentos. A origem e subsequente composição química do basalto tem influência nas características mecânicas e físicas dos filamentos obtidos [31],[34].

### 2.4.1. Campos de aplicação das fibras

Apesar de só recentemente estar ao dispor da indústria civil, devido às suas características, estas começam a substituir algumas das fibras até agora utilizadas em algumas aplicações. Novas áreas estão a começar a ser exploradas no sentido de observar o seu comportamento e comparar com os materiais que estão mais difundidos no mercado atual. Devido às suas propriedades mecânicas e ao seu preço, as fibras de basalto colocam-se na região de aplicações das fibras de vidro, tendo muitas das aplicações das fibras de basalto sido feitas através da substituição das fibras de vidro, ou pela utilização conjunta das duas. Como tal também a maior parte dos estudos seguem esta linha diretora, procurando perceber qual o comportamento destes compósitos híbridos e comparando as suas características quando usados como material de reforço em separado.

Comparando resultados de ensaios realizados a compósitos de fibra de vidro e de basalto é possível vislumbrar possibilidades de substituição da primeira pela segunda. Compósitos de epóxi com fibra de basalto podem apresentar valores de módulo de Elasticidade em tração, compressão ou flexão entre 35-42% superiores em relação a compósitos que utilizam E-glass, assim como melhores propriedades de compressão e de flexão [34]. A Figura 17 apresenta o resultado de um estudo comparativo entre um compósito com fibras de basalto e outro com fibras de vidro de diferentes módulos de Elasticidade.

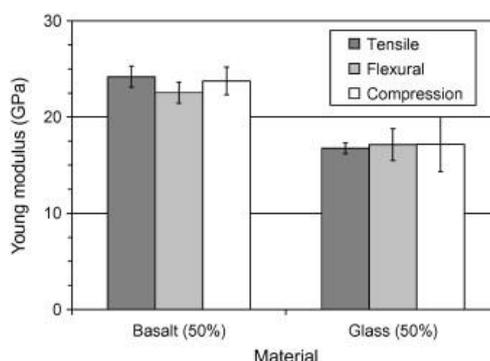


Figura 15 - Comparação entre os diferentes módulos de Elasticidade dos compósitos de basalto e E-glass, com a mesma fração volúmica [34]

Devido ao facto de serem resistentes à corrosão, começam-se a ser introduzidas em estruturas que estejam nas proximidades de água salgada ou em ambientes agressivos, como substituição por exemplo do ferro como elemento de reforço do betão armado. As fibras de basalto obtiveram grande aceitação no que diz respeito a aplicações como proteções contra a

propagação de fogo, por manterem a sua integridade física mesmo a temperaturas na ordem dos 1100°C [31], começando a estar presentes em equipamentos de combate a incêndio, ou nos edifícios em estruturas retardadoras de fogo. A utilização de fibras de basalto, na construção de botijas de gás natural comprimido, mostrou ser uma alternativa viável em relação à utilização de fibras de E-glass, mostrando que para botijas com iguais propriedades, as compostas por fibra de basalto pesavam menos 15% e custavam menos 5% que as de E-glass [41].

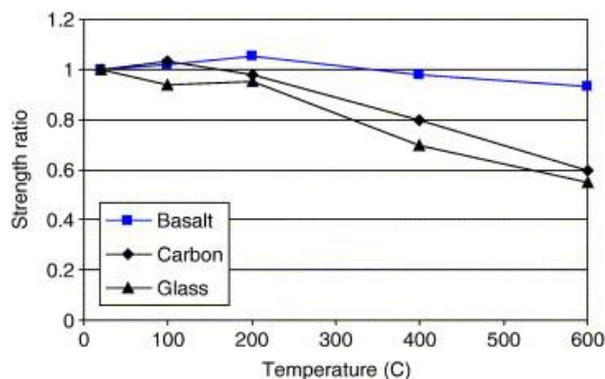


Figura 16 - Gráfico da evolução do comportamento dos diferentes compósitos com o aumento da temperatura [41]



Figura 17 - Reservatórios de gás natural comprimido com aplicação de fibras de basalto [41]

A utilização de fibras de basalto no reforço de membros estruturais de cimento, mostrou ter a capacidade de manter as suas propriedades mecânicas, mantendo a integridade da estrutura e 90% da resistência, quando submetidos a temperaturas da ordem dos 600°C em relação a fibras como carbono e vidro [42].

Devido ao facto de haver uma crescente preocupação com a preservação do meio ambiente, os governos veem-se obrigados a aprovar legislação que distribua as responsabilidades ambientais pelas empresas produtoras e utilizadores dos produtos. Deste modo os estados fomentam a introdução de materiais e processos de fabrico que diminuem os encargos relacionados com o tratamento de resíduos e reciclagem. As fibras de basalto oferecem assim uma vantagem competitiva, pois a sua inceneração não introduz quaisquer

custos adicionais associados com a limpeza das estruturas de tratamento, o que não acontece com as fibras de vidro que tendem a ficar coladas no interior da câmara de combustão [43].

A utilização de camadas de reforços mistos, promove uma oportunidade de expansão para as fibras de basalto. Em estudos realizados quanto à resposta de dois compósitos a um ensaio de impacto, um com basalto e o outro com fibras de vidro, observou-se um comportamento predominante de rotura no compósito de fibras de basalto e um fenómeno de delaminação no compósito de vidro. A utilização de um reforço híbrido iria introduzir uma melhor previsibilidade dos padrões de falha. Demonstra-se ainda que com a mistura destas fibras segundo uma determinada sequência de empilhamento se consegue uma melhor resposta em relação a compósitos com um único tipo de reforço, no que diz respeito a absorção de energia de impacto, padrões de degradação mais favoráveis e propriedades de flexão após impacto [44].

### 2.4.2. Fibras de Vidro

A fibra de vidro, na sua mais antiga forma, foi desenvolvida pelos egípcios e utilizada como decoração, tendo a mesma técnica sido utilizada e melhorada por algumas civilizações contemporâneas mas com o mesmo fim. Em 1836 o parisiense Ignace Dubus-Bonnel obteve a patente para o processo de fiação de fibras de vidro. Mas foi preciso esperar pela década de 1930 para que a Owens Illinois Glass Company e a Corning Glass Works desenvolvessem métodos de produção de fibras de vidro para fim comercial. Desde o momento em que foi possível a produção de filamentos contínuos finos, a fibra de vidro encontrou grande aceitação em aplicações como isolamento térmico e filtros de ar. Quando se combinaram as propriedades das fibras de vidro e de plásticos, obteve-se um material leve e resistente, que foi essencial para o desenvolvimento de toda uma nova variedade de produtos nas mais diversas áreas. A sua aplicação em compósitos, vai desde a construção aeronáutica, passando por indústria automóvel, desportiva, eletrónica [35] [36]. Na Figura 15 é apresentada a aplicação de fibra de vidro na construção de pás de torres eólicas.



Figura 18 - Utilização de fibra de vidro nas pás de torres eólicas [37].

## Processo de fabrico

Os principais componentes da fibra de vidro são a areia, o calcário e a argila, podendo ainda serem adicionados boratos e pequenas quantidades de especialidades químicas de modo a conferir propriedades específicas. Todas as matérias-primas são lavadas e de seguida moídas, sendo posteriormente misturadas a granel, mistura essa designada por fornada. Essa mistura vai por sua vez alimentar um forno de fusão designado por tanque. Esse tanque, constituído por paredes de tijolos refratários, encontra-se a temperaturas na ordem dos 1500°C, dando origem à total fundição da fornada. A massa fundida de vidro flui para bandejas de platina altamente resistentes ao calor, designadas por fieiras. As fieiras possuem milhares de pequenas aberturas tubulares furadas com precisão, através dos quais o vidro passa e os filamentos são formados. Estes filamentos de vidro fundido são puxados verticalmente a uma velocidade controlada para assim obter um diâmetro preciso. Os filamentos são então arrefecidos a ar e água de modo a fixar o valor do diâmetro e criar a fibra de vidro. As fibras são então revestidas com uma mistura química à base de água que tem como finalidade proteger os filamentos do manuseamento de que será alvo durante os processos seguintes e assegurar uma boa adesão entre a fibra e a resina. O último passo, comum a todos os tipos de produtos finais da fibra de vidro é a passagem pela estufa para evaporação da água resultante dos processos anteriores. A fibra de vidro tem os mais variados usos, assim ela poderá ser picada, ou enrolada em carretos ou ainda utilizada em tecidos ou malhas.

### 2.4.3. Fibras de Carbono

As fibras de carbono de alta resistência foram pela primeira vez produzidas nos finais da década de 50, por Roger Bacon. A contínua investigação levou à substituição da matéria-prima nos anos seguintes, por poliacrilonitrilo e da seguida a introdução de piche no processo, o que

levou a um incremento substancial nas suas propriedades [38]. Logo começou a ser comercializada com sucesso devido as suas propriedades, mas sofrendo consequentes ciclos de procura e recessão. Devido as presentes necessidades de algumas indústrias, num mercado cada vez mais competitivo em obtenção de materiais com altas performances e baixo peso, como a energética, aeroespacial, desporto entre outras, tem-se registado um aumento na procura deste produto.



Figura 19 - Aplicação de fibras de carbono na construção do chassis do Lamborghini Aventador V12L [39]

## Processo de fabrico

O material utilizado, designado por precursor e utilizado na fabricação, é constituído por 90% de poliacrilonitrilo (PAN), uma resina sintética e os restantes 10% são raiom ou piche de petróleo, sendo todos eles polímeros orgânicos constituídos por longas cadeias de moléculas, ligadas entre si por átomos de carbono. Durante o seu processo serão adicionados vários produtos líquidos e gasosos que têm como função potenciar ou inibir certas reações.

O processo de fabrico pode ser dividido em 4 fases: fiação, estabilização, carbonização, tratamento superficial e dimensionamento [40]. Na fiação a acrilonitrina em pó é misturado com outro plástico e um catalisador para formar plástico PAN, sendo de seguida extrudido em forma de fibras, mediante um de vários métodos existentes, sendo neste passo que a estrutura interna atómica é formada. As fibras são de seguida lavadas e esticadas até à dimensão pretendida, contribuindo para a orientação das moléculas essencial para uma eficaz carbonização. O próximo passo é a estabilização, onde as fibras são expostas a temperaturas de 200°-300° C durante 30-120 minutos, para alterar quimicamente as ligações atómicas tornando-as mais estáveis. De seguida as fibras sofrem um processo de carbonização, onde são aquecidas a temperaturas entre 1000 e 3000°C por alguns minutos num forno que contém uma mistura gasosa sem oxigénio. À medida que as fibras são aquecidas estas vão perdendo todos os átomos não-carbono, fazendo com que os átomos de carbono que permanecem nas

fibras, formem cristais de carbono fortemente ligados e alinhados paralelamente ao eixo da fibra. Após a carbonização as fibras não têm uma grande afinidade com as resinas usadas em compósitos, sendo necessário fazer um tratamento superficial. A solução utilizada é a ligeira oxidação das fibras, através da exposição das fibras a gases como ar, dióxido de carbono ou ozono, ou líquidos como o hipoclorito de sódio ou ácido nítrico. O último passo é a dimensionamento onde as fibras recebem outro tratamento superficial para as tornar mais resistentes ao manuseamento, ou para as tornar mais compatíveis com determinadas resinas, sendo de seguida enroladas em bobines de vários tamanhos.

## 2.5. Matrizes poliméricas

As resinas naturais proveem de plantas, e têm vindo a ser usados pelo Homem desde a antiguidade e numa grande variedade de aplicações. Um dos mais notáveis foi a sua utilização na preparação de corpo mumificados no Egito, ou a sua aplicação em joalheria sob a forma de âmbar. Ainda hoje têm um largo campo de aplicações que vão desde perfumes até aos arcos de instrumentos como o violino.

Essas resinas naturais foram reproduzidas pelo Homem, dando origens ao que se chama resinas sintéticas. Estas resinas mantêm todas as qualidades das naturais, a mais importante de todas a habilidade de endurecer com a aplicação de calor ou pressão. Estes são obtidos através da polimerização química, e permite criar polímeros mais estáveis e homogêneos que os das resinas naturais, sendo muito usados na indústria nas mais diversas aplicações.

### 2.5.1. Termoplásticos e Termoendurecíveis

No que se refere ao tipo de material usado para a matriz, como foi referido anteriormente, os materiais compósitos são agrupados em 3 grandes grupos:

- Matriz polimérica;
- Matriz cerâmica;
- Matriz metálica

O uso de polímeros em compósito requer que estes tenham um determinado conjunto de características que permitam que desempenhe a função de matriz. Deverá então ter umas boas propriedades mecânicas, uma alta tensão de rotura e capacidade de deformar sem partir, e uma boa tenacidade. Uma boa capacidade de adesão é essencial pois possibilita que a transmissão dos esforços provocados, sejam distribuídos pelo material de reforço. Uma boa resistência ao meio, de maneira a proteger possíveis fragilidades dos materiais de reforço a agressões do exterior como por exemplo água salgada.

Os materiais poliméricos são compostos por moléculas simples, chamadas meros, que se repetem sucessivamente originando longas cadeias. Os polímeros podem ser divididos em dois grupos, tendo em conta o tipo de ligação promovida entre as cadeias, os termoplásticos e os

termoendurecíveis. Nos termoplásticos a união entre cadeias poliméricas é resultante unicamente de interações físicas e do emaranhado de cadeias. Este tipo de estrutura permite, após o seu aquecimento até uma temperatura próxima da que foi formada, uma enformação da mesma. Quando o material volta à temperatura normal, apresenta as mesmas características anteriores ao aquecimento, podendo este processo ser repetido várias vezes sem danificar a estrutura do material. Em geral são pouco utilizados pois a sua estrutura cria resistência aos solventes, e são difíceis de processar dadas as elevadas viscosidades dos produtos de elevado peso molecular. Os polímeros termoendurecíveis têm uma estrutura reticulada e as cadeias poliméricas estão interligadas por ligações químicas. São formados por uma reação química, onde a resina e o catalisador se misturam e provocam uma reação irreversível, reação essa que promove a ligação entre as cadeias, que se designa por cura e resulta na formação de um material rígido. Como são produtos de baixo peso molecular e conseqüente baixa viscosidade, permitem uma boa impregnação do material de reforço. Devido à rigidez da estrutura reticulada não permite a enformação do material caso a temperatura seja aumentada, mas caso a temperatura ultrapasse um determinado valor, temperatura de transição vítrea que varia consoante o polímero, propriedades tal como o módulo de Elasticidade, resistência à água, estabilidade de cor, decrescem rapidamente [6], [45], [46].

Os polímeros são muito utilizados e apreciados, especialmente devido ao seu baixo peso e facilidade de processamento. O seu baixo custo e a facilidade com que podem ser processados permitiram que penetrassem nas mais diversas indústrias. Em norma apresentam uma boa resistência à corrosão e abrasão. Uma das razões que impede a sua ainda maior expansão é o facto de não ser possível a sua utilização em aplicações onde a temperatura ultrapasse os 250°C, devido à sua baixa resistência térmica e elevado coeficiente de expansão térmica [47].

## 2.5.2. Bio Resinas

Devido às preocupações existentes com o uso das resinas sintéticas, nomeadamente o da sua origem não renovável, estas deram um impulso ao aparecimento e desenvolvimento de novas resinas derivadas de produtos naturais ou renováveis [48]. A utilização de bio polímeros provenientes de recursos renováveis, nomeadamente o uso de produtos agrícolas, permite um desenvolvimento sustentável da economia, e dando a possibilidade a países menos desenvolvidos de se tornarem produtores de matéria-prima, ao mesmo tempo que se preserva os recursos fósseis finitos. Outro fator que está presente nos bio polímeros, e que depende do tipo de ligações estruturais, é o facto de serem na sua maioria, biodegradáveis. A utilização destes polímeros biodegradáveis oferece uma solução para problemas relacionados com a eliminação de resíduos relacionados com os tradicionais polímeros derivados do petróleo.

Foram criadas normas no sentido de qualificar o material como sendo bio e quanto ao limite pelo qual se pode ou não considerar um produto biodegradável. Neste sentido a norma ASTM D6866, permite qualificar um produto de bio, através do tipo de carbono utilizado, fóssil

ou não fóssil, tendo em consideração a origem e percentagem de cada tipo de carbono. No que diz respeito à designação como biodegradável, ou seja, a capacidade do material ser convertido em dióxido de carbono por ação de micro-organismos, a resina deverá cumprir os requisitos presentes na norma EN 13432 ou a norma ASTM D 6400 [49].

Em 1941, a empresa de Henry Ford desenvolveu e aplicou nos seus automóveis um bio-based compósito constituído por derivado de sementes de soja. O automóvel era constituído por 70% por fibras de celulose e uma matriz de resina fenólica, ver Figura 20. Apesar do sucesso do novo compósito, o início da Segunda Guerra Mundial e o baixo preço e abundantes quantidades de produtos petroquímicos disponíveis, acabaram por levar ao abandono do produto.



Figura 20 - Automóvel desenvolvido por Henri Ford usando materiais biológicos [50]

A tentativa de desenvolver uma bio resina teve um novo impulso através do esforço feito por John Deere de desenvolver um produto mais verde para as suas máquinas agrícolas, juntamente com a empresa Ashland Performance Materials. O produto final foi uma resina que utilizava óleo de soja e etanol derivado do milho, como elementos constituintes. Devido à necessidade de atingir determinadas especificações mecânicas e de performance, foi necessário utilizar uma mistura de produtos petroquímicos e biológicos, nomeadamente 12% de etanol de milho e 13% de óleo de soja. Nesta mesma linha foram desenvolvidos outros produtos para diversas aplicações e processo de fabrico e utilizando novas fontes de matérias-primas renováveis [49].

Devido ao facto das estruturas dos produtos derivados de plantas não serem quimicamente robustas, os produtos biológicos dificilmente poderão substituir totalmente os petroquímicos sem que as suas performances sejam drasticamente alteradas, cabendo-lhes sim a função de complementar a indústria petroquímica.

## 2.6. Estruturas Sandwich

Patenteada por Vón Kármán (1924), as estruturas sandwich são o principal método de construção utilizado nas indústrias aeronáuticas, aeroespacial e naval, pois apresentam uma excelente relação resistência/peso.

A utilização da estrutura sandwich permite utilizar e combinar propriedades específicas dum material, ao mesmo tempo que se melhora algumas dessas propriedades mecânicas, especialmente resistência à flexão, sem que para isso se tenha de efetuar um aumento considerável do seu peso[51]. Por esse mesmo facto a indústria pioneira no desenvolvimento e aplicação de estruturas deste tipo foi a indústria aeronáutica, que na década de 30 começou a implantá-la nos primeiros aviões.

Uma das primeiras e mais famosas aplicações deste tipo de estrutura foi no avião de Havilland Mosquito, por parte do Reino Unido. A escolha da estrutura sandwich permitiu a utilização de materiais não estratégicos na construção deste avião, mas também a possibilidade de mais industriais participarem no esforço de guerra com a sua produção. Quando foi produzido era um dos aviões mais rápidos e capazes de desempenhar missões das mais variadas. O sucesso desta aplicação veio impulsionar nas décadas seguintes a sua utilização em ramos como a aeronáutica e áreas como a construção de edifícios, nomeadamente edifícios pré-fabricados, armazenamento frigorífico, indústrias automóveis e navais.

A estrutura sandwich é constituída por duas faces finas, uma camada grossa que constitui o núcleo e duas camadas de adesivo, que colocadas entre o núcleo e as faces. Este tipo de estrutura permite aumentar a distância entre as duas faces e conseqüentemente a distância ao eixo neutro, resultando num aumento significativo do 2º momento de área. Esse facto combinado com um elevado módulo de elasticidade das faces, culmina num elevado aumento da rigidez à flexão, sem um incremento relevante do peso.

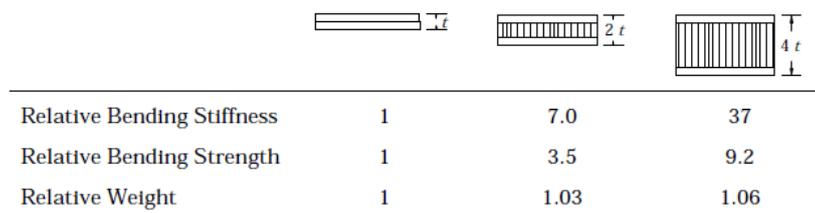


Figura 21 - Relação entre aumento da espessura do núcleo e as grandezas relativas à flexão e peso numa estrutura sandwich [51]

Na estrutura sandwich é suposto as faces suportarem os esforços de tração e compressão, sendo imperativo saber o valor do módulo de elasticidade e as tensões de rutura e cedência dos materiais que as constituem. Quando a espessura do núcleo não é suficiente para que o valor do 2º momento de área da seção da estrutura seja grande, o valor da sua rigidez à flexão também tem que se ter em conta. A função do núcleo é manter as faces

afastadas a uma determinada distância, e ao mesmo tempo impedir que haja escorregamento na interface núcleo/face. Tendo isso em conta, o núcleo deverá ter uma elevada resistência à compressão e tração que ocorra na direção normal as faces, e também às tensões de corte nos planos paralelos às faces [52].

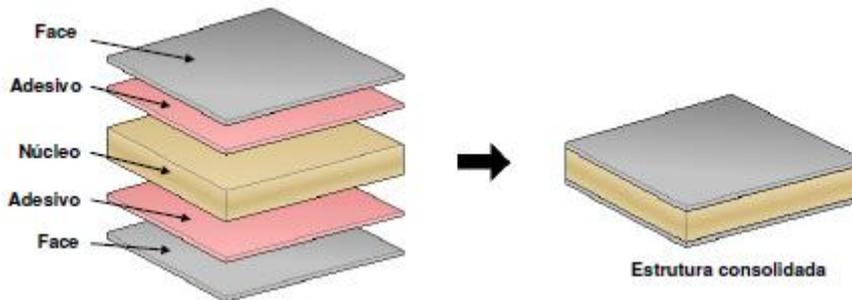


Figura 22 - Elementos da estrutura sandwich [53]

### 2.6.1. Faces

Os materiais mais utilizados para este tipo de elemento da sandwich são os aços, ligas de alumínio, madeiras e derivados e os materiais compósitos. Devido ao facto da sua principal função ser suportar tensões axiais e de estarem em contacto com o meio, os materiais enunciados anteriormente reúnem, em quantidades diferentes, estas características:

- Elevada rigidez;
- Elevada resistência a tensões de tração e de compressão na direção axial;
- Elevada resistência ao impacto;
- Boa qualidade superficial;
- Resistente aos agente do meio envolvente;
- Boa resistência ao desgaste.

### 2.6.2. Núcleo

Algumas características do material que compõe o núcleo variam consoante a escolha recaia sobre um material ou outro, mas existem uns requisitos que são essenciais para o correto funcionamento da estrutura sandwich como a baixa densidade, rigidez na direção perpendicular às faces e resistência ao corte. Existem outras características como o isolamento térmico e acústico, que podem ser importantes quando se escolhe esta estrutura, na medida em que podem suprimir a necessidade de acrescentar elementos para efetuar esses isolamentos, diminuindo custos e peso ao projeto [52], [54].

Existe uma grande variedade de materiais passíveis de serem utilizados, que podem ir desde a madeira de balsa, que apesar de ter aparecido muito cedo se mantém competitiva, visto que apresenta baixa densidade e custo, boa resistência à compressão e fadiga assim como facilidade de manipulação. No campo das espumas poliméricas temos o poliuretano, o

poliestireno, o PVC, o PMI e a resina fenólica, que se caracterizam por uma baixa densidade e custo, um bom desempenho como isolante térmico e alta resistência.

Existem ainda os chamados "favos de abelha" que são estruturas com formas diversas, triangulares, quadrangulares, hexagonais, e de vários materiais como polímeros, cerâmicos, metais e cartão reforçado com resina. Apresentam uma boa rigidez, elevada resistência à compressão, boa tolerância à temperatura, parâmetros que variam consoante a estrutura e o material usado.

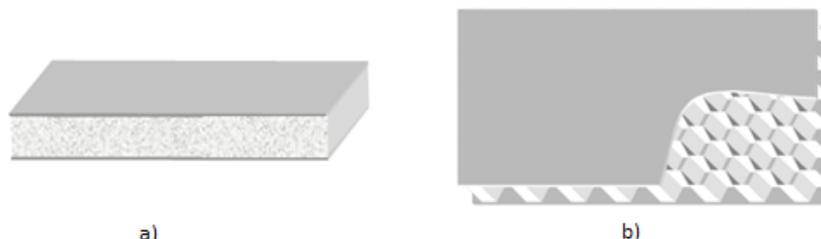


Figura 23 - Duas estruturas sandwich: a) núcleo de espuma polimérica b) núcleo Favo de Abelha [51].

### 2.6.3. Adesivos

O adesivo é o elemento que promove a adesão entre o núcleo e as duas faces da estrutura sandwich, ao mesmo tempo que transmite os esforços por toda a estrutura, estando assim sujeito a elevados e variados tipos de tensões. Para evitar o colapso da estrutura este elemento deverá ter propriedades mecânicas no mínimo tão boas como as do núcleo [55].

O desempenho do adesivo não depende somente das suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Considera-se assim que existem três parâmetros que influenciam a resistência mecânica da junta. O primeiro é o nível de adesão entre o adesivo e o aderente que está relacionada com propriedades químicas e físicas do adesivo e da superfície. Os outros dois são a coesão do adesivo depois de curado, e a geometria da junta que como se viu anteriormente pode ser bastante variada [56].

As falhas que ocorrem neste elemento da estrutura sandwich estão todos diretamente relacionados com os parâmetros enunciados anteriormente, e podem resultar em roturas coesivas, roturas adesivas e em roturas mistas coesivas/adesivas.

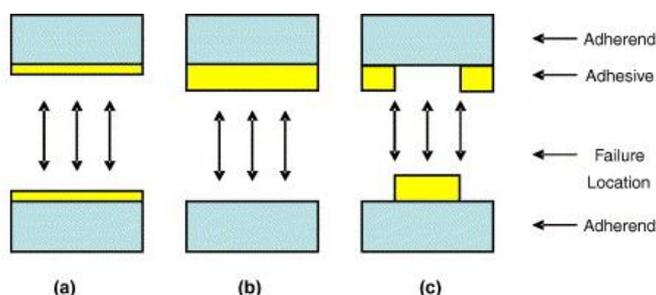


Figura 24 - Tipos de roturas que ocorrem na zona do adesivo: a) rutura coesiva, b) rutura adesiva, c) rutura coesiva/adesiva [57]

### 3. Materiais e métodos experimentais

#### 3.1. Introdução e Normas

Neste capítulo será descrito qual o material que foi testado bem como o seu processo de fabrico. Será feita uma descrição dos ensaios realizados e da respetiva norma e uma descrição geral das funcionalidades e características dos equipamentos utilizados nos mesmos.

Este trabalho foi realizado no ano lectivo de 2012/13. A fabricação dos provetes utilizados nos ensaios decorreu na oficina de apoio dos Laboratórios de Ensaios Mecânicos do Instituto Superior Técnico de Lisboa (IST). Os ensaios de tração, compressão, flexão em 3 pontos, corte com guias e o ensaio não destrutivo C-Scan foram efetuados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica do IST.

Para a obtenção das grandezas que permitissem caracterizar o compósito de poliéster-basalto, foram seguidas as seguintes normas abaixo enumeradas:

- ASTM D 790 - Norma para a obtenção de propriedades de flexão de plásticos com e sem reforço e materiais isolantes elétricos.

- ASTM D 3410 - Norma para obtenção de propriedades de compressão de materiais compósitos com seção não apoiada por carregamento de corte.

- ASTM D 3039 - Norma para a obtenção de propriedades de tração de materiais compósitos de matriz polimérica.

- ASTM D 3518 - Norma para a obtenção da resposta ao corte de um material compósito de matriz polimérica através de um ensaio de tração de um laminado a  $\pm 45^\circ$ .

- ASTM D 4255 - Norma para a obtenção das propriedades de corte no plano de um compósito de matriz polimérica pelo método de corte por guias.

##### 3.1.1. Norma ASTM D 790

Como enunciado anteriormente através do uso desta norma foi possível a obtenção das propriedades de flexão do compósito em estudo pois trata-se de um material polimérico reforçado. O ensaio foi efetuado a velocidade constante de  $R = 6.4 \text{ mm/min}$ , velocidade calculada através da equação 3 e que depende das dimensões do provete.

$$R = \frac{ZL^2}{6d} \quad (3)$$

Onde  $Z$  é uma constante igual a 0.01,  $d$  é a espessura do provete e  $L$  é a distância aos apoios. Para o cálculo da tensão de flexão na fibra exterior e no meio do provetes e tendo em conta que o rácio vão-espessura é superior a 16/1, a fórmula aconselhada é a da equação 4:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \left[ 1 + 6 \left( \frac{D}{L} \right)^2 - 4 \frac{dD}{L^2} \right] \quad (4)$$

A variável  $P$  representa a força num determinado ponto,  $b$  é a largura do provete e  $D$  a deflexão da linha central dos provetes. Para o cálculo do módulo de elasticidade à flexão  $E_B$  pode ser calculado usando a equação 5:

$$E_B = \frac{L^3 m}{4bd^3} \quad (5)$$

Onde  $m$  representa a inclinação inicial da reta do gráfico força- deflexão.

Para o ensaio ser considerado válido a rutura tem que ocorrer na face exterior do provete, e antes de atingir os 5% de deformação. Para que se possam considerar os resultados representativos, é aconselhável ter uma amostra de pelo menos 5 ensaios válidos. Segundo a norma, o provete sofre flexão a 3 pontos como mostra a Figura 39:

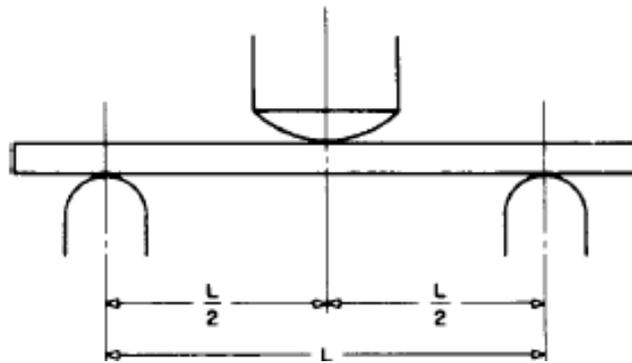


Figura 25 - Imagem da montagem da norma ASTM D 790 [58]

Pela norma a largura e a distância entre os apoios depende da grossura do provete e do tipo de material. Visto o compósito em estudo ser um compósito reforçado com fibras de alta resistência, a norma recomenda que a proporção distância entre apoios fosse igual a 40 vezes a espessura, logo para uma espessura de 2.4 mm será  $L=96\text{mm}$ . Consequentemente o provete tem que medir de comprimento 115mm no mínimo para garantir uma folga para lá dos apoios de 10% para cada lado, exigido pela norma, valor esse que foi arredondado para 140mm.

### 3.1.2. Norma ASTM D 3039

Esta norma é utilizada para determinar propriedades de tensão no plano de compósitos de matriz polimérica e reforçados por fibras de elevada resistência. Esta norma é limitada a fibras contínuas ou fibras descontínuas se estas se encontrarem simetricamente distribuídas em relação à direção do teste, enquadrando-se assim no âmbito do compósito em estudo [60].

Os materiais compósitos apresentam uma curva de tensão, quando sujeitos a um ensaio de tração, caracterizada por uma zona inicial elástica seguida de uma zona plástica. O comportamento da curva de tensão da zona elástica pode ser enquadrado na seguinte lei:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (7)$$

O compósito atinge a sua tensão máxima na zona da deformação plástica, e ocorre quando ocorre a falha na matriz ou nas fibras que compõem o compósito. Para o seu cálculo utiliza-se a seguinte equação:

$$\sigma = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A} \quad (8)$$

A norma requer o tipo de reforço do compósito que o provete tenha uma secção constante e retangular de dimensões 25x2.4mm, e com um comprimento de 250mm. As fibras deverão encontrar-se alinhadas com a direcção do deslocamento ou na perpendicular, que se aplica às placas 3,4 e 5.

Para medir as extensões foi utilizado um clip gage, que foi colocado a meio do provete com o auxílio de elásticos. Os valores daí obtidos foram introduzidos pelo programa na folha de dados e posteriormente usados nos cálculos.

Nos casos em que a fratura do provete ocorra na zona dos fixadores, pode dever-se ao facto de haver concentração de tensões na zona, e como tal o valor obtido pode não corresponder ao real valor do material, sendo esses ensaios considerados não válidos. Para obter um valor representativo do material a norma sugere a realização 5 ensaios válidos.

Do ensaio foram medidos os valores da força em função da extensão. A secção do provete foi considerada constante durante o ensaio, que se realizou a uma velocidade constante de 1.5mm/min. Pela norma, o módulo de elasticidade é obtido interpolando linearmente os valores das tensões nos pontos onde a extensão é respetivamente 0.001 e 0.003.

### 3.1.3. Norma ASTM D 3518

Para determinar propriedades de tensão de corte no plano de compósitos de matriz polimérica e reforçados por fibras de elevada resistência, foi utilizada a norma ASTM D 3518 [61]. Os tipos de compósitos estão limitados a fibras contínuas em que seja possível aplicar tensão nas direcções  $\pm 45^\circ$  das fibras, que é o caso específico dos provetes provenientes das placas 1 e 2.

A curva de tensão dos ensaios de corte também é caracterizada por uma zona inicial elástica seguida de uma zona plástica. O comportamento da curva de tensão da zona elástica pode ser enquadrado numa lei:

$$G = \frac{\Delta \tau}{\Delta \gamma} \quad (9)$$

O valor de  $\Delta \gamma$  corresponde a um intervalo de extensão onde se considera que a curva tem um comportamento linear, sendo  $\Delta \sigma$  a variação do valor das tensões que se verifica nesse

mesmo intervalo. Para o cálculo da tensão de corte num determinado ponto  $i$  do gráfico utiliza-se a equação:

$$\tau_i = \frac{P_i}{2A} \quad (10)$$

Na equação  $\tau$  representa a tensão de corte,  $P$  a força e  $A$  a área da secção do provete.

Tal como na norma D3039, os provete tinham uma secção constante e retangular de dimensões 25x2.4mm, e com um comprimento de 250mm, mas neste caso as fibras devem encontrar-se a  $\pm 45^\circ$  em relação à direção do deslocamento.

Nos casos em que a fratura do provete ocorra na zona dos fixadores, pode dever-se ao facto de haver concentração de tensões na zona, e como tal o valor obtido pode não corresponder ao real valor do material, devendo os ensaios serem considerados não válidos. Para obter um valor representativo do material terão de se obter um mínimo de 5 ensaios válidos.

Do ensaio são medidos os valores da força de corte em função da extensão. A secção do provete é considerada constante durante o ensaio, que se realizou a uma velocidade constante de 1.5mm/min.

Pela norma, o módulo de Corte ( $G$ ) é obtido interpolando linearmente os valores das tensões nos pontos onde a extensão é respetivamente 0.0015 e 0.004.

### 3.1.4. Norma ASTM D 3410

Por este método é possível determinar as propriedades compressivas de um compósito de matriz polimérica reforçado com fibras de alta rigidez. Este método pode ser aplicável a compósitos feitos de fibras em forma de tecido, o que permite a sua utilização no compósito em estudo [62].

O ensaio é realizado à tração e a uma velocidade constante de 1.5mm/min. Para o cálculo do módulo de elasticidade de compressão a norma apresenta a equação 11:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (11)$$

Neste caso o  $\Delta\varepsilon$  corresponde a um intervalo de 0.002, e com início entre 1000 e 3000  $\mu\varepsilon$ , e  $\Delta\sigma$  a variação da tensão de corte entre esses 2 pontos. Por sua vez a tensão de compressão num ponto  $i$  é calculada por:

$$\sigma_i^c = \frac{P_i}{A} \quad (12)$$

A norma requiere que o provete tenha uma largura de 25mm e com um comprimento de 140mm.

### 3.1.5. Norma ASTM D 4255

Esta norma é também utilizada para determinar propriedades ao corte de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de elevada resistência.

Por este método o provete é preso por 2 ou 3 pares de grampos, e ao estes serem tracionados provocam esforços de corte no provete, assim nesta norma podem ser seguidos 2 procedimentos distintos, dependentes do tipo de mecanismos de fixação utilizado, com 2 ou 3 grampos. No ensaio realizado foi utilizado o procedimento A da norma, que corresponde ao uso de um dispositivo de fixação com 2 grampos.

O ensaio é realizado à tração e a uma velocidade constante de 1.5mm/min. Para o cálculo da tensão de corte num determinado ponto  $i$  a norma apresenta a equação 13:

$$\tau_i = \frac{P_i}{A} \quad (13)$$

Sendo  $A$  a área que é o produto do comprimento pela espessura do provete. No cálculo do módulo de corte  $G$  a expressão dada pela norma é:

$$G = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma} \quad (14)$$

Neste caso o  $\Delta\gamma$  corresponde a um intervalo de 0.004, e com início entre 1500 e 2500  $\mu\epsilon$ , e  $\Delta\tau$  a variação da tensão de corte entre esses 2 pontos.

Pelo facto do dispositivo não estar disponível nos laboratórios de ensaios, este foi desenhado e depois fabricado no Laboratório de Tecnologias Oficinas do IST segundo as orientações dadas na norma.

Quanto às dimensões dos provetes, elas estão diretamente dependentes do dispositivo de fixação. Os provetes tiveram uma dimensão de 150x75mm, e 6 furos com 13mm de diâmetro, nas posições assinaladas na Figura 40.

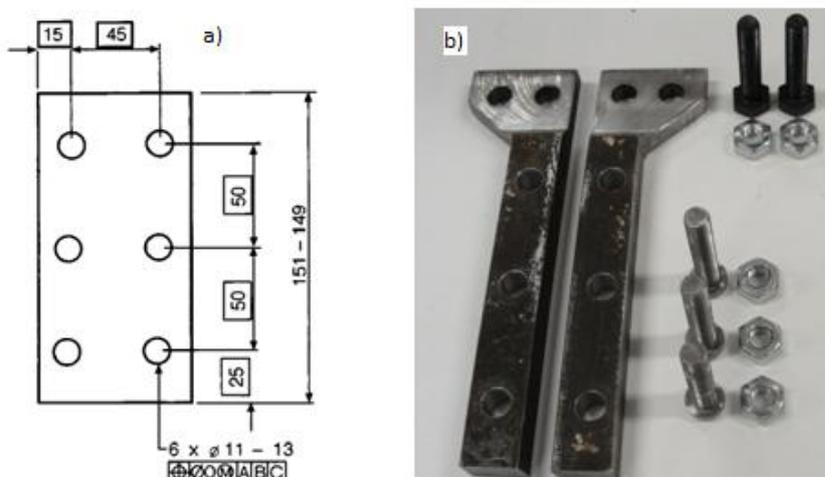


Figura 26 - a) Dimensões do provete e localização dos furos [59], b) Elementos que compõem o dispositivo de fixação fabricado no âmbito deste trabalho

## 3.2. Compósito poliéster-basalto

O material compósito de poliéster-basalto que foi analisado nos ensaios mecânicos era constituído por um empilhamento de 8 camadas de fibra de basalto. As várias camadas do empilhamento apresentavam o mesmo alinhamento entre elas.

### 3.2.1. Fibra de basalto

A malha de basalto utilizada foi produzida pela empresa BASALTEX, responsável pela produção de toda uma gama de produtos relacionados com fibra de basalto. A referência da malha utilizada foi BAS 220.1270.T, ver Anexo E, que era uma malha 100% constituída por filamentos contínuos de basalto para aplicações em compósitos. A referencia 220 designa a densidade superficial que é de 220 g/m<sup>2</sup>, a segunda referencia 1270 tem a ver com a largura do rolo de malha em milímetros, e a letra T o género de entrelaçado da malha que neste caso foi twill 2/2.

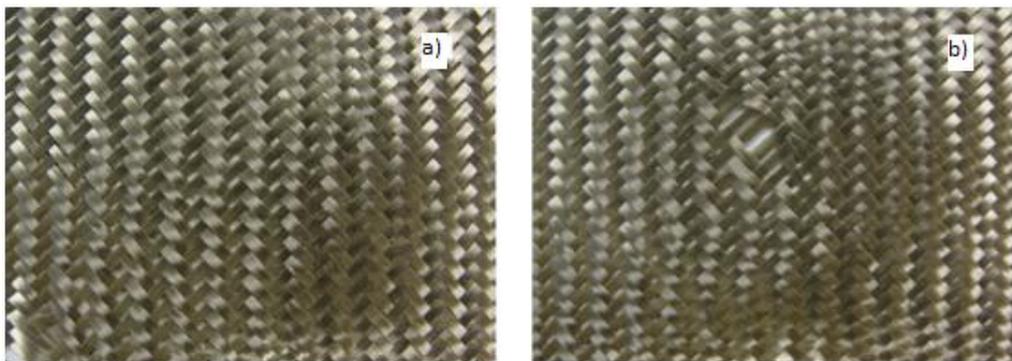


Figura 27 - a) Malha de basalto. b) Malha de basalto com uma distorção

Quando inicialmente se começou a cortar as secções de fibra de basalto, foi possível verificar que a malha de fibras de basalto era muito suscetível de distorcer e ficar irremediavelmente inutilizada quando se fazia alguma pressão na malha. Devido a esse facto foi necessário colocar tiras de fita adesiva na periferia dos contornos por onde se pretendiam cortar para assim obter-se a rigidez necessária para cortar a malha sem distorcer o entrelaçado.

O corte era então efetuado com a utilização de uma tesoura na zona imediatamente encostado à fita adesiva. Recorrendo a este método foram cortadas secções quadrangulares de dimensão 300 x 300mm utilizadas no RTM, e secções com a forma da pá de um remo pra a serem utilizadas no processo HLU. No caso das secções de 300x300mm, as fibras podiam ficar alinhadas com as faces do quadrado ou a fazerem um ângulo  $\pm 45^\circ$ .

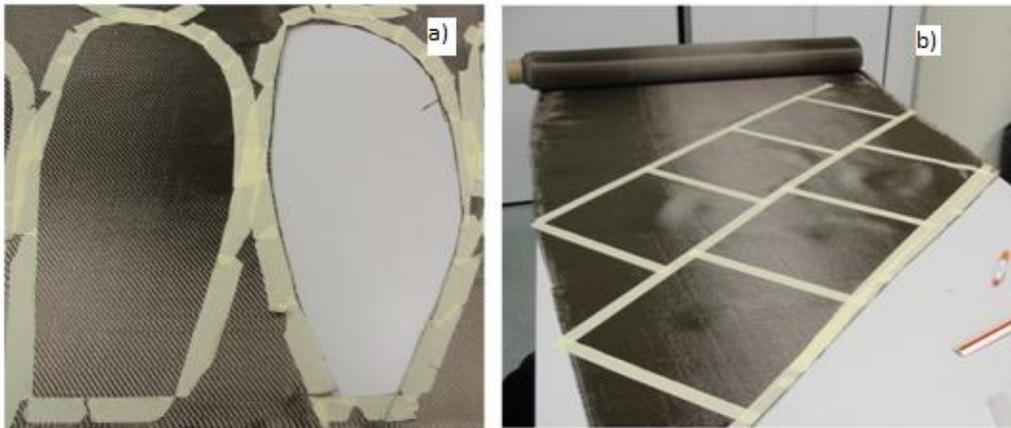


Figura 28 - Em a) seção do remo inferior cortada e uma seção superior do remo delimitada, b) um padrão de delimitação para as placas com alinhamento  $\pm 45^\circ$

### 3.2.2. Poliéster

A matriz utilizada para a produção das amostras foi uma resina de poliéster insaturada (UP), de base ortoftálica, tixotrópica e pré-acelerada. Em adição à resina de poliéster insaturada foi colocado o catalisador PMEK (peróxido de metil cetona). Para a resina UP foi considerado que o valor do módulo de elasticidade é de 2.8GPa e uma densidade de 1200Kg/m<sup>3</sup> [30].

		Valor	Unidades
Poliéster	Densidade	1200	Kg/m <sup>3</sup>
	Módulo de Elasticidade	2.8	GPa
Fibras de Basalto	Densidade	220	g/m <sup>2</sup>
	Módulo de Elasticidade	85	GPa

Tabela 1 - Propriedades do Poliéster insaturado e das Fibras de Basalto

### 3.2.3. Processo RTM

O método de fabrico utilizado na produção dos provetes foi o Resin Transfer Moulding (RTM). A máquina para injeção utilizada no processo de RTM foi da marca ISOJET, modelo RTM PISTON 2006 3L. A máquina era constituída por uma unidade de controlo e aquisição de dados, um pistão de injeção com capacidade para 3L, uma célula de controlo de pressão, um canal de injeção com aquecimento e uma bomba de vácuo. A prensa usada foi uma ISOJET, modelo PRESSE 3508 SERIES, com 15kW de potência, com bases de temperatura regulável e

de dimensões 500x500mm, com pressão máxima de 14 bar e sistema de acionamento pneumático.

No processo de RTM foi utilizado um molde de alumínio paralelepípedo, de dimensões 315x315x2.5 mm, ver Figura 27. O gito de entrada encontrava-se na parte inferior do molde e o gito de saída na parte superior do molde e do lado oposto ao de entrada. O molde era composto por um aro de alumínio e por 4 pinos que garantiam que o conjunto, molde inferior/superior e aro, se mantivesse na mesma posição quando era necessário a movimentação do mesmo, impedido que as fibras se desalinhassem ou a placa de compósito fosse danificada quando retirada da prensa.



Figura 29 - Base do molde de alumínio com uma camada de cera desmoldante, com o aro de alumínio e os quatro pinos-guia

O processo de fabrico das placas de compósitos por RTM é um processo complexo e para garantir a obtenção de um bom resultado foi necessário seguir a lista de procedimentos abaixo indicada:

- a) Verificar se a camada de cera desmoldante e álcool se encontra em perfeitas condições para a injeção. Caso não se verifique, é necessário limpar o molde com diluente e aplicar novamente uma camada de desmoldante.
- b) Colocação de borrachas nas ranhuras para impedir que a resina verta para a prensa durante a injeção, colocação dos pinos no molde inferior e de seguida colocação do aro de alumínio. Colocação das seções de fibra de basalto cortadas no molde, garantindo que as fibras se encontram alinhadas segundo a direção pretendida ao mesmo tempo que se verifica a existência de distorções ou defeitos na malha. Por fim colocação da parte superior do molde que leva ao seu encerramento.
- c) Colocações do molde na prensa cujos pratos se encontram aquecidos a 60°C e aplicação de uma pressão de 0.5 bar. Esperam-se 30 minutos, para garantir que todo o molde se encontra à mesma temperatura e aumenta-se a pressão da prensa para 2 bar.
- d) Durante o aquecimento do molde procede-se à preparação de todas as ligações necessárias para o processo que serão: a ligação entre o pistão e a bomba de vácuo, a

ligação entre a entrada do molde e o pistão e a ligação entre a saída do molde e um recipiente que recolherá toda a resina que seja expulsa do molde.

- e) Quando os 2 passos anteriores estejam concluídos pode-se proceder à preparação da resina. Colocam-se num recipiente de mistura 750ml de resina de poliéster e 1.5 ml de catalisador, ou seja, uma percentagem de 0.2%. Após ser bem misturada é colocada dentro do pistão de injeção. Ao colocar a resina no pistão originam-se bolhas de ar na mistura. Para acelerar o processo natural de desgaseificação o pistão é encerrado e ligado a uma bomba de vácuo, durante 2 minutos, passados os quais a saída do êmbolo é ligada à entrada do molde.
- f) O processo de injeção é feito a uma velocidade constante, tendo 2 valores diferentes durante o procedimento de enchimento. Entre o início da injeção e o momento em que a resina chega ao canal de saída do molde, a resina é injetada a 15cc/min, a partir desse momento até ao final da injeção a resina é injetada a 10cc/min.
- g) Após toda a resina ser injetada, para-se o pistão e o tubo de entrada do molde é selado de modo a impedir a saída da resina por essa extremidade. Espera-se o tempo necessário para que a resina dentro do molde esteja em ponto gel, retiram-se os tubos e procede-se à abertura do molde e retira-se a placa do molde.
- h) Procede-se á imediata limpeza do molde com diluente e posterior aplicação de uma camada de cera desmoldante. Para terminar o processo de cura da placa, esta volta a ser colocada no molde e este dentro da prensa, onde permanece entre 3 a 4 horas, após as quais o aquecimento dos pratos da prensa é desligado. O resto da cura será feita à temperatura ambiente.

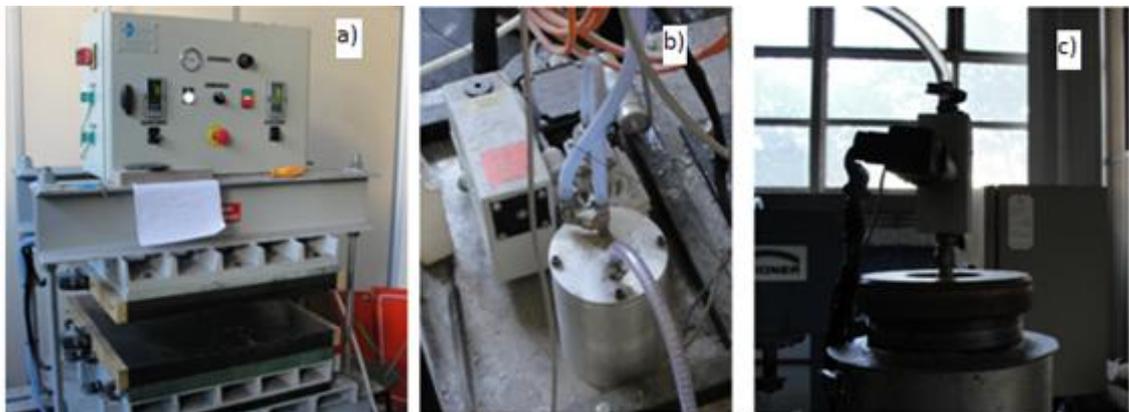


Figura 30 - Elementos da máquina ISOJET utilizada no processo de RTM: a) prensa de bases de temperatura regulável, b) bomba de vácuo, c) reservatório ligado ao canal de injeção

No final de todo o processo, todos os elementos da máquina de injeção e os tubos das ligações que estiveram em contacto com a resina, eram cuidadosamente lavados com diluente para impedir que a resina cura-se e danifica-se os diversos elementos.

Para se proceder ao corte dos provetes, utilizou-se uma serra elétrica de disco BOSCH no Laboratório de Tecnologias Oficiais, foi necessário esperar 2 dias, até a resina se encontrar perfeitamente curada. Antes de efetuar o corte, os provetes foram cuidadosamente etiquetados

de maneira a saber qual a sua exata posição na placa inicial, para se poderem cruzar os dados recolhidos nos ensaios a realizar posteriormente. Com o auxílio de fita adesiva foram marcados na placa os limites por onde o corte devia ser efetuado garantindo as dimensões e os alinhamentos desejados.

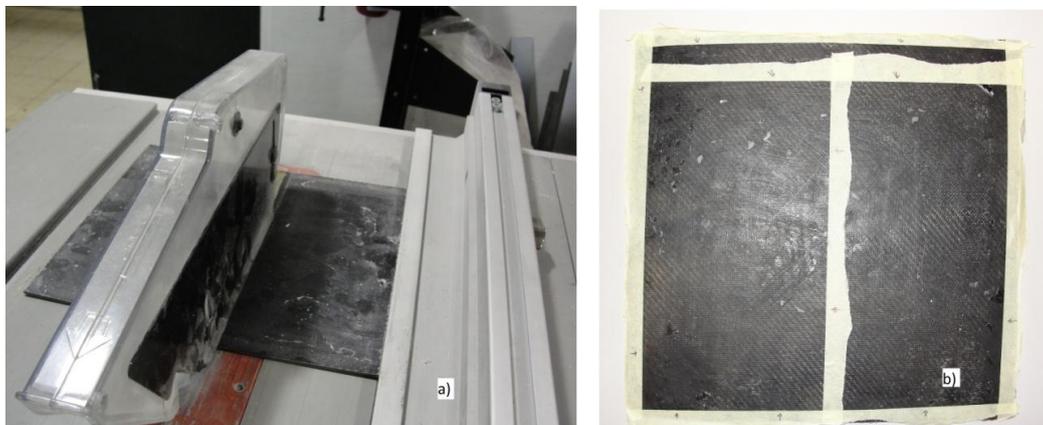


Figura 31 - a) - Processo de corte com a serra elétrica. b) - Marcação das margens de corte das placas de compósito

No caso dos provetes utilizados nos ensaios de corte por guias foi necessário fazer 6 furos por provete, para o qual foi utilizada uma furadeira mecânica FECOPE. O provete foi colocado sobre uma placa de MDF para lhe proporcionar uma superfície que garantisse a estabilidade da placa durante o processo de furação, ao mesmo tempo que conferia uma altura segura em relação à mesa, para permitir a total perfuração dos provetes pela broca. Tendo em conta a norma do ensaio, foi utilizada uma broca de diâmetro 13mm, e o furo foi efetuado a uma velocidade entre 365 e 440 rpm.



Figura 32 - Furação dos provetes: a) marcação de pontos b) furação c) provete final.

### 3.2.4. Processo Hand Lay Up

Para atestar a aplicabilidade do compósito de fibras de basalto e poliéster foi decidido fabricar uma peça típica de aplicação de materiais compósitos como material estrutural. A escolha recaiu sobre a pá de um remo, tendo em conta a sua complexidade e a possibilidade

de obtenção de um resultado satisfatório. Para o seu fabrico foi decidido que o método que apresentava maior exequibilidade era o Hand Lay Up.

O remo a construir seria constituído por 8 camadas de fibra de basalto e um cabo em alumínio de 35mm de diâmetro. As fibras encontrariam-se alinhadas em relação ao eixo longitudinal do cabo segundo a direção 0/90°. O cabo por sua vez estará encastrado no centro do compósito, com 4 camadas de fibras por cima e 4 camadas por baixo.

Por se tratar de uma peça com uma superfície curva, difícil de dimensionar, não foi possível realizar uma réplica exata de um modelo já existente no mercado. Pela consulta de modelos existentes e das escassas indicações dadas pelos fabricantes em relação à dimensão dos seus produtos, foi possível obter um produto similar aos existentes.

Recorrendo ao programa de modelação geométrica SOLIDWORKS, foi desenhado o conjunto remo/cabo assim como um molde com a forma da superfície da pá do remo. Essa superfície foi usada como base para maquinar o molde em poliuretano numa máquina de controlo numérico. O molde em poliuretano foi colado sobre uma placa de MDF, para fornecer uma maior superfície de trabalho para o processo de HLU, e promover a integridade ao molde de poliuretano durante o seu manuseamento.

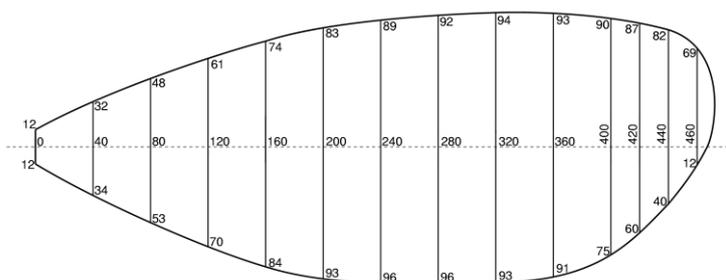


Figura 33 - Dimensões utilizadas na pá do remo (mm)

Para garantir a integridade do molde e ao mesmo tempo melhorar a qualidade da superfície, foram aplicados alguns produtos na superfície do molde, ou seja, na superfície do conjunto poliuretano e MDF. Nas instalações do Laboratório de Tecnologias Oficiais do IST, com uma pistola de ar comprimido foi primeiro aplicada uma camada de poliéster a qual foi deixada curar completamente e posteriormente foram aplicadas 3 camadas de desmoldante semipermanente XTEND XTR Sealer. Com esta última etapa o molde ficou preparado para a fabricação da pá do remo. No processo de fabrico dos remos foi seguido o seguinte procedimento:

- Aplicação de uma camada de cera e álcool desmoldante.
- Após a camada desmoldante se encontrar seca, colocar a tacky tape, nas extremidades da placa de MDF.
- Mistura da resina com o catalisador e, com o auxílio de um pincel, aplicação de uma primeira camada de resina no molde uniformemente espalhada.
- Colocação de uma camada de fibra, e com o pincel efetuar pressão pontual na fibra para garantir que esta se encontra efetivamente em contato com o molde e ao mesmo

tempo promover a impregnação das fibras pela resina. Passar com um rolete sobre a superfície com o objetivo de retirar a resina em excesso. Repetir o mesmo processo até terem sido colocadas 4 camadas de fibra.

- e) Colocação na posição adequada sobre o molde do cabo de alumínio e posterior colocação de resina, com o recurso ao pincel, nas zonas que estarão em contacto com a seguinte camada de fibra. Verificar se o cabo se encontra bem apoiado para que durante o resto do processo não promova distorções nas camadas de fibra.
- f) Colocação de mais 4 camadas de fibra, executando as mesmas instruções do passo d) e tendo especial cuidado com as fibras que se encontram na zona do cabo.
- g) Colocar sobre a parte de MDF onde vai ficar a extremidade do tubo de ligação com a bomba de vácuo um troço de lã, e colocar o respetivo tubo em posição. Selar o plástico com tacky tape até ficar completamente estanque. Ligar o tubo à bomba de vácuo e proceder à verificação e eliminação de possíveis fugas.
- h) Pôr em funcionamento a bomba de vácuo e esperar até o compósito estar curado.

Nas Figura 32 e 33 é apresentada uma sequência de imagens do processo, tiradas durante a fabricação e que serve de ilustração para o que foi descrito no procedimento.



Figura 34 - a) Imagem da primeira aplicação de resina no molde, b) aplicação da primeira camada de fibra e passagem do rolete c) aplicação da resina para a segunda camada de fibras.



Figura 35 - a) Imagem da colocação da primeira camada de fibra sobre o cabo, b) pá do remo com todas as camadas aplicadas c) molde sobre a ação do vácuo.

### 3.3. Provetes utilizados

Os provetes utilizados nos ensaios foram originários de 6 placas, tendo sido fabricadas com dois tipos de alinhamentos diferentes, para que quando se procedesse ao corte dos

provetes poder haver um aproveitamento quase completo da placa. Os provetes foram produzidos assim, com estes dois tipos de empilhamentos:

- Empilhamentos A - Onde as 8 camadas fibras, com a mesma orientação, faziam  $\pm 45^\circ$  com as faces laterais do molde.

- Empilhamentos B - Onde as 8 camadas fibras, com a mesma orientação faziam  $0/90^\circ$  com as faces laterais do molde.

Uma nomenclatura foi implementada à medida que os provetes eram cortados com o objetivo de saber a sua localização na placa inicial. Assim para cada um dos seguintes passos acrescentou-se um número na posição (x) à sequência de identificação:

- a) Para se poder verificar se havia diferenças nos resultados em relação a provetes que provinham de diferentes placas, cada provete foi marcado com um número que identificava a que placa pertencia [posição (x \_ \_)].
- b) De cada uma das placas iniciais foram cortados 2 provetes de dimensões 180x260mm e um de 180x25mm em quatro das placas, para o ensaio não destrutivo C-Scan [posição (\_x \_)].
- c) Com o objetivo de observar possíveis imperfeições no compósito, provenientes do processo de fabrico, e tendo em vista as dimensões necessárias para futuros ensaios de tração foram cortados 4 ou 5 provetes das 2 placas de 180x260mm, em provetes com 25x260mm [posição (\_ \_x)].
- d) Para efetuar o ensaio de compressão e flexão foi necessário cortar alguns dos provetes ao meio ficando com dimensões finais de 25x140mm, apenas estes provetes serão identificados com um número de quatro dígitos [posição (\_ \_ \_ x)].

Pela Figura 34 tem-se uma ideia elucidativa de como eram atribuídas as designações das placas e porquê algumas delas terem menos algarismos que outras. Considerando esta a placa 1, após o primeiro corte teríamos 3 seções com as seguintes designações: a bege "11", a verde "12" e a laranja "13". No corte das seções em provetes mais finos iremos acrescentar um dígito, no caso da seção verde ficaríamos com os provetes "121", "122", etc. Para obter os provetes de flexão e compressão fez-se ainda mais um corte acrescentado o último número à sequência, neste caso como se cortou a placa "121" os 2 novos provetes teriam a designação de "1211" e "1212".

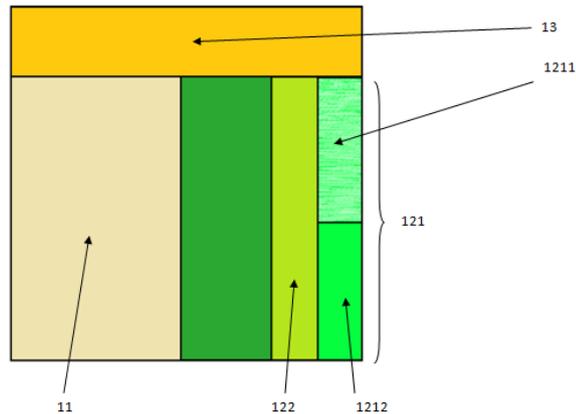


Figura 36 - Representação da atribuição das designações aos provetes

As Tabelas 2 e 3 mostram qual a designação das placas com alinhamento  $\pm 45^\circ$  e  $0/90^\circ$ , e também que dimensões apresentam os provetes que foram cortados dessas mesmas placas.

Tabela 2 - Alinhamento das placas fabricadas

Orientação do empilhamento das fibras	Placas
$\pm 45^\circ$	1, 2
$0/90^\circ$	3, 4, 5, 6

Tabela 3 - Dimensão dos provetes usados

Ensaio	Dimensão dos provetes (mm)
Tração	250x25
Compressão	140x25
Flexão	140x25
Corte com guias	150x75

Com o objetivo de obter informação complementar sobre os ensaios de tração e de corte com guias, foram instrumentados 2 provetes com extensômetros. Para a informação extraída do extensómetro poder ser o mais próxima do material testado foram seguida a seguinte sequência de procedimentos durante a o processo de colagem, encontrando-se descritos na mesma ordem que foram aplicados:

- Com o auxílio de um paquímetro foi marcado a posição e direção pretendida para o extensómetro a fim de facilitar o posterior alinhamento do extensómetro;
- A zona anteriormente marcada, onde iria ser colado o extensómetro foi lixada, com uma lixa fina, para tirar impurezas existentes e proporcionar maior adesão. Foi tido em atenção que a superfície lixada tinha que ser maior que o extensómetro;
- Com um cotonete foi colocado um solvente altamente volátil de modo a dissolver gorduras existentes e limpar a superfície;
- Colou-se o extensómetro numa tira de zona adesiva, e posteriormente colocou-se na zona do provete anteriormente marcada. Este procedimento foi utilizado para garantir que quando se procedeu à colagem do extensómetro, este manteve-se durante o tempo de cura da cola no sítio correto.

- e) Levantou-se parte da goma adesiva a fim de expor a face de contacto do extensómetro com o provete, e foi aplicado um desinfetante, M-Line Rosin Solver, por toda a superfície exposta.
- f) Colocou-se a cola sobre a superfície anteriormente desinfetada, e baixou-se a goma adesiva com o extensómetro na posição pretendida. Manteve-se sempre uma pressão entre o extensómetro e o provete ao mesmo tempo que foram efetuadas algumas passagens com o dedo a fim de espalhar a cola por toda a superfície do extensómetro e retirar algumas bolhas de ar que tenham ficado retidas. Este passo foi realizado com alguma celeridade, a fim de evitar que a cola começa-se a curar.
- g) Foi mantida a pressão durante 2 a 3 minutos, após os quais se retirou a fita gomada. De seguida aplicou-se uma camada de verniz em cima da superfície do extensómetro.
- h) Quando o verniz secar, deve-se proceder à verificação do correto funcionamento do extensómetro. Através da utilização de um multímetro, verifica-se se o valor da resistência nos terminais do extensómetro corresponde ao valor descrito pelo fabricante.

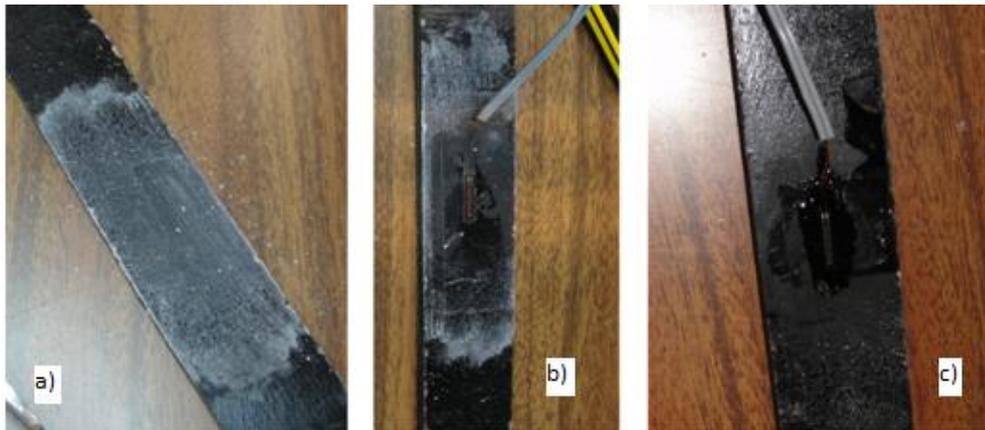


Figura 37 - Alguns dos passos da instrumentação dos provetes: a) polimento da superfície, b) colagem do extensómetro b) aplicação do verniz

Os extensómetros e a roseta utilizados tinham todos uma resistência de  $120\Omega$ , e um gage factor de 2.15. O tipo de conexão utilizada para medir as deformações em todos os ensaios realizados foi a de um quarto de ponte. Os ensaios com provetes instrumentados foram todos realizados por patamares, que consistiam em dar instruções à máquina para fazer incrementos de força pré determinados e entre esses incrementos parar durante um intervalo de tempo estabelecido. Durante esse tempo de paragem eram apontados os valores da micro-extensão dada pelo aparelho de leitura, e o valor da força dada pelo software. Os dados obtidos destas medições foram assim do tipo discreto, separados por intervalos de força constantes.

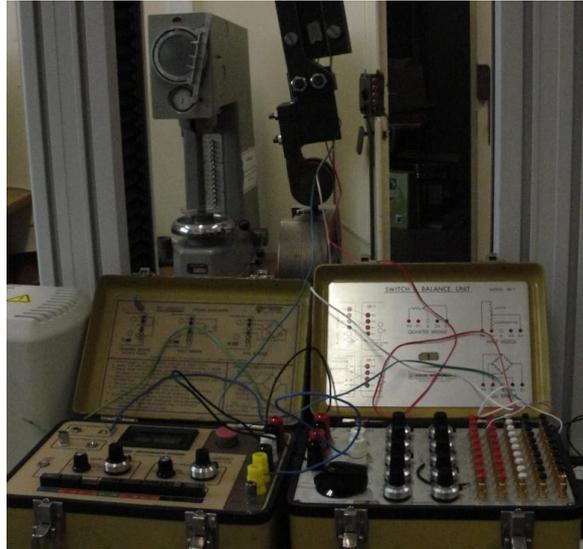


Figura 38 - Imagem da ligação da roseta ao aparelho de aquisição de dados

### 3.4. Equipamentos de ensaio

No decorrer do trabalho experimental foi necessário manusear vários equipamentos, os quais serão descritos de uma maneira geral, fazendo referencia a algumas das suas características e capacidades nesta seção.

#### 3.4.1. Equipamento de ensaios não-destrutivos C-Scan

Este equipamento tem por base o varrimento por ultra-sons do material a ser testado. Este equipamento é constituído por um gerador de sinal, que é emitido a uma elevada frequência de vibração para o objeto em estudo. Os ultra-sons têm a capacidade de se propagar por materiais sólidos, líquidos e gasosos, mas com variação na velocidade que depende do material. Por essa razão quando uma descontinuidade é encontrada num material a onda de som vai ser afetada. Quando a onda chega ao ponto de transição entre os dois materiais parte dela é refletida enquanto que a restante atravessa o defeito mas com uma atenuação do sinal. Estas alterações apresentam-se na forma do sinal sob formas de picos, que permitem saber a que distância do emissor as irregularidades se encontram.

O equipamento é constituído por: uma fonte de emissão de ultra-sons, um tanque onde se coloca o meio condutor dos ultra-sons e objeto em estudo, e um computador com um software que faz o tratamento de dados ao mesmo tempo que permite uma eficaz calibração da análise pelo alteração de certos parâmetros de funcionamento.

Para se obter um sinal capaz de refletir com exatidão o que se passa na placa, é necessário para cada espécime alterar os parâmetros que permite ao programa discriminar o que realmente é de interesse e no final se obter uma imagem o mais detalhada possível. Para

além disso é necessário definir a área de varrimento, velocidade de varrimento da sonda e resolução da área analisada.

O software recolhe e armazena os dados dos varrimentos ao mesmo tempo que efetua um processamento dos mesmos, permitindo a obtenção de medições de amplitude do sinal de defeito detetado (AMP), medições do tempo de voo entre a interface de entrada do sinal e do sinal de defeito Time of Flight (TOF). Com estes dados é possível obter um mapeamento da placa com uma distribuição cromática que varia conforme os valores obtidos no ensaio.

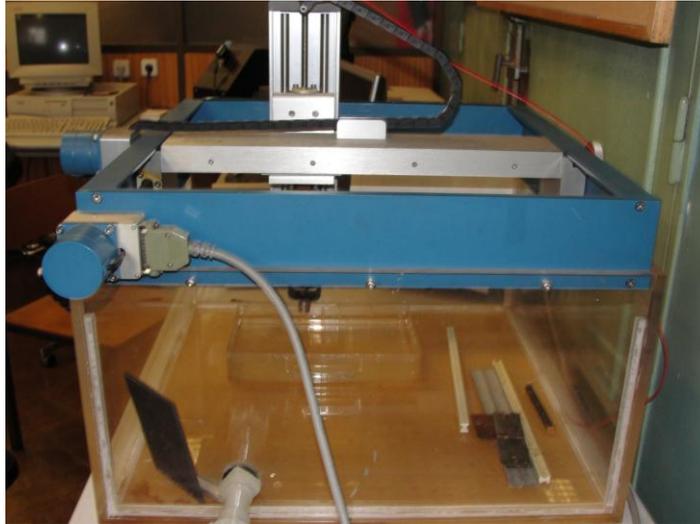


Figura 39 - Máquina de ensaios C-Scan

### 3.4.2. Máquina de ensaios Instron 3369

Os ensaios de tração, compressão e flexão em 3 pontos, foram realizados numa máquina de ensaios universal Instron modelo 3369, uma máquina electro mecânica que tinha uma célula de carga de 50 KN. Esta máquina utiliza o software de controlo e de aquisição de dados Bluehill, que permite a definição de métodos de ensaios assim como a obtenção dos dados relevantes para o ensaio. No ensaio de tração utilizou-se ainda um clip gage Instron com uma abertura de referência de 25mm de abertura e um curso de +12.5mm/-2.5mm.



Figura 40 - Máquina de ensaios eletromecânica Instron 3369

Foram utilizados 3 tipos de montagens para efetuar os ensaios mecânicos:

- Tração e compressão - Para estes ensaios foram utilizados garras de ação mecânica em cunho, para fixar as extremidades dos provetes.
- Flexão - Neste ensaio foi montado um suporte de dimensão variável no suporte inferior e um punção cilíndrico no suporte superior.
- Corte com guias - Foram utilizadas garras de ação mecânica em cunho, para fixar o dispositivo de fixação específico deste teste.

### 3.5. Metodologia dos ensaios realizados

Na próxima seção serão apresentadas as descrições dos procedimentos seguidos para cada um dos ensaios realizados.

#### 3.5.1. Ensaio não destrutivo C-Scan

Com o objetivo de verificar o estado do interior das placas de compósito de basalto, foram realizadas a 6 placas ensaios não destrutivos. Para garantir que os resultados fossem válidos e o mais completos possível, foi seguido o seguinte procedimento durante estes ensaios:

- a) Colocação de uma caixa de plástico com um volume de água que permitisse a total imersão das placas e com uma área superficial superior à área das placas a analisar.
- b) Iniciação do computador e da fonte de emissão.
- c) Colocação da placa sobre 2 suportes, para garantir um espaço com água entre a placa e o fundo da caixa, tendo o cuidado de manter a placa paralela ao eixo de varrimento e as arestas alinhadas com os eixos de deslocamento da sonda. Cuidado em expulsar

todas as bolhas de ar existentes na superfície da placa, especialmente na superfície inferior.

- d) Com recurso ao software, imersão da sonda na água, criação da origem do referencial num dos vértices da placa e definição da área de varrimento. Verificação da inexistência de bolhas de ar na superfície imersa da sonda.
- e) Otimização do sinal emissão recepção recorrendo a um varrimento total da placa, com uma resolução menor, em vários pontos da placa.
- f) Início do ensaio.

Os valores utilizados na otimização do sinal variaram de placa para placa.

### 3.5.2. Ensaio de tração

Antes de iniciar os ensaios, foi criado no software de controlo da máquina de ensaios um método a ser utilizado nos ensaios de tração, onde foram definidos os parâmetros de segurança, as grandezas a retirar do ensaio pelo programa, o intervalo entre cada amostra, a direção e a velocidade dos mecanismos de fixação.



Figura 41 - Ensaio de tração

O seguinte procedimento foi seguido para todos os provetes utilizados nos ensaios de tração:

- a) Introdução na referência do provete, e dos valores referentes às dimensões da seção de cada provete no software Bluehill.
- b) Colocação do provete no dispositivo de fixação da máquina de ensaios.
- c) Colocação do clip gage na zona central do provete, ajuste manual do extensómetro para um valor inferior a 0.1% do seu zero absoluto, e posterior marcação do zero no dispositivo referente ao do deslocamento residual.
- d) Marcação do zero do sistema do deslocamento dos dispositivos de fixação, extensão e carregamento.

e) Início do ensaio.

Todos os provetes foram ensaiados até à rotura, tendo sido ensaiados 9 provetes  $\pm 45^\circ$  e 12 provetes com alinhamento  $0/90^\circ$ .

### 3.5.3. Ensaio de compressão

Através do software de controlo da máquina de ensaios, criação de um método a ser utilizado nos ensaios de compressão, onde foram definidos os parâmetros de segurança, as grandezas a retirar do ensaio pelo programa, o intervalo entre cada amostra, a direção e a velocidade dos mecanismos de fixação. Com a etapa anterior concluída, repetiu-se este procedimento para todos os provetes:

- a) Introdução na referência do provete, e dos valores referentes às dimensões da seção de cada provete no software Bluehill.
- b) Colocação do provete nos fixados da máquina de ensaio garantindo o seu correto alinhamento em relação ao eixo de deslocamento. Verificação de que o gage apresenta um valor de 25mm.
- c) Aperto das garras quando as situações anteriores se verificam, e marcação do zero do sistema do deslocamento dos dispositivos de fixação e carregamento.
- d) Início do ensaio.

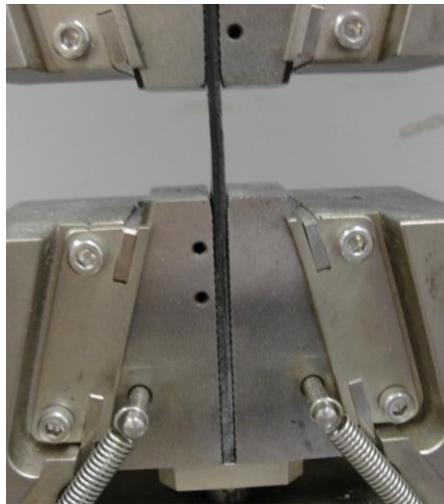


Figura 42 - Ensaio de compressão

Os provetes foram ensaiados até à rutura, ou até quando já se verificava que os provetes tinham ultrapassado a cedência e uma degradação da integridade estrutural muito visível.

### 3.5.4. Ensaio de flexão em 3 pontos

Anteriormente foi criado um método de ensaio no software Bluehill para os ensaios de flexão em 3 pontos. Foram definidos os parâmetros de segurança, as grandezas a retirar do ensaio pelo programa, o intervalo entre cada amostra, a direção e a velocidade dos mecanismos de fixação.

Após a colocação dos suportes interiores à distância de 96mm um do outro e simétricos em relação ao punção superior, foi aplicado o seguinte procedimento durante os ensaios de flexão:

- a) Introdução na referência do provete, e dos valores referentes às dimensões da seção de cada provete no software Bluehill.
- b) Colocação dos provetes sobre os 2 apoios inferiores, tendo em atenção a sua simetria e alinhamento.
- c) Descida do punção superior até encostar no provete, não devendo na posição inicial exercer uma pré tensão superior a 1N, e marcação do zero do sistema.
- d) Início do ensaio.

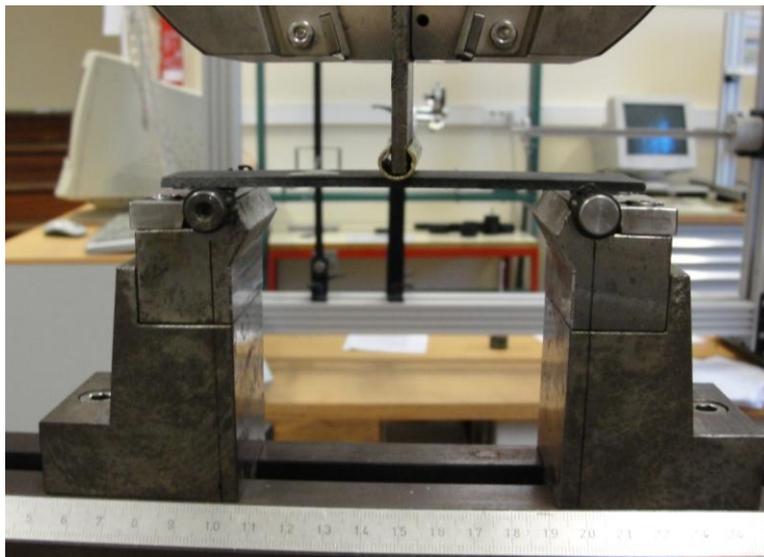


Figura 43 - Ensaio de flexão em 3 pontos

Os ensaios foram realizados até se verificar a rutura do provete, ou a passagem da fase de cedência do compósito, mas devido a constrangimentos nos dispositivos de fixação, esse ponto não foi atingido na totalidade dos ensaios. Segundo a norma se os provetes não atingissem o ponto de cedência antes dos 5% de deformação, que correspondia no ensaio a 32mm de deslocamento do punção superior os resultados deixavam de ser válidos. Como o constrangimento que levava à paragem do ensaio se encontrava para lá dos 32mm, não apresentou qualquer influência no universo de dados válidos do ensaio.

### 3.5.5. Ensaio de corte com guias

Antes de iniciar os ensaios foi criado no software de controlo do aparelho de ensaios um método a ser utilizado no ensaio de corte, onde foram definidos os parâmetros de segurança, as grandezas a retirar do ensaio pelo programa, o intervalo entre cada amostra, a direção e a velocidade dos mecanismos de fixação. Em seguida foi aplicado este procedimento durante os ensaios, tendo em atenção todos os requerimentos da norma relativamente à montagem:

- a) Início do software de controlo da máquina de ensaios Bluehill.
- b) Colocação dos grampos no provete, tendo cuidado para que na posição de aperto os parafusos responsáveis pelo aperto dos grampos não entrem em contacto com o provete.
- c) Aplicação de um pequeno aperto dos parafusos para impedir deslocação do provete nos apertos seguintes. Com o auxílio de uma chave dinamométrica, procede-se ao aperto dos parafusos numa primeira fase até 70Nm, e de seguida até 100Nm.
- d) Quando todos os elementos se encontram acoplados, efetua-se em primeiro lugar a ligação com a garra superior do aparelho de ensaios, e só depois se prende na garra inferior. É necessário garantir que os 2 elementos de ligação com garra se encontram alinhados segundo o eixo de deslocação da máquina de ensaios.
- e) Marcação do zero da força do sistema, aplicação de uma pré-tensão 1N no sistema e remarcação de um novo zero do sistema.
- f) Início do ensaio.

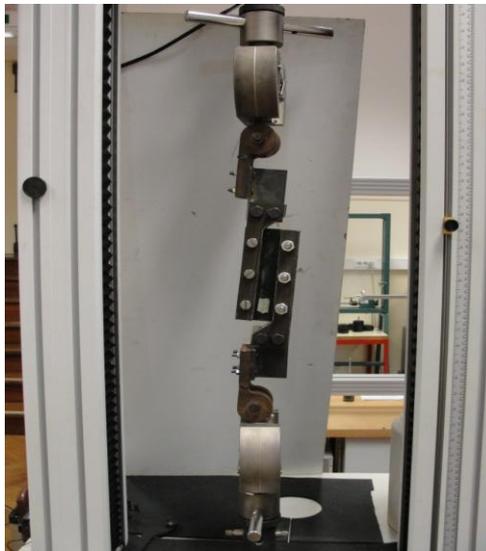


Figura 44 - Ensaio de corte por guias

Os provetes são ensaiados para lá do momento em que se verifica a ultrapassagem do ponto de rutura dos provetes, quando se verifique haver uma perda da integridade estrutural do compósito.

## 4. Apresentação e discussão dos resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos referentes aos ensaios realizados ao material compósito de poliéster e basalto. Será feita também uma análise dos dados e considerações finais.

Inicialmente será feita a apresentação e análise aos dados resultantes do ensaio C-Scan utilizando os procedimentos e equipamentos descritos no capítulo 3 e irá ser feita uma comparação com as observações feitas com o microscópio das seções das placas analisadas com os ultrassons.

Será feita uma apresentação dos dados retirados dos ensaios de tração, compressão, flexão em 3 pontos e o ensaio de corte por guias e o cálculo de propriedades de acordo com normas descritas no capítulo 3.

Por último será feita um estudo com um componente (pá de remo) fabricado por HLU, que inclui uma análise ao processo de fabrico para o caso das pás, e um ensaio força-deslocamentos às duas pás fabricadas. Serão apresentados e comparados os resultados obtidos por uma simulação computacional da pá do remo usando o programa de elementos finitos Abaqus, com os resultados experimentais obtidos em laboratório.

### 4.1. Ensaio não destrutivo C-Scan

Devido a razões práticas, as placas de compósito foram cortadas a meio e no caso da placa identificada como “6” em quatro partes, sendo depois sujeitas a um ensaio C-Scan. Da Figura 45 à 47 são apresentados os resultados do ensaio de TOF das seis placas.

Pela observação das imagens, verifica-se a existência de duas zonas com características diferentes quanto à propagação dos ultra-sons. Nas zonas roxas o sinal foi capaz de atravessar a totalidade da placa sem encontrar nenhuma descontinuidade no material, Figura 48 a). No caso das zonas azuis foi possível constatar, pela visualização do sinal, que a zona cuja distância representada no mapeamento da placa não correspondia à distância entre as duas superfícies da placa, mas sim à existência de uma irregularidade no interior do compósito, Figura 48 b).

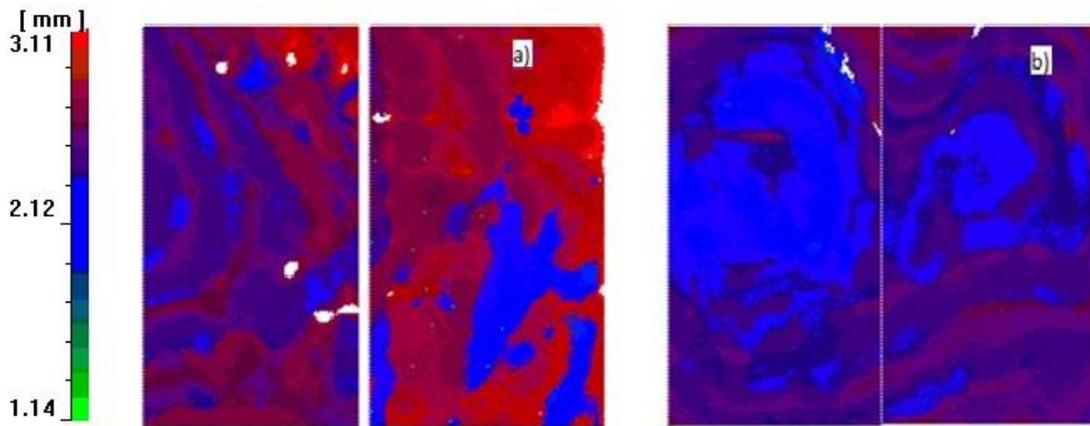


Figura 45 - Imagem ensaio de TOF do C-Scan: a) - Placa 1, b) - Placa 2

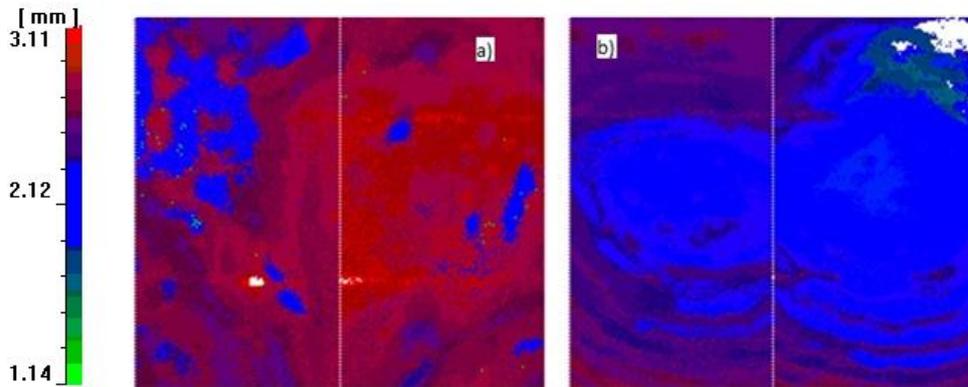


Figura 46 - Imagem ensaio de TOF do C-Scan: a) - Placa 3, b) - Placa 4

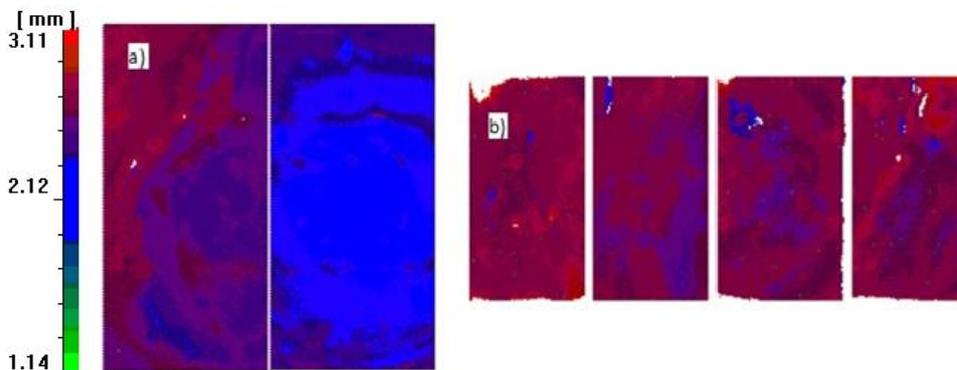


Figura 47 - Imagem ensaio de TOF do C-Scan: a) Placa 5, b) Quatro seções da Placa 6

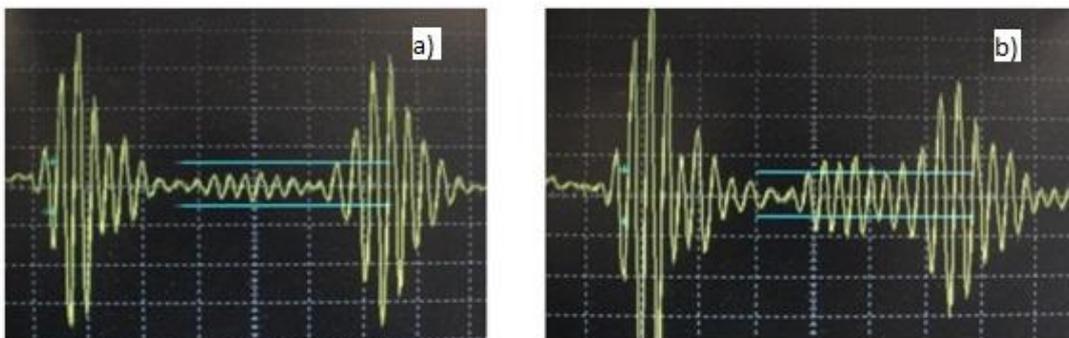


Figura 48 - Imagem do sinal do varrimento C-Scan: a) Imagem do sinal na zona do provete onde as fibras estão bem distribuídas (cor roxa das imagens) b) Sinal numa zona onde há concentração de resina na superfície que corresponde à cor azulada das imagens.

Após o corte das placas em provetes, foi possível confirmar, com a utilização de uma craveira digital e do dispositivo digital do microscópio, que a variação abrupta da espessura não se verificava.

Sendo agora possível a visualização das zonas de interesse com a utilização do microscópio, foi feita uma análise à distribuição das camadas de fibra ao longo da espessura do compósito, e procuradas possíveis causas para o seu aparecimento. As fibras de basalto apresentam-se nas imagens com uma cor mais clara, e a resina com um tom mais escuro. Durante a inspeção visual dos provetes foram observadas as distribuições de camadas pela espessura do compósito, apresentadas da Figura 49 à 53:

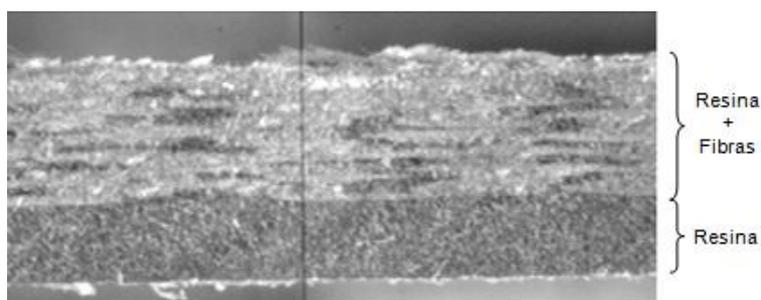


Figura 49 - Imagem com o plano preferencial de escoamento da resina, a qual empurra as fibras contra a superfície do molde, estando apenas 35% da espessura da placa com resina

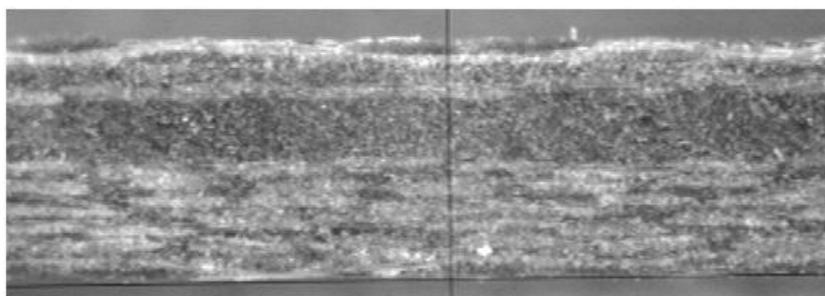


Figura 50 - Imagem que mostra um plano preferencial de escoamento da resina

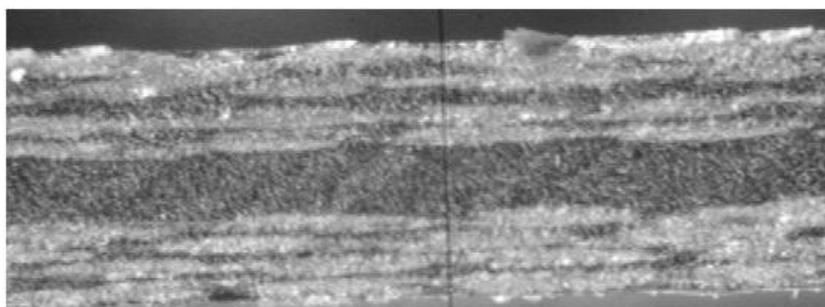


Figura 51 - Imagem que mostra um plano preferencial de escoamento localizado no centro do provete que promove um afastamento das fibras para a superfície da placa

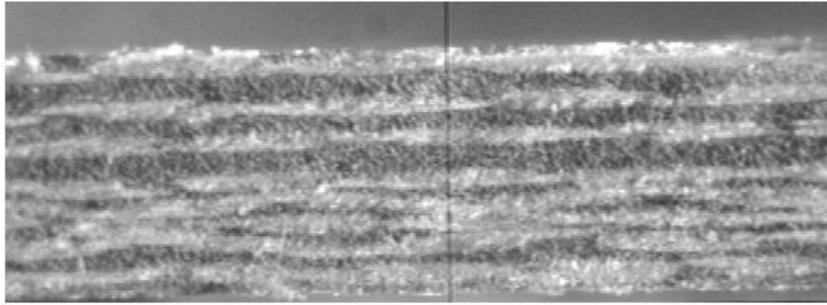


Figura 52 - Imagem que mostra três planos preferenciais de escoamento da resina que introduz uma pequena distorção na distribuição das fibras

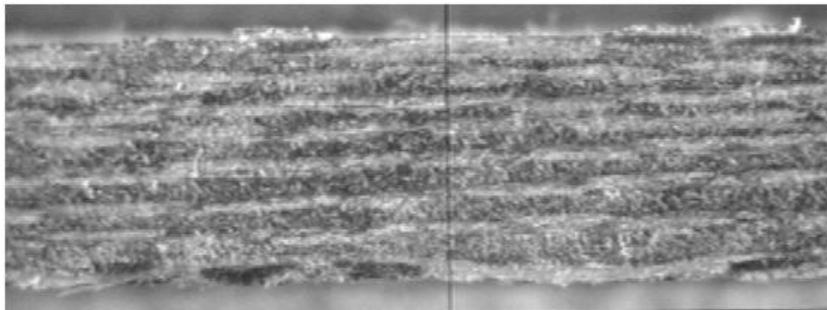


Figura 53 - Imagem de uma distribuição uniforme das fibras pela espessura do compósito



Figura 54 - Fissura decorrente do processo de cura, e que se inicia na superfície da placa e se propaga até à primeira camada de fibra

À vista desarmada já era possível observar algumas destas irregularidades na distribuição das camadas, mas com o auxílio do microscópio foi possível verificar a existência das menos perceptíveis. Na análise da localização de defeitos de homogeneidade e distribuições, verificou-se que na zona de entrada da resina no molde o defeito da Figura 49 estava presente com maior ou menor predominância. Conforme a resina se afastava da zona de entrada, as distribuições das fibras iam sequencialmente passando da apresentada na Figura 50 para uma das seguintes situações apresentadas: a resina encontrava um plano preferencial de escoamento e permanecia nesse plano até ao gito de saída, Figura 51, ou a resina começava a escoar por entre diversas camadas e acabava por ter uma distribuição uniforme pela espessura da placa, Figura 52 e 53.

Devido ao facto de não ter sido dada à placa 5 o mesmo processo de cura das outras placas, concretamente a não observação das 3 horas de cura da resina (após à injeção da mesma) dentro da prensa a 60º, apareceram apenas fissuras na superfície da placa. Essas fissuras localizavam-se na periferia da placa e deslocavam-se para o centro da placa. Apesar dessas partes não terem sido utilizadas nos ensaios, procedeu-se à observação do fenómeno. Pela Figura 54 foi possível ver que a fissura se propagava da superfície até encontrar a primeira camada de fibra, e que apesar das fibras terem uma boa distribuição, não impediu o aparecimento das fissuras.

Em consequência dos resultados do ensaio por ultra-sons foram escolhidos pontos específicos nas placas que permitissem saber qual a origem da irregularidade do sinal no ensaio do C-Scan.

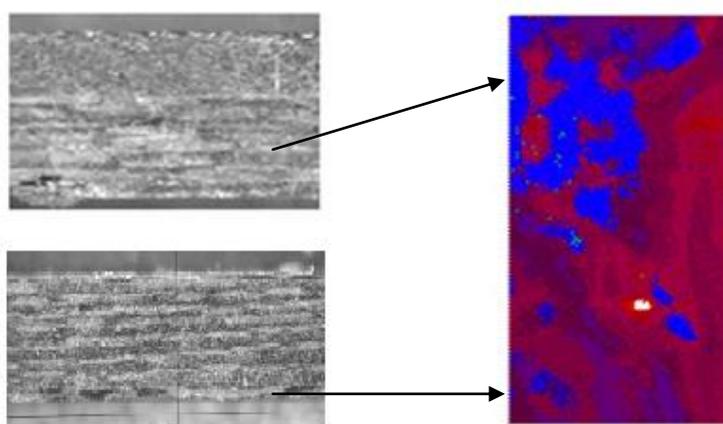


Figura 55 - Comparação do provete 315 com a imagem obtida pelo C-Scan da placa 3

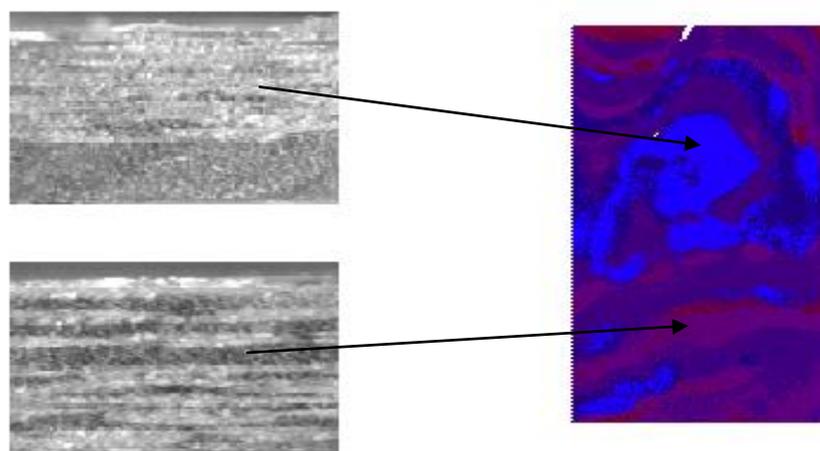


Figura 56 - Comparação do provete 223 com a imagem obtida pelo C-Scan da placa 2

Após serem examinados os provetes, com especial atenção os que tinham sido tirados de zonas onde houve a diferenciação cromática azul-roxo do mapeamento do ensaio de TOF foi reconhecido um padrão. As zonas que apareciam a azul nas imagens eram zonas onde havia uma grande camada de resina acumulada na superfície do provete, ao contrário das zonas onde as fibras estavam bem distribuídas que apresentavam uma cor roxa. Caso a camada de

resina se encontrasse no meio do provete, já não produzia uma interferência suficientemente forte no sinal para ser detetada pelos parâmetros de condicionamento do sinal utilizados.

## 4.2. Regra das misturas

Pela aplicação da regra das misturas apresentada no capítulo 2, foi feita uma estimativa do módulo de Elasticidade do compósito testado. O resultado aqui obtido seria posteriormente comparado com o resultado experimental.

Foi escolhida uma seção da placa, sem defeitos superficiais e com uma boa tolerância dimensional de onde foram tirados os valores da largura, espessura e comprimento. Com o auxílio de uma balança de precisão, fez-se a pesagem do provete. Recorrendo à folha de dados do fabricante da malha de basalto obteve-se a densidade superficial da malha. Os dados encontram-se agrupados na seguinte lista:

$$\begin{aligned} \text{Volume} &= 0.0000328 \text{ m}^3 & \rho_{\text{fibras}} &= 0.22 \text{ Kg/m}^2 \\ \text{Área} &= 0.01368 \text{ m}^2 & \rho_{\text{matriz}} &= 1200 \text{ Kg/m}^3 \\ & & M_{\text{proвете}} &= 0.05182 \text{ Kg} \end{aligned}$$

Multiplicando a densidade das fibras por a área da superfície do provete e pelas 8 camadas de fibra que o provete continha obteve-se o valor da massa das fibras:

$$M_{\text{fibras}} = 0.024 \text{ Kg}$$

Tendo o peso do provete e das fibras, assim como a densidade da resina, foi possível tirar o volume da resina no compósito:

$$M_{\text{proвете}} = M_{\text{fibras}} + \rho_{\text{matriz}} V_{\text{matriz}} \rightarrow V_{\text{matriz}} = 2.311 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Com o volume total e o volume da matriz, obteve-se o volume específico da matriz e das fibras:

$$\begin{aligned} \vartheta_{\text{matriz}} &= \frac{V_{\text{matriz}}}{V_{\text{proвете}}} = 0.704 \\ \vartheta_{\text{fibras}} &= 1 - \vartheta_{\text{matriz}} = 0.296. \end{aligned}$$

Utilizando um fator de Krenchel  $\eta = 0.5$ , módulo de Elasticidade da resina UP  $E_m = 2.8 \text{ GPa}$ , e o valor para as fibras  $E_f = 85 \text{ GPa}$  (o valor médio entra a gama consultada em diversos documentos), tem-se que o valor para o módulo de elasticidade, utilizando a equação 2:

$$E_c = \eta E_f \vartheta_f + E_m \vartheta_m = 14.5 \text{ GPa}$$

## 4.3. Ensaio de tração dos provetes com alinhamento 0/90°

Nesta seção serão apresentados os valores que resultaram dos ensaios de tração às placas com alinhamento 0/90°. Será feita posteriormente uma análise dos mesmos e também dos valores obtidos do cálculo das tensões máximas e módulos de Elasticidade dos provetes e das variações observadas.

### 4.3.1. Apresentação dos resultados

Nas Figuras 57 e 58, encontram-se os gráficos das curvas tensão/extensão resultantes do ensaio segundo a norma ASTM D 3039. Os dados dos provetes provenientes da mesma placa foram

agrupados no mesmo gráfico, e depois comparados com os das restantes placas, para assim verificar se a influência da origem dos provetes tem relevância nos resultados finais obtidos.

### Curva tensão/extensão placa 3

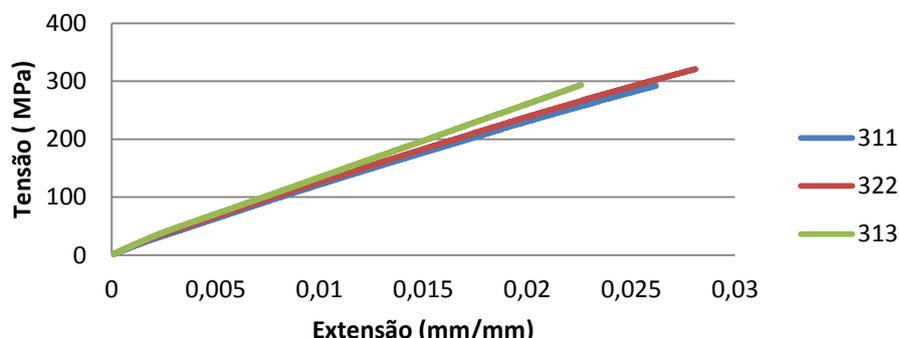


Figura 57 - Gráfico com os resultados do ensaio de tração aos provetes da placa 3

### Comparação entre as 3 placas

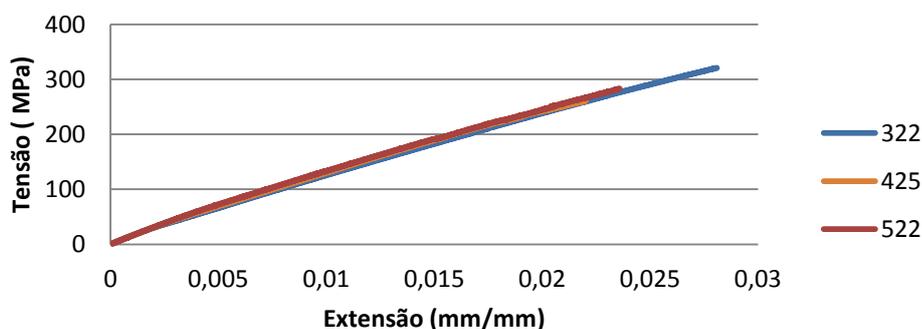


Figura 58 - Gráfico de comparação das retas provenientes de três placas diferentes

Apresenta-se, na Tabela 4, um resumo dos resultados dos valores de tensão máxima dos ensaios de tração por provetes e uma média dos valores provenientes da mesma placa, e na Tabela 5 os valores calculados do módulo de Elasticidade para cada provete.

Tabela 4 - Resultados do ensaio de tração dos provetes com alinhamento 0/90

	Tensão Máxima (MPa)	Média Placa (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Variação	Média Geral (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Variação
311	293,6	304,0	16,6	5,5%	291,4	18,2	6,3%
312	323,1						
313	295,2						
413	273,4	278,6	18,0	6,5%			
441	298,7						
425	263,8						
514	309,3	291,4	15,7	5,4%			
521	279,8						
522	285,2						

Tabela 5 - Valores do Módulo de Elasticidade calculados com base nos resultados dos ensaios

	Módulo de Elasticidade (MPa)	Média Placa (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. Variação	Média Geral (MPa)	Desvio Padrão	Coef. Variação
311	12551,9	13490,0	1083,1	8,0%	14302,0	1008,7	7,1%
312	13242,6						
313	14675,4						
413	13352,7	14421,5	1075,9	7,5%			
441	15504,4						
425	14407,3						
514	14971,2	14994,6	96,2	0,6%			
521	14912,4						
522	15100,4						

### 4.3.2. Análise dos resultados

No decorrer dos ensaios de tração realizados aos provetes 0/90, não foi possível constatar nenhuma diferença entre os provetes das várias placas no que se refere ao modo de falha. Todos os provetes, passado algum tempo do início do ensaio, começavam a apresentar pequenas fissuras na zona compreendida entre a superfície do provete até à primeira camada de fibras, ou seja apenas na zona da resina. Estas fissuras eram quase todas na direção perpendicular à direção do ensaio, e transversais a toda a placa. Na altura em que o provete fraturava, a sua superfície já continha inúmeras destas pequenas fissuras, mas a rutura do provete nem sempre ocorria nas zonas onde as fissuras tinham maior concentração.

Pela visualização dos gráficos obtidos não foi possível obter, à primeira vista, uma grande diferença no comportamento dos provetes provenientes de diferentes placas, mas quando se calculam os valores, as diferenças são visíveis. Quanto aos valores da tensão máxima todos eles apresentam um coeficiente de variação na ordem dos 6%, quer entre os provetes da placa, quer entre todos os provetes ensaiados. O valor mais alto foi obtido no ensaio do provete 312, com 323,1MPa e o mais baixo no provete 425 com 263.8 MPa, tendo sido calculado um valor médio para a placa de 291.4 MPa.

Nos valores do Módulo de Elasticidade voltou-se a verificar uma diferença entre os valores de cada placa. O valor máximo foi obtido no provete 441, que apresentava um módulo de 15.5GPa, e o valor mais baixo teve origem do ensaio 311 com 12.5GPa. De realçar a uniformidade dos resultados obtidos pelos provetes da placa 5, que apresentavam um coeficiente de variação de 0.6% nos resultados, e o seu Módulo de Elasticidade médio foi o mais alto das 3 placas, 15.0GPa. O facto de com esta placa se ter obtido a distribuição de fibras mais uniforme e bem espaçada pode explicar a origem deste tipo de resultados. A média dos 6 provetes é de 14.3GPa com um coeficiente de Variação de 7%, semelhante ao coeficiente de variação dos resultados das placas 3 e 4.

Através da regra das misturas foi possível obter um resultado de 14.5GPa, muito próximo ao que foi constatado experimentalmente com apenas 0.2GPa de diferença entre os 2 resultados.

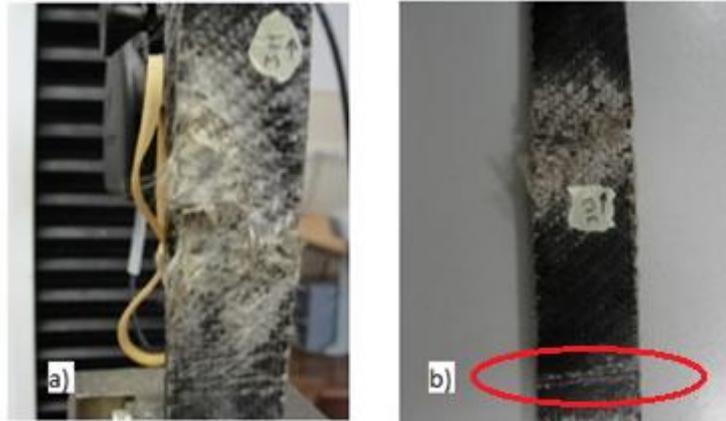


Figura 59 - a) Imagem onde a ruptura ocorreu na zona onde começou a fissurar b) Imagem onde é visível que a ruptura ocorreu fora da zona onde estava a fissurar

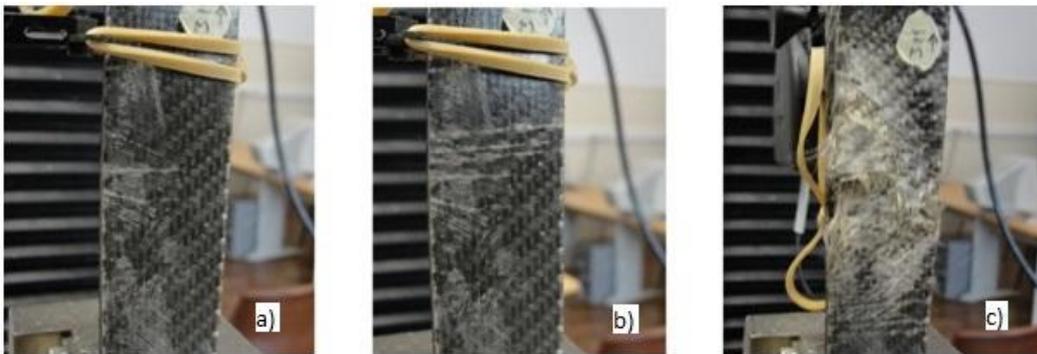


Figura 60 - Sequência de fases do ensaio de tração: a) - Início da fissuração b) - Aumento do número de fissuras c) - Ruptura violenta do provete

## 4.4. Ensaio de Compressão

Foram efetuados ensaios de compressão a doze provetes com alinhamento  $0/90$ , e a nove com alinhamento  $\pm 45$ . Foi ensaiado ainda um provete  $0/90^\circ$ , instrumentado com um extensómetro, a fim de se obter um valor aproximado para o Módulo de Elasticidade à compressão.

### 4.4.1. Apresentação dos resultados

Das Figuras 61 à 63 estão apresentados os gráficos das curvas força/deslocamento resultantes do ensaio de compressão realizados. Para cada alinhamento serão apresentados os resultados por placa, e depois num mesmo gráfico um resultado de cada placa para ser possível visualizar as diferenças nos comportamentos caso eles existam. Os gráficos dos ensaios dos restantes provets encontra-se no Anexo C.

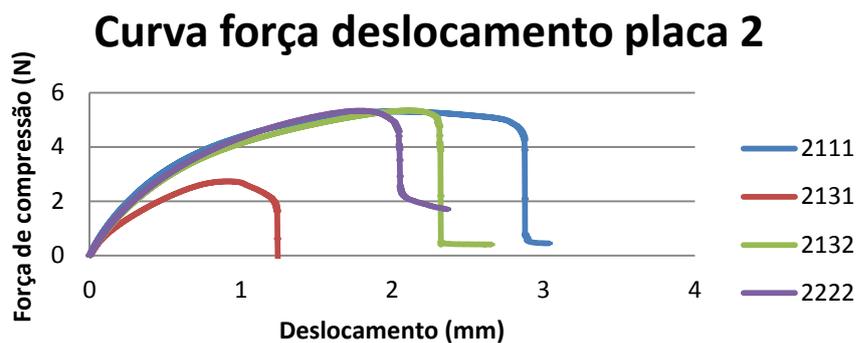


Figura 61 - Gráfico com os resultados do ensaio de tração aos provetes da placa 2

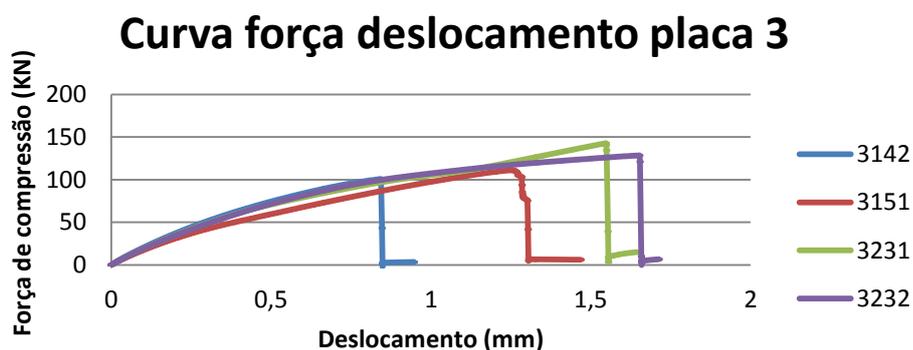


Figura 62 - Gráfico com os resultados do ensaio de tração aos provetes da placa 3

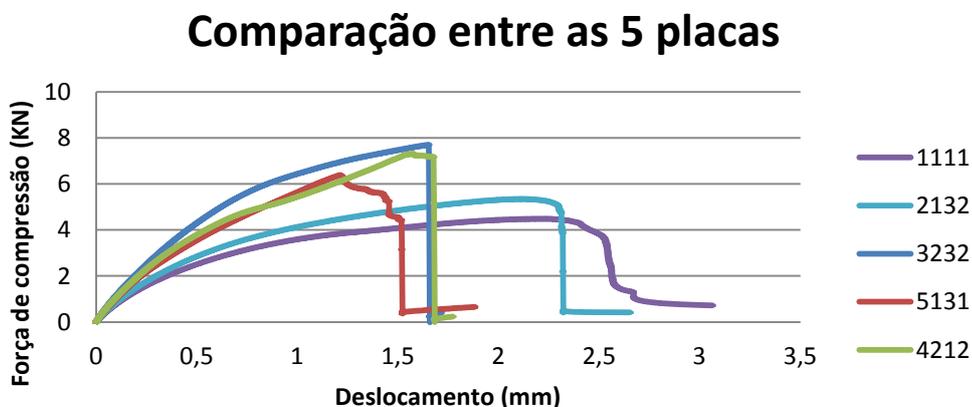


Figura 63 - Gráfico de comparação das retas provenientes de 5 placas diferentes

Para o provete instrumentado, foi feito um ensaio de compressão por patamares, para assim permitir a leitura correta do valor do extensómetro e da força. Os incrementos de força eram de 500N por patamar, e feitos a uma velocidade constante de 1.5mm/min, como referido na norma. A paragem entre incrementos tinha uma duração de 20 segundos. Os gráficos de tensão/extensão e força/deslocamento encontram-se reproduzidos nas Figuras 64 e 65.

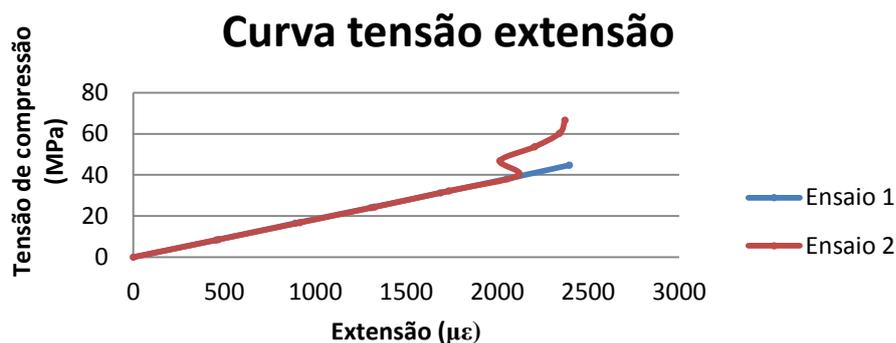


Figura 64 - Curva Tensão extensão dos 2 ensaios à compressão do provete instrumentado

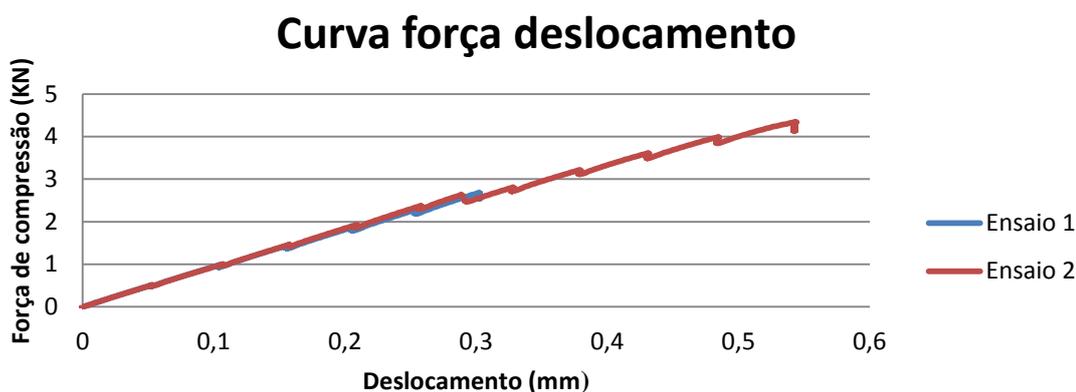


Figura 65 - Curva força deslocamento dos 2 ensaios à compressão do provete instrumentado

Nas tabelas 6 e 7 apresenta-se o resumo dos resultados obtidos nos ensaios realizados.

Tabela 6 - Valores dos ensaios de compressão dos provetes  $\pm 45^\circ$

	1111	1112	1131	1132	1212	2111	2131	2132	2222
Tensão Máx (MPa)	68,3	68,4	113,6	67,5	75,2	91,6	45,0	87,7	83,7
Média placa (MPa)	69,9					87,7			
Desvio padrão (MPa)	3,6					4,0			
Coef. Variação placa	5,12%					4,51%			
Média total (MPa)	77,5								
Desvio padrão (MPa)	10,1								
Coef. Variação total	13,04%								

Tabela 7 - Valores dos ensaios de compressão dos provetes 0/90°

	3142	3151	3231	3232	4141	4142	4212	4222	5122	5131	5132	5241
Tensão Máx (MPa)	100,7	93,9	102,8	105,0	106,9	90,7	91,0	90,6	83,8	90,7	119,6	85,0
Média placa (MPa)	100,6				94,8				94,8			
Desvio padrão (MPa)	4,8				8,1				16,8			
Coef. Variação placa	4,78%				8,50%				17,76%			
Média total (MPa)	95,9											
Desvio padrão (MPa)	10,4											
Coef. Variação total	10,90%											

Tabela 8 - Valor do módulo de compressão do provete instrumentado

	Ensaio 1	Ensaio 2
Módulo de Elasticidade à compressão (MPa)	18743,1	18867,6

#### 4.4.2. Análise dos resultados

A partir dos resultados obtidos no gráfico da Figura 63, foi possível verificar uma diferente resposta entre os provetes com um alinhamento  $\pm 45^\circ$  e os que tinham um alinhamento 0/90. No caso dos provetes com o primeiro alinhamento, provenientes das placas 1 e 2, provetes 1111 e 2132 da Figura 63, estes não atingiam uma tensão máxima tão elevada, apresentando um valor médio de 77.5 MPa, enquanto os provetes do segundo alinhamento, provetes 3232, 4212 e 5131 da Figura 63, apresentavam um valor médio de 95.9MPa. Entre os provetes com as fibras a  $\pm 45^\circ$ , foi possível claramente diferenciar dois tipos de comportamento da curva que tinha origem na proveniência do provete. Pela observação do comportamento do provete 1131 no gráfico, que se trata de um provete com um alinhamento 0/90 e não  $\pm 45^\circ$ , não sendo por isso considerado para os cálculos seguintes. Os gráficos dos restantes ensaios encontra-se no Anexo D.

Na Tabela 8 os resultados mostram que a placa 2 apresenta uma maior tensão máxima que os provetes da placa 1, suportados por um bom coeficiente de variação dos resultados obtidos para ambos os valores das placas. Para o outro alinhamento os provetes da placa 3 mostraram ser o que apresentaram maior tensão máxima em média 100.6MPa, mas o valor mais elevado teve proveniência da placa 5 com 119.6MPa, valor este que se encontrava bastante distanciado do resto dos provetes dessa placa e que foi responsável pelo elevado coeficiente de variação dos resultados dessa placa.

Dos dois ensaios à compressões do provete instrumentado obteve-se um Módulo Elasticidade à compressão praticamente igual como se podia prever pela quase total coincidência das duas retas, e com um valor de 18.7GPa. Como se pode visualizar no gráfico da Figura 65, pelo facto de haver pequenas paragens no ensaio e durante esses intervalos se verificar uma diminuição do valor da força aplicada, pode haver consequências no resultado final.

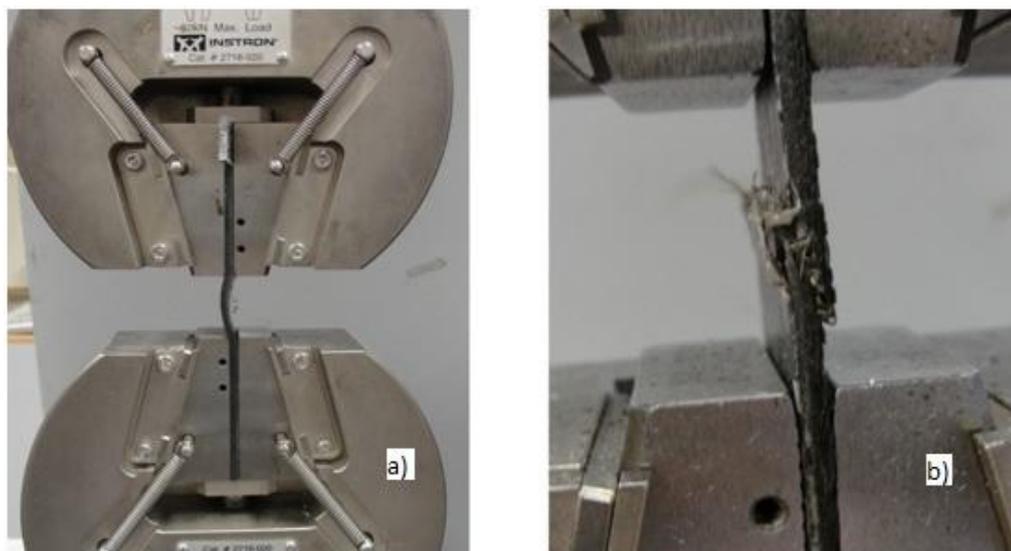


Figura 66 - Ensaio de compressão: a) Início da deformação do provete, b) - Rutura típica verificada na maioria dos ensaios.

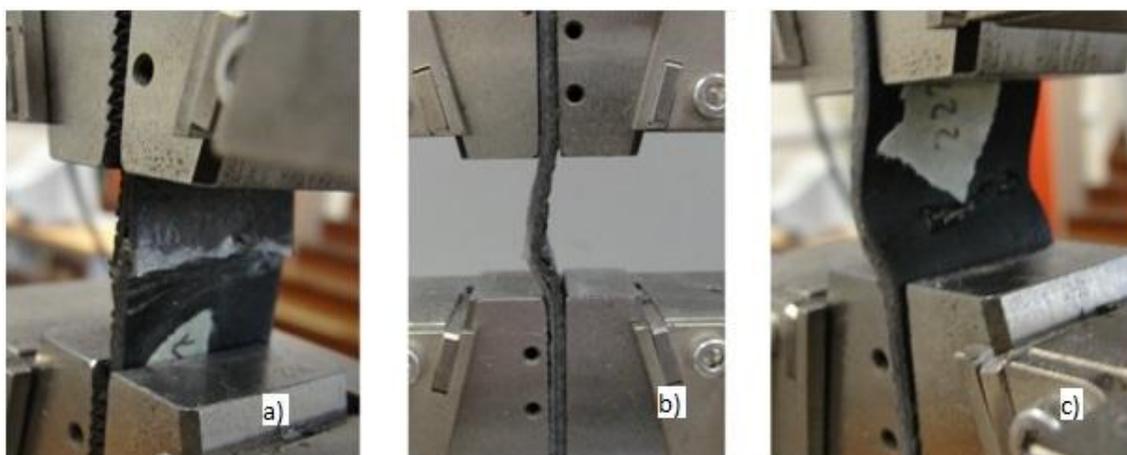


Figura 67 - Três tipos de rutura observados: a) - O provete fatura a meio indo cada metade para seu lado, b) - Devido a uma grande concentração de resina esta fratura e as fibras apenas dobram, c) - Aparecimento de uma fissura no meio do provete.

## 4.5. Ensaio de Flexão em 3 pontos

Nesta seção serão apresentados os valores que resultaram dos ensaios de flexão em 3 pontos. Será feita posteriormente uma análise dos mesmos, dos valores obtidos do cálculo das tensões máximas da face exterior e módulos de elasticidade de flexão dos provetes, e das variações apresentadas.

### 4.5.1. Apresentação dos resultados

Foram ensaiados provetes com os 2 tipos de alinhamentos. Alguns dos provetes não apresentaram cedência ou fratura antes do limite dos 5% requeridos pela norma, e como tal não

foram considerados para os cálculos. Na Figura 68, os gráficos das curvas força deflexão, não foram possíveis de corresponder com a identificação de origem da placa, apenas o tipo de alinhamento.

Tabela 9 - Valores resultantes dos ensaios de flexão dos provetes  $\pm 45^\circ$

	1	2	3	4	5	6
Tensão Máxima de Flexão (MPa)	221,7	168,3	168,6	153,5	201,7	173,1
Média (MPa)	181,2					
Desvio padrão (MPa)	25,3					
Coef. Variação	14,01%					

Tabela 10 - Valores do Módulo de Elasticidade dos provetes  $\pm 45^\circ$

	1	2	3	4	5	6
Módulo de elasticidade (MPa)	7726,7	6768,8	6674,7	5803,4	8131,9	6960,2
Média (MPa)	7011,0					
Desvio padrão (MPa)	824,7					
Coef. Variação	11,76%					

Tabela 11 - Valores resultantes dos ensaios de flexão dos provetes 0/90°

	Tensão Máxima de Flexão (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. Variação
1	395,3	350.9	48.6	13.8%
2	319,2			
3	345,2			
4	352,7			
5	346,6			
6	400,3			
7	324,5			
8	330,9			
9	386,8			
10	301,9			
11	282,9			
12	480,1			
13	352,2			
14	292,4			
15	367,3			
16	335,8			

Tabela 12 - Valores do módulo de elasticidade dos provetes 0/90°

	Módulo de elasticidade (MPa)	Média (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coef. Variação
1	13676,0	13191,0	1250,2	9,4%
2	14202,0			
3	14920,7			
4	11822,2			
5	11923,3			
6	11957,6			
7	14177,1			
8	14653,1			
9	12073,7			
10	11280,5			
11	12192,7			
12	14100,8			
13	14763,8			
14	13600,9			
15	11991,4			
16	13720,0			

### Curva força deflexão ±45°

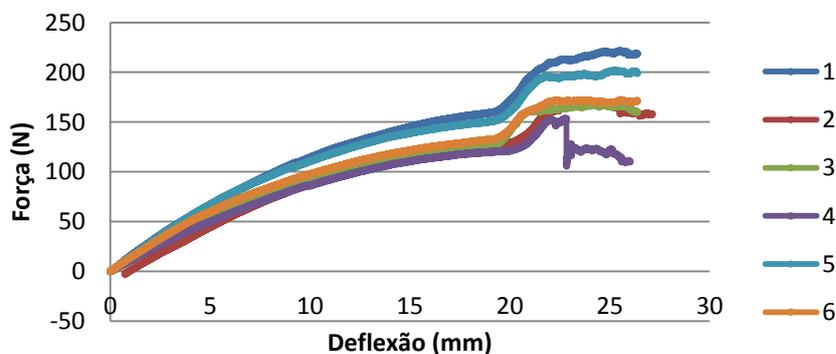


Figura 68 - Gráfico da curva de força deflexão dos provetes com alinhamento ±45°

#### 4.5.2. Análise dos resultados

Pelo gráfico da Figura 68 referente aos provetes com alinhamento ±45°, é possível verificar 2 grupos de curvas com um comportamento semelhante entre elas. Devido à falta de referência dos provetes, podemos só supor que cada um dos grupos corresponde a uma placa distinta. Pelo facto de apenas um dos provetes ter cedido, e estar marcado como sendo da placa 2, pode-se extrapolar que o grupo de curvas inferior seja referente aos provetes da placa 2. Esta ideia é reforçada pelo facto de

nos provetes da placa 2, as fibras se encontrarem distribuídas assimetricamente pela espessura da placa como se pode ver na Figura 49, ao contrário da placa 1 que se encontram simetricamente distribuídas, ver Figura 51. Para o caso do alinhamento  $0/90^\circ$  não foi possível fazer qualquer tipo de extrapolação quanto à origem dos provetes, e os gráficos com os resultados obtidos encontram-se no Anexo B.

Em todos os ensaios realizados os resultados divergiram bastante, apresentando todos eles uma coef. Variação na ordem dos 10%. No que diz respeito à tensão máxima da superfície exterior dos provetes no caso do alinhamento  $\pm 45^\circ$  foi de 181.2MPa e o módulo de elasticidade médio de 7GPa enquanto que para o alinhamento de  $0/90^\circ$  foi de 350.9MPa para a tensão máxima e 13.1GPa para o módulo.

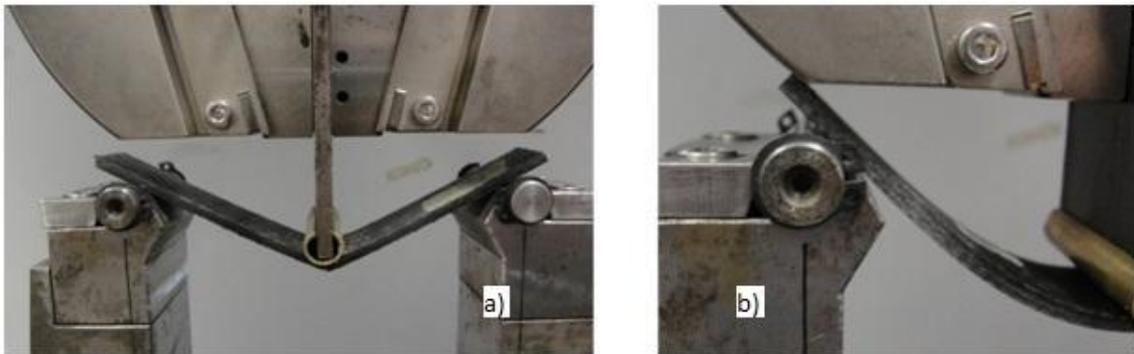


Figura 69 - Dois tipos de situações que aconteceram no ensaio de flexão: a) Imagem de um provete quanto atingiu a rutura, b) Um provetes de alinhamento  $\pm 45^\circ$  que não cedeu durante o ensaio.



Figura 70 - Imagem do único provete com alinhamento  $\pm 45^\circ$  que fraturou

#### 4.6. Ensaio de tração com orientação das fibras a $\pm 45^\circ$

Nesta secção serão apresentados os valores que resultaram dos ensaios de tração às placas com alinhamento  $\pm 45^\circ$ . Será feita uma análise dos dados diretamente resultantes do ensaio, dos valores obtidos do cálculo das tensões máximas e módulos de corte dos provetes e das variações apresentadas.

##### 4.6.1. Apresentação dos resultados

Nas Figuras 71 e 72 encontram-se os gráficos das curvas tensão/extensão resultantes do ensaio segundo a norma ASTM D 3518. Novamente os dados dos provetes provenientes da mesma placa

foram agrupados num gráfico, e só depois comparados com os das restantes placas, para verificar se a origem dos provetes tem influência nos resultados finais obtidos.

### Curva tensão extensão

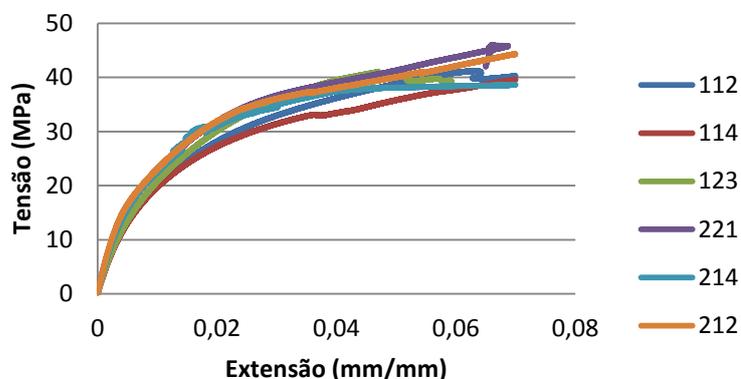


Figura 71 - Gráfico das curvas tensão extensão resultante do ensaio de tração

### Curva tensão extensão

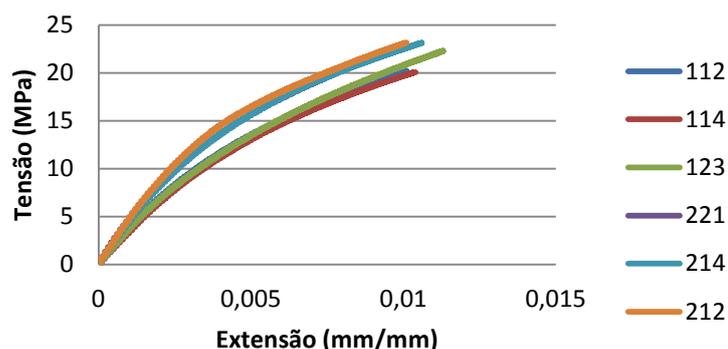


Figura 72 - Gráfico das curvas tensão extensão resultante do ensaio de tração nos momentos iniciais do ensaio

São apresentados, na Tabela 13, um resumo dos resultados dos ensaios de tração por provetes e uma média dos valores provenientes da mesma placa.

Tabela 13 - Resultados do ensaio de tração dos provetes com alinhamento  $\pm 45^\circ$

	114	112	123	221	214	212
Tensão Máxima (MPa)	41,7	43,3	33,6	46,0	38,8	48,5
Média placa (MPa)	39,5			44,4		
Desvio padrão (MPa)	5,2			5,0		
Coef. Variação placa	13,07%			11,35%		
Média total (MPa)	42,0					
Desvio padrão (MPa)	5,3					
Coef. Variação total	12,61%					

Seguindo as indicações da norma foi possível calcular o valor do módulo de rigidez ao corte do compósito. Os valores encontram-se na Tabela 14, separados por provete e placa.

Tabela 14 - Valores do módulo de corte calculados com base nos resultados dos ensaios

	114	112	123	221	214	212
G	2472,3	2500,9	2500,7	2818,7	2893,5	3105,8
Média placa (MPa)	2491,3			2939,3		
Desvio padrão placa	16,4			149,0		
Coef. Variação placa	0,7%			5,1%		
Média total (MPa)	2715,3					
Desvio padrão total	263,1					
Coef. Variação total	9,7%					

#### 4.6.2. Análise dos resultados

Nos ensaios efetuados aos provetes com alinhamento  $\pm 45^\circ$ , foi possível verificar a distorção da malha, no sentido das fibras se alinharem com a direção do deslocamento dos fixadores. Devido a esse facto, e por nos provetes a resina não estar uniformemente distribuída pelas 8 camadas de fibras, constatou-se uma precoce dissociação entre a resina e as fibras das zonas adjacentes à concentração de resina. Durante o ensaio dos provetes da placa 1 e 2, foi então possível identificar 2 tipos de distintos de comportamento dos provetes, que estavam relacionados diretamente com a distribuição das camadas de fibra pela espessura do compósito.

No caso da placa 1, constatou-se a existência de um canal de escoamento entra a quarta e a quinta camada como se pode ver na Figura 51. Ao A placa 2 apresentava uma grande concentração de resina na superfície dos provetes, estando as 8 camadas pouco impregnadas como se pode ver pela Figura 49. Ao se iniciar a tração dos provetes da placa 1 estes começavam a delaminar entre a 4 e 5 camada e no caso da placa 2 a resina da superfície começava a descolar da camada de fibra exterior e deixava fazer parte da seção resistente do provete.

Pelos resultados resultantes dos ensaios e presentes na Tabela 13 e 14, confirma-se que o facto dos provetes serem da placa 1 ou 2 tem influência nas características do compósito, o que também é visível no gráfico da Figura 72, onde se pode constatar 2 tipos diferentes de comportamento. No valor referente ao módulo de corte a diferença mínima é de 600MPa entre os valores dos 2 grupos de provetes, sendo o valor médio da placa 1 igual a 4982,6 MPa e o da placa 2 de 5878,7 MPa. No que se refere à tensão de rutura ainda existe uma diferença entre os valores médios das duas placas de 10 MPa, 79.1MPa na placa 1 e 88.9MPa na placa 2, havendo uma zona de valores de tensão comum às duas placas.

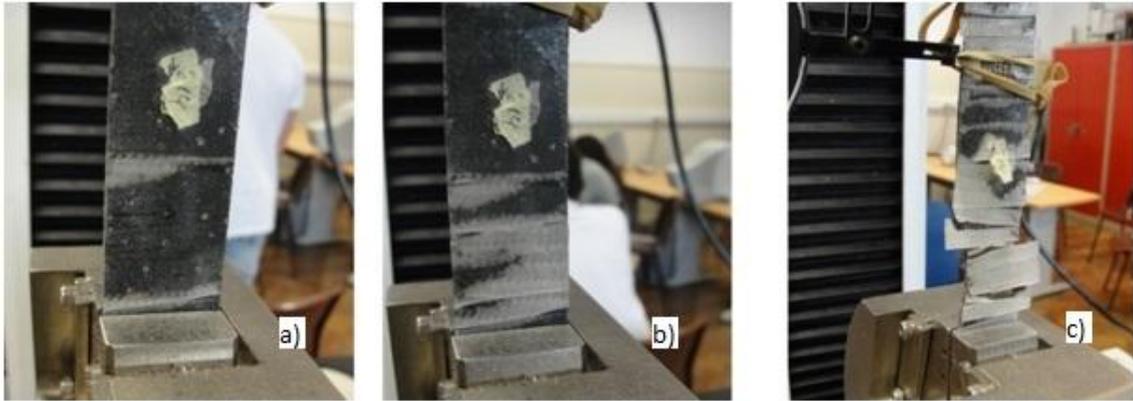


Figura 73 - Fases típicas de um ensaio de tração de um provete da placa 2: a) e b) - Desprendimento da resina localizada na superfície, c) Estricção do provete numa zona localizada e por fim cedência nesse ponto.



Figura 74 - Fases típicas de um ensaio de um provete da placa 1: a) - Fissuração ao meio ao longo do meio da espessura da placa, b) - Início da estricção ao longo de todo o provetes das fibras c) e d)- Expulsão da camada de resina do interior da placa até à cedência do provete.

## 4.7. Ensaio de corte com guias

Nesta secção serão apresentados os resultados obtidos no ensaio ao corte com utilizações de guias. Serão analisados e interpretados os diferentes resultados, assim como os resultados obtidos pela instrumentação de um dos provetes com uma roseta de extensómetros.

### 4.7.1. Apresentação dos resultados

Foram realizados 4 ensaios a provetes utilizando este método, onde um deles foi instrumentado e apenas foi ensaiado na parte inicial da curva de força/deslocamento. Nas Figuras 75 e 76 encontram-se os gráficos dos valores de força deslocação dos 4 provetes e em mais pormenor o gráfico tensão/extensão do ensaio do provete instrumentado. Para o provete instrumentado, foi feito um ensaio de tração com patamares, onde os incrementos de força eram de 500N por patamar, e feitos a uma velocidade constante de 1.5mm/min, como referido na norma. A paragem entre incrementos necessária para a leitura dos 3 valores da roseta tinha uma duração de 30 segundos.

## Curva força deslocamento

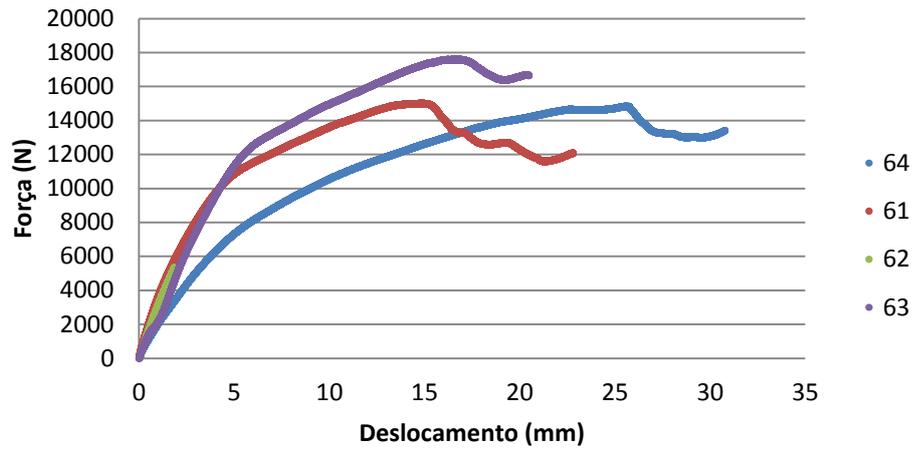


Figura 75 - Gráfico da curva força deslocamento dos 4 ensaios de corte

## Curva tensão extensão

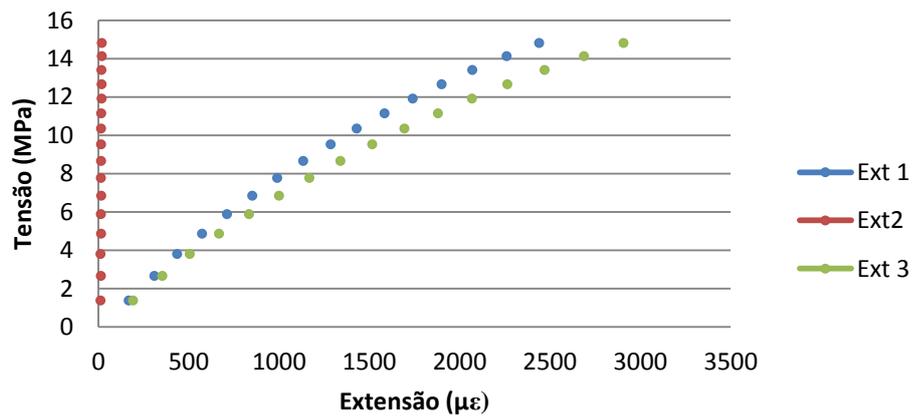


Figura 76 - Gráfico da curva tensão extensão da roseta nas 3 direções

## Curva força deslocamento

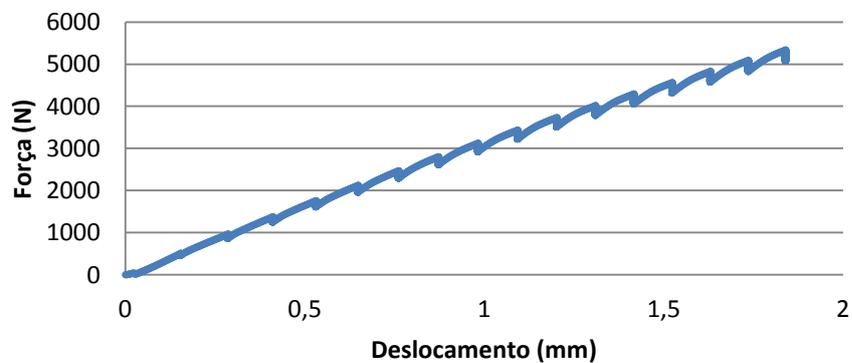


Figura 77 - Gráfico da curva força deslocamento do ensaio do provete instrumentado

Tabela 15 - Tabela com os valores de tensão máxima obtidos nos ensaios

	61	62	63	64
Tensão Máxima (MPa)	41,6	-	48,8	37,2
Média (MPa)	42,5			
Desvio padrão (MPa)	5,8			
Coef. Variação	13,7%			

Tabela 16 -Valores dos dois pontos utilizados no cálculo do módulo de corte e o respetivo valor

$\sigma 1$ (MPa)	$\sigma 2$ (MPa)	$\gamma 1$	$\gamma 2$	G (MPa)
6,8	14,8	0,001852	0,005347	2279,9

Onde  $\gamma_i$  é a soma das extensões no ponto i, nas direções +45° e -45°.

#### 4.7.2. Análise dos resultados

Durante a realização do primeiro ensaio ficou claro que o aperto entre os provetes e os grampos de fixação eram de uma tremenda importância. O primeiro provete a ser ensaiado foi o 64, o qual durante o ensaio apresentou 3 zonas localizadas de distorção, que coincidiam com a linha da distância mais curta entre os parafusos que apertavam os provetes aos grampos. Nos seguintes ensaios foram utilizados os valores mais altos de aperto apresentados na norma, o que levou a que nos ensaios seguintes esse fenómeno não voltasse a ser observado.

Foram ensaiados quatro provetes, tendo apenas três deles sido ensaiados até à cedência do provete. Destes três provetes o que apresentou maior valor de tensão máxima foi o provetes 63 que atingiu os 48.8MPa, e o provete com menor valor foi o 64, com 37.2MPa, provavelmente devido à questão do aperto referida anteriormente.

O provete 62 foi instrumentado com uma roseta, onde o extensómetro do meio estava alinhado com as fibras, e os outros dois nas direções  $\pm 45^\circ$ . Pelo gráfico da Figura 76, pode-se ver que o extensómetro colocado na direção das fibras sofre apenas um deslocamento residual, o que seria de esperar por se tratar de um ensaio de corte. Os outros dois extensómetros apresentavam uma curva semelhante entre eles, apresentando no entanto uma diferença de 500 $\mu\epsilon$  no final do ensaio. Apesar do ensaio ter sido feito em patamares, a curva apresenta um perfil entre a dos ensaios 61 e 63, como se vê na Figura 75. Trabalhando os dados deste último ensaio calculou-se o módulo de corte com o valor de 2279.9MPa. Comparando este valor com o que foi obtido por o ensaio da seção 4.5 que foi de 2715.2MPa, o obtido por este método é 436MPa mais baixo.

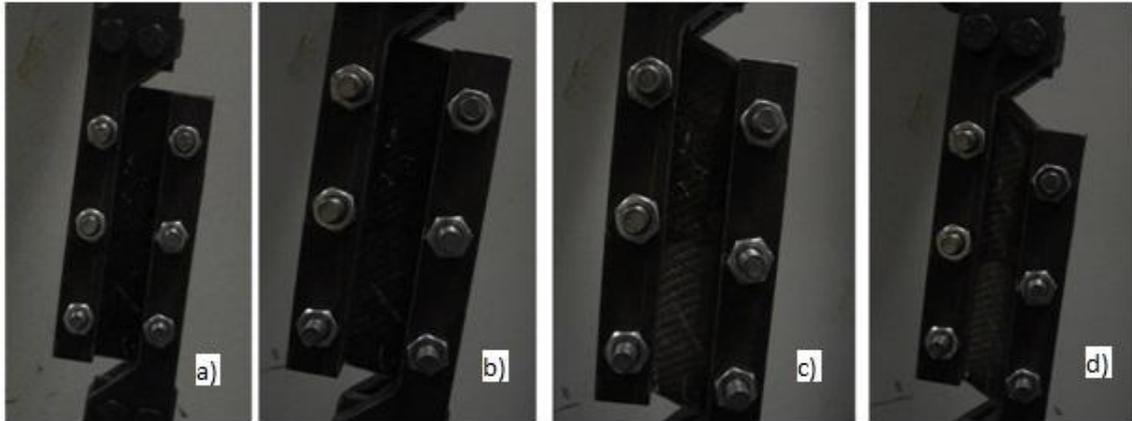


Figura 78 - a),b),c) e d) - Sequência de imagens do ensaio de corte por guias

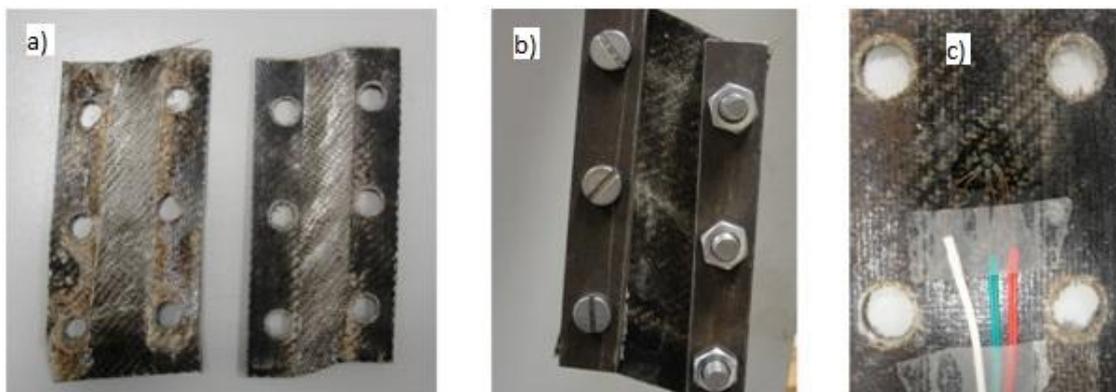


Figura 79 - a) Imagem dos provetes 61 e 63 depois de ensaiados, b) - O provetes 61 a ser tracionado onde é visível a zona afetada pelos parafusos, c) - O provete 62 instrumentado com a roseta

## 4.8. Ensaio de deformação da pá do remo

Nas próximas seções serão descritos os ensaios realizados às pás dos remos fabricadas pelo método enunciado no capítulo 3. Será descrito como decorreu o ensaio no laboratório, e que resultados foram obtidos para os 2 remos. Será feita uma análise utilizando o programa de elementos finitos Abaqus e comparados os dados resultantes do ensaio experimental com os obtidos pela simulação.

### 4.8.1. Ensaio das pás

O ensaio decorreu no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica do IST, e consistiu na aplicação de uma força e medição do deslocamento no remo. O primeiro passo foi marcar duas linhas, que coincidia com a projeção do eixo do cabo do remo na face inferior e superior da pá do remo. Foram observadas as deformações em dois pontos desse eixo, o primeiro encontrava-se na posição onde o cabo de alumínio terminava, e o segundo a uma distância de 165mm desse ponto, quase na extremidade da pá. Aplicou-se uma força pontual através da utilização de um suporte de pesos em forma de ganchos, também colocado na linha desenhada e

aplicado na extremidade da pá. O suporte pesava 1N e permitia a colocação progressiva de pesos de 2N e 5N, sendo colocados de maneira a obter o maior número de medições possíveis. Foram utilizados dois relógios comparadores eletrônicos, e colocados na parte interior da pá. Os relógios foram orientados segundo a direção de aplicação da força.



Figura 80 - Localização dos pontos de medição: a verde o "Ponto 1" e a vermelho o "Ponto 2"

Foram usadas 3 montagens diferentes, cada uma correspondendo a um ensaio:

- a) Ensaio 1 - Pá 1 com as costas da pá voltadas para cima
- b) Ensaio 2 - Pá 1 com a frente da pá voltadas para cima
- c) Ensaio 3 - Pá 2 com a frente da pá voltadas para cima

Devido às alterações referidas no capítulo 3 em relação ao processo de fabrico das pás, eles apresentavam uma diferença no comprimento dos cabos. Quando os remos se encontravam encastrados foi tirada a medida do encastramento até ao final do cabo, obtendo-se uma medição de 418mm no caso da Pá 1 e uma medida de 275mm no caso da Pá 2.

Na tabela 17 constam as medições obtidas nos ensaios, assim como o valor dos respetivos momentos e forças, bem como a deformação residual que fica após o descarregamento do remo.

Tabela 17 - Dados do ensaio realizado à pá do remo 1, em posição invertida

Ensaio 1			
Peso (N)	Momento (Nm)	Ponto 1 (mm)	Ponto 2 (mm)
0	0	0,1	0
1	0,418	0,1	1,04
6	2,508	0,58	6,73
8	3,344	0,8	9,45
10	4,18	1,01	12,38
11	4,598	1,09	13,49
13	5,434	1,5	17,02

Tabela 18 - Dados dos deslocamentos resultantes dos ensaios realizados à pá do remo 1 e 2, para os mesmos valores de carregamento

Ensaio 2				Ensaio 3		
Peso (N)	Momento (Nm)	Ponto 1 (mm)	Ponto 2 (mm)	Momento (Nm)	Ponto 1 (mm)	Ponto 2 (mm)
0	0	0	0	0	0	0
1	0,418	0,09	0,86	0,275	0,04	0,8
3	1,254	0,34	3,31	0,825	0,15	2,59
5	2,09	0,6	5,73	1,375	0,28	4,3
6	2,508	0,69	6,57	1,65	0,31	4,8
8	3,344	0,95	8,88	2,2	0,43	6,42
10	4,18	1,2	11,27	2,75	0,55	8,06
11	4,598	1,3	12,13	3,025	0,58	8,56
13	5,434	1,55	14,46	3,575	0,7	10,28
15	6,27	1,82	17,17	4,125	0,83	12,14
16	6,688	1,9	17,92	4,4	0,86	12,81
18	-	-	-	4,95	0,99	15,1

### Deslocamento dos pontos do remo

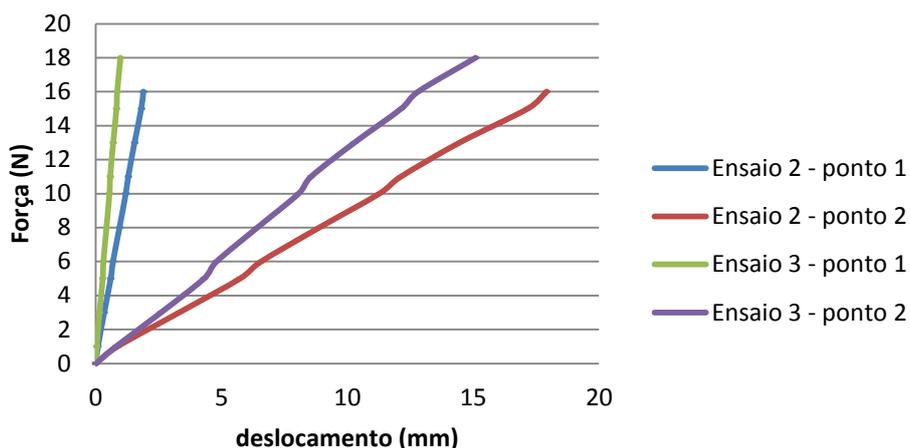


Figura 81 - Gráfico com o deslocamento dos 2 pontos da pá do remo durante o carregamento no ensaio 2 e 3

Tabela 19 - Valores do deslocamento após descarregamento progressivo do remo

Ensaio 3 - descarregamento			
Peso (N)	Momento (Nm)	Ponto 1 (mm)	Ponto 2 (mm)
16	4,4	0,86	13,16
13	3,575	0,74	10,85
11	3,025	0,61	9,17
6	1,65	0,35	5,44
1	0,275	0,07	1,36
Ensaio 2 - descarregamento			
Peso (N)	Momento (Nm)	Ponto 1 (mm)	Ponto 2 (mm)
11	4,598	1,38	12,99
6	2,508	0,81	7,81



Figura 82 - Imagens das 3 montagens: a) - Pá 1 posição invertida, b) - Pá 1 posição normal, c) - Pá 2 posição normal



Figura 83 - Duas imagens que mostram a pá do remo sob carregamento: a) - Imagem onde é possível ver os pontos de referência utilizados, b) - Deslocamento provocado pelo carregamento

#### 4.8.2. Simulação em Abaqus

O método de elementos finitos é uma ferramenta comum em vários ramos da engenharia de estruturas. Estes programas são desenvolvidos a partir de teorias de mecânica de meios contínuos, que estudam o equilíbrio, movimento e deformação de sólidos e utilizada em cálculos numéricos avançados. Nestes programas as funções contínuas são aproximadas por modelos discretos, em que o corpo a ser estudado é dividido em vários elementos mais pequenos, e onde são aplicadas a cada um desses elementos em separado as funções contínuas. Esses elementos estão ligados por nós, que são compilados para tornar as funções dos elementos uma boa aproximação da função global. Essa aproximação é melhorada com o refinamento da malha de elementos, que promove o aumento de nós e elementos. As funções dos elementos contêm informação sobre as propriedades do material e dados quanto à sua geometria. No que diz respeito as forças, estas são representadas por vetores e são aplicadas aos nós. Os valores dos deslocamento dos nós são a solução direta do sistema de equações, e o valores entre os nós são obtidos por interpolação lineares ou polinomiais.

Neste estudo de elementos finitos foi utilizado o programa Abaqus, onde foram desenhadas duas geometrias semelhantes às pás de remo fabricadas, com o objetivo de fazer uma comparação entre os resultados obtidos em laboratório e os resultados obtidos usando um programa de elementos

finitos. Para desenhar a forma da pá, foram utilizados exatamente as mesmas cotas usadas na modelação para a construção do molde, a partir do programa Solidworks. As dimensões da pá assim como o ponto de ligação do cabo à pá são iguais para as duas geometrias, a diferença está apenas no comprimento do cabo.

O modelo foi criado a partir de uma forma 3D --> deformable --> shell --> planar.

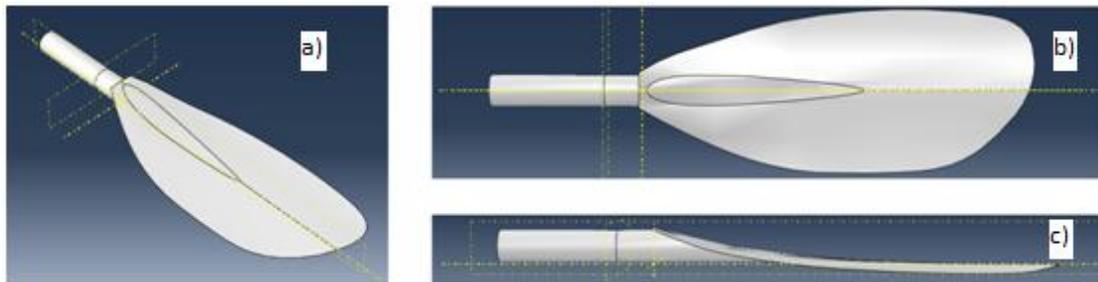


Figura 84 - a) - Vista isométrica, b) - Vista do plano xz, c) - Vista do plano xy

Os valores usados na caracterização do material foram os resultantes dos ensaios mecânicos realizados anteriormente. Foi escolhido um material do tipo Lamina para a parte do material compósito da pá, e *isotropic* para simular o cabo de alumínio. Após a parte e o material terem sido feitos, o empilhamento da pá foi criado, onde foi introduzida a direção em que se encontravam alinhadas as fibras, a espessura do compósito, o número de pontos necessários para a integração numérica. Foram atribuídos à pá as propriedades que correspondem a cada parte do componente. Para a definição dos materiais usados na simulação foram usados os valores da Figura 85:

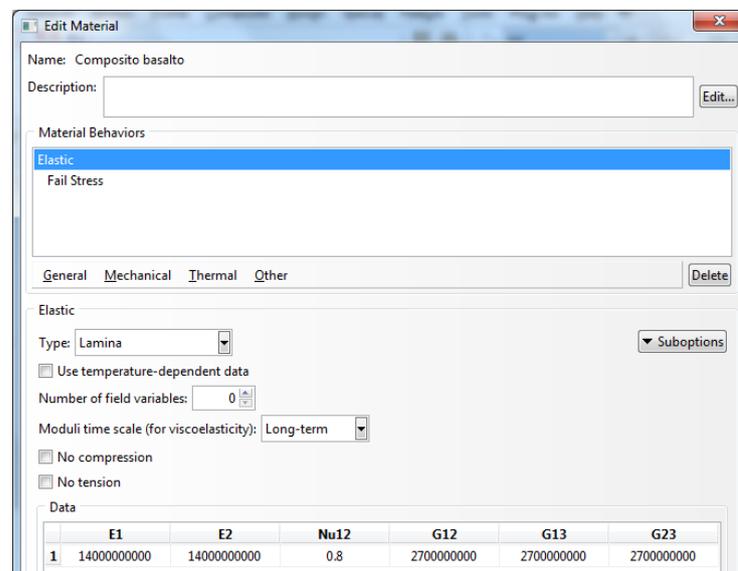


Figura 85 - Definição das características do material do compósito de basalto

Tabela 20 - Propriedades atribuídas ao alumínio

Módulo de Elasticidade (GPa)	Poisson
70	0.33

O seguinte passo após definir o material é atribuir a cada componente da pá do remo desenhada um tipo de material. É necessário definir uma seção tipo, onde vão ser atribuídas as características do material, espessura, alinhamento, pontos de integração e uma designação. Na Figura 86 estão apresentados os valores atribuídos à seção Pá Superior que são iguais aos da Pá Inferior.

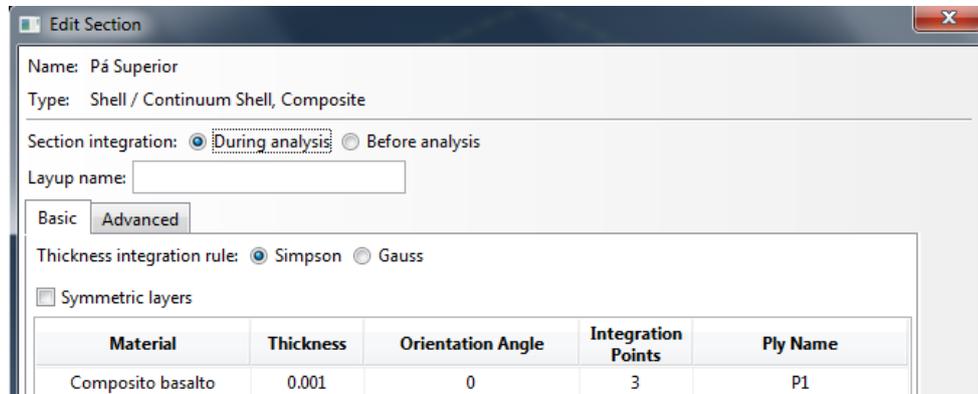


Figura 86 - Imagem com o empilhamento utilizado na seção da Pá Superior e Inferior

Foi definido o ponto de aplicação da força na extremidade da pá, alinhado com o eixo do cabo, e os 2 pontos de leitura de deslocamento nas posições que foram utilizadas no ensaio da pá do remo. Definiu-se a condição de fixação do remo do ensaio através do encastramento da extremidade do cabo.

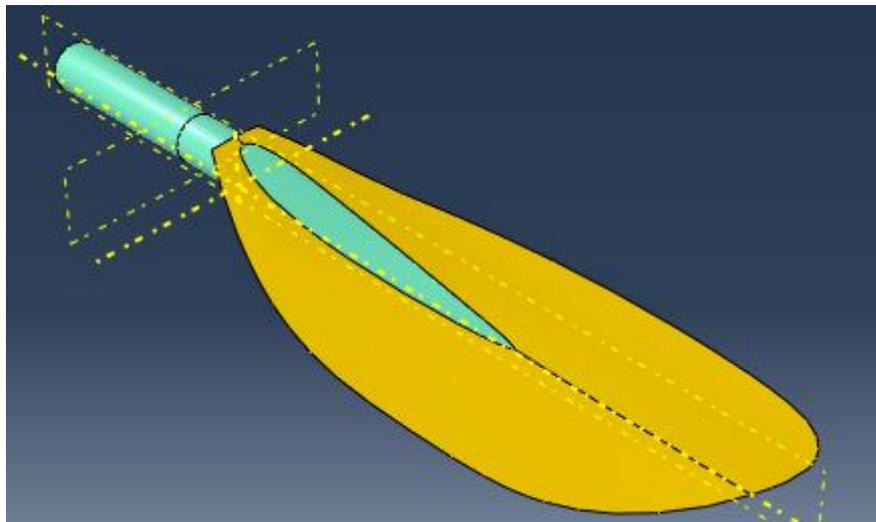


Figura 87 - O cabo que tem as propriedades do alumínio, na pá as propriedades do compósito espessura 0.5mm e a amarelo as propriedades do compósito com espessura 1mm.

Tendo em atenção a importância que o tamanho dos elementos tem nos resultados da análise, e que a partir de uma certa diminuição do tamanho dos elementos não exista uma alteração dos resultados que compense o aumento tempo de cálculo, o tamanho máximo dos elementos foi definido para 3mm. Devido à complexidade da geometria, o parâmetro da malha foi definido automaticamente pelo programa.

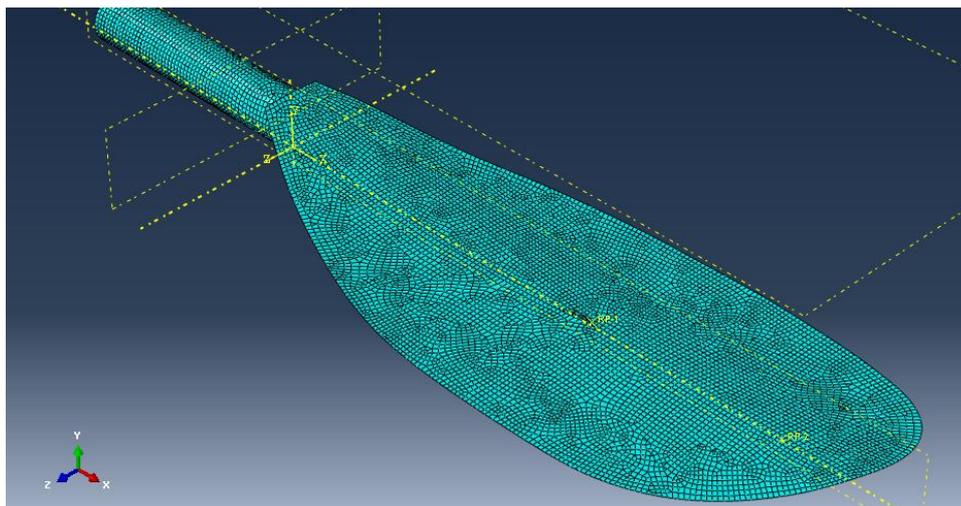


Figura 88 - Malha gerada pelo Abaqus e utilizada nas simulações

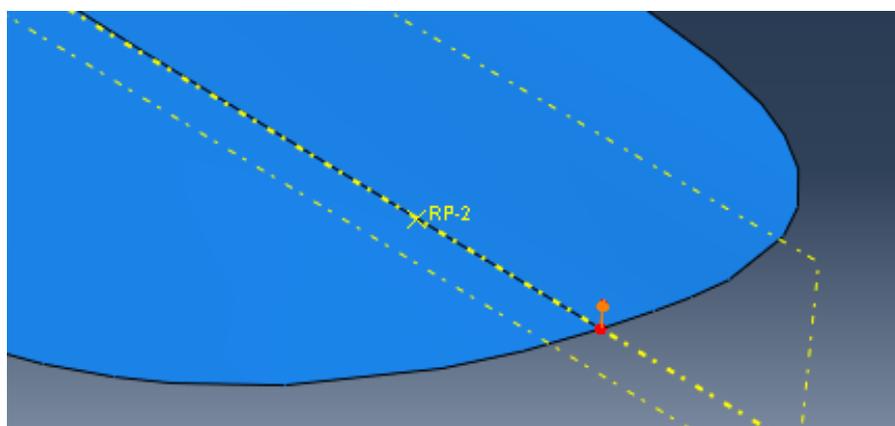


Figura 89 - Ponto de aplicação do carregamento e direção do ensaio 1

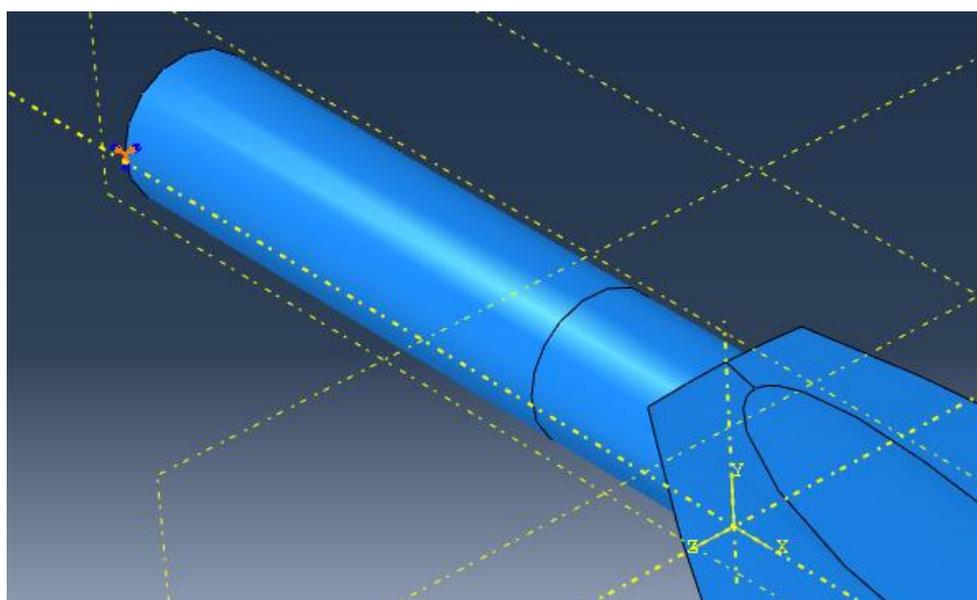


Figura 90 - Encastramento do cabo, condição de fronteira usada nas simulações

Nas Tabelas 21 e 22 estão apresentados os resultados das 3 simulações em Abaqus.

Tabela 21 - Resultados da simulação realizada no Abaqus do Ensaio 1

Abaqus 1		
Peso (N)	Ponto 1 (mm)	Ponto 2 (mm)
0	0	0
1	0,16	0,73
6	0,94	4,38
8	1,26	5,84
10	1,57	7,3
11	1,73	8,03
13	2,04	9,48

Tabela 22 - Resultados dos deslocamentos da simulação realizada no Abaqus dos Ensaio 2 e 3

Peso (N)	Abaqus 2		Abaqus 3	
	Ponto 1 (mm)	Ponto 2 (mm)	Ponto 1 (mm)	Ponto 2 (mm)
0	0	0	0	0
1	0,16	0,73	0,14	0,71
3	0,47	2,19	0,44	2,15
5	0,78	3,65	0,74	3,5
6	0,94	4,39	0,889	4,3
8	1,26	5,83	1,18	5,73
10	1,57	7,3	1,48	7,17
11	1,72	8,02	1,63	7,89
13	2,04	9,48	1,92	9,32
15	2,36	10,94	2,22	10,76
16	2,51	11,67	2,37	11,47
18	-	-	2,66	12,91

## Resultados do Abaqus e do Ensaio 1

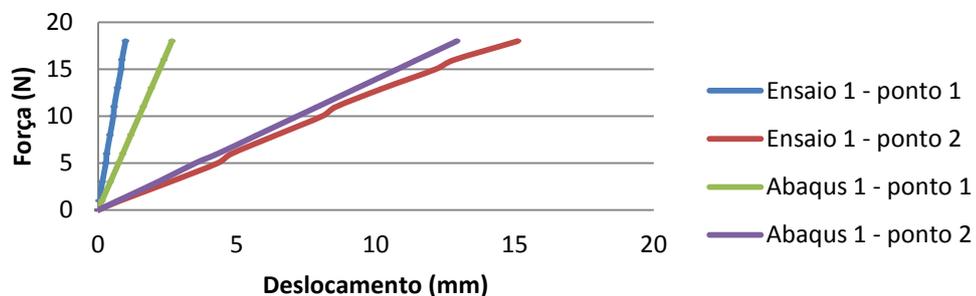


Figura 91 - Gráfico com os resultados do terceiro ensaio, com a Pá do Remo-2 em posição normal e da respectiva simulação no Abaqus

Tabela 23 -- Diferença em % dos valores dos deslocamentos obtidos no Ensaio 1 e no Abaqus 1

Ensaio 1						
Peso (N)	Ponto 1 (mm)			Ponto 2 (mm)		
	Abaqus	Ensaio	%	Abaqus	Ensaio	%
0	0	0	0,0%	0	0	0,0%
1	0,16	0,1	37,5%	0,73	1,04	29,8%
6	0,94	0,58	38,3%	4,38	6,73	34,9%
8	1,26	0,8	36,5%	5,84	9,45	38,2%
10	1,57	1,01	35,7%	7,3	12,38	41,0%
11	1,73	1,09	37,0%	8,03	13,49	40,5%
13	2,04	1,5	26,5%	9,48	17,02	44,3%

Tabela 24 - Diferença em percentagem dos valores obtidos no Ensaio 2 e no Abaqus 2

Ensaio 2						
Peso (N)	Ponto 1 (mm)			Ponto 2 (mm)		
	Abaqus	Ensaio	%	Abaqus	Ensaio	%
0	0	0	0	0	0	0
1	0,16	0,09	43,8%	0,73	0,86	15,1%
3	0,47	0,34	27,7%	2,19	3,31	33,8%
5	0,78	0,6	23,1%	3,65	5,73	36,3%
6	0,94	0,69	26,6%	4,39	6,57	33,2%
8	1,26	0,95	24,6%	5,83	8,88	34,3%
10	1,57	1,2	23,6%	7,3	11,27	35,2%
11	1,72	1,3	24,4%	8,02	12,13	33,9%
13	2,04	1,55	24,0%	9,48	14,46	34,4%
15	2,36	1,82	22,9%	10,94	17,17	36,3%
16	2,51	1,9	24,3%	11,67	17,92	34,9%

Tabela 25 - Diferença em percentagem dos valores obtidos no Ensaio 3 e no Abaqus 3

Ensaio 3						
Peso (N)	Ponto 1 (mm)			Ponto 2 (mm)		
	Abaqus	Ensaio	%	Abaqus	Ensaio	%
0	0	0	0	0	0	0
1	0,14	0,04	71,4%	0,71	0,8	11,3%
3	0,44	0,15	65,9%	2,15	2,59	17,0%
5	0,74	0,28	62,2%	3,5	4,3	18,6%
6	0,889	0,31	65,1%	4,3	4,8	10,4%
8	1,18	0,43	63,6%	5,73	6,42	10,7%
10	1,48	0,55	62,8%	7,17	8,06	11,0%
11	1,63	0,58	64,4%	7,89	8,56	7,8%
13	1,92	0,7	63,5%	9,32	10,28	9,3%
15	2,22	0,83	62,6%	10,76	12,14	11,4%
16	2,37	0,86	63,7%	11,47	12,81	10,5%
18	2,66	0,99	62,8%	12,91	15,1	14,5%

## Resultados do Abaqus entre os primeiros 2 ensaios

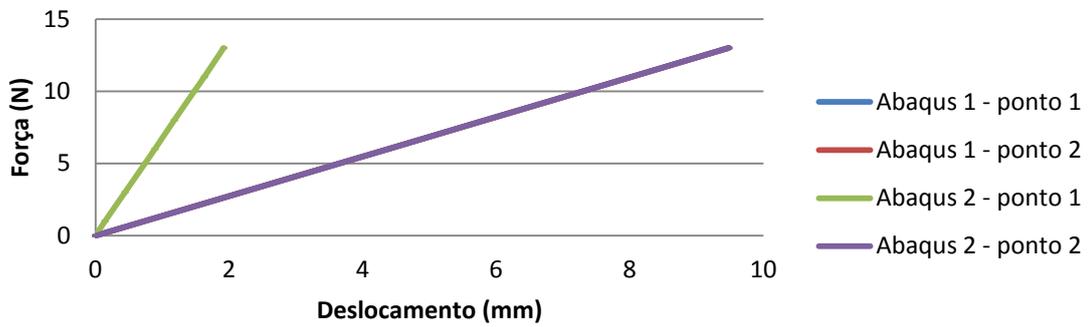


Figura 92 - Gráfico com os deslocamentos das simulações dos Ensaio 1 e 2 no Abaqus

## Resultados entre os primeiros 2 ensaios

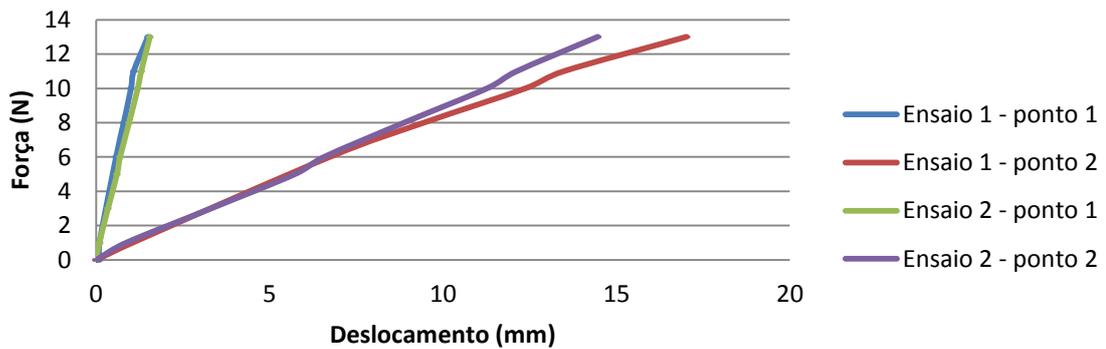


Figura 93 - Gráfico com os deslocamentos resultantes dos Ensaio 1 e 2

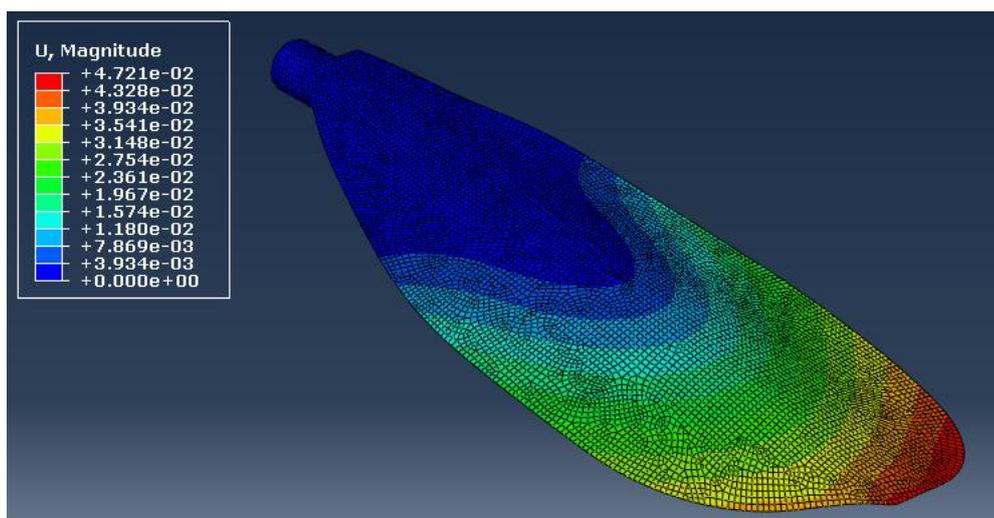


Figura 94 - Imagem com o resultado da simulação do ensaio 3, onde também são visíveis o tamanho dos elementos.

### 4.8.3. Análise de resultados

Em primeiro lugar será feita uma análise dos resultados dos ensaios realizados no laboratório, em seguida dos resultados obtidos pela simulação do programa de elementos finitos Abaqus e por fim será feita uma comparação entre os dois métodos, cujos gráficos se encontram no anexo A. Observando os deslocamentos da Pá 1, na posição normal e na posição invertida consegue-se verificar que para iguais carregamentos, estes exibem valores diferentes de deformação. No caso do ponto 1, os valores de deformação são menores no remo invertido do que no remo na posição normal, em contrapartida quando se observam os resultados do ponto 2 verifica-se o contrário, ou seja as deformações no ponto mais próximo da extremidade são menores no remo que está na posição normal, do que os da pá em posição invertida.

Na simulação do Abaqus não foi possível verificar diferença entre os resultados do Ensaio 1 e do Ensaio 2, como se pode ver pelo gráfico da Figura 89, onde as retas com as deformações dos dois ensaios se encontram totalmente sobrepostas.

Fazendo uma comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados do Abaqus, é possível verificar a existência de uma disparidade nos resultados obtidos. Fazendo uma análise geral dos três ensaios, as deformações dadas pelo programa de elementos finitos são sempre superiores às obtidas em laboratório para o ponto de medição 1, e são sempre inferiores para o ponto de medição 2. No caso do Ensaio 1, a diferença média em percentagem dos resultados em relação ao Ponto 1 é de 34% e do Ponto 2 é de 40%. No Ensaio 2, que corresponde ao caso em que a força é aplicada em sentido contrário, a diferença entre os resultados das duas análises diminui sendo de 24% para o Ponto 1 e de 34% para o Ponto 2. Para o Ensaio 3, o caso do cabo mais curto, a diferença de resultados no Ponto 1 é de 63% e no Ponto 2 de 12%.

## 5. Conclusões e Futuros Desenvolvimentos

Este capítulo apresenta as conclusões mais relevantes em relação aos vários tipos de ensaios e simulações realizadas ao material compósito analisado, bem como algumas propostas de desenvolvimento futuro que possibilitem dar continuidade a este trabalho e permitam a obtenção mais completa das características mecânicas de painéis de material compósito com fibra de basalto.

### 5.1. Conclusões Finais

No trabalho desenvolvido foram obtidas algumas das propriedades mecânicas de um compósito de basalto específico, fabricado por RTM e HLU. De todo este trabalho experimental podem ser retiradas, desde já, algumas conclusões, as quais serão seguidamente enunciadas:

O ensaio não destrutivo por varrimento de ultrassons permite a deteção de zonas do compósito onde não existe uma distribuição uniforme de fibras na espessura do compósito, provocada por uma concentração de resina entre duas camadas de fibra.

Os resultados obtidos no ensaio de tração encontram-se em linha com os obtidos pela utilização da regra das misturas, apresentando respetivamente os valores de 14.3GPa e 14,5GPa, mostrando assim uma boa correlação da regra das misturas nesta situação.

O facto do valor apresentado, na direção 2 da roseta colocada no provete 62, durante o ensaio de corte por guias se ter mantido praticamente inalterado, atesta o bom dimensionamento e a fiabilidade do dispositivo de fixação desenvolvido para a realização deste tipo de ensaio.

Pelo facto de terem sido feitos dois ensaios de corte ao compósito, foi possível obter o módulo de corte a partir duas origens diferentes. Comparando os dois resultados, verifica-se que o módulo de corte do ensaio de tração às fibras na direção  $\pm 45^\circ$  deu um resultado mais elevado, 2.7GPa, enquanto que pelo ensaio de corte com guias o resultado foi de 2.3GPa.

A existência de demasiadas irregularidades e variações na espessura do componente fabricado (pá de remo), assim como a concentração de resina nas zonas adjacentes ao cabo, não permite uma análise realista da estrutura da pá do remo por elementos finitos. Este aspeto deverá ser analisado em maior detalhe em trabalhos futuros, quer sob o ponto de vista computacional na forma de contemplar a possibilidade de excesso de resina em zonas de transição entre superfícies do componente, que no controlo de fabrico do componente de forma a evitar esses mesmos excessos de resina. Do ponto de vista laboratorial é importante o conhecimento mais aprofundado das técnicas que permitam controlar as discrepâncias observadas.

Foi possível constatar a dificuldade de controlo efetivo do processo de fabrico por RTM e aferir a influência que tem nas propriedades das placas de compósitos. Foi possível verificar que os provetes provenientes da mesma placa apresentavam valores mais próximos entre si, mesmo tendo em conta que todos eles tinham sido fabricados seguindo o mesmo procedimento e utilizando materiais da mesma origem. Novamente, apenas com procedimentos e experiência laboratorial será possível melhorar os resultados, conduzindo à afinação das técnicas envolvidas.

Verificou-se, comparando os resultados das placas 1 e 2, que a existência de uma concentração de resina no interior da placa foi mais prejudicial para o comportamento mecânico do compósito do que a que a existência de uma concentração de resina equivalente na periferia da placa. Apenas no ensaio de flexão a placa 2 mostrou melhor desempenho, pelo facto das fibras se encontrarem na periferia da placa, zonas onde as tensões axiais de flexão são maiores.

## 5.2. Propostas de Desenvolvimento Futuro

Com o desfecho desta tese é de interesse referir certas perspectivas de desenvolvimento futuro, que com o conjunto de resultados aqui adquiridos permitiria obter uma caracterização mais completa das fibras de basalto como elemento estrutural de um material compósito. Dito isto sugerem-se alguns estudos considerados de interesse para a divulgação das potencialidades desta fibra em componentes industriais.

A realização de ensaios de modo a obter as propriedades próprias da fibra utilizada, nomeadamente o valor do Módulo de Elasticidade. poder desta forma pode-se fazer uma análise mais realista da aplicação da regra das misturas com os dados referentes ao material utilizado.

Será interessante constatar a diferença do comportamento destas fibras num compósito, mantendo o número de camadas, mas com alinhamentos diferentes. Através da comparação com os resultados já obtidos, pode-se obter a diferença dos resultados que a mudança de alinhamentos provoca na resposta estrutural que o compósito dá aos diferentes tipos de esforços.

A criação de modelos numéricos recorrendo a formas mais elementares, que permitam uma comparação mais simples e exata dos resultados experimentais e computacionais e possibilitem a construção de uma base de partida robusta para o estudo deste tipo de compósito. Após a construção destes primeiros modelos, será possível distinguir em formas mais complexas quais os fenómenos resultantes do comportamento típico do compósito dos restantes fenómenos.

Visto que o processo de fabricação dos compósitos influencia muito as suas propriedades mecânicas, seria interessante a produção de compósitos usando a mesma matriz com fibras diferentes, através do processo de RTM, no sentido de se poder comparar as características dos diferentes compósitos obtidos, diminuindo ao máximo a interferência do processo nos resultados. Neste caso a comparação com compósitos de fibra de vidro e de basalto, seria mais interessante devido às áreas comuns de aplicação das duas fibras. Este processo deverá garantir a repetibilidade dos resultados, pelo que serão necessárias muitas horas de trabalho laboratorial, em condições controladas. Neste aspeto deverão ser definidos os procedimentos a cumprir na produção dos provetes em laboratório, desde o acondicionamento dos materiais (fibras e resinas), seu

manuseamento e técnica de produção. A realidade atual tem, em vários aspetos, pouco controlo o que pode condicionar alguns dos resultados obtidos nos ensaios.

Por se tratar de um material que apresenta atributos do ponto de vista da segurança ambiental, seria interessante combinar estas fibras com bio resinas já existentes, e até fazer a sua aplicação numa estrutura sandwich utilizando um núcleo de um material renovável como, por exemplo, a cortiça ou uma estrutura em favo de abelha, de fibras de papel ou madeira. Desta forma, o objetivo será obter um compósito em que quer as fibras quer as resinas tenham uma origem “natural” acentuada. Nesta sentido será também muito importante o estudo da possível reutilização destes elementos após o fim de vida do componente, aumentando o efeito de sustentabilidade ambiental.



## Referências

- [1] Ellyard, D.; (2010) Putting it together - Science and Technology of Composite Materials. Disponível em "<http://www.science.org.au>" (consultado em Outubro de 2012).
- [2] Ryan, V.; (2001) Composite Materials - Reinforced Concrete. Disponível em "<http://www.technologystudent.com>" (consultado em Maio de 2013).
- [3] Composites. Disponível em "<http://www.pslc.ws>" (consultado Maio de 2013).
- [4] Black, S.; (2009) Composites employed for thermal insulation in space observatories. Disponível em "<http://www.compositesworld.com>" (consultado em Maio de 2013).
- [5] Composite Fillers and Reinforcements Information. Disponível em "<http://www.globalspec.com>" (consultado em Outubro de 2012).
- [6] Introduction to Composite Materials. (consultado em Outubro de 2012).
- [7] Types of Fiber Reinforcement. Disponível em "<http://www.fibermaxcomposites.com>" (consultado em Outubro de 2012).
- [8] "What are composites all about?" Disponível em "<http://www.spencercomposites.com>" (consultado em Outubro de 2012).
- [9] Richardson, T.; (1978) Composites: A Design Guide. Industrial Press Inc., New York.
- [10] Fridlyander, I. N.; Shevchenko, V. Ya.; Barinov S. M.; (1992) Ceramic composite materials.
- [11] Iuliano, L.; Settineri, L.; e Gatto, A.; (1998) "High-speed turning experiments on metal matrix composites," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 29, no. 12, pp. 1501-1509.
- [12] Watt, W. e Perov, B. V.; (1985) Handbook of Composites, Vol. 1: Strong Fibers. Amsterdam: North-Holland.
- [13] Evans, C. C.; (1972) Whiskers. Mills & Boon Limited, London.
- [14] Shojaei, H.; Farrahinia, S. M. R.; Pishvaie; (2010) "Effect of system of initiators on the process cycle of nonisothermal resin transfer molding – Numerical investigation," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 41, no. 1, pp. 138-145, 2010.
- [15] Lacovara B.; (1995) "Considering Resin Transfer Molding? Here is what you need to know...", Composites Fabricators Association

[16] Resin Transfer Molding (RTM) Tooling, Disponível em "<http://www.rtmcomposites.com>" (consultado em Outubro 2012)

[17] Open Molding, Disponível em "<http://www.moldedfiberglass.com>" (consultado em Maio de 2013)

[18] Compression and Transfer Molding, Disponível em "<http://www.sinotech.com>" (consultado em Maio de 2013)

[19] Vacuum Infusion Processing (VIP), RTM-lite (Resin Infusion, VARTM, SCRIMP), Disponível em "<http://www.moldedfiberglass.com>" (consultado em Maio de 2013)

[20] Silva L.V.; (2011) "Compositos Avançados epoxy/fibra de vidro com elevado teor de nanotubos de carbono", Porto Alegre

[21] Restrepo, O.; Hsiao, K.-T.; Rodriguez, A.; (2007) "Development of adaptive injection flow rate and pressure control algorithms for resin transfer molding," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 38, no. 6, pp. 1547-1568.

[22] Resin Transfer Molding, Disponível em "<http://www.flickr.com>" (consultado em Outubro de 2012)

[23] Resin Transfer Moulding, Disponível em "<http://www.keim-fasertechnik.de>" (consultado em Maio de 2013)

[24] Silva A.T.P.A.M.M.; (2011) "Desenvolvimento e montagem de um gerador eólico com pás compósitas", Projeto de Graduação, Universidade de Brasília, Brasília

[25] Hand lay-up technique, Disponível em "<http://www.fassmer.de>" (consultado em Maio de 2013)

[26] Rice B.L. ; (2004) "Fabrication Process Assignment",

[27] Hand Lay-Up, Disponível em "<http://www.wacker.com>" (consultado em Dezembro de 2012)

[28] Derivation of the rule of mixtures and inverse rule of mixtures, Disponível em "<http://www.doitpoms.ac.uk>" (consultado em Maio de 2013)

[29] McCabe J.F., Walls A.W.G. "Applied Dental Materials", 9th Edition, Blackwell Munksgaard

[30] Lopes N.M.A.; (2009) "Análise e caracterização da degradação de compósitos reforçados com fibras de juta e fibra de vidro em ambiente controlado (temperatura & humidade)", Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico

[31] Ross A.; (2006), Basalt Fibers: Alternative To Glass? , Disponível em "<http://www.compositesworld.com>" (consultado em Outubro 2012)

[32] Nolf J.; (2003) Basalt Fibers Fire Blocking Textiles "<http://www.basaltex.com>"

[33] Basalt Fiber Woven Fabric. Disponível em " <http://www.wallean.com>" (consultado em Maio 2013)

[34] Lopresto, V.; Leone, C.; De Iorio, I.; (2011) "Mechanical characterisation of basalt fiber reinforced plastic," Composites Part B: Engineering, vol. 42, no. 4, pp. 717-723.

[35] McKinnery M. , "The History of Fiberglass". Disponível em "<http://www.classicglasspars.com>" (consultado em Maio de 2013)

[36] Johnson T. "The Evolution of Lightweight Composite Materials", Disponível em " <http://composite.about.com>" (consultado em Maio de 2013)

[37] Torre eólica - Construção. Disponível em " <http://www.taringa.pt>" (consultado em Maio de 2013)

[38] Advanced Composites for Infrastructures Repairs. Disponível em "<http://www.hj3.com>" (consultado em Dezembro de 2012)

[39] Peak inside the Lamborghini factory. Disponível em " <http://supercar.menexpert.net>" " (consultado em Maio de 2013)

[40] How is Carbon Fiber Made. Disponível em " <http://www.zoltek.com>" (consultado em Dezembro de 2012)

[41] Pavlovski, D.; Mislavsky, B. e Antonov, A. (2007) "CNG cylinder manufacturers test basalt fiber", Reinforced Plastics, vol. 51, no. 4, pp. 36-39.

[42] Sim, J.; Park, C.; Moon, D. Y.; (2005) "Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures," Composites Part B: Engineering, vol. 36, no. 6–7, pp. 504-512.

[43] Vek B. (2011) Screening LCA of Basalt fibers versus glass fibers . Disponível em "<http://www.basfiber.com>" (consultado em Outubro de 2012)

[44] Sarasini F. (2013) "Effect of basalt fiber hybridization on the impact behavior under low impact velocity of glass/basalt woven fabric/epoxy resin composites", Institute for Composite and Biomedical Materials

[45] Cripps D.; Resin Types. Disponível em " <http://www.netcomposites.com>" ( consultado em Outubro 2012)

[46] Morais A.M.B. (2012) "Fabrico e Utilização Estrutural de Laminados de Materiais Compósitos", Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

[47] Scientific Principles of Composites. Disponível em "<http://www.asminternational.org>" (consultado em Outubro de 2012)

[48] Haq M.; Burgueño R.; (2008) " Hybrid bio-based composites from blends of unsaturated polyester and soybean oil reinforced with nanoclay and natural fibers", University of Guelph

[49] Dotan A.; (2008) " Bioplastics: Durable Renewable Sources Polymers". Disponível em "<http://www.plastic.org.il>" (consultado em Dezembro 2012)

[50] Janick J.; Whipkey A.; "Industrial Hemp: A New Crop with New Uses for North America" ASHS Press, Alexandria, VA

[51] Petras A.; (1998), "Design of Sandwich Structures", Robinson College, Cambridge

[52] ALLEN, H. G.; (1969) Analysis and Design of Structural Sandwich Panels, Oxford New York, Pergamon Press

[53] Carvalho P.M.R. (2008), "Análise do comportamento mecânico e identificação do tipo de falha em estruturas sandwich com núcleos de cortiça", Tese de Mestrado, IST/UTL, Lisboa.

[54] Sandwich Composites. Disponível em "<http://www.angelfire.com>" (consultado em Outubro de 2012)

[55] J. M. Davies, (2001) Lightweight Sandwich Construction, Blackwell Publishing, 2001.

[56] Soares B. A. R.S. (2007) " Estruturas Sandwich com Utilização de Núcleos de Cortiça", Tese de Mestrado, IST/UTL, Lisboa.

[57] Kweon, J.H.; Jung, J.W.; Kim, T.H.; (2006) "Failure of carbon composite-to-aluminum joints with combined mechanical fastening and adhesive bonding," *Composite Structures*, vol. 75, no. 1–4, pp. 192-198.

[58] ASTM D 790 (1970) Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. American Society for Testing and Materials Annual Book of ASTM Standards.

[59] ASTM D 4255/D 4255M (2002) Standard Test Method for In-Plane Shear Properties of Polymer Matrix Composite Materials by the Rail Shear Method. American Society for Testing and Materials Annual Book of ASTM Standards.

[60] ASTM D 3039 (2002) Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. American Society for Testing and Materials Annual Book of ASTM Standards.

[61] ASTM D 3518 (2001) Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of  $\pm 45^\circ$  Laminate. American Society for Testing and Materials Annual Book of ASTM Standards.

[62] ASTM D 3410 (2003) Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading. American Society for Testing and Materials Annual Book of ASTM Standards.



## Anexos

### Anexo A - Gráficos comparativos entre os resultados dos ensaios e da simulação em Abaqus.

#### Resultados do Abaqus e do Ensaio 1

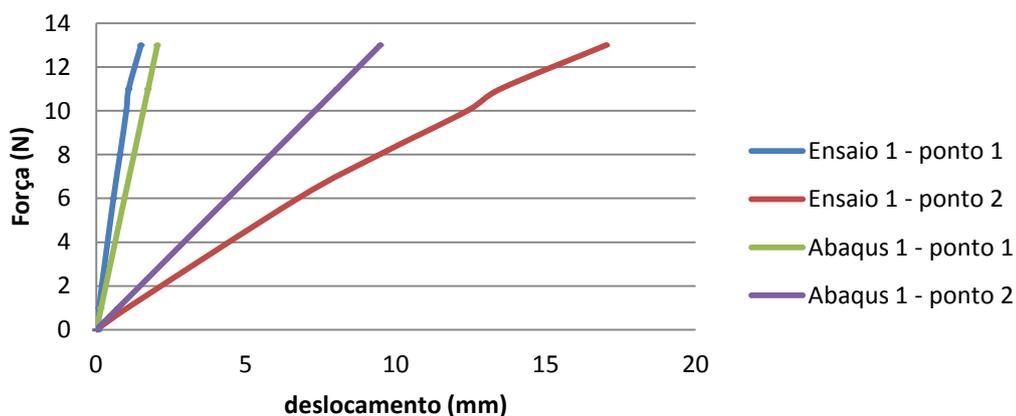


Figura 95 - Gráfico com os resultados do primeiro ensaio, com a Pá do Remo-1 na posição invertida e da respectiva simulação no Abaqus

#### Resultados do Abaqus e do Ensaio - 2

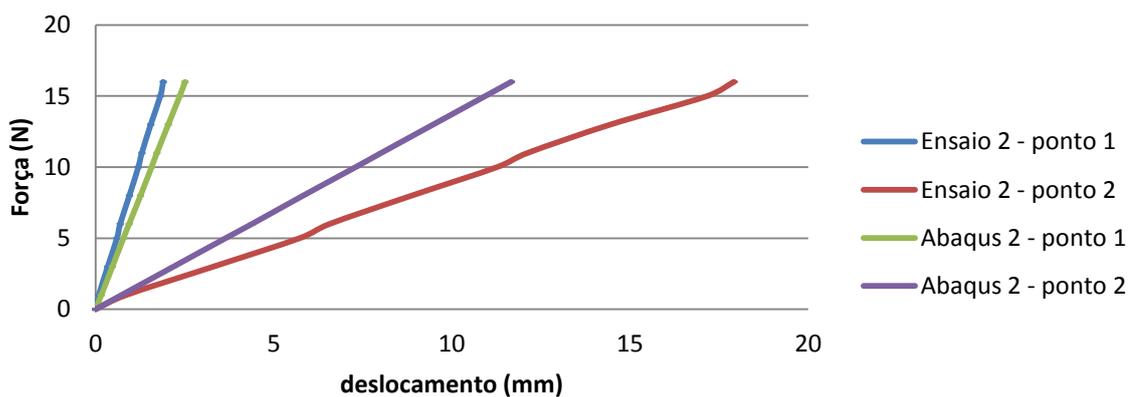


Figura 96 - Gráfico com os resultados do segundo ensaio, com a Pá do Remo-1 em posição normal e da respectiva simulação no Abaqus

## Anexo B - Gráficos das curvas resultantes dos ensaios de flexão em três pontos.

### Curva tensão deflexão

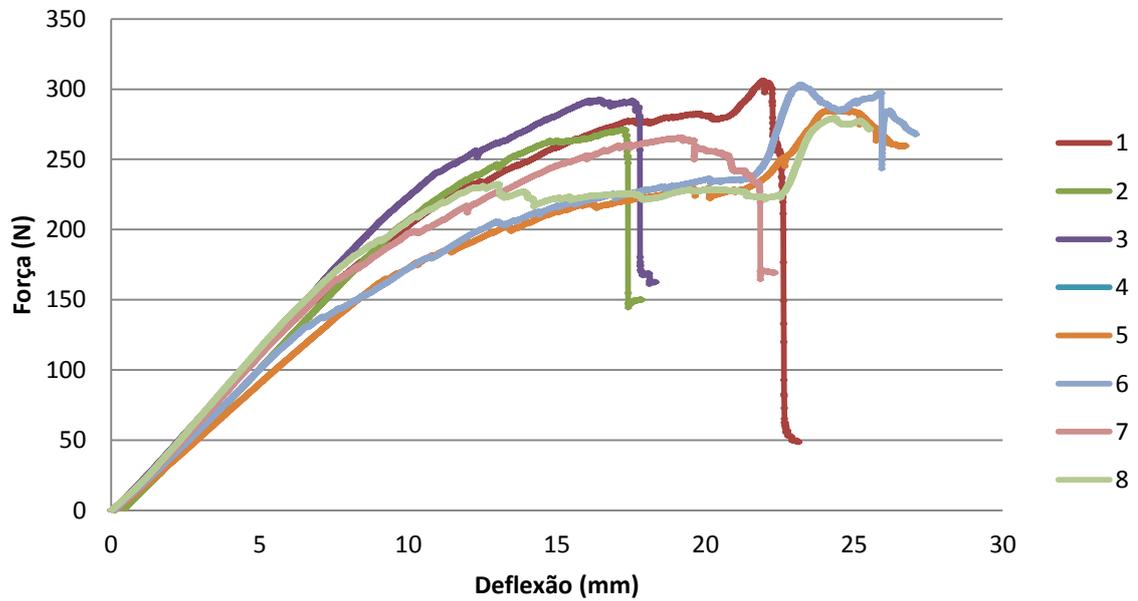


Figura 97 - Gráfico da curva de força deflexão dos provetes com alinhamento 0/90

### Curva tensão deflexão

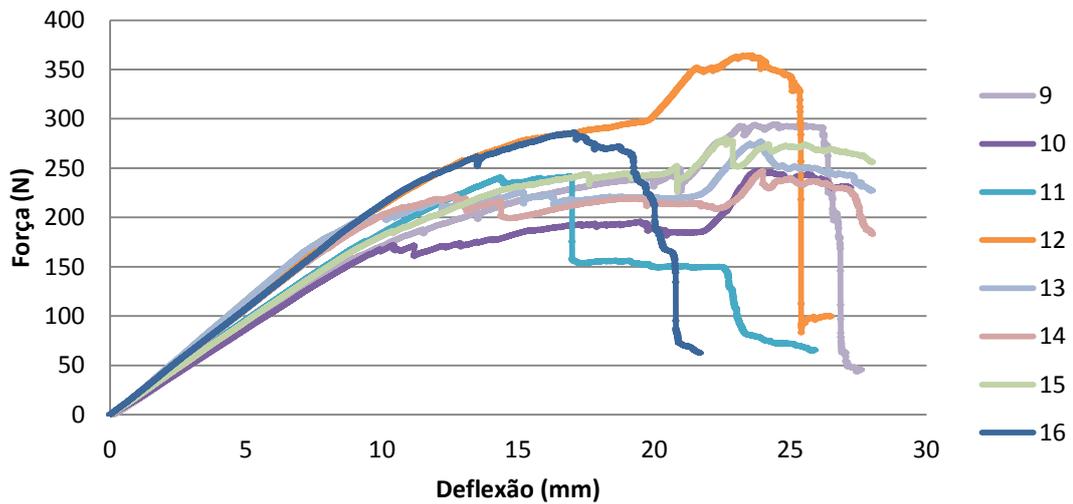


Figura 98 - Gráfico da curva de tensão deflexão dos provetes com alinhamento 0/90

## Anexo C - Gráficos das curvas resultantes dos ensaios de Compressão

### Curva força deslocamento placa 1

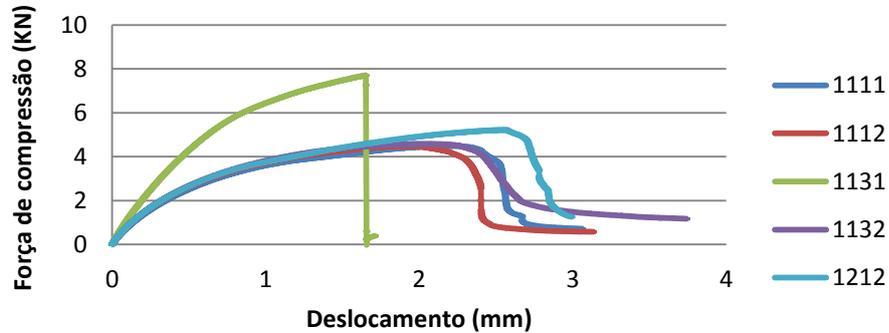


Figura 99 - Gráfico com os resultados do ensaio de tração aos provetes da placa 1

### Curva força deslocamento placa 4

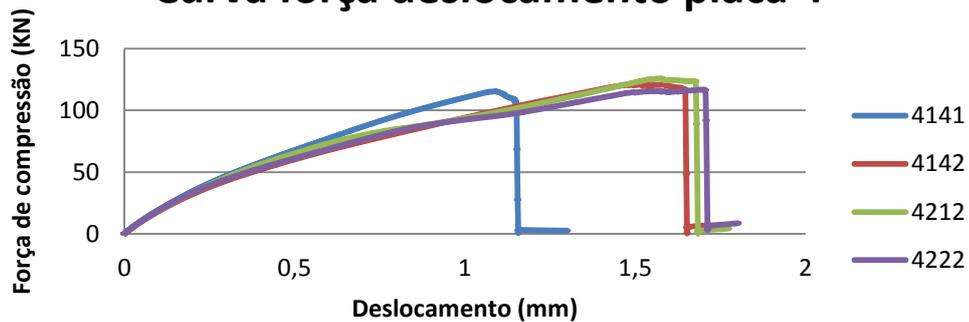


Figura 100 - Gráfico com os resultados do ensaio de tração aos provetes da placa 4

### Curva força deslocamento placa 5

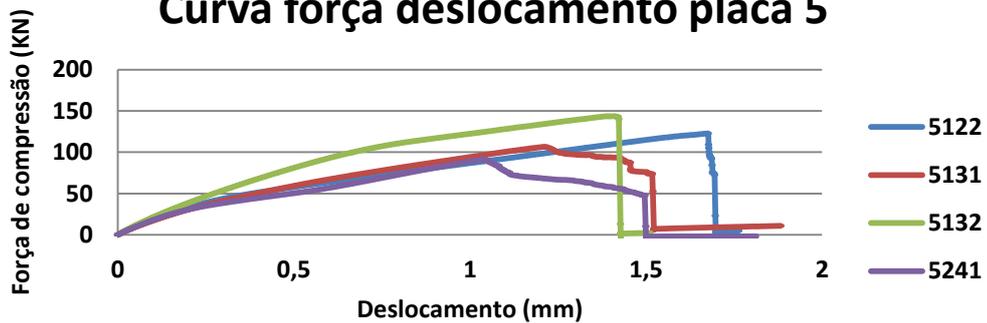


Figura 101 - Gráfico com os resultados do ensaio de tração aos provetes da placa 5

## Anexo D - Gráficos das curvas resultantes dos ensaios de Compressão

### Curva tensão extensão placa 4

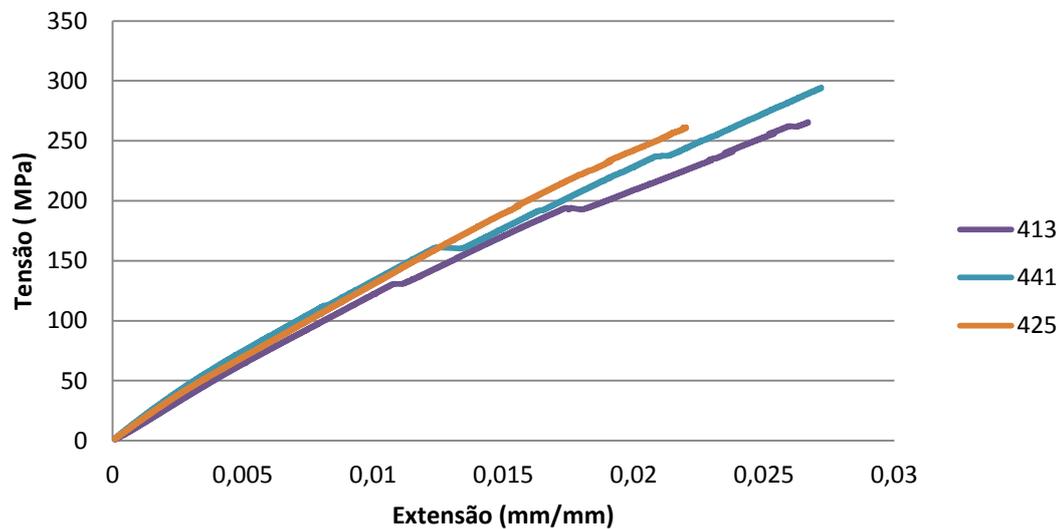


Figura 102 - Gráfico com os resultados do ensaio de tração aos provetes da placa 4

### Curva tensão extensão placa 5

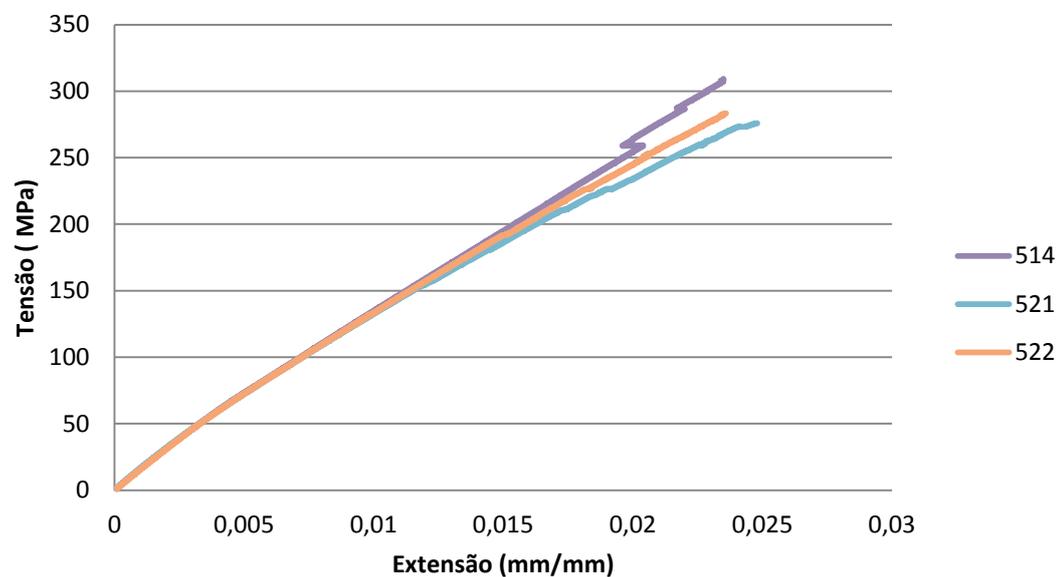


Figura 103 - Gráfico com os resultados do ensaio de tração aos provetes da placa 5

## Anexo E - Folha de dados da Fibra de Basalto



ISO 9001

A Division of FLOCART nv

### Technical Data Sheet

#### Fabric Type BAS 220.1270.T

Woven fabric for composite applications, is entirely made of 100% BCF (basalt continuous filament) direct (unassembled) roving.

The first code 220 is the surface density in g/m<sup>2</sup>

The second code 1270 is the width of the fabric in mm.

The third code indicates the weave.

Property	Standard/Method	Unit	Value	Tolerance
<b>Base material</b>				
Density of unsized filament matl		kg/dm <sup>3</sup>	2.67	± 5%
Moisture content of basaltic rock		%	0.1	+ 0.05
Melting point		°C	1350	+ 100
<b>Fabric</b>				
Specific surface weight	ISO 3374:2000	g/m <sup>2</sup>	220	
Weave type			Twill 2/2	
Yarn density/type:				
- warp		ends/cm	7.2	
- weft		ends/cm	7.2	
Width	ISO 5025:1997	mm	1270	-0/+20
Thickness	ISO 4603:1993	mm	0.13	
Sizing type			silane	
Breaking load:	ISO 4606:1995 – Type II			
- warp		N/25mm	>1800	
- weft		N/25mm	>1800	
Continuous temperature range		°C	-250°C – 550°C 1200°C fire barrier	
Moisture content (fabric)	ISO 3344:1997	%	<0.3	
LOI, also sizing content	ISO 1887:1995*	%	0.4 – 0.6	
Combustibility	NF P92-503:1995	M0	Pass	
UV stability	ISO 105-B02		6	
Colour fastness	ISO 1005-BX12		6	

\* after drying according ISO 3344:1997

#### Packaging

Fabric length is approximately 100 lm per roll. Other length on request. Roll tube has internal diameter of 55 mm. Identification label. Standard packing.

#### Product Stability:

BASALTEX™ Products have not been designed for full external exposure conditions and cannot be guaranteed for use in such situations. However, these BASALTEX™ products have considerable tolerance to damp conditions and occasional water immersion. After drying out, the product will give the same level of performance as the original sample.

#### Stability over time:

Said products not being subjected to excessive heat, wear and abrasion, all evidence obtained to date indicates that their performance should not significantly change over a significant period of time. It is the responsibility of the developer of the end-product, finished device or system to test its performance in the end-application.