

# ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DO DANO EM MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

**PEDRO EMANUEL VIANA SILVA**

Outubro de 2016

# **ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DO DANO EM MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA**

Pedro Emanuel Viana da Silva

**2016**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

# **ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DO DANO EM MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA**

Pedro Emanuel Viana da Silva  
1140164

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação de Luís Miguel Pereira Durão.

**2016**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

# JÚRI

## **Presidente**

<Grau Académico e Nome>

<Categoria, Instituição>

## **Orientador**

<Grau Académico e Nome>

<Categoria, Instituição>

## **Co-orientador**

<Grau Académico e Nome>

<Categoria, Instituição>

## **Arguente**

<Grau Académico e Nome>

<Categoria, Instituição>



## AGRADECIMENTOS

A conclusão de uma tese de mestrado marca o fim de uma etapa percorrida ao longo dos últimos dois anos. Apesar das dúvidas e dificuldades que foram surgindo ao longo do caminho, houve um conjunto de pessoas que, direta ou indiretamente, deram o seu contributo para a consecução deste trabalho. Deste modo, gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos:

Ao Prof. Dr. Luís Miguel Pereira Durão por todo o apoio, aconselhamento e orientação que me prestou, de forma incansável, durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. João Emílio Matos e à Prof<sup>ª</sup>. Dra. Stella Abreu pelos conhecimentos que me transmitiram e pelo apoio prestado na realização do trabalho.

Ao Eng. Victor Ribeiro e ao Eng. Arnaldo Pinto pela assistência prestada nas oficinas de Engenharia Mecânica do ISEP, durante a realização dos trabalhos experimentais.

Ao meu primo Daniel Martins e à Ana João Silva pelo apoio prestado durante o processo de tratamento de imagens.

À minha irmã Sílvia Silva pela preciosa ajuda durante a realização dos estudos de estatística e da pesquisa bibliográfica.

Às amigas Cristiana Esteves e Catarina Elias pelo contributo prestado na revisão deste trabalho.

Aos amigos e colegas Miguel Brito e Hélder Pinto, pelo apoio, companhia, convívio e boa disposição, não só durante a realização deste trabalho como durante todo o mestrado.

Aos amigos Ana Rita Elias, Samuel Cardoso e Leonardo Fonte por todo o apoio e toda a força que me transmitiram ao longo dos últimos dois anos.

Aos meus pais, pelo apoio e incentivo constantes.





## PALAVRAS CHAVE

Furação, Delaminação, Carbono epóxido, Radiografia, Área de dano, Tratamento de imagem, Ensaio Flexão em três pontos, Ensaio *Pin-Bearing*, Estatística

## RESUMO

Os materiais compósitos têm assumido uma importância crescente na engenharia e o seu uso é cada vez mais comum. Características importantes destes materiais, como as elevadas propriedades mecânicas, associadas a maior leveza, têm permitido uma vasta aplicação em áreas tão distintas como a medicina, o desporto, a aeronáutica, a defesa ou a indústria automóvel.

A maioria dos compósitos é fabricada sob a forma de peças funcionais, prontas ou quase prontas a serem utilizadas. Contudo, o seu uso ainda não prescinde completamente de processos de maquinaria adicionais, com particular destaque para a furação. Com efeito, a furação de materiais compósitos é ainda um processo muito frequente e, apesar de vários progressos feitos nesta área, deste processo resultam danos nos materiais compósitos cujos efeitos têm de ser tidos em conta. Entre os principais defeitos decorrentes da furação, destaca-se o fenómeno da delaminação.

O objetivo deste estudo foi o de avaliar a magnitude da área danificada por furação em carbono epóxido, um material compósito de matriz polimérica, e de que forma os danos decorrentes do processo de furação afetavam as propriedades mecânicas do material.

Foram fabricados 35 provetes em carbono epóxido e procedeu-se à furação com cinco geometrias diferentes de broca – broca Helicoidal, broca *Dagger*, broca *Brad*, broca *High Speed Steel* e broca Helicoidal com pré-furação – a fim de se obterem diversas áreas de dano. Os provetes foram radiografados e das imagens resultantes foi possível calcular a área de dano causado por furação, com recurso a *software* de edição de imagem. No final, os provetes foram submetidos a dois ensaios mecânicos: Flexão em 3 pontos e *Pin-Bearing*. As áreas de dano determinadas foram relacionadas com a perda de propriedades mecânicas verificadas durante os ensaios com recurso a ferramentas estatísticas.

Os resultados obtidos permitiram estabelecer e modelar relações entre a área danificada durante a furação e a resistência mecânica do material. A resistência à flexão não apresenta grande variabilidade em função da área de dano. Já a resistência à compressão diminui com o incremento da área de dano.



**KEYWORDS**

*Drilling, Delamination, Carbon epoxy, Radiography, Damage area, Image Editing, Three point flexural test, Pin-Bearing Test, Statistics*

**ABSTRACT**

*Composite materials have been assuming a growing importance in engineering and their use is becoming more common. Important characteristics of these materials, such as high mechanical properties along with lightness, have allowed a wide application in distinct areas like medicine, sports, aeronautics, defense or automotive industry.*

*The majority of the composite materials is produced in the form of functional parts, in a net or near-net shape. However, their use does not fully excludes yet the need of additional machining processes, particularly the drilling process. So, the drilling of composite materials remains a very frequent process and, despite several advances in this area, this process causes damages to the composite materials whose effects must be taken in consideration. Among the main problems resulting from drilling, delamination is one of the most important.*

*The objective of this study was to evaluate the magnitude of the area damaged by drilling in carbon epoxy, a composite material with polymeric matrix, and how does the resulting damages of the drilling process affected the mechanical properties of the material.*

*There were manufactured 35 test subjects in carbon epoxy and they were drilled with five different drill geometries – Twist drill, Dagger Drill, Brad drill, High Speed Steel drill and Twist drill with pre-drilling - to obtain different damage areas. The test subjects were then radiographed and from the resulting images it was possible to calculate the damaged area caused by drilling, using an image editing software. Finally, the test subjects went under two mechanical tests: Three point flexural test and Pin-Bearing test. The determined damaged areas were related to the loss of mechanical properties verified during the tests, using statistical tools.*

*The achieved results allowed to establish and model the relations between the damaged area during drilling and the material's mechanical resistance. The bending resistance does not vary greatly with the damage area. In the other hand, the bearing resistance decreases with the increase of the damage area.*



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

Al	Alumínio
a. C	antes de Cristo
BRA	Broca Brad
DAG	Broca Dagger
d. C.	depois de Cristo
EUA	Estados Unidos da América
GPL	Gás de Petróleo Liquefeito
HEL	Broca Helicoidal
HM	High Modulus
HPF	Broca Helicoidal com Pré-Furação
HS	High Strength
HSS	Broca High Speed Steel
IM	Intermediate Modulus
LM	Low Modulus
PA	Poliamida
PAN	Poliacrilonitrilo
PC	Policarbonato
PP	Polipropileno
PRFV	Polímeros Reforçados com Fibra de Vidro
UHM	Ultra High Modulus
.BMP	Windows Bitmap

### Lista de Unidades

mm/rot	Milímetros por rotação
pixels	Pixels ok
rpm	Rotações por minuto

### Lista de Símbolos

$(A_{avg})$	Área nominal do furo
$(A_{max})$	Área do círculo correspondente ao diâmetro máximo do dano
$(A_0)$	Área nominal do furo com diâmetro nominal do furo
$(D)$	Rigidez à flexão
$(D')$	Transformação da rigidez à flexão
$(D_e)$	Diâmetro equivalente
$(D_{rat})$	Damage ratio
$(D_{mar})$	Área de dano na periferia do furo
$(D_{max})$	Diâmetro máximo do dano
$(D_0)$	Diâmetro nominal do furo
$(E)$	Módulo de elasticidade ou de Young
$(F_{ct})$	Força crítica
$(F_d)$	Fator de delaminação
$(F_{da})$	Fator de delaminação ajustado
$(F_{ed})$	Fator de delaminação equivalente
$(G_{IC})$	Taxa crítica de libertação de energia em modo de fratura do tipo I
$(h)$	Espessura não cortada
$(R^2)$	Coefficiente de determinação
$(S_{y.x})$	Erro padrão da regressão linear
$(T_g)$	Temperatura de transição vítrea
$(T_m)$	Temperatura de fusão
$(\alpha)$	Ponderação do peso da relação entre diâmetros
$(\beta)$	Ponderação do peso da relação entre áreas
$(\nu)$	Coefficiente de Poisson
$(\rho)$	Densidade
$(\sigma_u)$	Resistência à tração

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – O <i>EUROFIGHTER TYPHOON</i> TEM GRANDE PARTE DAS SUAS ASAS E FUSELAGEM CONSTRUÍDAS EM MATERIAIS COMPÓSITOS DE FIBRAS DE CARBONO. [42] - [43]	27
FIGURA 2 - A BOTIJA DE GÁS PLUMA, MUITO MAIS LEVE DO QUE AS BOTIJAS TRADICIONAIS, É FABRICADA UTILIZANDO UM COMPÓSITO TERMOPLÁSTICO COM FIBRA DE VIDRO, REVESTIDO POR UMA FINA CAMADA DE AÇO. [44]	28
FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA PRANCHA DE <i>SURF</i> CONSTRUÍDA EM MATERIAIS COMPÓSITOS. [45]	28
FIGURA 4 – <i>BOEING 787 DREAMLINER</i> DA COMPANHIA AÉREA <i>ALL NIPPON AIRWAYS</i> . [46]	30
FIGURA 5 – A BLINDAGEM <i>CHOBHAM</i> DO TANQUE BRITÂNICO <i>CHALLENGER 2</i> É UM COMPÓSITO DE MATRIZ METÁLICA E REFORÇO CERÂMICO. [47]	31
FIGURA 6 – CAPACETE EM <i>KEVLAR®</i> UTILIZADO PELAS FORÇAS ESPECIAIS DA POLÍCIA DE ORLANDO, EUA, APÓS SUSTER UM IMPACTO DE BALA, SALVANDO A VIDA AO AGENTE. [48]	35
FIGURA 7 – FABRICO DE UMA PÁ DE TURBINA EÓLICA, EM RESINA DE EPÓXIDO E FIBRA DE VIDRO. [49]	36
FIGURA 8 – PROCESSO DE MOLDAÇÃO POR CONTACTO MANUAL. [7]	37
FIGURA 9 – PROCESSO DE MOLDAÇÃO POR PROJEÇÃO. [7]	38
FIGURA 10 – PROCESSO DE MOLDAÇÃO POR VÁCUO. [7]	38
FIGURA 11 – MOLDAÇÃO POR COMPRESSÃO. [7]	39
FIGURA 12 – PROCESSO DE MOLDAÇÃO POR INJEÇÃO. [7]	40
FIGURA 13 – PROCESSO DE MOLDAÇÃO EM AUTOCLAVE. [7]	40
FIGURA 14 – PROCESSO DE ENROLAMENTO FILAMENTAR, ADAPTADO DE [50].	41
FIGURA 15 – PROCESSO DE PULTRUSÃO. [7]	42
FIGURA 16 – DELAMINAÇÃO DURANTE A FURAÇÃO. TIPO <i>PEEL-UP</i> (A) OU <i>PUSH-OUT</i> (B). [16]	45
FIGURA 17 – MODO DE FRATURA DO TIPO I. [14]	46
FIGURA 18 – DISPOSITIVO DE AMORTECIMENTO DO MOVIMENTO VERTICAL DA BROCA, ADAPTADO DE [25].	47
FIGURA 19 - ESQUEMA DE REMOÇÃO DE MATERIAL E DANO CAUSADO PELA BROCA, ADAPTADO DE [2].	47
FIGURA 20 – DIFERENÇAS NA FURAÇÃO E DELAMINAÇÃO PARA VÁRIOS TIPOS DE BROCAS. [28]	48
FIGURA 21 – ALGUNS TIPOS DE ÂNGULOS DE PONTA DE BROCA. [52]	49
FIGURA 22 – RELAÇÃO ENTRE MECANISMOS DE CORTE E ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS. [14]	49
FIGURA 23 – O MESMO FATOR DE DELAMINAÇÃO PODE CONTER ÁREAS DE DANO MUITO DISTINTAS. [16]	50
FIGURA 24 – CRITÉRIO DE TSAO ET AL. PARA O DIÂMETRO EQUIVALENTE (DE). [3]	51
FIGURA 25 – FURAÇÃO ORBITAL, DESENVOLVIDA PELA <i>NOVATOR®</i> . [14]	52
FIGURA 26 – PLACA QUADRADA DE CARBONO EPÓXIDO <i>T700 – UD REM TAPE</i> EM BRUTO. [14]	56
FIGURA 27 - MESA DE CORTE MANUAL DE SERRA CIRCULAR, MODELO <i>BATISTI MECCANICA DV25</i> .	56
FIGURA 28 – BROCAS UTILIZADAS DURANTE O PROCESSO DE FURAÇÃO.	57
FIGURA 29 – FURADORA <i>MAS VR2</i> .	58



FIGURA 30 - PROVETE 100_5 APÓS O FURO PRÉVIO DA FURAÇÃO TIPO HPF.	58
FIGURA 31 – PROVETE 135_4 APÓS O FURO PRÉVIO DA FURAÇÃO HPF, A 30 MM DA FACE.	59
FIGURA 32 – DANOS RESULTANTES DA FURAÇÃO COM VÁRIOS TIPOS DE BROCA.	60
FIGURA 33 – <i>KODAK 2100 X-RAY SYSTEM</i> .	61
FIGURA 34 – <i>SENSOR RVG 5100</i> .	61
FIGURA 35 – OBTENÇÃO DE UMA RADIOGRAFIA.	62
FIGURA 36 – RADIOGRAFIAS OBTIDAS DOS DIVERSOS FUROS.	62
FIGURA 37 - MÁQUINA DE ENSAIOS <i>SHIMADZU AG-X PLUS</i> .	63
FIGURA 38 - ESQUEMA DO ENSAIO DE FLEXÃO EM 3 PONTOS, VISTA FRONTAL.	64
FIGURA 39 – ESQUEMA DO PROVETE 100 DURANTE O ENSAIO DE FLEXÃO EM 3 PONTOS, VISTA SUPERIOR.	64
FIGURA 40 – PROVETE 100_7 APÓS A REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE FLEXÃO EM 3 PONTOS.	64
FIGURA 41 – ESQUEMA DE UTILIZAÇÃO DOS PROVETES 135 NOS ENSAIOS <i>PIN-BEARING</i> .	66
FIGURA 42 – FORMA E DIMENSÕES DOS PROVETES A UTILIZAR NO ENSAIO <i>PIN-BEARING</i> . [34]	66
FIGURA 43 – ENSAIO <i>PIN-BEARING</i> .	67
FIGURA 44 – PROVETE 135_15 APÓS ENSAIO <i>PIN-BEARING</i> , SENDO VISÍVEL A FRATURA VERTICAL.	67
FIGURA 45 - AMOSTRA DOS CONTORNOS DA ÁREA DANIFICADA.	69
FIGURA 46 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO DE VÁRIOS NÍVEIS DE <i>TRESHOLD</i> , COMPARADOS COM A RADIOGRAFIA ORIGINAL.	70
FIGURA 47 – REGULAÇÃO DO NÍVEL DE <i>TRESHOLD</i> NO <i>GIMP</i> ®.	70
FIGURA 48 – IMAGEM BINÁRIA ANTES DA LIMPEZA DO RÚIDO (ESQUERDA) E DEPOIS (DIREITA).	71
FIGURA 49 – LEVANTAMENTO VOLUMOSO DE FIBRAS APÓS FURO COM BROCA HSS.	72
FIGURA 50 – RECONSTRUÇÃO DO FURO CIRCULAR APLICADO AO FURO DO PROVETE 100_13, FURADO COM BROCA HSS.	72
FIGURA 51 – COLORAÇÃO DA ZONA DO FURO, PARA PERMITIR A CONTAGEM DOS <i>PIXELS</i> .	73
FIGURA 52 – FURO COM BROCA HELICOIDAL, COM DELAMINAÇÃO DE FIBRAS MAS ÁREA DE DANO REDUZIDA.	74
FIGURA 53 – VALORES MÉDIOS DE ÁREA DE DANO E ( $D_{RAT}$ ) POR TIPO DE FURAÇÃO.	79
FIGURA 54 – DISPERSÃO DOS VALORES DA TENSÃO DE ROTURA EM FLEXÃO EM FUNÇÃO DA ÁREA DE DANO.	82
FIGURA 55 – MODELO “PLANALTO” DESCRITIVO DA TENSÃO DE FLEXÃO EM FUNÇÃO DA ÁREA DE DANO.	82
FIGURA 56 - DISPERSÃO DOS VALORES DA TENSÃO DE ROTURA POR COMPRESSÃO <i>PIN-BEARING</i> EM FUNÇÃO DA ÁREA DE DANO.	84
FIGURA 57 – REGRESSÃO LINEAR DESCRITIVA DA RELAÇÃO ENTRE A TENSÃO DE ROTURA POR COMPRESSÃO <i>PIN-BEARING</i> E A ÁREA DE DANO, COM O INTERVALO DE CONFIANÇA ASSINALADO.	84

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – PROPRIEDADES DE ALGUMAS FIBRAS E MATERIAIS, ADAPTADO DE [6].	29
TABELA 2 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ALGUMAS FIBRAS DE VIDRO COMUNS, ADAPTADO DE [6].	33
TABELA 3 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ALGUMAS FIBRAS DE CARBONO, ADAPTADO DE [6].	34
TABELA 4 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ALGUMAS FIBRAS DE ARAMIDA, ADAPTADO DE [6].	35
TABELA 5 – PARÂMETROS DE FURAÇÃO DOS PROVETES 100.	59
TABELA 6 – PARÂMETROS DE FURAÇÃO DOS PROVETES 135.	60
TABELA 7 – RESULTADOS OBTIDOS DURANTE O ENSAIO DE FLEXÃO EM 3 PONTOS.	65
TABELA 8 – RESULTADOS OBTIDOS DURANTE O ENSAIO DE <i>PIN-BEARING</i> .	68
TABELA 9 – ÁREA DE DANO E DELAMINAÇÃO CALCULADAS PARA OS PROVETES 100.	74
TABELA 10 - ÁREA DE DANO E DELAMINAÇÃO CALCULADAS PARA OS PROVETES 135, FUROS A 18 MM DE DISTÂNCIA DA FACE.	75
TABELA 11 - ÁREA DE DANO E DELAMINAÇÃO CALCULADAS PARA OS PROVETES 135, FUROS A 30 MM DE DISTÂNCIA DA FACE.	76
TABELA 12 – MÉDIA, DESVIO PADRÃO E VARIÂNCIA DA ÁREA DE DANO E DO <i>DAMAGE RATIO</i> .	80
TABELA 13 – VALORES DE TENSÃO DE ROTURA EM FLEXÃO E ÁREAS DE DANO CORRESPONDENTES.	81
TABELA 14 - VALORES DE TENSÃO DE ROTURA EM COMPRESSÃO <i>PIN-BEARING</i> E ÁREAS DE DANO CORRESPONDENTES.	83



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
1.1	Âmbito .....	23
1.2	Objetivos .....	23
1.3	Organização da Dissertação.....	24
<b>2</b>	<b>OS MATERIAIS COMPÓSITOS</b>	<b>27</b>
2.1	Matrizes .....	31
2.2	Reforços .....	33
2.3	Processos de Fabrico de Materiais Compósitos .....	36
2.3.1	Moldação por Contacto	37
2.3.2	Moldação por Vácuo	38
2.3.3	Moldação por Compressão	39
2.3.4	Moldação por Injeção	40
2.3.5	Moldação em Autoclave	40
2.3.6	Enrolamento Filamentar	41
2.3.7	Pultrusão	42
2.3.8	Outros Processos de Fabrico	42
2.4	Carbono Epóxico <i>T700 – UD REM TAPE</i> .....	43
2.5	Furação de Materiais Compósitos.....	44
2.5.1	Delaminação	45
2.5.2	Fatores de Delaminação	45
2.5.3	Determinação da Delaminação	50
2.5.4	Novas Técnicas de Furação	52
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>55</b>
3.1	Preparação dos Provetes .....	55
3.1.1	Corte	55

3.1.2	Furação	57
<b>3.2</b>	<b>Radiografias</b> .....	<b>61</b>
<b>3.3</b>	<b>Ensaio Mecânicos</b> .....	<b>63</b>
3.3.1	Flexão em 3 pontos	64
3.3.2	Ensaio <i>Pin-Bearing</i>	66
<b>3.4</b>	<b>Processamento de Imagem</b> .....	<b>69</b>
3.4.1	Treshold e Eliminação de Ruído	69
3.4.2	Reconstrução Circular	72
3.4.3	Quantificação do Dano	73
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES</b>	<b>79</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise e Discussão dos Resultados</b> .....	<b>79</b>
4.1.1	Delaminação por Tipo de Furação	79
4.1.2	Influência da Área de Dano na Flexão	81
4.1.3	Influência da Área de Dano na Compressão <i>Pin-Bearing</i>	83
<b>4.2</b>	<b>Conclusões e Recomendações para Trabalhos Futuros</b> .....	<b>85</b>
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO</b>	<b>89</b>
<b>6</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>97</b>
<b>6.1</b>	<b>Ficha Técnica Carbono Epóxico T700 – UD REM TAPE</b> .....	<b>97</b>
<b>6.2</b>	<b>Diiodometano de AnalaR NORMAPUR</b> .....	<b>98</b>
<b>6.3</b>	<b>Características da Curva Modelo “Planalto”</b> .....	<b>99</b>
<b>6.4</b>	<b>Características da Regressão Linear</b> .....	<b>101</b>

# 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Âmbito

1.2 Objetivos

1.3 Organização da Dissertação



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Âmbito

Os materiais compósitos laminados de matriz polimérica são cada vez mais utilizados em aplicações de grau de exigência crescente, devido a boas propriedades mecânicas como elevada resistência mecânica, resistência ao impacto, elevada rigidez e baixa densidade.

A facilidade de processamento destes materiais, a possibilidade de combinar tipos, frações e orientações de fibras, permite uma grande adaptabilidade para as mais diversas aplicações. Porém, apesar desta facilidade de processamento dos materiais compósitos, do seu fabrico em variadas formas e do progresso de técnicas na área dos adesivos estruturais, ainda é recorrente a necessidade de maquinagem de compósitos, sobretudo a furação, para efetuar ligações. [1]

A furação de materiais compósitos, devido a características muito peculiares destes materiais, é um processo complexo que provoca grave desgaste às ferramentas e pode causar danos no material compósito, impossíveis de reparar e que afetam a as suas propriedades mecânicas.

Uma vez que a furação é, normalmente, dos últimos passos de um processo de montagem, é fácil perceber o forte impacto em termos de custo e tempo que os danos provocados pela furação podem gerar, não só no próprio material compósito mas também em todas as aplicações em que este é utilizado. [2]

Tal facto não tem, contudo, impedido o uso de materiais compósitos. A solução mais recorrente tem sido o dimensionamento das aplicações com fatores de segurança elevados que, no entanto, penalizam o peso final da estrutura. [3]

A presente dissertação surge da necessidade de conhecer e tentar prever com maior exatidão a forma como os danos causados pela furação de materiais compósitos afetam as suas propriedades mecânicas.

## 1.2 Objetivos

Os principais objetivos desta dissertação são:

- Analisar e quantificar a área de dano na periferia de furos efetuados em placas de um material compósito (Carbono Epóxico *T700 – UD REM TAPE*);
- Determinar, através de ensaios mecânicos, a perda de propriedades mecânicas do material nas secções furadas;
- Ao determinar estas duas grandezas pretende-se verificar se estão relacionadas e, em caso afirmativo, como se caracteriza essa relação.



A prossecução dos objetivos principais envolveu um conjunto de métodos e procedimentos tais como:

- Levar a cabo toda a panóplia de procedimentos necessários para conceção e ensaios dos provetes, bem como a obtenção de radiografias dos furos efetuados;
- Recurso a *software* de tratamento de imagem para determinar a área de dano causada pela furação;
- Uso de ferramentas estatísticas para relacionar a área do dano com a perda de propriedades mecânicas;

### 1.3 Organização da Dissertação

A presente dissertação está organizada em 6 capítulos.

No Capítulo 1 é apresentado o trabalho, indicando o seu âmbito, objetivos e organização, servindo de guia para a leitura.

No Capítulo 2 são apresentadas informações relevantes e mais generalistas sobre os materiais compósitos bem como sobre as suas propriedades, aplicações, constituição e fabrico, efetuando-se uma breve apresentação do material compósito utilizado nos trabalhos experimentais realizados. Neste capítulo aborda-se também a temática da maquinagem de materiais compósitos, particularmente a furação, incidindo igualmente na caracterização e quantificação dos danos que esta última pode originar.

No Capítulo 3 começa-se por descrever passo a passo o procedimento experimental seguido, abordando os métodos, materiais e equipamentos utilizados. De seguida, é explicado o processamento de imagem que foi necessário realizar para tornar possível a quantificação do dano causado pela furação.

No Capítulo 4 exibem-se, analisam-se e discutem-se os resultados obtidos, e são expostas as conclusões do trabalho efetuado. Ainda neste capítulo serão apresentadas as limitações encontradas e propostas para futuros estudos.

A dissertação termina com a Bibliografia consultada e Anexos relevantes.

# 2 - OS MATERIAIS COMPÓSITOS

2.1 Matrizes

2.2 Reforços

2.3 Processos de Fabrico de Materiais Compósitos

2.3.1 Moldação por Contacto

2.3.2 Moldação por Vácuo

2.3.3 Moldação por Compressão

2.3.4 Moldação por Injeção

2.3.5 Moldação em Autoclave

2.3.6 Enrolamento Filamentar

2.3.7 Pultrusão

2.3.8 Outros Processos de Fabrico

2.4 Carbono Epóxido *T700 – UD REM TAPE*

2.5 Furação de Materiais Compósitos

2.5.1 Delaminação

2.5.2 Fatores de Delaminação

2.5.3 Determinação da Delaminação

2.5.4 Novas Técnicas de Furação



## 2 Os Materiais Compósitos

O presente capítulo aborda a definição, constituição e classificação dos materiais compósitos, bem como algumas das principais características e utilizações dos mesmos na atualidade e alguns dos seus principais métodos de processamento. O capítulo termina com a temática da furação de compósitos.

Um material compósito é, por definição, um material constituído por dois ou mais materiais diferentes, com propriedades distintas e uma interface clara entre estes materiais. A combinação de materiais visa obter propriedades diferentes dos componentes individuais, potenciando as suas qualidades e mitigando as propriedades menos desejáveis.

A constituição de um material compósito consiste num reforço (fase dispersa), que podem ser fibras, partículas ou outros elementos, que estão dispersos numa matriz (fase contínua) e podem conter aditivos para promover determinadas características. [4]

Há registos documentais e arqueológicos que evidenciam que o uso de materiais compósitos pelo ser humano remonta a tempos muito antigos. A título de exemplo, quando o túmulo de *Tutankamon*, datado do Século XIV a.C., foi descoberto em 1922, foram encontrados arcos em madeira flexível mas cuja zona central, onde o arqueiro agarrava o arco e que estava sujeita a maior flexão, era reforçada com osso animal, aumentando a sua resistência. Este meio de fabrico terá tido origem na Ásia Central e terá chegado ao Egito por via de trocas comerciais e culturais. [39]

No Século XX d.C. o desenvolvimento de novos materiais sintéticos, vulgarmente apelidados de plásticos, com propriedades superiores às das resinas naturais até então utilizadas, permitiu o desenvolvimento de novos materiais compósitos e o seu uso mais generalizado que hoje se verifica. [40]

Os materiais compósitos têm atualmente um vasto leque de aplicações, que passa por áreas como a energia, aeronáutica (**Figura 1**), indústria militar e de defesa, utilidades domésticas (**Figura 2**), indústria automóvel, construção civil, desporto (**Figura 3**) ou construção naval. [41]



Figura 1 – O Eurofighter Typhoon tem grande parte das suas asas e fuselagem construídas em materiais compósitos de fibras de carbono. [42] - [43]



Figura 2 - A botija de gás Pluma, muito mais leve do que as botijas tradicionais, é fabricada utilizando um compósito termoplástico com fibra de vidro, revestido por uma fina camada de aço. [44]

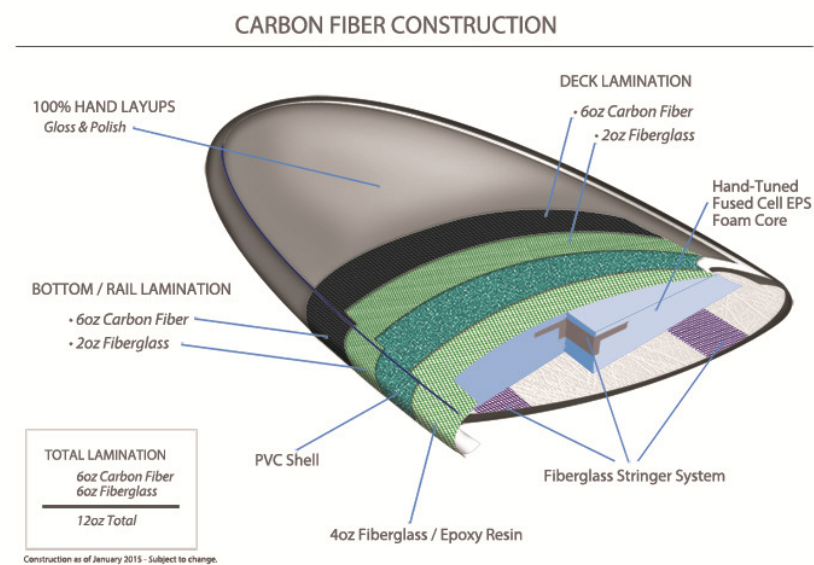


Figura 3 – Representação esquemática de uma prancha de *Surf* construída em materiais compósitos. [45]

Griffith [5] observou que as fibras de vidro possuíam propriedades mecânicas superiores às verificadas na forma maciça. Com efeito, o processo de produção do vidro causa defeitos que afetam as suas propriedades mecânicas. Assim, uma fibra de vidro de pequenas dimensões contém menos defeitos do que um bloco maciço.

O princípio de que certos materiais na forma fibrosa possuem melhores propriedades mecânicas do que na forma maciça pode ser observado na [Tabela 1](#) e demonstra o importante papel das fibras na obtenção de propriedades mecânicas dos materiais compósitos em que são utilizadas. [6]

Tabela 1 – Propriedades de algumas fibras e materiais, adaptado de [6].

Material	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Resistência à Tração $\sigma_u$ (GPa)	Densidade $\rho$ (kg/dm <sup>3</sup> )	Módulo Específico E/ $\rho$	Resistência Específica $\sigma_u/\rho$
<b>Fibras:</b>					
Vidro E	72	3.5	2.54	28.5	1.38
Vidro S	87	4.3	2.49	35	1.7
Carbono	345	2.3	1.85	186	1.24
Boro	393	3.1	2.7	146	1.15
Tungsténio	414	4.2	19.3	21	0.22
Berílio	240	1.3	1.83	131	0.71
Kevlar®49	131	3.6	1.45	90	2.48
<b>Materiais Convencionais:</b>					
Aço	210	0.34 – 2.1	7.8	26.9	0.043 – 0.27
Ligas de Al	70	0.14 – 0.62	2.7	25.9	0.052 – 0.23
Vidro	70	0.7 – 2.1	2.5	28	0.28 – 0.84
Tungsténio	350	1.1 – 4.1	19.3	18.1	0.057 – 0.21
Berílio	300	0.7	1.83	164	0.38

Apesar da importância das fibras no comportamento mecânico dos materiais compósitos, estas não podem, contudo, ser diretamente utilizadas em aplicações de engenharia, devido à sua baixa secção resistente. É a matriz de um compósito que cabe a função de lhe assegurar uma forma estável. O tipo de matriz é um dos aspetos mais relevantes para classificar um material compósito. Desta forma, os materiais compósitos podem ser distinguidos entre materiais de matriz polimérica, metálica, cerâmica ou cimentosa. [6]

Numa outra vertente, também é possível classificar os materiais compósitos com base na constituição dos seus reforços. Nesse caso, um material compósito pode ser reforçado com partículas, com fibras ou podem ser compósitos estruturais. [7]

Existem ainda alguns constrangimentos relativamente ao uso de compósitos, sobretudo em aplicações estruturais i.e., aplicações sujeitas a solicitações mais exigentes. Estes constrangimentos estão normalmente relacionados com custos mas também com questões de fiabilidade e resistência à fadiga. Não obstante, o desenvolvimento dos materiais compósitos e o aperfeiçoamento das técnicas de processamento e maquinagem destes materiais têm permitido progressos significativos e a sua utilização mais tem-se alargado a cada vez mais a aplicações da engenharia. [1]

Um exemplo concreto é o novo *Boeing Dreamliner 787* (Figura 4), construído em 50% por materiais compósitos de matriz polimérica, o que permite uma estrutura mais leve, resultando em maior autonomia e menor consumo de combustível. [46]



Figura 4 – *Boeing 787 Dreamliner* da companhia aérea *All Nippon Airways*. [46]

A crescente exigência em áreas como a indústria automóvel, aeronáutica ou o desporto, entre outras, lança o desafio para que continuem as investigações no desenvolvimento de novos materiais compósitos e melhorias nos já existentes, sempre com o objetivo de atingir melhores *performances* das aplicações em que são utilizados. Nesse sentido, a tendência aponta para um uso cada vez mais generalizado destes materiais, pelo que se torna cada vez mais importante assegurar a qualidade no seu fabrico e maquinagem. [6]

## 2.1 Matrizes

A matriz ou fase contínua de um material compósito assume um conjunto de funções cruciais para o desempenho do mesmo, como absorver deformações ou, conforme referido na secção anterior, assegurar uma forma estável ao compósito, permitindo a sua utilização.

As funções da matriz de um compósito variam consoante os reforços sejam partículas ou fibras. No que concerne aos reforços sob a forma de partículas, a matriz deve tornar o material num só sólido. Já no caso dos reforços fibrosos, a matriz mantém as fibras unidas para que se comportem como um só material, transfere as forças aplicadas a todas as fibras no seu interior, protege-as do contacto entre si e do meio ambiente e retarda o avanço de fraturas. [7]

Os compósitos de matriz cerâmica possuem características importantes como a resistência ao desgaste, à deformação, ao choque térmico e à fadiga, superiores a vários cerâmicos técnicos, pelo que são usados em aplicações exigentes como turbinas de gás de altas temperaturas ou ferramentas de corte para ligas metálicas mais duras. [8]

Já os compósitos de matriz metálica são utilizados numa grande variedade de aplicações em várias indústrias como a automóvel, aeroespacial ou militar (Figura 5). Certas características como a leveza relativamente às ligas metálicas, a resistência à fadiga ou a estabilidade a altas temperaturas fazem com que estes materiais sejam empregues em aplicações como, por exemplo, camisas de cilindros ou bocas de exaustão de motores a jato. [9]



Figura 5 – A blindagem *Chobham* do tanque britânico *Challenger 2* é um compósito de matriz metálica e reforço cerâmico. [47]

Quanto aos compósitos de matriz polimérica, devido à baixa densidade e facilidade de processamento dos polímeros, são dos compósitos mais importantes e atualmente



utilizados em aplicações diversas como próteses, raquetes de ténis ou *winglets* nas asas de aviões comerciais. Estes compósitos conseguem um compromisso entre elevada performance mecânica e maior leveza e durabilidade, que seriam impossíveis de atingir recorrendo a materiais mais tradicionais. Todavia, os polímeros apresentam limites de estabilidade térmica inferiores à generalidade dos metais ou cerâmicos, o que faz com que a temperatura seja um fator importante a ter em consideração no uso dos compósitos de matriz polimérica. [6]

Ainda no âmbito das matrizes poliméricas, importa distinguir entre matrizes de polímeros termoplásticos e matrizes de polímeros termoendurecíveis.

Os polímeros termoplásticos, quando aquecidos até uma determinada temperatura, passam de um estado rígido para um estado mais mole, devido à quebra das suas ligações intermoleculares. Esta temperatura é chamada de temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) e podem inclusive atingir um estado líquido viscoso se se atingir a sua temperatura de fusão ( $T_m$ ). São geralmente mais resistentes ao impacto e possuem maior tenacidade do que os termoendurecíveis. Como exemplos de polímeros termoplásticos podem enunciar-se, entre outros, o Polipropileno (PP), o Policarbonato (PC) ou a Poliamida (PA).

Os polímeros termoendurecíveis, por sua vez, não registam deformações tão vincadas como os termoplásticos quando submetidos a altas temperaturas, apesar de também possuírem ( $T_g$ ). Uma vez aquecidos, estes polímeros assumem uma forma permanente e não possuem ( $T_m$ ), de modo que, quando submetidos a elevados níveis de temperatura, se degradam de forma irreversível. Logo, ao contrário dos termoplásticos, não podem ser retrabalhados. Como exemplos de polímeros termoendurecíveis podem enunciar-se, entre outros, os Poliésteres insaturados, as Bismaleimidas, as resinas Fenólicas ou as resinas de Epóxido. [6]

## 2.2 Reforços

Os reforços suportam o essencial das cargas aplicadas a um material compósito, e permitem obter melhores propriedades mecânicas como a tenacidade, rigidez, ou resistência ao impacto. Na secção 2 foi referido que os materiais compósitos podem ser classificados com base na constituição dos seus reforços. Deste modo, podemos então considerar que existem três tipos de reforços de materiais compósitos: Reforços sob a forma de partículas, reforços sob a forma de fibras e reforços de compósitos estruturais. [7]

Os reforços fibrosos, especialmente relevantes para o presente trabalho, consistem na utilização de fibras de diversos materiais sendo que, as mais importantes, por serem as mais utilizadas em compósitos de matriz polimérica, são as fibras de vidro, de carbono e de aramida. [6]

As fibras de vidro são usualmente obtidas através do estiramento de vidro fundido por via de uma fieira. Essas fibras são de imediato submetidas a tratamentos superficiais que consistem em revestimentos para as proteger da atmosfera e impedir o surgimento de defeitos. [6]

Os compósitos com reforço de fibras de vidro são amplamente utilizados no fabrico automóvel, aeronáutico, naval ou de mobiliário. [10]

A Tabela 2 mostra algumas características dos tipos de vidro mais comuns usados para o fabrico de fibras de vidro.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas de algumas fibras de vidro comuns, adaptado de [6].

Propriedade	Vidro	Vidro	Vidro
	E	S	R
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2.6	2.49	2.55
Módulo de Elasticidade – E (GPa)	73	85.5	86
Tensão de Rotura (MPa)	3400	4580	4400
Deformação a Rotura (%)	4.4	5.3	5.2
Coefficiente Expansão Térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	5	2.9	4

As propriedades das fibras de carbono tornavam-nas especialmente adequadas para aplicações altamente exigentes na indústria aeroespacial. Porém, o uso de fibras de carbono generalizou-se, pelo que hoje é possível observar o seu uso na indústria automóvel, no desporto ou na construção civil. [11]

A produção das fibras de carbono consiste na decomposição térmica de precursores orgânicos. Podem-se obter fibras de carbono a partir da decomposição de celulose, as chamadas *Rayon Fibers*, do poliacrilonitrilo, com a designação PAN, e do alcatrão, designadas *Pitch*. [6]

Algumas propriedades das fibras de carbono, obtidas pelos precursores mencionados, podem ser observadas na **Tabela 3**.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas de algumas fibras de carbono, adaptado de [6].

Propriedade	PAN	Rayon Fibers	Pitch
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1.8	2	1.7
Módulo de Elasticidade – E (GPa)	200-400	400	415-680
Tensão de Ruptura (MPa)	2480-3100	1550	2070-2760
Deformação a Ruptura (%)	0.6-1.2	1-1.15	0.5-0.6
Coefficiente Expansão Térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	-0.7 a -0.5	-1.6 a -0.9	-

As fibras de carbono podem ser agrupadas em duas categorias, em função do seu teor em carbono. Assim, as fibras com uma percentagem entre 80% e 95% designam-se fibras de carbono e as fibras com uma percentagem de carbono até 99% são consideradas fibras de grafite. [6]

Uma outra forma de classificar as fibras de carbono baseia-se no valor de algumas das suas propriedades mecânicas. Dessa forma, podem classificar-se as fibras como:

- *Ultra High Modulus* – UHM: E > 500 GPa;
- *High Modulus* – HM: E > 300 GPa;
- *Intermediate Modulus* – IM: E < 300 GPa;
- *Low Modulus* – LM: E < 100 GPa;
- *High Strength* – HS: Resistência à tração superior a 3 GPa e rácio entre resistência e rigidez entre 1.5% e 2%; [6]

As fibras de aramida, mais conhecidas pela designação comercial *Kevlar*<sup>®</sup>, são produzidas a partir de poliamidas aromáticas. Podem ser divididas em dois tipos:

- *Standard*, como o *Kevlar*<sup>®</sup>29 da *Dupont* ou o *Twaron*<sup>®</sup> da *Enke*;
- Elevado módulo, como o *Kevlar*<sup>®</sup>49 ou o *Twaron* HM<sup>®</sup>;

Este tipo de fibras caracteriza-se, essencialmente, pela boa relação rigidez-peso, boa resistência química, mecânica, à fadiga e ao impacto. É utilizado no fabrico de automóveis de competição, estruturas de aviões ou cascos de barcos. Contudo, principalmente no caso do *Kevlar*<sup>®</sup>, o seu uso é mais conhecido, e com provas dadas, no caso dos objetos de proteção pessoal como capacetes (**Figura 6**), coletes à prova de bala ou escudos policiais. [6]



Figura 6 – Capacete em Kevlar® utilizado pelas forças especiais da polícia de Orlando, EUA, após sustentar um impacto de bala, salvando a vida ao agente. [48]

Na **Tabela 4** é possível observar algumas das propriedades mais importantes de alguns dos tipos de fibras de aramida existentes.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas de algumas fibras de aramida, adaptado de [6].

Propriedade	Kevlar®29	Kevlar®49	Twaron®
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1.44	1.45	1.44
Módulo de Elasticidade – E (GPa)	60	129	60
Tensão de Rotura (MPa)	3000	3000	3000
Deformação a Rotura (%)	3.6	1.9	3
Coefficiente Expansão Térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	-2	-2	-

### 2.3 Processos de Fabrico de Materiais Compósitos

O fabrico é um fator muito importante para as características e propriedades dos materiais compósitos. Este capítulo aborda alguns dos métodos de fabrico de materiais compósitos mais comuns, explicando em que consistem e quando se usam.

Os processos de fabrico existentes permitem atualmente grande flexibilidade na construção de peças em material compósito, o que representa mais uma vantagem no uso destes materiais. Estes processos de fabrico podem ser classificados em dois grupos: Processos de molde aberto e processos de molde fechado.

Nos processos de molde aberto apenas uma superfície tem bom acabamento. São geralmente utilizados no fabrico de peças de grandes dimensões e com geometrias complexas. (Figura 7)

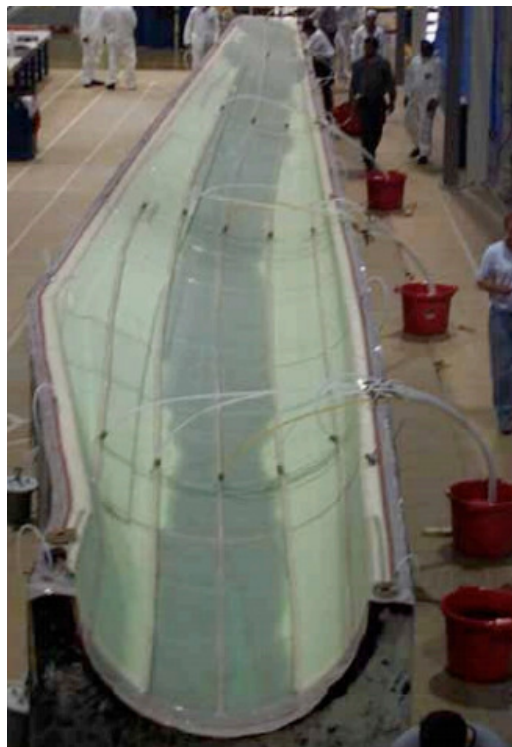


Figura 7 – Fabrico de uma pá de turbina eólica, em resina de Epóxico e fibra de vidro. [49]

Já os processos em molde fechado permitem bons acabamentos em todas as faces, peças de maior precisão e reprodutibilidade, embora de menores dimensões. Outra vantagem deste tipo de processos é a menor emissão de produtos nocivos. [6]

A seleção de um processo de fabrico deve obedecer a critérios de decisão relacionados com os requisitos das peças que se pretende produzir. Estes requisitos podem ser relativos às propriedades mecânicas, às dimensões, à complexidade das formas ou volume e cadência de produção. Os vários processos de fabrico, abordados neste capítulo, possuem diferentes características como, por exemplo, a forma sob a qual se apresentam as fibras (*fio/roving*, manta, malha, tecido ou pré-formas).

### 2.3.1 Moldação por Contacto

A moldação por contacto é um método de fabrico muito comum e económico, sobretudo em compósitos de fibra de vidro. Consiste no empilhamento de sucessivas camadas de reforço, sob a forma de manta ou tecido, num molde aberto. Dependendo da sua automatização, considera-se moldação manual se o processo não for automatizado e moldação por projecção se o for.

Na moldação manual (**Figura 8**) as camadas são empilhadas e impregnadas manualmente. Por esse motivo, é usado para pequenas séries, em formas pouco complexas e sem grandes restrições dimensionais. Neste processo a qualidade da peça depende da perícia do operador, podendo a mesma peça ter diferentes percentagens de fibras e resina. O facto de algumas resinas serem nocivas para a saúde e/ou voláteis, obriga à existência de boa ventilação.

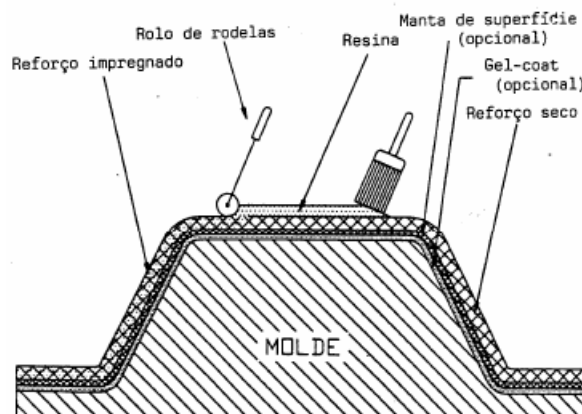


Figura 8 – Processo de moldação por contacto manual. [7]

No caso da moldação por projecção (**Figura 9**), a aplicação da resina e da fibra é realizada em simultâneo sobre um molde aberto, por via de um equipamento de projecção. As fibras, utilizadas sob a forma de *roving*, são conduzidas até à cabeça do equipamento de projecção onde são cortadas com comprimento desejado e lançadas num jato de resina.

Este processo é utilizado em pequenas séries, dando origem a peças com piores propriedades mecânicas, quando comparadas com as obtidas por moldação manual, devido ao menor teor em fibras. É também um processo que necessita de boas condições de ventilação. [6]

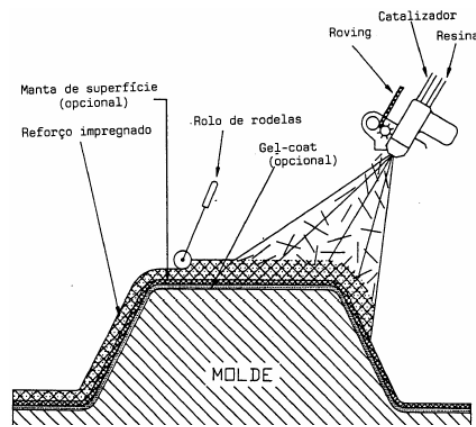


Figura 9 – Processo de Moldação por projeção. [7]

### 2.3.2 Moldação por Vácuo

A moldação por vácuo (Figura 10) é um processo de molde fechado, em que é aplicado vácuo no interior de um molde estanque, com as fibras e resinas no seu interior.

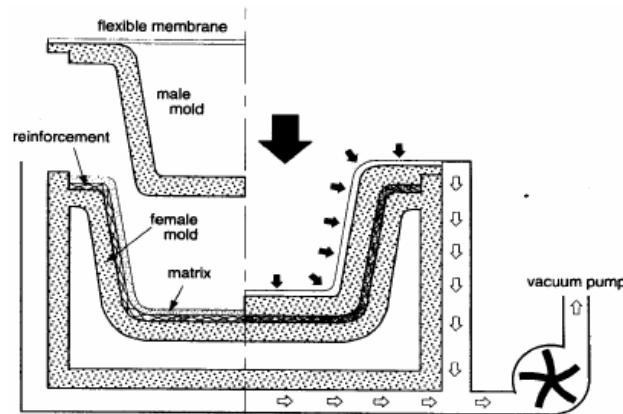


Figura 10 – Processo de moldação por vácuo. [7]

Este método serve para séries médias (500 a 5000 peças/ano) e peças de média/elevada dimensão. O uso deste método permite a obtenção de peças com bom acabamento superficial em todas as superfícies e ótimas características mecânicas, já que previne o surgimento de bolhas de ar no material e permite percentagens de fibras até 70%. Tem também a vantagem de harmonizar as percentagens de resina e reforço em toda a peça, independentemente do operador. [7]

### 2.3.3 Moldação por Compressão

O processo da moldação por compressão (Figura 11) consiste na compressão de reforços de fibras sobre os quais se deposita previamente uma resina em estado líquido, podendo ser realizado a frio ou a quente.

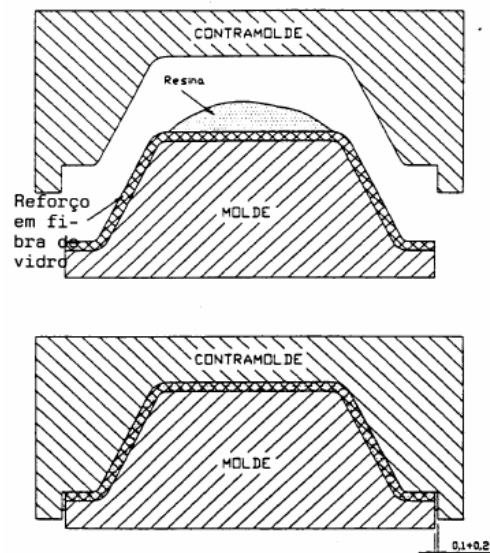


Figura 11 – Moldação por compressão. [7]

No processo realizado a frio, as resinas estão associadas a um sistema catalítico que aquece progressivamente o molde. A natureza exotérmica deste processo exige a presença de um sistema de extração de calor.

As baixas pressões e temperaturas permitem o uso de prensas leves e moldes mais económicos, o que dá competitividade a este processo, que é usado em séries médias. Por outro lado, a compressão a frio serve para peças que não requeiram bom acabamento superficial. Já o fenómeno da contração faz com que este processo não deva ser usado em peças de grande precisão dimensional. É também desaconselhada a presença de nervuras ou ângulos vivos na superfície do molde.

A moldação por compressão a quente é similar ao processo a frio, com a diferença que os moldes são previamente aquecidos. As temperaturas e as pressões envolvidas são maiores, o que requer moldes metálicos. No entanto, resulta numa maior cadência produtiva e em peças com melhores propriedades, já que permite a incorporação de uma maior percentagem de fibras. [6]



### 2.3.4 Moldação por Injeção

A moldação por injeção (Figura 12) é um processo fechado de fabrico de compósitos em que a resina é injetada num molde fechado onde já se encontra o reforço, expulsando o ar.

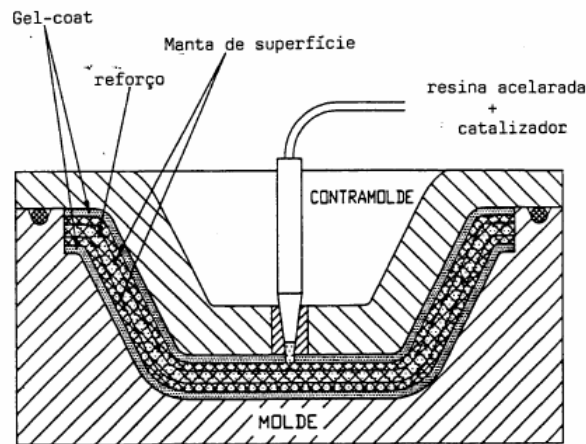


Figura 12 – Processo de moldação por injeção. [7]

Entre as formas de moldação por injeção estão a *Resin Transfer Molding*, a *Structural Reaction Injection Molding* ou a *Reinforced Reaction Injection Molding*.

As grandes vantagens deste método de fabrico são permitir a execução de peças de grande complexidade, bons acabamentos superficiais e boas propriedades mecânicas, devido a valores elevados de percentagem fibras. No entanto, os equipamentos de produção e os moldes podem requerer investimentos avultados, pelo que este método é geralmente usado no fabrico de grandes séries. [6]

### 2.3.5 Moldação em Autoclave

A moldação em autoclave (Figura 13) é muito usada no fabrico de laminados, sendo um processo demorado e dispendioso, destinado a pequenas séries. Contudo, permite obter peças com excelentes propriedades mecânicas, resultantes do uso de elevadas percentagens de fibras, e garante grande homogeneidade da sua distribuição.

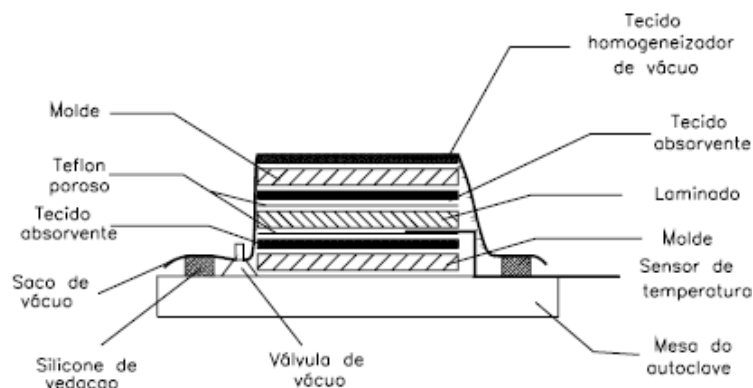


Figura 13 – Processo de moldação em autoclave. [7]

Neste processo, um componente previamente formado e impregnado com resina é cortado e empilhado sobre um molde, sendo este conjunto inserido num saco de vácuo e sujeito a um ciclo de determinadas condições de pressão e temperatura. As características das peças produzidas por via deste método fazem com que sirva indústrias que necessitam de materiais compósitos de elevado desempenho. [6]

### 2.3.6 Enrolamento Filamentar

O processo de enrolamento filamentar (Figura 14) consiste em depositar uma fibra, sob a forma de *roving*, pré-impregnada, sobre um mandril em rotação. É uma técnica aplicada para realizar peças de diversas formas como reservatórios de pressão, tubos redondos, quadrados, hexagonais ou peças esféricas.

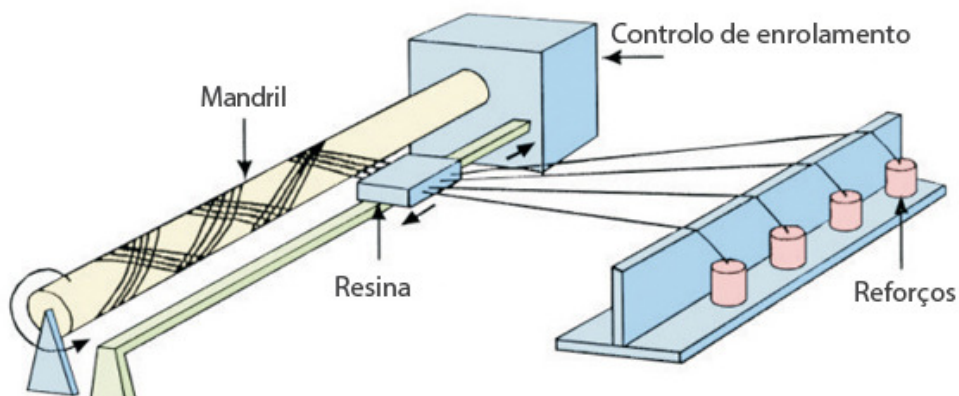


Figura 14 – Processo de enrolamento filamentar, adaptado de [50].

Este processo permite orientar as fibras de acordo com as solicitações a que a peça será sujeita em função da sua utilização, através do controlo de movimentos de translação do carro e da rotação do mandril. [6]

Como se trata de um processo automatizado, é bastante fiável e permite volumes elevados de fibras, produzindo peças com boas propriedades mecânicas. No entanto, são necessários complexos cálculos prévios, é difícil obter ângulos baixos de orientação de fibras e as formas das peças que podem ser produzidas por este processo são limitadas. [7]

### 2.3.7 Pultrusão

A pultrusão (Figura 15) é um processo contínuo em que um reforço, sob a forma de *roving*, manta ou tecido, é tracionado através de um recipiente com resina, produzindo um perfil de secção constante, reforçado longitudinalmente. No fim do processo há um mecanismo que corta o perfil com o comprimento pretendido.

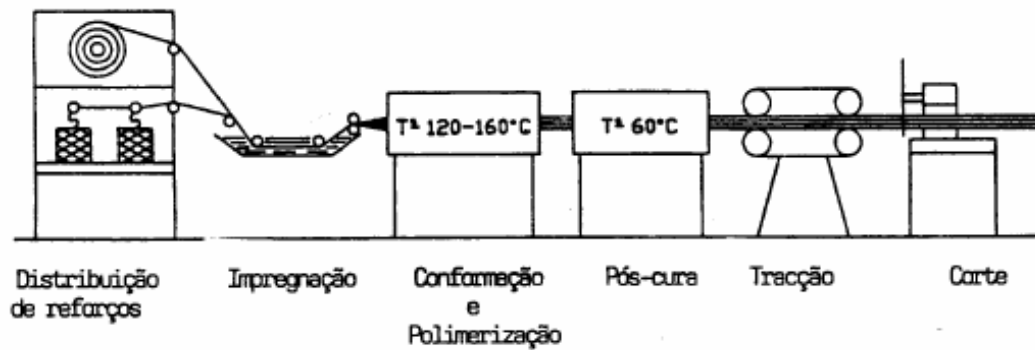


Figura 15 – Processo de pultrusão. [7]

Este processo é veloz e automatizado, garantindo boas características mecânicas na direção longitudinal. No entanto, não permite a produção de peças com grande rigor dimensional nem grande resistência a esforços não axiais. Além disso, as fibras só podem ser aplicadas a  $0^{\circ}$  pelo que, para obter propriedades mecânicas bidirecionais é necessário recorrer a tecidos. [7]

### 2.3.8 Outros Processos de Fabrico

Existem outros processos de fabrico além dos mencionados, tais como a moldação em contínuo, muito usado para a construção de chapas usadas na construção civil, ou a moldação por centrifugação, mais associado à produção de peças ocas.

A grande desvantagem destes dois processos consiste nos elevados investimentos iniciais que é necessário realizar para os implementar. [6]

## 2.4 Carbono Epóxico *T700 – UD REM TAPE*

O material compósito a utilizar durante os estudos descritos na presente dissertação foi o Carbono Epóxico *T700 – UD REM TAPE*, fornecido sob a forma de placas. Caracteriza-se por uma elevada resistência à tração e algumas das suas principais propriedades mecânicas podem ser observadas no catálogo do fabricante, no [Anexo 6.1](#).

Trata-se um compósito de matriz polimérica em resina de Epóxico (Termoendurecível) e reforço de fibras de carbono *High-Strength*.

Os compósitos de carbono epóxico *High-Strength* da família T700 são muito usados em reservatórios de pressão como, por exemplo, depósitos de GPL para carros ou botijas de oxigénio de aparelhos respiratórios usados por bombeiros em atmosferas tóxicas. [51]

As placas foram fabricadas através do processo da moldação em autoclave.

## 2.5 Furação de Materiais Compósitos

Os materiais compósitos, tal como acontece com outros materiais, não estão imunes à existência de defeitos que degradam as suas propriedades.

Existem diversas causas para os defeitos observados em materiais compósitos, podendo estas ser divididas em três grandes famílias: Fabrico, Manuseamento / Transporte e Maquinagem. A fraca adesão entre reforço e matriz ou frações de fibras incorretas por excesso ou falta de resina, por exemplo, podem ocorrer durante o fabrico. Já ranhuras e os impactos podem ocorrer durante o manuseamento e/ou transporte.

Uma das várias vantagens dos materiais compósitos é o facto de ser relativamente fácil a sua produção numa forma muito próxima da forma final, a chamada *Near-Net Shape*. Porém, o processo de montagem de aplicações em materiais compósitos envolve frequentemente o recurso a processos de maquinagem como a furação. [12] Com efeito, a furação continua a ser um processo muito aplicado para a ligação entre peças, pesem embora os progressos no desenvolvimento de adesivos estruturais.

A furação de materiais compósitos é um processo complexo e cujos efeitos são ainda difíceis de antever com precisão, devido a características intrínsecas dos mesmos, nomeadamente a sua anisotropia, a sensibilidade ao calor das matrizes poliméricas ou a abrasividade de alguns reforços. [13]

Jia et al. [2] alertam para o facto de as fibras serem mais difíceis de romper do que as resinas, pelo que a remoção de material durante a furação não é homogénea, contrariamente ao que acontece, por exemplo, nos metais.

Durão [14] identifica, entre outros, três tipos principais de danos que podem ocorrer durante a furação de compósitos de matriz polimérica e reforços fibrosos: Delaminação, arrancamento das fibras e danos térmicos na matriz por sobreaquecimento.

No que respeita especificamente aos compósitos de carbono epóxico, Daudeville et al. [15] identificam quatro tipos de danos mais comuns que se verificam em compósitos de carbono epóxico: Fratura progressiva da matriz, rotura de fibras, descolamento na interface matriz-reforço e delaminação.

A delaminação é o dano comum quando se enumeram os defeitos que podem ocorrer durante a furação de compósitos. Lissek et al. [16] consideram mesmo que a delaminação é o defeito mais crítico que a furação pode causar a um material compósito.

Por esta razão, o presente capítulo irá então centrar-se no fenómeno da delaminação, definindo-o, abordando as formas como ocorre, os fatores que o influenciam e de que forma o influenciam, bem como os métodos existentes para o atenuar.

### 2.5.1 Delaminação

A delaminação consiste na separação de camadas de um material compósito laminado devido a esforços fora do plano do material. Durão et al. (2011) [17] referem que se trata de um tipo de dano cuja propagação está confinada a um plano. O fenómeno da delaminação, que ocorre durante a furação, pode ser de dois tipos: *Peel-Up*, que ocorre durante a entrada da broca, cuja rotação pode puxar algumas camadas superiores para cima; *Push-Out*, em que a força axial exercida pela broca nas últimas camadas do material as sujeita a um esforço de flexão que as pode deformar e separar. (Figura 16)

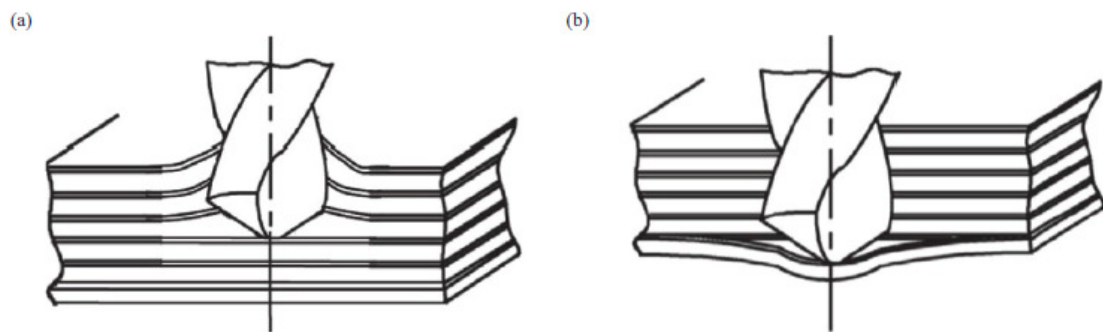


Figura 16 – Delaminação durante a furação. Tipo *Peel-Up* (a) ou *Push-Out* (b). [16]

### 2.5.2 Fatores de Delaminação

A ocorrência e magnitude da delaminação são influenciadas por diversos fatores relacionados com as características da broca, do próprio material compósito e do processo de furação.

Relativamente ao processo de furação, há que considerar essencialmente a velocidade de corte e de avanço da broca. No que concerne à velocidade de corte, Melentiev et. al [18] concluíram, após a análise de vários estudos, que os efeitos da velocidade de corte na delaminação não são consensuais.

Por exemplo, Davim e Reis [19] consideram que uma maior velocidade de corte aumenta a delaminação, tanto à entrada como à saída. Já Palanikumar [20] sustenta que durante a furação de polímeros reforçados com fibra de vidro (PRFV), ao empregar velocidades de corte elevadas e baixos valores de avanço, é possível reduzir substancialmente o efeito de delaminação, quer à entrada, quer à saída. Na mesma linha, Gaitonde et al. [21] sustentam também que uma maior velocidade de corte permite a obtenção de uma taxa de remoção de material mais elevada com menor delaminação.

Contudo, parece ser consensual que a velocidade de avanço da broca tem um impacto mais significativo na delaminação do que a velocidade de corte. Silva et al. [12], sintetizando os resultados de diversos estudos, referem que a delaminação aumenta

com o incremento da velocidade de avanço da broca, independentemente da velocidade de corte. Turki et al. [22] justificam este facto mostrando com experiências que a força axial exercida pela broca é tanto maior quanto mais rápido for o seu avanço.

A força axial afigura-se então como um fator de extrema importância na ocorrência da delaminação. Nesse sentido, o principal desafio relativamente a este fator é o de conseguir calcular a força crítica, a partir da qual se dá o início da delaminação.

Hocheng e Dharan [23] formularam uma equação que determina a força crítica ( $F_{ct}$ ), a partir da qual, para brocas helicoidais, ocorre delaminação. A variável ( $G_{IC}$ ) representa a taxa crítica de libertação de energia em modo de fratura do tipo I (Figura 17), ( $E$ ) representa o módulo de elasticidade do material, ( $h$ ) a sua espessura não cortada e ( $\nu$ ) o coeficiente de Poisson. (Equação 1)

#### Equação 1

$$F_{ct} = \pi \times \left[ \frac{2G_{IC}Eh^3}{3(1-\nu^2)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

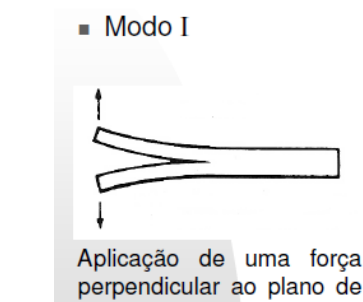


Figura 17 – Modo de fratura do tipo I. [14]

Já Lachaud et al. [24] desenvolveram duas equações para o cálculo da força crítica considerando-a uma carga concentrada (Equação 2) ou uma carga distribuída (Equação 3). As variáveis ( $D$ ) e ( $D'$ ) são constantes do material, calculadas a partir da matriz de rigidez à flexão de laminados.

#### Equação 2

$$F_z = 8\pi \left[ \frac{2G_{IC}D}{1-\frac{D}{8D}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

#### Equação 3

$$F_z = 8\pi \left[ \frac{G_{IC}D}{\frac{1}{3}-\frac{D}{8D}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

O recurso a velocidades de avanço moderadas é essencial para garantir uma furação com menor risco de delaminação. Capello [25] verificou que na fase final da furação geralmente ocorria um aumento da velocidade de avanço. Este aumento deve-se à flexão do material, que amplifica a força axial da broca perto do fim da furação, originando um efeito de *fast-release* à saída da broca, o que aumenta a delaminação. Para contrariar este efeito, o mesmo autor criou um mecanismo que, através de um cilindro hidráulico e uma mola, suaviza os movimentos de inserção e extração da broca, reduzindo o efeito de delaminação. (Figura 18)

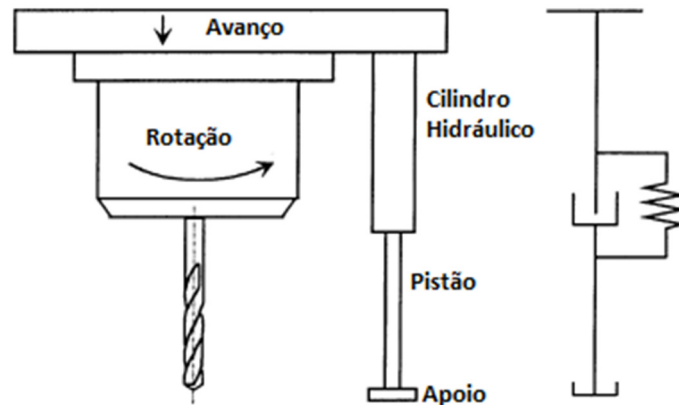


Figura 18 – Dispositivo de amortecimento do movimento vertical da broca, adaptado de [25].

Capello [25] sustenta também que o uso de suportes durante a furação reduz a flexão do material e, conseqüentemente, a delaminação. O benefício do uso de suportes é corroborado por diversos autores como, por exemplo, Curnick [26], que verificou maior delaminação do tipo *Push-Out* em placas não apoiadas comparativamente com placas apoiadas.

No que diz respeito às características da broca, a geometria tem grande influência na força axial exercida durante a furação e, conseqüentemente, no efeito de delaminação. (Figura 19)

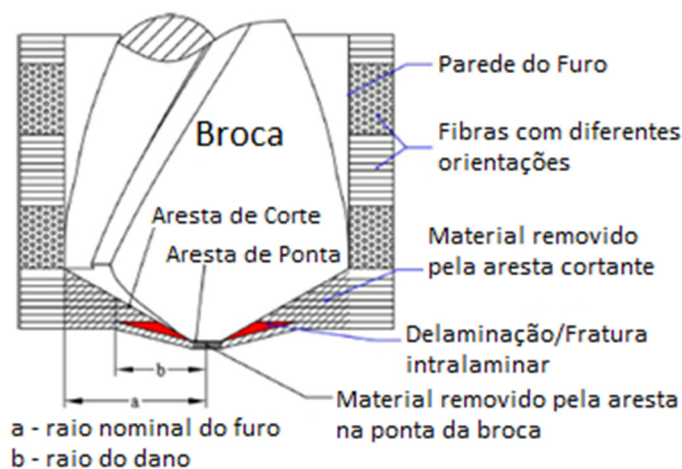


Figura 19 - Esquema de remoção de material e dano causado pela broca, adaptado de [2].



Com efeito, Durão et al. (2008) [27] verificaram que, para velocidades de avanço e de corte semelhantes, se registavam forças axiais díspares entre diferentes modelos de broca. Também Hocheng e Tsoa [28], ao estudar a delaminação com diferentes tipos de brocas, verificaram que com recurso a brocas de geometria especial era possível aplicar maiores velocidades de avanço, comparativamente com as brocas helicoidais (*twist drill*) e obter menor delaminação. (Figura 20)

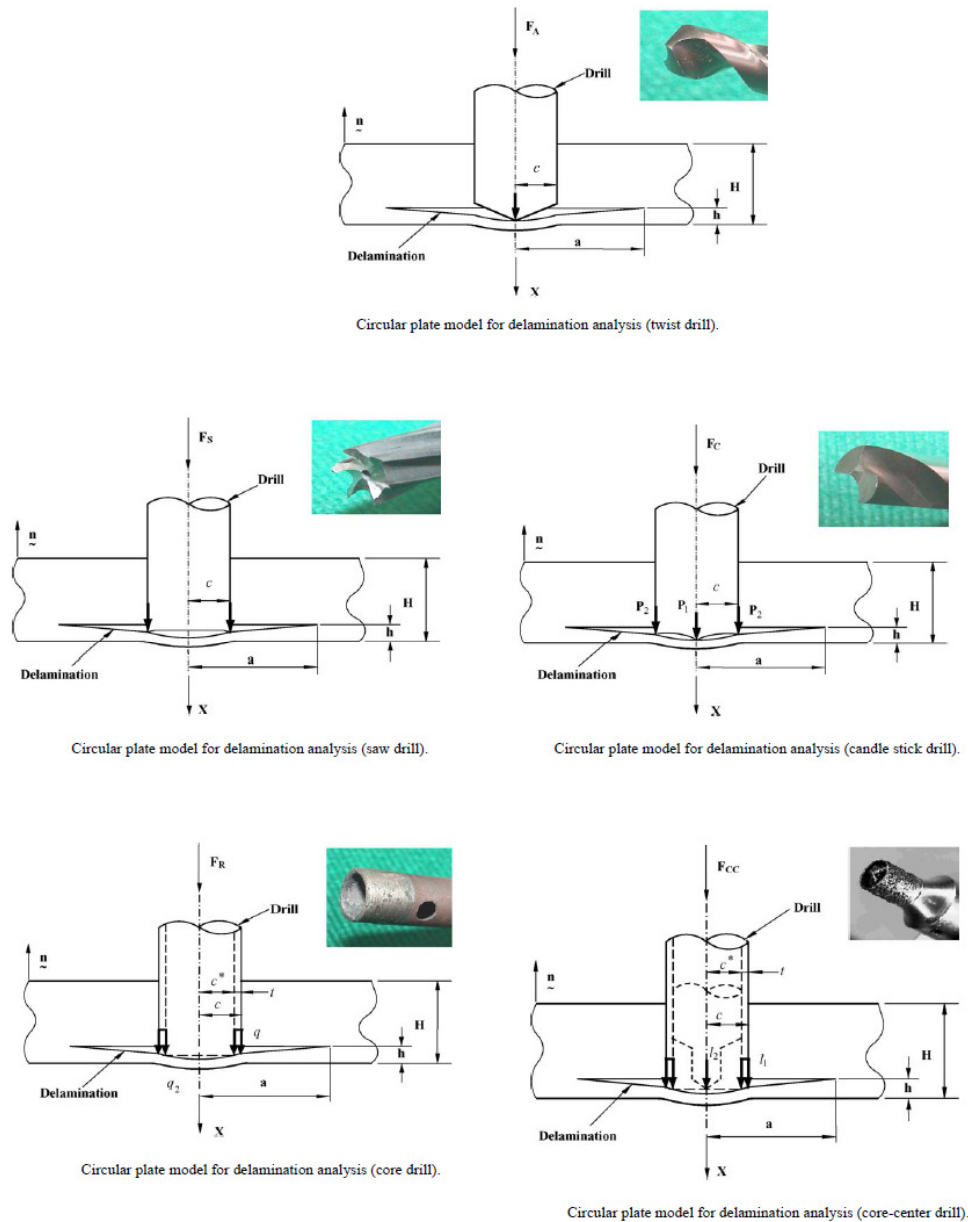


Figura 20 – Diferenças na furação e delaminação para vários tipos de brocas. [28]

Gaitonde et al. [21] analisaram brocas helicoidais com diferentes ângulos de ponta (Figura 21) e concluíram que menores ângulos de ponta conduzem a uma menor delaminação.

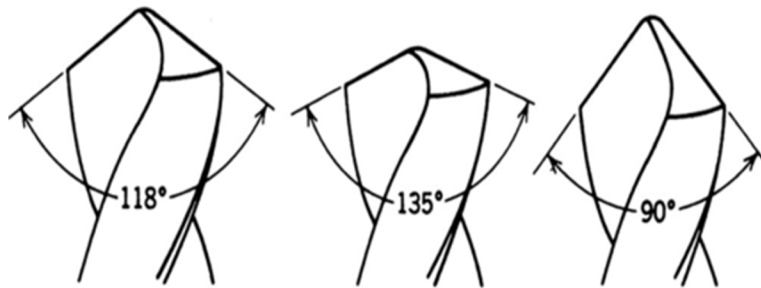
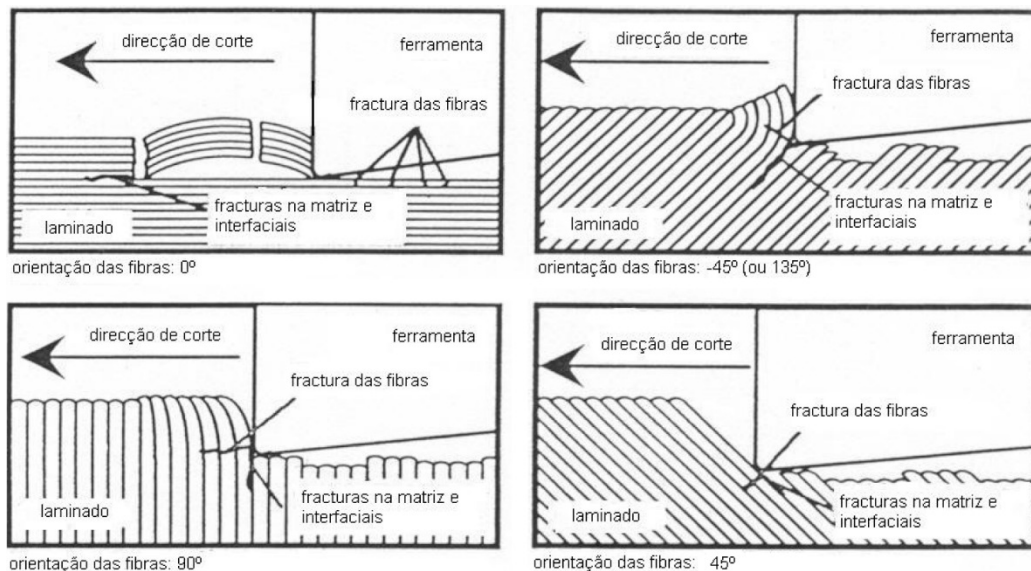


Figura 21 – Alguns tipos de ângulos de ponta de broca. [52]

O material de que são feitas as brocas também deve ser tido em conta no processo de furação de compósitos. Hocheng [29] desaconselha o uso de aços rápidos na furação de materiais compósitos de fibras de vidro ou carbono em virtude da abrasão provocada pelo contacto com estas fibras. O autor defende o uso brocas em carboneto de tungsténio ou PCD (*Polycrystalline Diamond*).

As propriedades dos materiais compósitos que são objeto de furação desempenham também um papel importante na delaminação. Durão [14] explica que para orientações das fibras dos reforços entre 60° e 120° a força de corte é menor do que a exigida por orientações inferiores a 60° ou superiores a 120° essa força aumenta. Ou seja, a orientação das fibras relativamente ao corte define o tipo de sollicitação a que ficam sujeitas e, conseqüentemente, o seu modo de rotura. Isto é demonstrado por Durão [14], citando Klocke et al. (Figura 22)



Orientação das fibras $\theta$	Tipo de sollicitação	Modo de rotura das fibras	Notas
0°	compressão	delaminação	
0° < $\theta$ < 90°	dobragem e tração	quebra	45° melhor valor
90°	dobragem	arrancamento	
>90°	dobragem e compressão	quebra	menos favorável

Figura 22 – Relação entre mecanismos de corte e orientação das fibras. [14]

Magalhães [7] sustenta que laminados com camadas multidirecionais estão menos sujeitos a delaminação do que laminados unidirecionais, já que no caso destes últimos há tendência para o arrancamento de fibras em zonas onde o movimento relativo entre ferramenta e peça é paralelo às fibras.

Outro aspeto importante, referido por Lachaud et al. [24], é o da condutividade térmica do material compósito. Quando maior a condutividade, menor o risco de delaminação, já que o aumento da temperatura durante a furação aumenta a possibilidade de ocorrência de delaminação.

### 2.5.3 Determinação da Delaminação

O estudo da delaminação necessita que se a quantifique de alguma forma. Só assim é possível aferir de que forma os vários fatores já citados afetam a delaminação, estabelecer comparações entre eles e procurar soluções para atenuar este fenómeno.

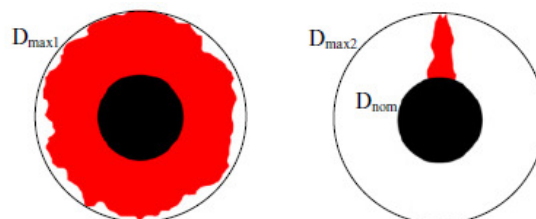
A avaliação da delaminação começa com a obtenção de algum tipo de imagem do furo e da sua periferia. Silva et al. [12] enumera um conjunto de técnicas atualmente utilizadas na obtenção de imagens do furo e da zona danificada que o rodeia. São elas: Fotografia microscópica; estereomicroscopia; termografia; varrimento com ultrassons; fotografia digital; sombras de *Moiré*; radiografias com recurso a raio-x; tomografia de raio-x computadorizada.

Chen [30] propôs um fator denominado Fator de Delaminação, ( $F_d$ ), que é obtido através de um rácio entre o diâmetro máximo da área danificada ( $D_{max}$ ) e o diâmetro nominal do furo ( $D_0$ ). (Equação 4)

#### Equação 4

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_0}$$

Contudo, este fator apresenta a limitação de ser unidimensional e não ter em conta a área do dano, pelo que dois furos com áreas de dano distintas podem ter o mesmo ( $F_d$ ) (Figura 23). Além disso, em casos onde a área do dano é mais irregular e não circular, é aconselhável o uso da área do dano para quantificar a delaminação em vez do diâmetro máximo.



$$F_d = \frac{D_{max1}}{D_{nom}} = \frac{D_{max2}}{D_{nom}}$$

Figura 23 – O mesmo Fator de Delaminação pode conter áreas de dano muito distintas. [16]

Para contrariar a limitação do fator proposto por Chen [30], Davim et al. [31] sugerem um Fator de Delaminação Ajustada, ( $F_{da}$ ). (Equação 5)

#### Equação 5

$$F_{da} = \alpha \frac{D_{max}}{D_0} + \beta \frac{A_{max}}{A_0}$$

Neste caso, ( $A_{max}$ ) corresponde à área do círculo cujo diâmetro é ( $D_{max}$ ) e ( $A_0$ ) é a área nominal do furo com diâmetro ( $D_0$ ). Os parâmetros ( $\alpha$ ) e ( $\beta$ ) são uma ponderação do peso de cada um dos membros da equação e a sua soma deve perfazer um total de 1.

Também Mehta et al. [32] propõem um indicador denominado Rácio de Dano, ( $D_{rat}$ ), que consiste num rácio entre a área de dano na periferia do furo, ( $D_{mar}$ ), e a área nominal do furo ( $A_{avg}$ ). (Equação 6)

#### Equação 6

$$D_{rat} = \frac{D_{mar}}{A_{avg}}$$

Tsao et. al [33] desenvolveram o Fator de Delaminação Equivalente, ( $F_{ed}$ ), que relaciona um diâmetro equivalente ( $D_e$ ) (Figura 24), com o diâmetro nominal do furo ( $D_0$ ). (Equação 7)

#### Equação 7

$$F_{ed} = \frac{D_e}{D_0}$$

$$D_e = \left( \frac{4(A_d + A_0)}{\pi} \right)^{0.5}$$

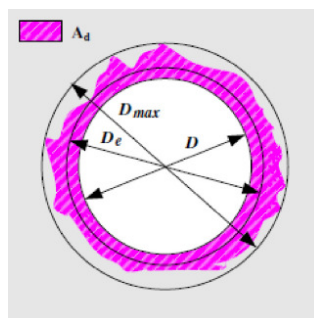


Figura 24 – Critério de Tsao et al. para o diâmetro equivalente ( $D_e$ ). [3]

#### 2.5.4 Novas Técnicas de Furação

As dificuldades do processo de furação de materiais compósitos têm levado ao desenvolvimento de novas técnicas com objetivo de reduzir os danos causados.

Hocheng e Tsao [28] referem resultados satisfatórios com recurso a técnicas como a furação com recurso a feixe de laser, jato de água, ultrassons ou por descarga elétrica.

Durão [14] dá ainda exemplos como a furação orbital, um método desenvolvido na Suécia pela empresa *Novator*<sup>®</sup> (Figura 25), o uso de ferramentas com geometrias alternativas ou métodos de furação com controlo de força axial.

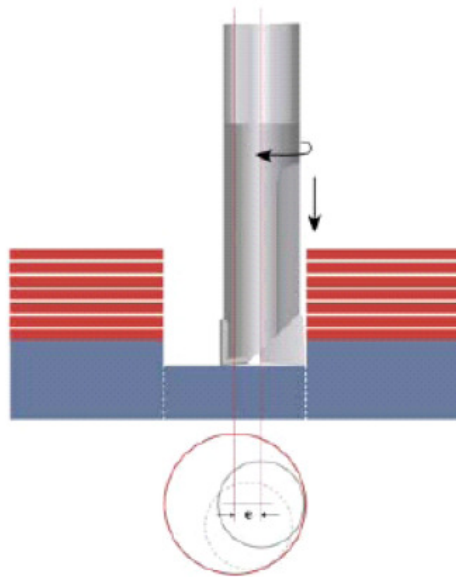


Figura 25 – Furação orbital, desenvolvida pela *Novator*<sup>®</sup>. [14]

Magalhães [7] cita também o recurso à pré-furação como técnica útil para reduzir a delaminação. A execução de um furo prévio de diâmetro inferior diminui as forças axiais durante a furação com o diâmetro pretendido uma vez que reduz o efeito exercido pela aresta na ponta da broca (Figura 19).

# 3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

## 3.1 Preparação dos Provetes

3.1.1 Corte

3.1.2 Furação

## 3.2 Radiografias

## 3.3 Ensaios Mecânicos

3.3.1 Flexão em 3 pontos

3.3.2 Ensaio *Pin-Bearing*

## 3.4 Processamento de Imagem

3.4.1 Treshold e Eliminação de Ruído

3.4.2 Reconstrução Circular

3.4.3 Quantificação do Dano



## 3 Procedimento Experimental

Este capítulo descreve os trabalhos experimentais levados a cabo, a fim de responder aos objetivos propostos. Estes trabalhos podem ser divididos em três fases principais: preparação de provetes, que incluiu a sua furação; radiografias aos furos para posteriormente se quantificar a área danificada na sua periferia; ensaios mecânicos para avaliar a perda de propriedades mecânicas causadas pela delaminação.

Existem atualmente vários ensaios mecânicos para avaliar a perda de propriedades mecânicas dos materiais após a furação como, por exemplo, ensaio de esmagamento, ensaio de flexão em 3 pontos ou o ensaio *Pin-Bearing*, desenvolvido por Wang et al. [34], tendo sido levados a cabo estes últimos dois.

Para cada uma das três fases principais do procedimento experimental será descrito todo o procedimento realizado, bem como os materiais e equipamentos utilizados. Será igualmente descrito todo o processamento de imagem efetuado para tornar possível a quantificação do dano causado pela furação.

### 3.1 Preparação dos Provetes

A preparação dos provetes visou a obtenção de provetes em carbono epóxico *T700 – UD REM TAPE* e a sua furação, por forma a serem posteriormente sujeitos a ensaios mecânicos na zona dos furos.

#### 3.1.1 Corte

Esta fase começou com o processo de corte de duas placas quadradas de carbono epóxico ([Figura 26](#)), fornecidas pelo Eng. Luís Durão. Previamente ao corte, foram traçadas a marcador linhas auxiliares nas placas, de modo a servirem de referência durante o corte. O corte foi levado a cabo na mesa de corte de serra circular, modelo *Batisti Meccanica DV25*, das oficinas do laboratório de mecânica do ISEP. ([Figura 27](#))

Foram cortados 20 provetes de dimensão 135 mm x 35 mm, designados como Provetes 135 e outros 19 provetes de dimensão 100 mm x 18 mm, denominados Provetes 100, sendo que todos foram numerados com recurso a um marcador. As dimensões dos provetes seguem a norma ISO 14125 [35]

Importa referir que os provetes foram cortados de modo a que o seu comprimento fosse ao longo das fibras. Tal como referido em [2.5.3](#), os materiais compósitos possuem diferentes propriedades conforme a direção das fibras. Neste caso, o comprimento ao longo das fibras era a melhor opção em termos de resistência mecânica.



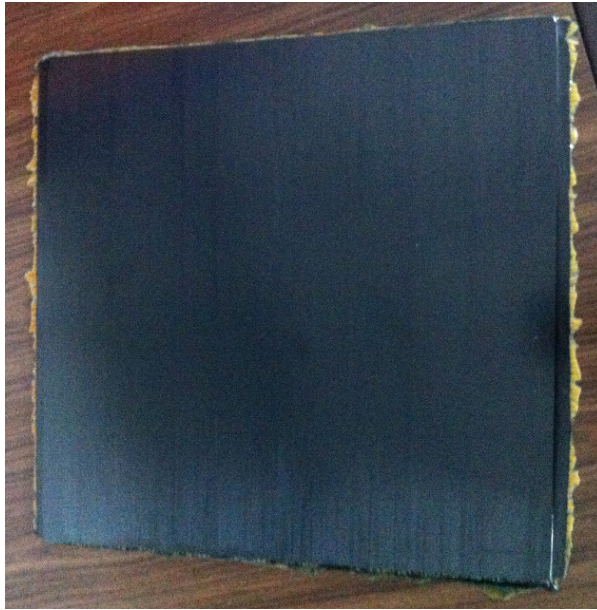


Figura 26 – Placa quadrada de carbono epóxico T700 – UD REM TAPE em bruto.



Figura 27 - Mesa de corte manual de serra circular, modelo *Batisti Meccanica DV25*.

### 3.1.2 Furação

Após o corte dos provetes passou-se à fase de furação. Com o objetivo de ter áreas de dano com diferentes extensões e formas, foram efetuados cinco tipos diferentes de furação: com broca helicoidal (HEL), com broca *Dagger* (DAG), com broca *Brad* (BRA), com broca *High Speed Steel* (HSS) e, de novo com broca helicoidal mas com uma furação prévia de menor diâmetro (HPF). (Figura 28)

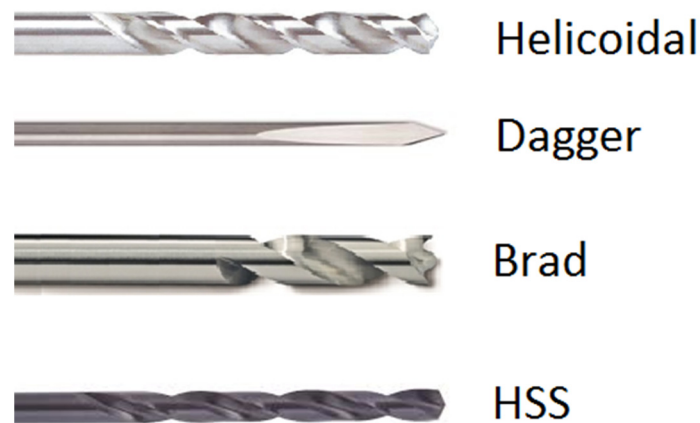


Figura 28 – Brocas utilizadas durante o processo de furação.

As brocas helicoidais são frequentemente utilizadas na furação de compósitos, com bons resultados no que concerne à área de dano. Os exemplares utilizados possuíam um ângulo de ponta  $118^\circ$  e eram feitas em carboneto de tungstênio.

As brocas *Dagger* usadas possuíam um ângulo de ponta muito apertado -  $30^\circ$  - e eram de carboneto de tungstênio. O ângulo de ponta apertado significa que tem de haver espaço suficiente à saída do furo para este ficar completo, o que pode constituir uma limitação importante ao utilizar estas brocas. [36]

As brocas do tipo *Brad* têm arestas de corte em forma de foice, que tensionam as fibras antes do corte, resultando num corte mais limpo. São especialmente indicadas para compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras. Os exemplares desta broca que foram utilizados também eram em carboneto de tungstênio. [36]

As brocas HSS são brocas helicoidais feitas em aço rápido. O uso de brocas fabricadas neste tipo de metais não é apropriado para o tipo de material compósito dos provetes, devido à abrasividade das fibras. Por isso, foram usadas com o objetivo de criar furos com área de dano extensa. Inclusivamente, a velocidade de avanço aplicada na furação com estas brocas também foi maior do que nos outros tipos de furação porque, conforme referido em 2.5.2, isto provoca maior força axial e maior delaminação.

A furação do tipo HPF consiste na realização de um furo piloto de pequeno diâmetro, seguido de um furo com a mesma broca helicoidal usada na furação HEL. O recurso a um furo prévio de menor diâmetro deve originar áreas de dano diminutas, conforme explicado em 2.5.4.

Todas as brocas empregues tinham 6 mm de diâmetro à exceção das brocas utilizadas para fazer o furo piloto na furação HPF, que tinham 1.6 mm de diâmetro.

A furação foi executada com a máquina *MAS VR2*, das oficinas do laboratório de mecânica do ISEP. (Figura 29)

Aos Provetes 100 foi efetuado um furo no centro geométrico, cuja posição foi determinada pela interseção de duas linhas diagonais traçadas a marcador. (Figura 30)



Figura 29 – Furadora MAS VR2.



Figura 30 - Provette 100\_5 após o furo prévio da furação tipo HPF.

Os Provetes 135 foram furados em dois locais, ao longo do maior eixo de simetria, um a 18 mm de uma das extremidades do provete e o outro a 30 mm da extremidade oposta. Estas distâncias foram determinadas com recurso a régua e aristo e assinaladas a marcador. (Figura 31)



Figura 31 – Provetes 135\_4 após o furo prévio da furação HPF, a 30 mm da face.

Todos os furos foram efetuados com os provetes apoiados em placas de suporte, feitas em madeira, por forma a minimizar efeitos de delaminação e foi feita uma marca com marcador a assinalar a face do provete em que ocorreu a entrada da broca.

As Tabelas 5 e 6 mostram os tipos de broca, a velocidade de rotação e a velocidade de avanço utilizadas na furação dos Provetes 100 e 135 respetivamente. Estes parâmetros foram arbitrados com base em recomendações propostas de experiências realizadas anteriormente.

Tabela 5 – Parâmetros de furação dos Provetes 100.

Provetes Nº	Tipo Furo	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rot)
100_1	BRA	1120	0.12
100_2	BRA	1120	0.12
100_3	BRA	1120	0.12
100_4	BRA	1120	0.12
100_5	HPF	1120	0.12
100_6	HPF	1120	0.12
100_7	HPF	1120	0.12
100_8	DAG	1120	0.12
100_9	DAG	1120	0.12
100_10	DAG	1120	0.12
100_11	DAG	1120	0.12
100_12	HSS	1120	0.30
100_13	HSS	1120	0.30
100_14	HSS	1120	0.30
100_15	HSS	1120	0.30

Tabela 6 – Parâmetros de furação dos Provetes 135.

Provete Nº	Tipo Furo	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rot)
135_1	HPF	1120	0.12
135_2	HPF	1120	0.12
135_3	HPF	1120	0.12
135_4	HPF	1120	0.12
135_5	BRA	1120	0.12
135_6	BRA	1120	0.12
135_7	BRA	1120	0.12
135_8	BRA	1120	0.12
135_9	HEL	1120	0.12
135_10	HEL	1120	0.12
135_11	HEL	1120	0.12
135_12	HEL	1120	0.12
135_13	DAG	1120	0.12
135_14	DAG	1120	0.12
135_15	DAG	1120	0.12
135_16	DAG	1120	0.12
135_17	HSS	1120	0.30
135_18	HSS	1120	0.30
135_19	HSS	1120	0.30
135_20	HSS	1120	0.30

Analisando visualmente os furos observa-se que as brocas *Dagger* e HSS causam danos consideráveis na periferia dos furos. Já a furação com as brocas helicoidais, *Brad* e, sobretudo, a furação com broca helicoidal antecedida de pré-furação, causam poucos estragos à volta dos furos, chegando mesmo a verificar-se furos quase sem dano em redor, na face por onde se deu a entrada da broca isto é, sem delaminação do tipo *Peel-Up*. (Figura 32)

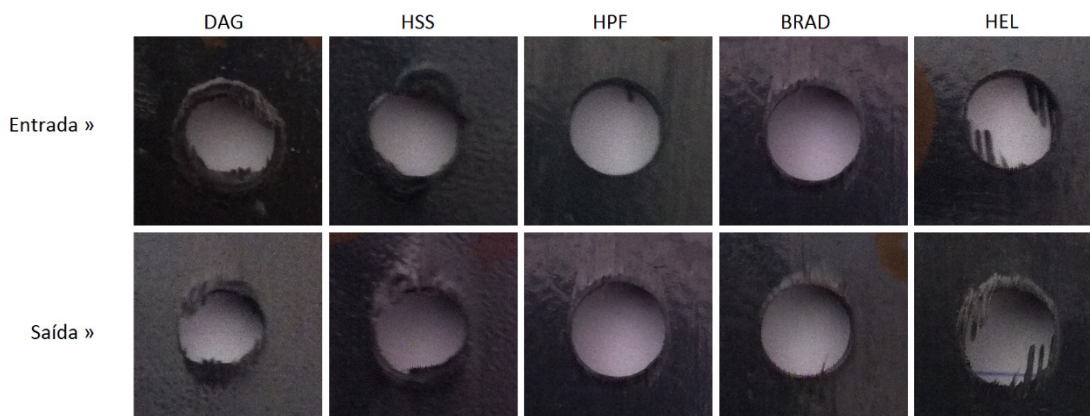


Figura 32 – Danos resultantes da furação com vários tipos de broca.

## 3.2 Radiografias

As radiografias com contraste aos furos permitiram obter imagens dos danos na periferia dos furos causados por delaminação para que, posteriormente, fosse possível quantificar esses danos a partir das imagens obtidas. Esta fase antecedeu os ensaios mecânicos e só depois de se ter garantido que todos os furos foram corretamente radiografados é que se pôde realizar os ensaios, uma vez que esses ensaios eram destrutivos.

As radiografias, ao contrário de técnicas como, por exemplo, os ultrassons, não permitem observar a delaminação ao longo de toda a profundidade do furo. A imagem resultante deste processo consiste numa majoração dos efeitos de delaminação observáveis nas faces de entrada e saída do furo.

O processo de radiografar os furos começou com a imersão dos provetes durante 15 minutos num líquido contrastante para realçar o contraste da zona danificada em redor do furo ou de outros defeitos nas peças, o *diiodometano de AnalaR NORMAPUR*, cuja ficha técnica pode ser consultada no [Anexo 6.2](#).

As radiografias foram levadas a cabo com recurso ao aparelho de Raio-X *Kodak 2100* ([Figura 33](#)) do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP, associado ao sensor digital *Kodak RVG 5100 System* ([Figura 34](#)) ligado a um computador com o *software* de imagem *Kodak Dental Imaging Software*. O tempo de exposição definido para as radiografias foi de 0.125 segundos.



Figura 33 – Kodak 2100 X-Ray System.



Figura 34 – Sensor RVG 5100.

Os provetes foram colocados com as zonas furadas entre o aparelho (por cima) e o sensor (por baixo), sendo este último e os provetes nivelados com recurso a plasticina moldável. Uma vez que, conforme anteriormente referido, as imagens obtidas neste processo são uma majoração dos efeitos visíveis nas duas faces, tornava-se indiferente qual dos lados do provete ficaria voltado para cima. No entanto, deveria haver coerência no procedimento e, nesse sentido, arbitrou-se que todos os furos fossem radiografados com a face de saída da broca voltada para cima. (Figura 35)



Figura 35 – Obtenção de uma radiografia.

É importante salientar que as imagens obtidas durante este procedimento (Figura 36) foram guardadas em ficheiros do formato .bmp (*Windows Bit Map*). Este formato .bmp não efetua nenhum tipo de compressão nem implica nenhuma perda de resolução das imagens e permite conceptualizar pixéis como se se tratasse de uma matriz, o que pode ser muito útil para o processamento das imagens e quantificação do dano na periferia dos furos. [53]

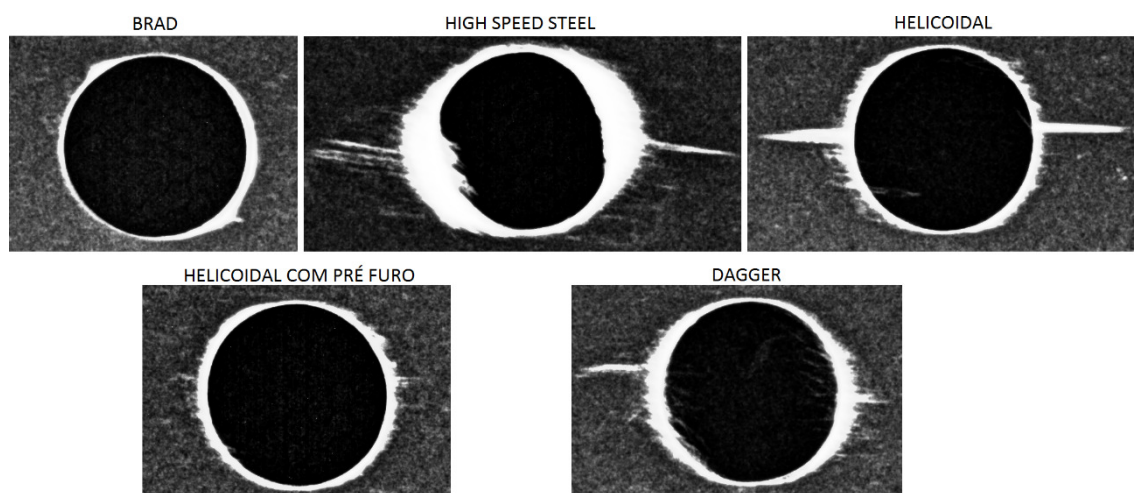


Figura 36 – Radiografias obtidas dos diversos furos.

### 3.3 Ensaio Mecânicos

Os ensaios mecânicos foram realizados com o objetivo de aferir a perda de capacidades mecânicas dos provetes nas secções furadas, de maneira a poder-se correlacionar esta perda com a área do dano à volta do furo. Foram realizados dois ensaios: Flexão em 3 pontos e *Pin-Bearing*.

Os ensaios foram efetuados na máquina de ensaios *Shimadzu AG-X Plus* (Figura 37) do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP, ligada a um *software* para a recolha de dados.



Figura 37 - Máquina de ensaios *Shimadzu AG-X Plus*.



### 3.3.1 Flexão em 3 pontos

O ensaio de Flexão em 3 pontos foi aplicado aos Provetes 100 e consistiu na aplicação de uma carga ao longo da secção do provete que passava a meio do furo, estando o provete suportado por dois apoios a uma distância (*Span*) de 80 mm, de acordo com a norma ISO 14125 [35]. (Figura 38 e Figura 39)

Os ensaios foram realizados com a face do provete por onde se deu a saída da broca, aquando da furação, voltada para cima.

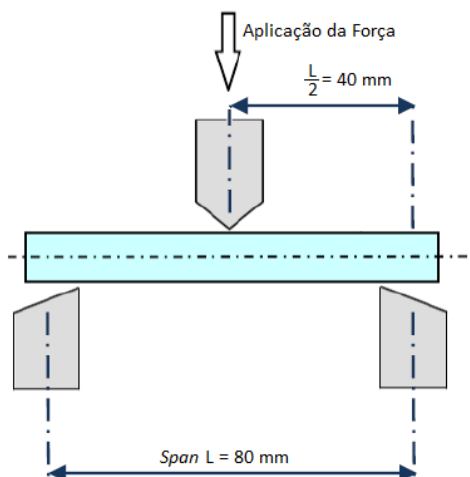


Figura 38 - Esquema do ensaio de Flexão em 3 pontos, vista frontal.

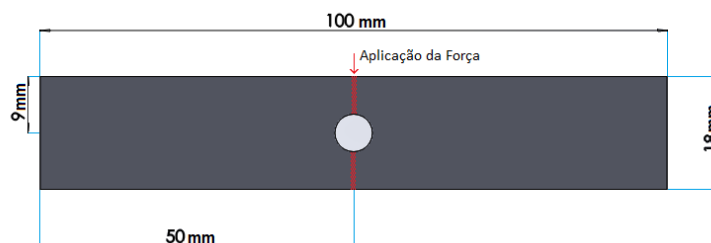


Figura 39 – Esquema do Provette 100 durante o ensaio de Flexão em 3 pontos, vista superior.

Antes de iniciar o ensaio de cada provete foram medidas, com recurso a um paquímetro, a espessura e largura da secção onde seria aplicada a carga, uma vez que sobretudo no caso da largura, não seria correto assumir sempre como sendo de 18 mm, já que podiam ter havido desvios durante a fase do corte. A velocidade de avanço da carga foi de 3.5 mm/min e o ensaio terminava quando se registasse uma queda abrupta na força, o que correspondia à rotura do provete. (Figura 40)

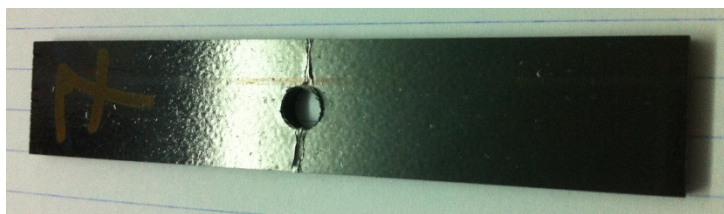


Figura 40 – Provette 100\_7 após a realização do ensaio de Flexão em 3 Pontos.

A **Tabela 7** mostra os valores medidos com paquímetro, registados durante o ensaio, e os valores de tensão, calculados de acordo com a norma ISO 14125 [35].

Tabela 7 – Resultados obtidos durante o ensaio de Flexão em 3 pontos.

Provete	Tipo Furo	Span (L)		80 mm	
		Largura (mm) (B)	Espessura (mm) (H)	Força (N) (F)	Tensão (MPa) $(3*F*L)/(2*B*H^2)$
100_0.1	s/ furo	18.25	3.30	1818.498	1098.00
100_0.2	s/ furo	18.20	3.30	1932.748	1170.19
100_0.3	s/ furo	18.20	3.10	1885.001	1293.30
100_0.4	s/ furo	19.00	3.30	1974.599	1145.19
100_1	BRA	19.90	3.30	1448.472	802.07
100_2	BRA	20.00	3.30	1354.361	746.20
100_3	BRA	19.00	3.30	1074.425	623.13
100_4	BRA	18.00	3.30	1173.274	718.26
100_5	HPF	19.65	3.30	1341.375	752.21
100_6	HPF	18.60	3.30	1268.005	751.21
100_7	HPF	18.70	3.30	1297.871	764.79
100_8	DAG	19.80	3.30	1310.396	729.27
100_9	DAG	18.70	3.30	1196.273	704.92
100_10	DAG	19.80	3.20	1218.112	720.95
100_11	DAG	19.50	3.30	1402.458	792.52
100_12	HSS	18.60	3.30	1143.487	677.44
100_13	HSS	18.10	3.30	1085.631	660.93
100_14	HSS	18.00	3.30	1222.324	748.29
100_15	HSS	17.90	3.30	1294.819	797.09

### 3.3.2 Ensaio *Pin-Bearing*

Os ensaios *Pin-Bearing* foram executados em peças extraídas dos Provetes 135 através do corte pelo centro do furo que estava a 30 mm da extremidade (Figura 41). Este corte foi efetuado na mesma mesa de corte manual de serra, utilizada em 3.1.1.

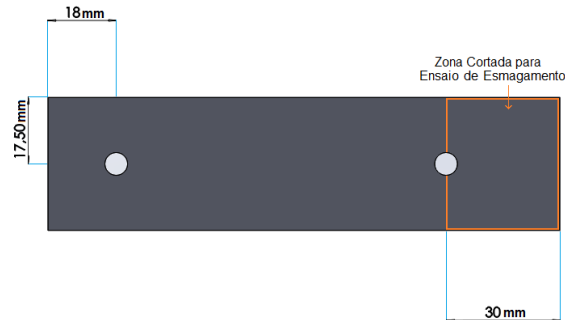


Figura 41 – Esquema de utilização dos Provetes 135 nos ensaios *Pin-Bearing*.

Este ensaio foi conduzido de acordo com o ensaio proposto por Wang et al. [34] segundo a qual, as dimensões do provete a utilizar (Figura 42) devem obedecer a dois rácios:

- ✓  $W/D = 6$  » ( $W = 35 \text{ mm}$  &  $D = 6 \text{ mm}$ )
- ✓  $E/D = 5$  » ( $E = 30 \text{ mm}$  &  $D = 6 \text{ mm}$ )

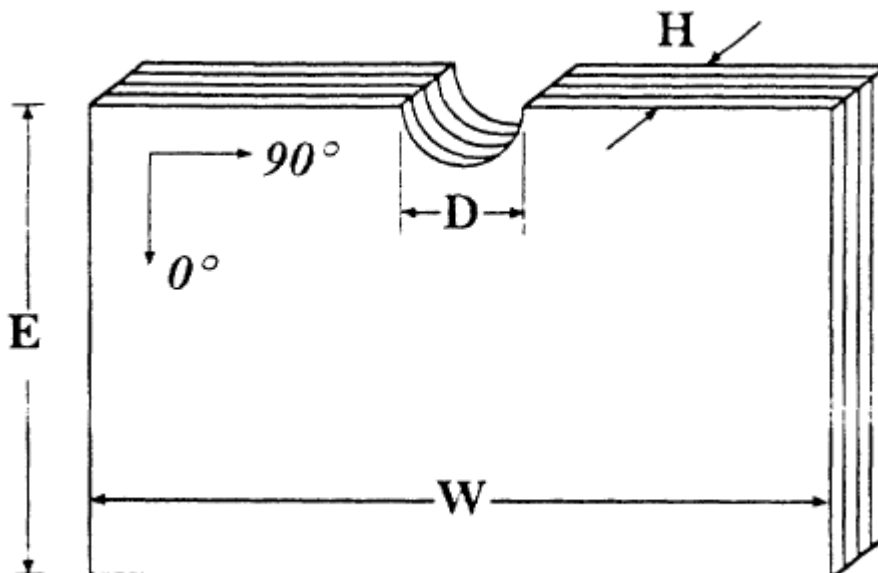


Figura 42 – Forma e dimensões dos provetes a utilizar no ensaio *Pin-Bearing*. [34]

O cumprimento destes rácios entre as dimensões do provete garante que a rotura é por compressão pura, não havendo flexão do provete.

O ensaio consistiu no esmagamento dos provetes com recurso a uma cunha com extremidade em forma semicircular, aplicada no semicírculo resultante do corte do furo. A velocidade de avanço foi de 1.27 mm/min. (Figura 43)

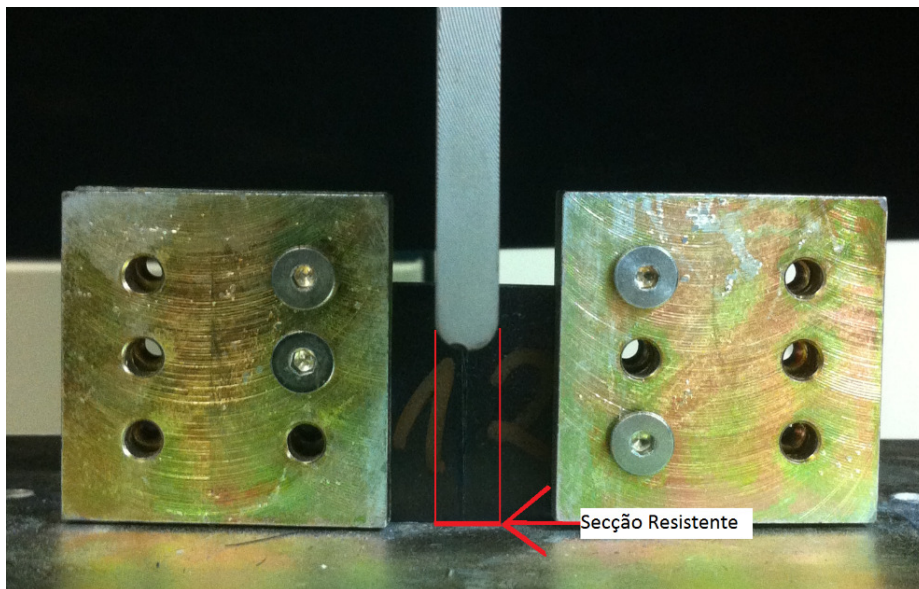


Figura 43 – Ensaio *Pin-Bearing*.

Considerou-se que a secção resistente ao esmagamento, assinalada na figura acima, correspondia ao produto entre o diâmetro do furo (6 mm) e a espessura do provete na secção do furo, medida com recurso a um paquímetro. Cada ensaio terminava quando se registasse uma queda abrupta na força, correspondente à rotura do material. (Figura 44)



Figura 44 – Provede 135\_15 após ensaio *Pin-Bearing*, sendo visível a fratura vertical.

A Tabela 8 permite observar a força máxima aplicada aos vários provetes, bem como as espessuras medidas e as tensões calculadas.

Tabela 8 – Resultados obtidos durante o ensaio de *Pin-Bearing*.

Provete	Tipo Furo	Diâmetro (D)		Força (N) (F)	Tensão (MPa) (F)/(A)
		6 mm	Área Resistente (mm <sup>2</sup> ) (A) = (H)*(D)		
		Espessura (mm) (H)			
1	HPF	4.10	24.60	7428.456	301.97
2	HPF	4.00	24.00	7436.101	309.84
3	HPF	4.10	24.60	8511.908	346.01
4	HPF	4.10	24.60	8449.396	343.47
5	BRA	4.10	24.60	7126.808	289.71
6	BRA	4.10	24.60	8512.211	346.02
7	BRA	4.10	24.60	7702.509	313.11
8	BRA	4.10	24.60	8755.286	355.91
9	HEL	4.10	24.60	8621.979	350.49
10	HEL	3.80	22.80	6649.669	291.65
11	HEL	3.80	22.80	7543.325	330.85
12	HEL	3.80	22.80	6355.254	278.74
13	DAG	3.80	22.80	6556.162	287.55
14	DAG	4.10	24.60	7647.833	310.89
15	DAG	4.10	24.60	7952.213	323.26
16	DAG	4.10	24.60	6768.958	275.16
17	HSS	4.10	24.60	6511.259	264.69
18	HSS	4.10	24.60	6991.354	284.20
19	HSS	3.80	22.80	4966.577	217.83
20	HSS	3.80	22.80	4378.43	192.04

### 3.4 Processamento de Imagem

O presente capítulo descreve as etapas percorridas no tratamento das imagens, com vista à quantificação das áreas de dano à volta dos furos.

O processamento e análise das imagens obtidas durante o processo de radiografia dos furos constitui um passo fundamental para os resultados desta dissertação. O recurso ao tratamento de imagem é um método frequentemente utilizado para se conseguir quantificar a área de delaminação, sendo referido por vários autores como Durão et al. (2013) [37] ou Silva et al. [12]. O objetivo final é obter imagens em que a área do dano tenha uma cor (geralmente o branco) e o resto da imagem outra cor (geralmente o preto).

Inicialmente, estava previsto que o processo de tratamento das imagens fosse levado a cabo no programa *Matlab*<sup>®</sup>. No entanto, devido a algumas características das radiografias e dos furos, que serão expostas neste capítulo, o recurso ao *Matlab*<sup>®</sup> mostrou-se inviável, pelo que foi usado o *software* de edição de imagem *GIMP*<sup>®</sup>.

#### 3.4.1 Threshold e Eliminação de Ruído

As fronteiras entre a zona do furo e a zona de dano e entre a zona de dano e a placa apresentam várias tonalidades (Figura 45), e o mesmo acontece com a área danificada, a área furada e a superfície da placa. Torna-se, portanto, necessário recorrer a métodos para a tornar os contornos e as áreas mais bem definidos.

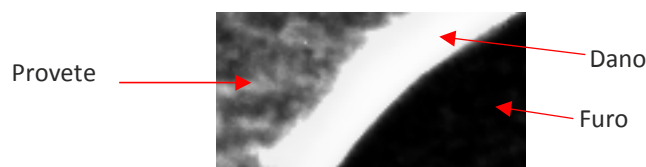


Figura 45 - Amostra dos contornos da área danificada.

Um método frequentemente utilizado para este efeito é o *threshold*. O *threshold* é um algoritmo que calcula um valor limite que divide os valores da escala de cinzentos, tornando a imagem em imagem binária. Por outras palavras, o algoritmo atribui um valor a cada cor da imagem, entre 0 e 255, calcula um valor médio dos tons de cinzento de uma imagem e atribui um *pixel* preto para valores abaixo do limite e um *pixel* branco para valores acima, resultando numa imagem a preto a branco, com contornos e áreas mais nítidas.

Vários *softwares* que permitem o tratamento de imagem já possuem a ferramenta *threshold* incorporada, como é o caso do *Matlab*<sup>®</sup>. No entanto, verificou-se um problema no uso desta ferramenta neste *software*. Constatou-se que em várias radiografias o nível de *threshold* determinado podia não corresponder à melhor transformação da imagem em imagem binária. Com efeito, um nível de *threshold* demasiado baixo mistura a área do dano com tonalidades claras da superfície do

provete, tornando a área do dano indefinida. Por outro lado, um nível demasiado alto negligencia áreas danificadas e pode também separar uma área contínua em áreas mais pequenas e desligadas entre si. (Figura 46)

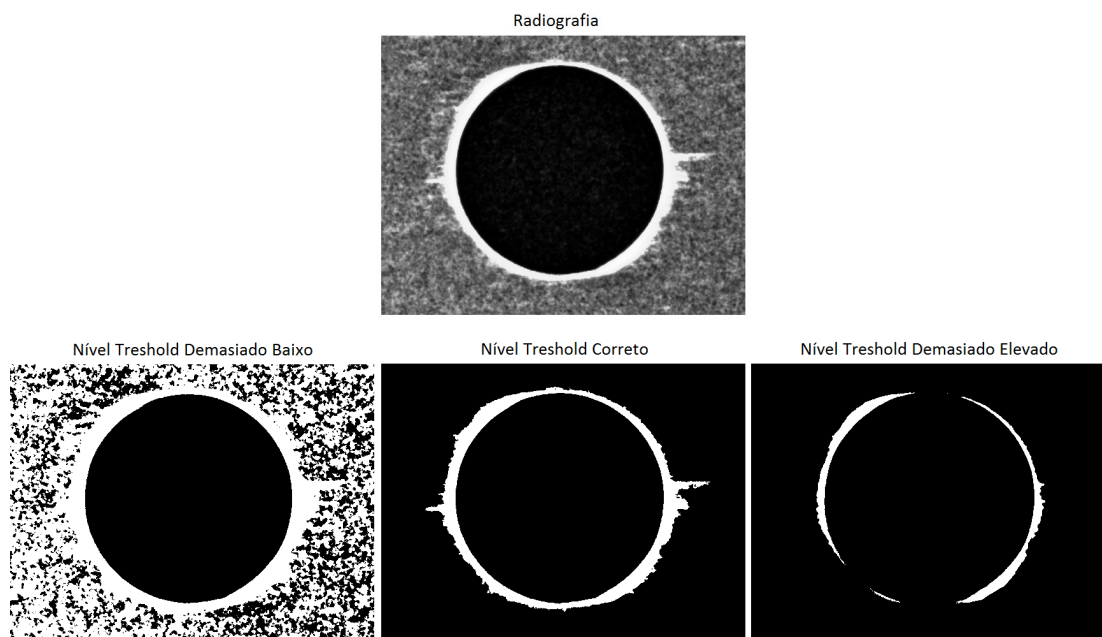


Figura 46 – Resultados da aplicação de vários níveis de *threshold*, comparados com a radiografia original.

As radiografias foram obtidas de forma cuidada. Porém, fatores como a variação das distâncias entre aparelho de Raio-x e os vários provetes, diferentes condições de luz em diferentes dias ou ao longo do mesmo dia tornaram impossível que todas as radiografias tivessem a mesma tonalidade. Caso contrário, podia ter sido definido um nível de *threshold* único para todas.

O *Matlab*<sup>®</sup> permitia a alteração do nível de *threshold* mas era um processo demorado e pouco *user friendly*. Era preciso programar o código para aplicar o nível pretendido, esperar pela geração da nova imagem, repetindo o processo numa lógica de tentativa e erro. Por esse motivo, decidiu-se então processar as imagens no *software* de edição de imagem *GIMP*<sup>®</sup>. Este *software* é de mais fácil utilização e sem perda de qualidade de imagem relativamente ao *Matlab*<sup>®</sup>.

As imagens obtidas durante o processo de radiografia foram então sujeitas à aplicação do *threshold* no *GIMP*<sup>®</sup>. Esta ferramenta permite regular o nível de *threshold* através de uma seta indicadora (Figura 47) e é possível verificar imediatamente as alterações à imagem resultantes da variação do nível de *threshold*.

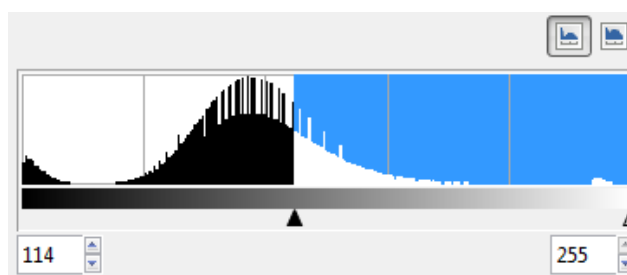


Figura 47 – Regulação do nível de *threshold* no *GIMP*<sup>®</sup>.

Este processo foi conduzido de uma forma metódica, num computador ligado a dois monitores. Um monitor com a radiografia original ampliada e o outro com o *GIMP*®, regulando-se o *threshold* até um ponto em que se considerasse que a imagem modificada estava o mais aproximada possível da imagem original.

A seguir à aplicação do *threshold* procedeu-se à remoção do ruído das imagens. Uma vez que a quantificação da área danificada se iria processar através da contagem dos *pixels* brancos, era conveniente garantir que os únicos *pixels* brancos na imagem correspondiam aos da área danificada em redor do furo, pintando de negro todos os *pixels* fora da área de dano. (Figura 48)

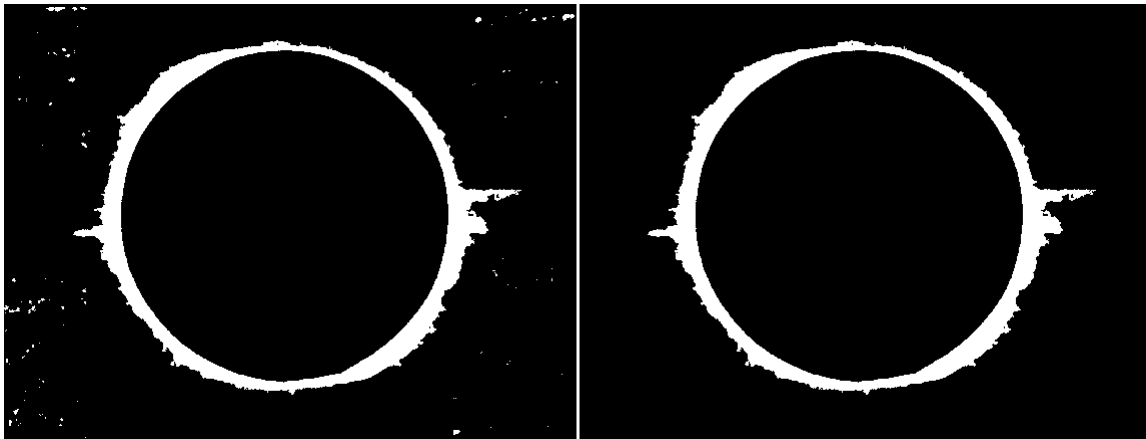


Figura 48 – Imagem binária antes da limpeza do ruído (esquerda) e depois (direita).



### 3.4.2 Reconstrução Circular

A furação de alguns provetes, sobretudo quando se usaram brocas *Dagger* e HSS, produziu levantamentos volumosos de fibras na periferia do furo. (Figura 49).



Figura 49 – Levantamento volumoso de fibras após furo com broca HSS.

Estas limalhas impediam que o contorno do furo ficasse bem definido nas radiografias. A correta distinção entre área de furo e área de dano é fundamental para determinar a delaminação. No entanto, remover mecanicamente as limalhas com objeto cortante estava fora de questão, uma vez que essa operação poderia aumentar a área danificada em redor do furo. Tal procedimento iria adulterar o resultado final na determinação da área do dano, já que misturaria dano causado pela furação com dano causado pela remoção de limalhas.

Para resolver este problema das limalhas, aproveitando zonas das radiografias em que o contorno do furo estava bem definido e recorrendo à ferramenta de seleção circular do *GIMP*®, foram definidos os contornos circulares dos furos quando estes não eram visíveis nas radiografias. (Figura 50)

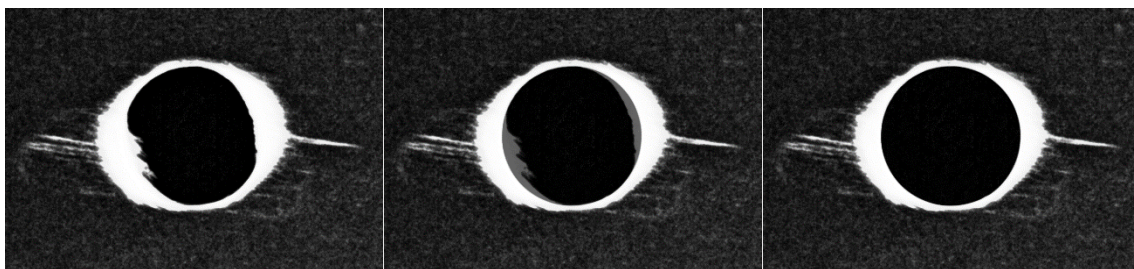


Figura 50 – Reconstrução do furo circular aplicado ao furo do provete 100\_13, furado com broca HSS.

Importa salientar que este procedimento foi realizado após a aplicação do *threshold*, uma vez ao desenhar um círculo negro nas radiografias originais podia-se estar a alterar a escala de cores da imagem. A figura acima serve apenas para demonstrar a necessidade e o procedimento da reconstrução circular.

O processo de reconstrução circular só era possível de realizar em programas de edição de imagem, o que constituiu mais uma vantagem no uso *GIMP*® em detrimento do *Matlab*®.

### 3.4.3 Quantificação do Dano

A conclusão do processo de tratamento de imagem permitiu a quantificação da área danificada, que se baseou na contagem de *pixels* da imagem.

O *GIMP*® possui uma ferramenta denominada histograma de cores que, entre outras informações, fornece o número de *pixels* de cada cor existente na imagem. A área do dano, em *pixels*, é dada pelo total de *pixels* brancos na imagem. Quanto à área do furo, também em *pixels*, foi necessário colorir a área furada com uma terceira cor, para que a ferramenta do programa os pudesse contar. (Figura 51)



Figura 51 – Coloração da zona do furo, para permitir a contagem dos *pixels*.

Para converter as áreas de *pixels* em  $\text{mm}^2$ , e uma vez que, conforme referido anteriormente, as radiografias não foram obtidas sempre à mesma distância do furo, tornou-se necessário definir um fator de escala para cada imagem.

Nesse sentido, assumiu-se o pressuposto de que os furos teriam todos 6 mm de diâmetro e, conseqüentemente,  $28.27433 \text{ mm}^2$  de área. Considerou-se que, a existirem desvios, não teriam grande expressão e portanto, não comprometeriam os resultados.

Obtida a área do furo (a vermelho) em *pixels* e sabendo que correspondia a  $28.27433 \text{ mm}^2$ , tornou-se possível saber a quantos  $\text{mm}^2$  correspondia cada *pixel*. Ao multiplicar este valor de  $\text{mm}^2$  por *pixel* pelo total de *pixels* da área do dano (branca) obteve-se a área de dano em cada furo em  $\text{mm}^2$ .

A determinação da área do dano possibilitou o cálculo da delaminação. De entre as várias fórmulas de cálculo da delaminação propostas em 2.5.3, a escolhida foi o *Damage Ratio* ( $D_{\text{RAT}}$ ), mencionada na Equação 6. A escolha deste indicador prende-se com o facto de em muitos dos furos se verificar a delaminação de algumas fibras que dariam azo um diâmetro de delaminação ( $D_{\text{max}}$ ) muito elevado quando a área de delaminação à volta do furo é relativamente pequena. (Figura 52)

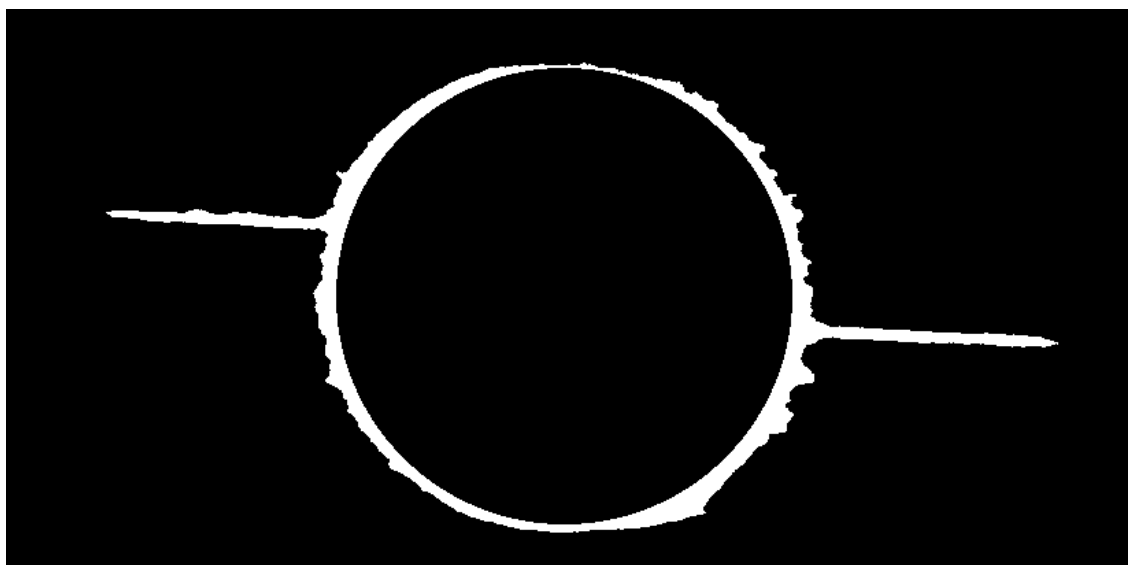


Figura 52 – Furo com broca helicoidal, com delaminação de fibras mas área de dano reduzida.

As áreas e delaminações determinadas para cada furo são apresentadas na [Tabela 9](#) para os Provetes 100 e na [Tabela 10](#) e [Tabela 11](#) para os Provetes 135.

Tabela 9 – Área de dano e delaminação calculadas para os Provetes 100.

Provete	Tipo Furo	Área Furo (A) 28.2743 mm <sup>2</sup>		Área Dano (D)	Área Dano (E) = (C)*(D)	D <sub>rat</sub> (E)/(A)
		Área Furo (B)	Área / 1 Pixel (C) = (A)/(B)			
1	BRA	87117	0.0003246	23111	7.5008	0.2653
2	BRA	85564	0.0003304	21972	7.2606	0.2568
3	BRA	87034	0.0003249	13519	4.3919	0.1553
4	BRA	86574	0.0003266	8563	2.7966	0.0989
5	HPF	86556	0.0003267	17263	5.6391	0.1994
6	HPF	85017	0.0003326	17932	5.9637	0.2109
7	HPF	87984	0.0003214	10438	3.3543	0.1186
8	DAG	85017	0.0003326	22985	7.6442	0.2704
9	DAG	85017	0.0003326	20825	6.9258	0.2450
10	DAG	87117	0.0003246	37592	12.2007	0.4315
11	DAG	84504	0.0003346	25533	8.5431	0.3022
12	HSS	85017	0.0003326	33183	11.0358	0.3903
13	HSS	84256	0.0003356	42258	14.1808	0.5015
14	HSS	85564	0.0003304	35874	11.8544	0.4193
15	HSS	85564	0.0003304	44618	14.7439	0.5215

Tabela 10 - Área de dano e delaminação calculadas para os Provetes 135, furos a 18 mm de distância da face.

Provete	Tipo Furo	Área Furo (A)		Área Dano (D)	Área Dano (E) = (C)*(D)	D <sub>rat</sub> (E)/(A)
		Área Furo (pixel) (B)	Área / 1 Pixel (mm <sup>2</sup> ) (C) = (A)/(B)			
				<b>28.2743 mm<sup>2</sup></b>		
1	HPF	87378	0.0003236	20142	6.5177	0.2305
2	HPF	89197	0.0003170	18797	5.9584	0.2107
3	HPF	87160	0.0003244	27915	9.0555	0.3203
4	HPF	87340	0.0003237	24646	7.9786	0.2822
5	BRA	84504	0.0003346	25065	8.3865	0.2966
6	BRA	86556	0.0003267	25101	8.1995	0.2900
7	BRA	85017	0.0003326	17445	5.8017	0.2052
8	BRA	85564	0.0003304	27125	8.9634	0.3170
9	HEL	86197	0.0003280	19184	6.2927	0.2226
10	HEL	86065	0.0003285	18271	6.0024	0.2123
11	HEL	87117	0.0003246	21904	7.1091	0.2514
12	HEL	86021	0.0003287	26096	8.5775	0.3034
13	DAG	88570	0.0003192	20960	6.6911	0.2366
14	DAG	84804	0.0003334	25317	8.4409	0.2985
15	DAG	86728	0.0003260	29698	9.6819	0.3424
16	DAG	86556	0.0003267	21665	7.0771	0.2503
17	HSS	86556	0.0003267	37703	12.3160	0.4356
18	HSS	87624	0.0003227	31936	10.3050	0.3645
19	HSS	90384	0.0003128	42403	13.2647	0.4691
20	HSS	88217	0.0003205	39675	12.7162	0.4497

Tabela 11 - Área de dano e delaminação calculadas para os Provetes 135, furos a 30 mm de distância da face.

Provete	Tipo Furo	Área Furo (A)		Área Dano		$D_{rat}$ (E)/(A)
		Área Furo ( <i>pixel</i> ) (B)	Área / 1 Pixel ( $mm^2$ ) (C) = (A)/(B)	Área Dano ( <i>pixel</i> ) (D)	Área Dano ( $mm^2$ ) (E) = (C)*(D)	
			<b>28.2743 <math>mm^2</math></b>			
1	HPF	86556	0.0003267	16827	5.4967	0.1944
2	HPF	89197	0.0003170	12311	3.9024	0.1380
3	HPF	86556	0.0003267	17284	5.6460	0.1997
4	HPF	86961	0.0003251	20432	6.6432	0.2350
5	BRA	85564	0.0003304	22765	7.5226	0.2661
6	BRA	85564	0.0003304	15957	5.2729	0.1865
7	BRA	84209	0.0003358	17639	5.9225	0.2095
8	BRA	84504	0.0003346	16516	5.5261	0.1954
9	HEL	85557	0.0003305	22827	7.5437	0.2668
10	HEL	87117	0.0003246	14552	4.7229	0.1670
11	HEL	85564	0.0003304	17056	5.6361	0.1993
12	HEL	87829	0.0003219	21293	6.8547	0.2424
13	DAG	91619	0.0003086	20489	6.3231	0.2236
14	DAG	88354	0.0003200	23038	7.3724	0.2607
15	DAG	85931	0.0003290	22210	7.3079	0.2585
16	DAG	89832	0.0003147	30695	9.6612	0.3417
17	HSS	87018	0.0003249	35821	11.6391	0.4117
18	HSS	88291	0.0003202	37746	12.0878	0.4275
19	HSS	86230	0.0003279	38780	12.7157	0.4497
20	HSS	88174	0.0003207	42898	13.7559	0.4865

Os resultados obtidos nos ensaios mecânicos e no tratamento de imagens descritos neste capítulo serão estudados e relacionados no próximo capítulo.

# CONCLUSÕES

## 4.1 Análise e Discussão dos Resultados

### 4.1.1 Delaminação por Tipo de Furação

### 4.1.2 Influência da Área de Dano na Flexão

### 4.1.3 Influência da Área de Dano na Compressão *Pin-Bearing*

## 4.2 Conclusões e Recomendações para Trabalhos Futuros



## 4 Discussão dos Resultados e Conclusões

Neste capítulo proceder-se-á à análise dos resultados obtidos neste estudo. Numa primeira parte serão descritos os resultados da delaminação por tipo de furação e, de seguida, os do estudo da relação entre a área de dano e a perda de propriedades mecânicas. Numa segunda parte far-se-á a exposição das ilações extraídas da análise aos resultados e serão tecidas algumas considerações para trabalhos a efetuar no futuro.

### 4.1 Análise e Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos foram sujeitos a análises estatísticas, por forma a evidenciar comportamentos, relações e tendências. Estas análises foram realizadas com recurso ao *software* estatístico *Prism 5*<sup>®</sup> e ao *MS Excel*<sup>®</sup>.

#### 4.1.1 Delaminação por Tipo de Furação

A partir das áreas de dano ( $D_{rat}$ ) calculadas, e apresentadas nas **Tabelas 9, 10 e 11**, procedeu-se ao agrupamento destes dados por tipo de furação, calculando-se posteriormente a média dos valores observados. (**Figura 53**)

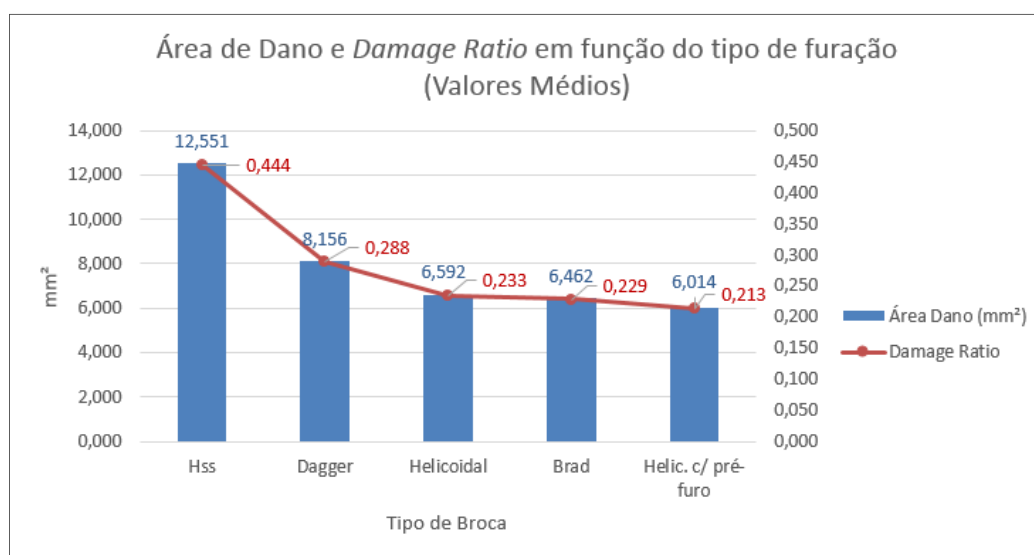


Figura 53 – Valores médios de área de dano e ( $D_{rat}$ ) por tipo de furação.

Através do cálculo de estatísticas descritivas [38], como a média, desvio padrão e a variância, é possível verificar a ocorrência de alguma variação nos resultados, sobretudo na área de dano, conforme demonstram os resultados expostos na **Tabela 12**. Esta variação deve-se, sobretudo, à anisotropia que caracteriza o material compósito.



Tabela 12 – Média, desvio padrão e variância da área de dano e do *damage ratio*.

Tipo Furação	Área Dano (mm <sup>2</sup> )			Damage Ratio		
	Média	Desvio Padrão	Variância	Média	Desvio Padrão	Variância
HSS	12.551	1.239	1.534	0.444	0.044	0.002
Dagger	8.156	1.606	2.580	0.288	0.057	0.003
Helicoidal	6.592	1.120	1.254	0.233	0.040	0.002
Brad	6.462	1.745	3.047	0.229	0.062	0.004
Helicoidal com pré/furo	6.014	1.533	2.349	0.213	0.054	0.003

Os valores médios permitem ter uma ideia da magnitude do dano associado a cada tipo de furação.

Os furos com as brocas helicoidais e *Brad* revelaram-se apropriados, dado terem originado áreas de dano pequenas. A furação com broca helicoidal precedida de pré-furação de diâmetro inferior registou os melhores resultados em termos de área de dano, comprovando o efeito positivo que a realização de um furo piloto tem na delaminação.

No sentido inverso, as brocas *Dagger*, mesmo tendo espaço suficiente à saída, provocaram danos extensos, mostrando que a configuração das arestas de corte não é apropriada para a furação do carbono epóxico utilizado. As brocas helicoidais em aço rápido, como se esperava, resultaram nas áreas de dano mais extensas, demonstrando serem inadequadas para a furação de compósitos.

#### 4.1.2 Influência da Área de Dano na Flexão

O estudo da influência da área de dano na resistência à flexão começou pela compilação dos resultados destas duas grandezas (Tabela 7 e Tabela 9), apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores de tensão de rotura em flexão e áreas de dano correspondentes.

Provete	Tipo Furo	Tensão (MPa)	Área Dano (mm <sup>2</sup> )
100_0.1	s/ furo	1098.00	0.000
100_0.2	s/ furo	1170.19	0.000
100_0.3	s/ furo	1293.30	0.000
100_0.4	s/ furo	1145.19	0.000
100_1	BRA	802.07	7.5008
100_2	BRA	746.20	7.2606
100_3	BRA	623.13	4.3919
100_4	BRA	718.26	2.7966
100_5	HPF	752.21	5.6391
100_6	HPF	751.21	5.9637
100_7	HPF	764.79	3.3543
100_8	DAG	729.27	7.6442
100_9	DAG	704.92	6.9258
100_10	DAG	720.95	12.2007
100_11	DAG	792.52	8.5431
100_12	HSS	677.44	11.0358
100_13	HSS	660.93	14.1808
100_14	HSS	748.29	11.8544
100_15	HSS	797.09	14.7439

Uma primeira análise mais superficial mostrou que, como seria expectável, houve uma redução da tensão de rotura nas secções furadas, quando comparadas com as secções não furadas. Em relação à variação da tensão com a área do dano, os resultados aparentam alguma aleatoriedade. Por exemplo, utilizando a mesma broca e parâmetros de furação, o furo 100\_11 resultou numa área de dano mais extensa do que o furo 100\_9 mas aguentou uma carga maior.

Atendendo à aleatoriedade dos resultados observada na análise preliminar, efetuou-se uma representação gráfica da dispersão dos valores observados de tensão em função da área de dano. (Figura 54)

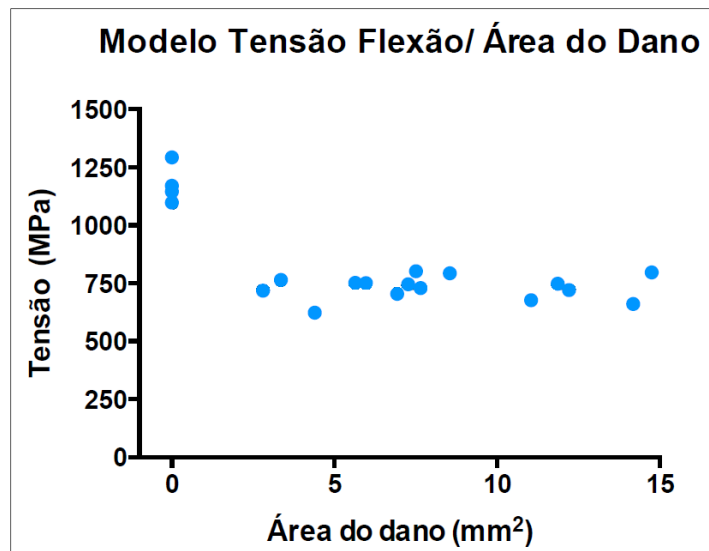


Figura 54 – Dispersão dos valores da tensão de rotura em flexão em função da área de dano.

A análise da dispersão permitiu verificar que após a furação, a resistência à flexão caía para um patamar entre os 600 MPa e os 800 MPa, aparentando variar entre estes valores de forma independente da área do dano.

Com recurso ao *Prism 5*<sup>®</sup> estabeleceu-se uma curva para descrever os dados observados. O modelo determinado assumiu uma forma de “planalto”, em que a tensão tende para uma assíntota de valor de 733.3 MPa, com um intervalo de confiança a 95% entre 696.7 e 769.9 MPa.

As características do modelo “planalto” estabelecido podem ser consultadas em detalhe no Anexo 6.3, destacando-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), de 91.63%, que indica a boa qualidade do ajuste deste modelo aos dados [38]. (Figura 55)

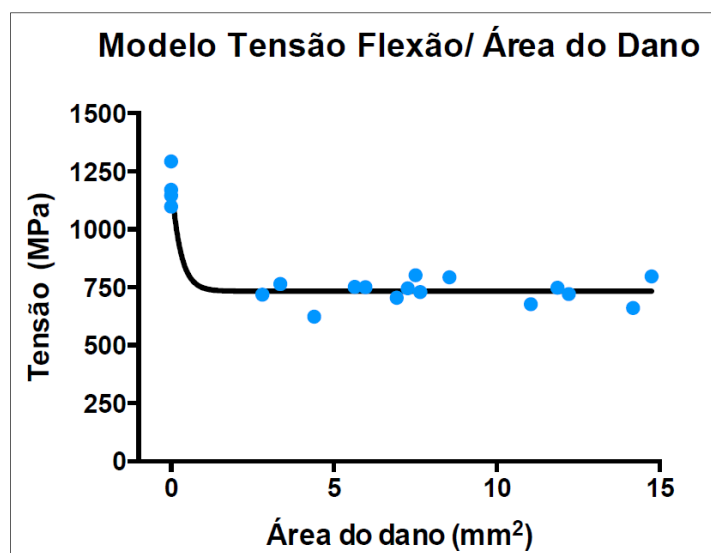


Figura 55 – Modelo “planalto” descritivo da tensão de flexão em função da área de dano.

#### 4.1.3 Influência da Área de Dano na Compressão *Pin-Bearing*

A análise da influência da área de dano na resistência à compressão no ensaio *Pin-Bearing* começou também pela agregação dos dados das duas grandezas em estudo (Tabela 8 e Tabela 11), apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 - Valores de tensão de rotura em compressão *Pin-Bearing* e áreas de dano correspondentes.

Provete	Tipo Furo	Tensão (MPa)	Área Dano (mm <sup>2</sup> )
135_1	HPF	301.97	5.4967
135_2	HPF	309.84	3.9024
135_3	HPF	346.01	5.6460
135_4	HPF	343.47	6.6432
135_5	BRA	289.71	7.5226
135_6	BRA	346.02	5.2729
135_7	BRA	313.11	5.9225
135_8	BRA	355.91	5.5261
135_9	HEL	350.49	7.5437
135_10	HEL	291.65	4.7229
135_11	HEL	330.85	5.6361
135_12	HEL	278.74	6.8547
135_13	DAG	287.55	6.3231
135_14	DAG	310.89	7.3724
135_15	DAG	323.26	7.3079
135_16	DAG	275.16	9.6612
135_17	HSS	264.69	11.6391
135_18	HSS	284.20	12.0878
135_19	HSS	217.83	12.7157
135_20	HSS	192.04	13.7559

Neste caso, a análise preliminar pareceu indicar que, de uma forma geral, a tensão de rotura por compressão decresce com o aumento da área de dano. Tal facto pareceu ser corroborado pela representação gráfica da dispersão dos valores observados de tensão em função da área de dano. (Figura 56)

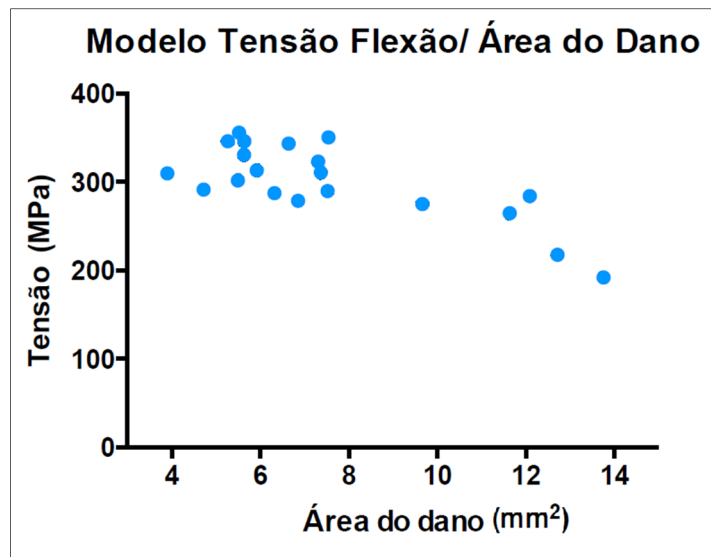


Figura 56 - Dispersão dos valores da tensão de rotura por compressão *Pin-Bearing* em função da área de dano.

Foi efetuada uma regressão linear com recurso ao *Prism 5*<sup>®</sup> para determinar uma reta descritiva dos valores observados. A reta estabelecida na regressão tem um declive negativo de 11.53 ou seja, a tensão de rotura na compressão que ocorre durante o ensaio de *Pin-Bearing* cai 11.53 MPa por cada aumento de 1 mm<sup>2</sup> da área de dano. Este declive negativo, com um intervalo de confiança a 95%, varia entre 9.25 e 13.81 MPa/mm<sup>2</sup>. (Figura 57)

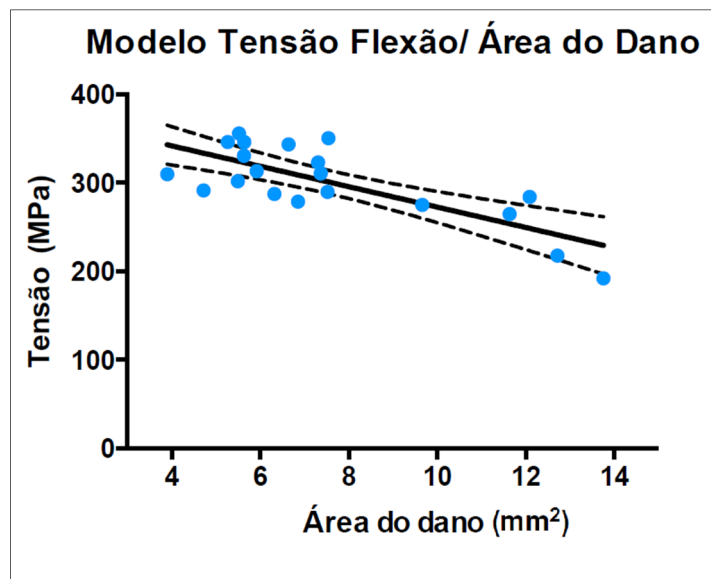


Figura 57 – Regressão linear descritiva da relação entre a tensão de rotura por compressão *Pin-Bearing* e a área de dano, com o intervalo de confiança assinalado.

As informações relativas à regressão linear podem ser consultadas com maior detalhe no Anexo 6.4. A qualidade do ajuste deste modelo pode ser avaliada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que se situou nos 58.77% e pelo erro padrão da regressão ( $Sy.x$ ), que representa a média dos desvios dos valores observados em relação à reta estabelecida [54], e que foi de 28.31 MPa. Estes valores podem ser considerados aceitáveis, validando a aproximação linear determinada.

## 4.2 Conclusões e Recomendações para Trabalhos Futuros

A realização deste trabalho atingiu os objetivos propostos e forneceu contributos para responder a questões relacionadas com a furação de materiais compósitos em geral e do carbono epóxico em particular.

Relativamente aos tipos de furação, os resultados obtidos permitiram concluir que, desde que as condições de corte - avanço e velocidade de corte - estejam devidamente controladas, as brocas helicoidais e *Brad* provocam baixos valores de área de dano e delaminação, de modo que o seu uso pode ser considerado apropriado para o tipo de material compósito utilizado. A furação com as brocas *Dagger* e brocas de aço rápido originaram áreas de dano bastante extensas, mostrando que o seu uso é desadequado na furação de carbono epóxico. Já o recurso à furação prévia de diâmetro inferior ao da furação final pretendida demonstrou ser um método vantajoso para reduzir os danos causados pela furação, tendo-se alcançado com este método as menores áreas de dano.

A radiografia dos furos revelou-se um processo simples e eficaz para obter imagens dos danos causados pela furação. O recurso ao programa de tratamento de imagem *GIMP*<sup>®</sup> demonstrou que este tipo de *software* pode ser bastante útil no estudo da delaminação, na medida em que permitiu contornar algumas limitações do *Matlab*<sup>®</sup>.

Uma das limitações deste estudo prendeu-se com o controlo das condições de efetuação das radiografias e com o fator subjetividade que pode ser apontado à edição de imagens. Será importante, em estudos posteriores, controlar as condições de luminosidade durante a execução das radiografias, a fim de evitar variações da sua tonalidade. Este controlo poderia eventualmente permitir que se definisse um nível de *threshold* comum para todas radiografias, poupando trabalho e eliminando ou atenuando subjetividade. Silva et al. [12] sugerem que se efetue uma radiografia à mesma porção do provete antes e depois da realização do furo, efetuando-se depois uma subtração de imagens, que ajudaria a distinguir o que é dano e o que são características da superfície do provete. No entanto, este método pressupõe que as radiografias sejam obtidas rigorosamente nas mesmas condições.

Para além dos esforços que devem ser feitos no sentido de standardizar o processo de obtenção das radiografias, é importante promover uma fixação mais eficaz quer do provete, para garantir a sua horizontalidade, quer da lente do aparelho de Raio-X, para garantir que todas as radiografias são obtidas à mesma distância do provete. A implementação destes procedimentos permitiria a definição de um fator de escala que facilitaria e aumentaria o rigor da conversão de *pixels* em mm<sup>2</sup>. Apesar das limitações mencionadas, pode considerar-se que as mesmas não colocam em causa os resultados obtidos, na medida em que se conseguiram imagens binárias próximas das originais. A área associada a cada *pixel* é extremamente pequena de modo que, apesar da subjetividade que pode ser imputada à avaliação do utilizador na definição do nível de *threshold*, o erro que possa existir não alterará de modo significativo a ordem de grandeza dos danos observados.

No que concerne aos efeitos da área de dano na resistência à flexão, a tensão de rotura por flexão ronda os 1000 – 1200 MPa e cai para os 600 – 800 MPa após a furação, mantendo-se depois num nível estável para áreas de dano entre os 3 e os 15 mm<sup>2</sup>. A estabilidade mostra que, para áreas de dano neste intervalo, a resistência à flexão não regista grandes variações. A replicação deste estudo recorrendo a instrumentos e a procedimentos que permitam obter furos com áreas de dano ainda menores, contribuiria para definir melhor a curva que descreve a perda de resistência mecânica até à estabilização. De igual modo, a replicação do estudo com produção de furos com maiores áreas de dano, contribuiria para verificar se a resistência à flexão permanece estável ou se decresce a partir de um determinado limiar.

Já a resistência à compressão *Pin-Bearing*, ao contrário do observado na flexão, decresce com o aumento da área danificada, de uma forma linear, com um declive entre os 9 e os 14 MPa/mm<sup>2</sup>. A relação linear demonstra a dependência da resistência à compressão *Pin-Bearing* da área danificada à volta do furo. Também este estudo beneficiaria com a realização de mais ensaios, efetuados com áreas de dano menos e mais extensas do que as observadas, por forma a tornar mais clara a reta descritiva do comportamento das variáveis, e maior número de dados para aumentar o nível de confiança estatístico.

Podem ser obtidas áreas de dano menos extensas recorrendo a maiores velocidades de rotação, menores velocidades de avanço, brocas de geometria mais apropriada, pré-furação e o uso de apoios durante a furação. Em sentido inverso, o uso de velocidades de rotação menores conciliadas com avanços de broca mais rápidos, de brocas desapropriadas, a não execução de pré-furação ou a furação sem apoios, podem ajudar a obter áreas de dano mais extensas.

A anisotropia que caracteriza os materiais compósitos dá azo a variações dos resultados experimentais obtidos. Tal facto não impede, contudo, que os resultados obtidos possam ser considerados satisfatórios. No entanto, o estudo dos efeitos da área de dano nas propriedades mecânicas beneficiará do uso de amostras de maiores dimensões e maior variedade i.e., com mais ensaios e com a análise de uma maior diversidade no que toca a áreas de dano.

É importante salientar que a tensão de rotura por compressão é bastante menor do que a tensão de rotura por flexão. Este facto deve ser tido em conta no desenho das peças, evitando os furos em zonas sujeitas a esforços axiais de compressão ao longo do sentido das fibras ou, caso não seja possível evitar a furação, dimensionar a peça com coeficientes de segurança adequados.

A realização deste trabalho permitiu consolidar e alargar conhecimentos na área da furação dos materiais compósitos. O recurso a um grande conjunto de equipamentos, métodos e *softwares* originou uma experiência prática muito enriquecedora e cujos conhecimentos daí resultantes poderão servir de guia em estudos futuros. Tratou-se de uma oportunidade ímpar para a aquisição de competências numa importante área da Engenharia.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES  
DE INFORMAÇÃO**





## 5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] L. M. P. Durão, J. M. R. S. Tavares, V. H. C. de Albuquerque, J. F. S. Marques e O. N. G. Andrade, “Drilling damage in composite material”, *Materials*, Vol.7, nº 5, pp. 3802-3819, 2014.
- [2] Z. Jia, R. Fu, B. Niu, B. Qian e Y. Bai, F. Wang, “Novel drill structure for damage reduction in drilling CFRP composites”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 110, pp. 55-65, 2016.
- [3] L. M. P. Durão, T. H. Panzera, F. Scarpa, S. L. M. R. Filho e P. R. Oliveira, “Damage assessment of fibre reinforced laminates”, *Composite Structures*, Vol. 133, pp. 939-946, 2015.
- [4] P. J. R. O. Nóvoa, “Apontamentos da disciplina de Materiais Compósitos”, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
- [5] A. A. Griffith, “The phenomenon of rupture and flow in solids”, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 221a, pp. 163-198, 1920.
- [6] M. F. S. F. de Moura, A. B. de Morais e A. G. Magalhães, “Materiais Compósitos – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico”, Porto: Publindústria – Produção e Comunicação Lda., 2011.
- [7] A. G. Magalhães, “Apontamentos da disciplina de Materiais Não Metálicos”, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2006.
- [8] I. M. Low, “Ceramic matrix composites – Microstructure, properties and applications”, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2006.
- [9] S. Suresh, A. Mortensen e A. Needleman, “Fundamentals of metal matrix composites”, Stoneham: Butterworth-Heinemann, 1993.
- [10] T. P. Sathishkumar e J. Naveen, “Glass fiber-reinforced polymer composites – a review”, *Journal of Reinforced Plastics & Composites*, Vol, 33, nº 13, pp. 1258-1275, 2014.
- [11] D. L. Chung, “Carbon Fiber Composites”, Stoneham: Butterworth-Heinemann, 1994.
- [12] D. Silva, J. P. Teixeira e C. M. Machado, “Methodology analysis for evaluation of drilling-induced damage composites”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 71, nº 9, pp. 1919-1928, 2014.

- [13] L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, J. M. R. S. Tavares, V. H. C. de Albuquerque e A. Torres Marques, "Comparative analysis of drills for composite laminates", *Journal of Composite Materials*, Vol. 46, nº 14, pp. 1649-1659, 2012.
- [14] L. M. P. Durão, "Apontamentos da disciplina de Estruturas Especiais", Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2015.
- [15] L. Daudeville, O. Allix e P. Ladevèze, "Delamination analysis by damage mechanics: some applications", *Composites Engineering*, Vol, 5, Nº 1, pp. 17-24, 1995.
- [16] F. Lissek, J. Tegas e M. Kaufeld, "Damage quantification for machining of CFRP: an introduction about characteristic values considering shape and orientation of drilling-induced delamination", *Procedia Engineering*, Vol 149, pp. 2-16, 2016.
- [17] L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, J. M. R. S. Tavares, V. H. de Albuquerque, e A. Monteiro Baptista, "Delaminação na furação de laminados carbono/epóxido", Porto: CIBEM, 2011.
- [18] R. Melentiev, P. C. Priarone, M. Robiglio e L. Settineri, "Effects of tool geometry and process parameters on delamination in CFRP drilling: An overview", *Procedia CIRP*, Vol 45, pp. 31-34, 2016.
- [19] J. P. Davim e P. Reis, "Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave – experimental and statistical study", *Materials and Design*, Vol. 24, Nº 5, pp. 315-324, 2003.
- [20] K. Palanikumar, "Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites", *Measurement*, Vol. 44, Nº 1, pp. 2138-2148, 2011.
- [21] V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, J. Campos Rubio, A Esteves Correia, A. M. Abrão e J. P. Davim, "Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 202, Nº 1-3, pp. 431-438, 2008.
- [22] Y. Turki, M. Habak, R. Velasco, Z. Aboura, K. Khellil e P. Vantomme, "Experimental investigation of drilling damage and stitching effects on the mechanical behaviour of carbon/epoxy composites", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 87, pp. 61-72, 2014.

- [23] H. Hocheng e C. K. H. Dharan “Delamination during drilling in composite laminates”. *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 112, Nº 3, pp. 236-239, 1990.
- [24] F. Lachaud, R. Piquet, F. Collombet e L. Surcin, “Drilling of composite structures”, *Composite Structures*, Vol. 52, Nº 3-4, pp. 511-516, 2001.
- [25] E. Capello, “Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 148, Nº 2, pp. 186-195, 2004.
- [26] P. Curnick, “An investigation into the drilling of fibre-reinforced polymer composites using the optical microscopy inspection method”, *Insight*, Vol. 43, Nº 5, pp. 248-252, 2011.
- [27] L. M. P. Durão, A. G. Magalhães, A. T. Marques e J. M. R. S. Tavares, “Influência dos parâmetros de maquinagem no dano de placas compósitas”, *Mecânica Experimental*, Vol, 16, pp. 45-54, 2008.
- [28] H. Hocheng e C. C. Tsao, “The path towards delamination-free drilling of composite materials”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, Nº 2-3, pp. 251-264, 2005.
- [29] H. Hocheng, “Machining technology for composite materials – principles and practice”, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [30] W-C. Chen, “Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture.*, Vol. 37, Nº 8, pp. 1097-1108, 1997.
- [31] J. P. Davim, J. Campos Rubio e A. M. Abrão, “A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates”, *Composites Science and Technology*, Vol. 67, Nº 9, pp. 1939-1945, 2007.
- [32] M. Mehta, T. J. Reinhart e A.H. Soni, “Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr composite laminates”, *Proc. of the machining composite materials symposium - ASM materials week*, pp. 113–26, 1992.

- [33] C. C. Tsao, K. L. Kuo e I.C. Hsu, "Evaluation of a novel approach to a delamination factor after drilling composite laminates using a core-saw drill", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 59, Nº 5, pp. 617-622, 2012.
- [34] H. S. Wang, C. L. Hung e F. K. Chang, "Bearing failure of bolted composite joints. Part I: Experimental characterization", *Journal of Composite Materials*, Vol. 30, Nº 12, pp. 1284-1313, 1996.
- [35] ISO 14125: Fibre reinforced plastic composites – Determination of Flexural Properties, Genebra: International Organization for Standardization, 1998.
- [36] L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, J. M. R. S. Tavares, V. H. C. Albuquerque, A. A. Vieira e A. T. Marques, "Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates", Projeto da FCT Nº PTDC/EME – TME/66207, 2006.
- [37] L. M. P. Durão, J. M. R. S. Tavares, V. H. C. Albuquerque, D. J. S. Gonçalves, "Damage evaluation of drilled carbon/epoxy laminates based on area assessment methods", *Composite Structures*, Vol. 96, pp. 576-583, 2013.
- [38] R. C. Guimarães e J. A. S. Cabral, "Estatística", Madrid: McGraw-Hill, 2007.
- [39] "[https://en.wikipedia.org/wiki/Composite\\_bow#cite\\_note-11](https://en.wikipedia.org/wiki/Composite_bow#cite_note-11)", consultado em 20-09-2016.
- [40] "<http://composite.about.com/od/aboutcompositesplastics/a/HistoryofComposites.htm>", consultado em 20-09-2016.
- [41] "<http://www.acmanet.org/composites/where-are-composites-used>", consultado em 21-09-2016.
- [42] "<https://www.eurofighter.com/the-aircraft>", consultado em 20-08-2016.
- [43] "<https://www.planespotters.net/photo/286480/3120-german-air-force-eurofighter-ef-2000-typhoon>", consultado em 20-08-2016.
- [44] "[www.inegi.pt/ddownloads/imprensa/plumaexpresso.pdf](http://www.inegi.pt/ddownloads/imprensa/plumaexpresso.pdf)", consultado em 20-08-2016.
- [45] "<http://www.guytakayamasurfboards.com/carbon-fiber-surfboard-construction/>", consultado em 22-08-2016.

- [46] “<http://edition.cnn.com/2011/10/25/travel/dreamliner-features/>”, consultado em 28-09-2016.
- [47] “[https://en.wikipedia.org/wiki/Chobham\\_armour#Material](https://en.wikipedia.org/wiki/Chobham_armour#Material)”, consultado em 28-09-2016.
- [48] “<http://www.dailymail.co.uk/news/article-3637773/PICTURED-Kevlar-helmet-saved-officer-s-life-caught-cross-fire-Orlando-gunman-SWAT-team-over.HTML>”, consultado em 30-09-2016.
- [49] “[http://web.mit.edu/windenergy/windweek/Presentations/Nolet\\_Blades.pdf](http://web.mit.edu/windenergy/windweek/Presentations/Nolet_Blades.pdf)”, consultado em 09-10-2016.
- [50] “<http://br.cpicfiber.com/processos.asp?codigo=7&cat=Processos>”, consultado em 09-10-2016.
- [51] “<http://www.toraycfa.com/highstrength.html>”, consultado em 11-10-2016.
- [52] “<https://engineerharry.wordpress.com/2012/04/21/drills-drilling/>”, consultado em 5-10-2016.
- [53] “[http://www.fileformat.info/mirror/egff/ch03\\_08.htm#X058-9-C03-S1-8](http://www.fileformat.info/mirror/egff/ch03_08.htm#X058-9-C03-S1-8)”, consultado em 30-09-2016.
- [54] “[https://www.graphpad.com/guides/prism/5/user-guide/prism5help.html?reg\\_diagnostics\\_tab\\_7\\_2.htm](https://www.graphpad.com/guides/prism/5/user-guide/prism5help.html?reg_diagnostics_tab_7_2.htm)”, consultado em 13-10-2016.



# ANEXOS

6.1 FICHA TÉCNICA CARBONO EPÓXIDO T700 – UD REM TAPE

6.2 DIIDOMETANO DE ANALAR NORMAPUR

6.3 CARACTERÍSTICAS DA CURVA MODELO “PLANALTO”

6.4 CARACTERÍSTICAS DA REGRESSÃO LINEAR





## 6 ANEXOS

### 6.1 Ficha Técnica Carbono Epóxico T700 – UD REM TAPE



**Composite Materials (Italy) s.r.l. – Socio Unico**  
 Via Quasimodo, 33 – 20025 Legnano (MI) ITALY  
 Phone: +39 0331.467.555  
 Fax: +39 0331.467.777  
 E-mail: [info@composite-materials.it](mailto:info@composite-materials.it)  
[www.composite-materials.it](http://www.composite-materials.it)

## CIT HS160 T700 REM UD tape 36%

### MECHANICAL PROPERTIES OF PREPREG LAMINATES

Test carried out on a UD REM TAPE – T700 Carbon Prepreg  
 (Standard cure cycle: 1 hours @ 125°C).

Cured Material Property	Unit	Actual Values
Tensile Modulus 0°	GPa	123.0
Tensile Strength 0°	MPa	2294
Tensile Strain	%	1.72
Compression Modulus 0°	GPa	109.8
Compression Strength 0°	MPa	1152
Flexural Modulus 0°	GPa	134.0
Flexural Strength 0°	MPa	1850
Inter-laminar Shear Strength	MPa	81.5
Cured Ply Thickness	mm	0.164

Laminates Cure condition: 2 hours @ 135°C

## 6.2 Diiodometano de AnalaR NORMAPUR



### Product Specification

Material	25633.186
Material description	DIIODOMETHANE
Grade	AnalaR NORMAPUR
CAS Number	75-11-6
Molecular formula	CH <sub>2</sub> I <sub>2</sub>
Molecular mass	267.84

Characteristics	Specifications
Assay (on anhydrous substance)	Min. 99.4 %
Acidity	Max. 0.003 meq/g
Density (20/4)	3.310 → 3.322
Solidification point	5.6 → 6.2 °C

#### Signature

We certify that this batch conforms to the specifications listed above.

This document has been produced electronically and is valid without a signature.

Isabelle Habay, Head of Laboratory - Briare  
 VWR International S.A.S., Z.I. de Vaugereau, FR-45250 Briare,  
 France

### 6.3 Características da Curva Modelo “Planalto”

Plateau followed by one phase decay					
Best-fit values		Std. Error		95% Confidence Intervals	
X0	0,02264	X0	29923	X0	-63766 to 63766
Y0	1177	Y0	30,79	Y0	1111 to 1242
<b>Plateau</b>	<b>733,3</b>	<b>Plateau</b>	<b>17,17</b>	<b>Plateau</b>	<b>696,7 to 769,9</b>
K	3,575	K	38482	K	0,0 to 82009
Half Life	0,1939	Span	35,25	Half Life	8,452e-006 to +infinity
Tau	0,2798			Tau	1,219e-005 to +infinity
Span	443,4			Span	368,3 to 518,5
<b>Goodness of Fit</b>					
Degrees of Freedom	15				
R <sup>2</sup>	0,9163				
Absolute Sum of Squares	56885				
Sy.x	61,58				
<b>Constraints</b>					
K	K > 0,0				
<b>Number of points Analyzed</b>					
	19				

Equation: Plateau followed by one phase decay

[http://www.graphpad.com/guides/prism/6/curve-fitting/reg\\_expone...](http://www.graphpad.com/guides/prism/6/curve-fitting/reg_expone...)**GraphPad Curve Fitting Guide****Equation: Plateau followed by one phase decay****Introduction**

In the standard **one-phase decay** equation, the decay starts at time 0. This equation is used when you measure a baseline for a while, then do some experimental intervention that starts the decay at some time  $X_0$ .

**Entering data**

Create an XY data table. Enter time into X, and response (binding, concentration ...) into Y. If you have several experimental conditions, place the first into column A, the second into column B, etc.

After entering data, click Analyze, choose nonlinear regression, choose the panel of exponential equations, and choose *Plateau followed by one phase decay*.

**Consider constraining  $X_0$  and Plateau to a constant values**

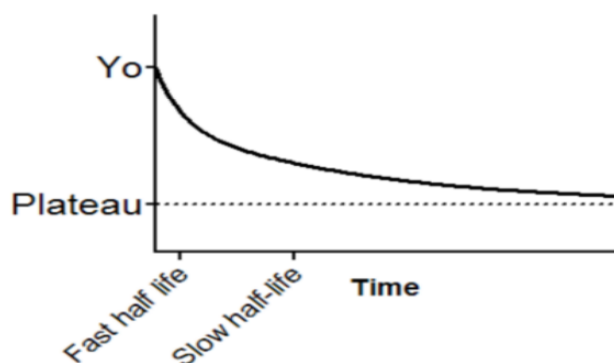
If you know the time at which you initiated the decay, you should constrain  $X_0$  to that value.

If you have subtracted off any background signal, then you know the curve has to plateau at  $Y=0$ . In this case, you should constrain the parameter Plateau to be a constant value equal to zero.

To constrain parameters to constant values, go to the Constrain tab of the nonlinear regression dialog, set the drop down next to the parameter name to "Constant equal to" and enter the value.

**Model**

$$Y = \text{IF}(X < X_0, Y_0, \text{Plateau} + (Y_0 - \text{Plateau}) * \exp(-K * (X - X_0)))$$



**$X_0$**  is the time at which the decay begins. Often you will set that to a constant value based on your experimental design, but otherwise Prism can fit it. It is expressed in the same time units as X.

**$Y_0$**  is the average Y value up to time  $X_0$ . It is expressed in the same units as Y.

**Plateau** is the Y value at infinite times, expressed in the same units as Y.

1 of 2

16/10/13 22:53

Equation: Plateau followed by one phase decay

[http://www.graphpad.com/guides/prism/6/curve-fitting/reg\\_expone...](http://www.graphpad.com/guides/prism/6/curve-fitting/reg_expone...)

**K** is the rate constant, expressed in reciprocal of the X axis time units. If X is in minutes, then K is expressed in inverse minutes.

**Tau** is the time constant, expressed in the same units as the X axis. It is computed as the reciprocal of K.

**Half-life** is in the time units of the X axis. It is computed as  $\ln(2)/K$ .

**Span** is the difference between  $Y_0$  and Plateau, expressed in the same units as your Y values.

© 1995-2015 GraphPad Software, Inc. All rights reserved.

## 6.4 Características da Regressão Linear

### LINEAR REGRESSION

Best-fit values	
Slope	-11,53 ± 2,277
Y-intercept when X=0.0	388,1 ± 18,38
X-intercept when Y=0.0	33,65
1/slope	-0,08672
95% Confidence Intervals	
Slope	-16,31 to -6,748
Y-intercept when X=0.0	349,4 to 426,7
X-intercept when Y=0.0	25,95 to 52,19
Goodness of Fit	
R <sup>2</sup>	0,5877
Sy.x	28,31
Is slope significantly non-zero?	
F	25,66
DFn, DFd	1,000, 18,00
P value	< 0,0001
Deviation from zero?	Significant
Data	
Number of X values	20
Maximum number of Y replicates	1
Total number of values	20
Number of missing values	40
Equation	Y = -11,53*X + 388,1

## GraphPad Curve Fitting Guide

### Analysis checklist: Linear regression

#### ✓ Can the relationship between X and Y be graphed as a straight line?

In many experiments the relationship between X and Y is curved, making linear regression inappropriate. It rarely helps to transform the data to force the relationship to be linear. Better, use nonlinear curve fitting.

#### ✓ Is the scatter of data around the line Gaussian (at least approximately)?

Linear regression analysis assumes that the scatter of data around the best-fit line is Gaussian.

#### ✓ Is the variability the same everywhere?

Linear regression assumes that scatter of points around the best-fit line has the same standard deviation all along the curve. The assumption is violated if the points with high or low X values tend to be further from the best-fit line. The assumption that the standard deviation is the same everywhere is termed homoscedasticity. (If the scatter goes up as Y goes up, you need to perform a weighted regression. Prism can't do this via the linear regression analysis. Instead, use nonlinear regression but choose to fit to a straight-line model.

#### ✓ Do you know the X values precisely?

The linear regression model assumes that X values are exactly correct, and that experimental error or biological variability only affects the Y values. This is rarely the case, but it is sufficient to assume that any imprecision in measuring X is very small compared to the variability in Y.

#### ✓ Are the data points independent?

Whether one point is above or below the line is a matter of chance, and does not influence whether another point is above or below the line.

#### ✓ Are the X and Y values intertwined?

If the value of X is used to calculate Y (or the value of Y is used to calculate X) then linear regression calculations are invalid. One example is a Scatchard plot, where the Y value (bound/free) is calculated from the X value. Another example would be a graph of midterm exam scores (X) vs. total course grades(Y). Since the midterm exam score is a component of the total course grade, linear regression is not valid for these data.

© 1995-2015 GraphPad Software, Inc. All rights reserved.