



# ESTUDO DA DELAMINAÇÃO EM COMPÓSITOS DE EPÓXIDO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO

**JORGE MIGUEL PINTO DA SILVA**

Outubro de 2016

# **ESTUDO DA DELAMINAÇÃO EM COMPÓSITOS DE EPÓXIDO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO**

Jorge Miguel Pinto da Silva

**2016**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica





# **ESTUDO DA DELAMINAÇÃO EM COMPÓSITOS DE EPÓXIDO REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO**

Jorge Miguel Pinto da Silva  
1100746

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 do Prof. Doutor 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

Este trabalho foi realizado no ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto, sob a orientação do Prof. Dr. Luís Miguel Pereira Durão a quem desejo expressar a minha gratidão pelo apoio, motivação, acompanhamento e aconselhamento durante todo processo de elaboração desta tese de Mestrado.

Agradeço ao Prof. Dr. João Emílio Raimundo Carrilho de Matos e à Prof<sup>ª</sup>. Dra. Stella Maria Costa de Abreu pelo apoio e contribuição durante esta longa etapa na realização deste trabalho.

Gostaria ainda de prestar os meus agradecimentos a todos os meus professores que durante a minha vida académica me inculcaram conhecimentos que puderam ser mais valias na realização desta tese.

Finalmente, resta-me agradecer à minha família, amigos e à minha namorada pela compreensão e motivação, que terá servido de grande mote à realização deste trabalho.



## **PALAVRAS CHAVE**

Furação de compósitos, delaminação, materiais compósitos, ensaios de esmagamento, radiografia, compósitos reforçados com fibras de carbono

## **RESUMO**

Atualmente, os materiais compósitos constituem um dos mais grupos interessantes de materiais a serem aplicados em diversos campos, como a indústria aeronáutica, a indústria automível, na medicina, entre outros.

A grande procura deste tipo de material para novos produtos está associada ao baixo peso e a elevada resistência específica tornando os materiais compósitos uma boa escolha para aplicações mais exigentes. A produção de produtos em material compósito já na forma final é uma das grandes vantagens. Contudo, na montagem é necessário recorrer a operações de furação. No processo de furação, em materiais compósitos, é muito comum ocorrer danos que afetam as propriedades mecânicas do material pondo em causa a fiabilidade do produto.

Neste sentido, para a indústria de materiais compósitos existe a necessidade do desenvolvimento de ferramentas de corte com o objetivo de diminuir a zona de dano e aumentar a qualidade do furo.

No trabalho aqui efetuado, apresenta-se um estudo comparativo entre diferentes geometrias de corte e velocidade de avanço que permitirá encontrar a melhor seleção dos parâmetros de furação. Para além disso, também se recorreu a análise da imagem do furo para encontrar uma correlação entre a área de dano e a Fatores de Delaminação.



**KEYWORDS**

Composite materials, delamination, mechanical test, bearing test, enhanced radiography, damage assessment, epoxy resin reinforced with carbon fiber

**ABSTRACT**

Actually, composite materials are one of the most interesting groups of materials to be applied in various fields such as aeronautics and automobile industry, medicine and others.

The great demand for this type of material for new products is associated with low weight and high specific strength composite materials making a good choice for more demanding applications. The production of composite material products in the final form is a major advantage. However, the assembly is necessary to resort to drilling operations. In the process of drilling, composite materials, it is very common cause damage affecting the mechanical properties of the material calling into question the reliability of the product.

Therefore, in the composite materials industry there is a need for the development of cutting tools in order to reduce the damage area and increase the quality of the hole. With this work, we present a comparative study of different cutting geometries and forward speed that will find the best selection of drilling parameters. Furthermore, it also refers to the hole image analysis to find a correlation between the area of damage and delamination factors.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

**PFRC** – Polímero de fibra de carbono reforçado

**E** – módulo de elasticidade

$\sigma_u$  – Resistência à tração

$\rho$  – Densidade

**E/ $\rho$**  - Módulo específico

$\sigma_u/\rho$  – Resistência específica

**CMM** – compósito de matriz metálica

**CMP** – compósito de matriz polimérica

**CMC** – compósito de matriz cerâmica

**T<sub>g</sub>** - Temperatura de transição vítrea

**PAM** – Poliacrilonitrilo

**UHM** – Ultra high Modulus

**HM** – High Modulus

**IM** -Intermediate Modulus

**HS** - High Strength

**RTM** – Resin Transfer Moulding

**F<sub>d</sub>** – fator de delaminação

**D<sub>máx</sub>** – Diâmetro máximo

**D** – Diâmetro

**A<sub>máx</sub>** - área máxima

**A<sub>d</sub>** -área de dano

**A<sub>0</sub>** – área nominal do furo

**F<sub>da</sub>** – fator de delaminação ajustado

**F<sub>d</sub>** - Fator de delaminação

**F<sub>de</sub>** – Fator de delaminação equivalente

**D<sub>MAR</sub>** – área delaminada

**A<sub>AVG</sub>** – área nominal do furo

**D<sub>RAT</sub>** – Rácio do dano

**F<sub>CT</sub>** – Força Crítica

**RLE** – Run Length Encoding

**DimF** – Dimensão Fratal

**rpm** – rotações por minute

**mm/rot** – milímetros por rotação

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1- BOEING 787 SÃO USADOS POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO (PRFC) PARA ALGUNS COMPONENTES DA ESTRUTURA DO AVIÃO[7]	28
FIGURA 2 - ALGUNS EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DA UTILIZAÇÃO DOS COMPÓSITOS NA ÁREA DA MEDICINA. NA FIGURA DO LADO ESQUERDO PODEMOS VER UMA MÃO BIÓNICA. DO LADO DIREITO PODEM SER OBSERVADAS AS PRÓTESES DE PRFC DE OSCAR PISTORIUS, O PRIMEIRO ATLETA AMPUTADO A COMPETIR NOS JOGOS OLÍMPICOS (2012) [8]–[9]	29
FIGURA 3 – AIRBUS A350 COM AS PONTAS DAS ASAS EM PRFC QUASE VERTICAIS, AUMENTANDO ASSIM A EFICIÊNCIA DAS ASAS [7]	29
FIGURA 4 – CHASSI AUTOMÓVEL DO BMW I3 EM RESINA EPÓXIDA REFORÇADO COM FIBRA DE CARBONO	30
FIGURA 5 – CARRO ELÉCTRICO DA BMW ONDE É UTILIZADO UM COMPÓSITO DE PRFC [14]	32
FIGURA 6 – ESQUEMA DE CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS SEGUNDO O TIPO DE REFORÇO, ADAPTADO DE [12]	35
FIGURA 7 - EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DAS FIBRAS DE ARAMIDA NA INDÚSTRIA MILITAR [18]	37
FIGURA 8 - CONSTRUÇÃO DE CASCO DE NAVIO EM FIBRA DE VIDRO [19]	39
FIGURA 9 - PROCESSO DE MOLDAÇÃO MANUAL POR CONTACTO[12]	40
FIGURA 10 - MOLDAÇÃO POR PROJEÇÃO [12]	41
FIGURA 11 - PROCESSO DE MOLDAÇÃO POR VÁCUO VÁCUO [9]	42
FIGURA 12- MOLDAÇÃO POR COMPRESSÃO [12]	43
FIGURA 13 - PROCESSO RTM [17]	44
FIGURA 14 - MOLDAÇÃO POR AUTOCLAVE [21]	45
FIGURA 15 - PROCESSO DE ENROLAMENTO FILAMENTAR [22]	45
FIGURA 16 - ALGUNS EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DO PROCESSO DE ENROLAMENTO FILAMENTAR[23],[21]	46
FIGURA 17 - PROCESSO DE PULTRUSÃO [24]	46
FIGURA 18 - DISPOSITIVO PARA AMORTECER O AVANÇO DA BROCA, CONFORME CAPELLO ET. AL [30]	50
FIGURA 19 - FOTOGRAFIA DOS FUROS: (A) FURO COM DELAMINAÇÃO GERADO SEM UTILIZAR SUPORTE, (B) FURO COM POUCA DELAMINAÇÃO, UTILIZANDO-SE AMORTECEDOR E (C) FURO COM POUCA DELAMINAÇÃO, UTILIZANDO-SE SUPORTE [30].	50
FIGURA 20 - FURO REALIZADO ATRAVÉS DE FURAÇÃO A LASER [33]	51
FIGURA 21- DELAMINAÇÃO DURANTE O PROCESSO DE FURAÇÃO NUMA PLACA EM PRFC [35] : A) À ENTRADA E B) À SAÍDA	52
FIGURA 22 - DIFERENTES ÁREAS DE DANO MAS COM O MESMO FATOR DE DELAMINAÇÃO ( $F_D$ ) [39]	53
FIGURA 23 - PELO O CRITÉRIO DE C.C.TSAO ET AL. AD – ÁREA DE DANO; $D_{MAX}$ – DIÂMETRO MÁXIMO; DE – DIÂMETRO EQUIVALENTE; D- DIÂMETRO NOMINAL DO FURO [25]	54
FIGURA 24 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA DELAMINAÇÃO COM VÁRIAS GEOMETRIAS DE BROCA [50]	58
FIGURA 25 - OPERAÇÃO DE FURAÇÃO COM E SEM PLACAS DE SUPORTE [50]	59
FIGURA 26 – MARCAÇÃO DAS PLACAS	64

FIGURA 27 - BROCAS UTILIZADAS NA REALIZAÇÃO DOS FUROS : A) BROCA HELICOIDAL; B) BROCA TIPO BRAD; C) BROCA BIMÉTRICA	65
FIGURA 28 – RADIOGRAFIA DO PROVETE 8F1 (ZONA DE DANO A BRANCO RESULTANTE DA FURAÇÃO) COM UMA BROCA TIPO BRAD, AVANÇO DE 0.12 MM/ROT E 1120 RPM.	68
FIGURA 29 - GRÁFICO TENSÃO X DEFORMAÇÃO OBTIDO APÓS TRATAMENTO DE DADOS DO ENSAIO DE ESMAGAMENTO	69
FIGURA 30. EXEMPLO DA ZONA DE FRONTEIRA	74
FIGURA 31. VÁRIOS ESTÁGIOS DA IMAGEM APÓS CORRER O PROGRAMA DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM A) IMAGEM OBTIDA A PARTIR DA RADIOGRAFIA; B) IMAGEM TRANSFORMADA EM BINÁRIO; C) IMAGEM QUE REPRESENTA FRONTEIRA DA ZONA DE DANO.	75
FIGURA 32 - EXEMPLO DO FENÓMENO DE GIBBS	76
FIGURA 33 - CONTORNO DO DANO	79
FIGURA 34 - IMAGEM OBTIDA A PARTIR DO PROGRAMA DE PROCESSAMENTO DE IMAGEM FEITO EM MATLAB <sup>®</sup> ANTES DE SER DEFINIDO O CONTORNO DA ZONA DE DANO	79
FIGURA 35 - CURVA DE KOCH	80
FIGURA 36 - EXEMPLO DE CURVA "SUAVE" E CURVA FRACTAL	81
FIGURA 37 - EXEMPLO DO MÉTODO DE <i>BOX-COUNTING</i>	82
FIGURA 38 - IMAGEM RESULTANTE DA FUNÇÃO <i>IMFILL</i>	83
FIGURA 39 - RADIOGRAFIA DO FURO, EXEMPLO DE IMAGEM COM MUITO RUÍDO	89
FIGURA 40 – GRÁFICO DA DIMENSÃO FRACTAL RESULTANTE DA FURAÇÃO COM ROTAÇÃO A 1120 RPM E AVANÇO DE 0.12 MM/ROT	90
FIGURA 41 – GRÁFICO DA ÁREA DE DANO RESULTANTE DA FURAÇÃO COM ROTAÇÃO A 1120 RPM E AVANÇO DE 0.12 MM/ROT	90
FIGURA 42 – GRÁFICO DA DIMENSÃO FRACTAL RESULTANTE DA FURAÇÃO COM ROTAÇÃO A 1120 RPM E AVANÇO DE 0.3 MM/ROT	91
FIGURA 43 – GRÁFICO DA ÁREA DE DANO RESULTANTE DA FURAÇÃO COM ROTAÇÃO A 1120 RPM E AVANÇO DE 0.3 MM/ROT	91
FIGURA 44 – GRÁFICO DO FATOR DE DELAMINAÇÃO EQUIVALENTE RESULTANTE DA FURAÇÃO COM ROTAÇÃO A 1120 RPM E AVANÇO DE 0.3 MM/ROT	92
FIGURA 45 – GRÁFICO DO RÁCIO DE DELAMINAÇÃO (DRAT) RESULTANTE DA FURAÇÃO COM ROTAÇÃO A 1120 RPM E AVANÇO DE 0.12 MM/ROT	93
FIGURA 46 – GRÁFICO DA DIMENSÃO FRACTAL RESULTANTE DA FURAÇÃO COM ROTAÇÃO A 1800 RPM E AVANÇO DE 0.12 MM/ROT	94
FIGURA 47 – GRÁFICO DA ÁREA DE DANO RESULTANTE DA FURAÇÃO COM ROTAÇÃO A 1800 RPM E AVANÇO DE 0.12 MM/ROT	94
FIGURA 48 – GRÁFICO DA DIMENSÃO FRACTAL RESULTANTE DA FURAÇÃO COM ROTAÇÃO A 1800 RPM E AVANÇO DE 0.3 MM/ROT	94
FIGURA 49 – GRÁFICO DA ÁREA DE DANO RESULTANTE DA FURAÇÃO COM ROTAÇÃO A 1800 RPM E AVANÇO DE 0.3 MM/ROT	95
FIGURA 50 – GRÁFICO DA DIMENSÃO FRACTAL RESULTANTE DA FURAÇÃO COM AVANÇO DE 0.12 MM/ROT	96
FIGURA 51 – GRÁFICO DA ÁREA DE DANO RESULTANTE DA FURAÇÃO COM AVANÇO DE 0.12MM/ROT96	

FIGURA 52 – GRÁFICO DA DIMENSÃO FRACTAL RESULTANTE DA FURAÇÃO COM AVANÇO DE 0.3 MM/ROT	96
FIGURA 53 – GRÁFICO DA ÁREA DE DANO RESULTANTE DA FURAÇÃO COM AVANÇO DE 0.3 MM/ROT	97
FIGURA 54 – GRÁFICO DA DIMENSÃO FRACTAL ALTERANDO A ROTAÇÃO DE 1120 RPM PARA 1800 RPM	98
FIGURA 55 – GRÁFICO DA ÁREA DE DANO ALTERANDO A ROTAÇÃO DE 1120 RPM PARA 1800 RPM	98
FIGURA 56 – GRÁFICO DA COMPARAÇÃO DA ÁREA DE DANO ALTERANDO A ROTAÇÃO E O AVANÇO	99
FIGURA 57 – GRÁFICO DA COMPARAÇÃO DA DIMENSÃO FRACTAL ALTERANDO A ROTAÇÃO E O AVANÇO	99
FIGURA 58 – GRÁFICO DA DIMENSÃO FRACTAL RESULTANTE DA FURAÇÃO COM ROTAÇÃO A 1120 RPM E AVANÇO DE 0.12 MM/ROT	103
FIGURA 59 – GRÁFICO DA DIMENSÃO FRACTAL RESULTANTE DA FURAÇÃO COM ROTAÇÃO A 1120 RPM E AVANÇO DE 0.3 MM/ROT	104
FIGURA 60 – GRÁFICO DO FATOR DE DELAMINAÇÃO EQUIVALENTE RESULTANTE DA FURAÇÃO COM ROTAÇÃO A 1120 RPM E AVANÇO DE 0.3 MM/ROT	104
FIGURA 61 – GRÁFICO DA COMPARAÇÃO DA ÁREA DE DANO ALTERANDO A ROTAÇÃO E O AVANÇO	105
FIGURA 62 – GRÁFICO DA COMPARAÇÃO DO FATOR DE DELAMINAÇÃO EQUIVALENTE ALTERANDO A ROTAÇÃO E O AVANÇO	106
FIGURA 63 – GRÁFICO DA COMPARAÇÃO DA TENSÃO MÁXIMA ALTERANDO A ROTAÇÃO E O AVANÇO	106
FIGURA 64 – GRÁFICO DA ÁREA DE DANO ALTERANDO A ROTAÇÃO DE 1120 RPM PARA 1800 RPM	107
FIGURA 65 – GRÁFICO DA TENSÃO MÁXIMA ALTERANDO A ROTAÇÃO DE 1120 RPM PARA 1800 RPM	107
FIGURA 66 – GRÁFICO DO FATOR DE DELAMINAÇÃO EQUIVALENTE MÁXIMA ALTERANDO A ROTAÇÃO DE 1120 RPM PARA 1800 RPM	108



## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 PROPRIEDADES DE ALGUMAS FIBRAS E MATERIAIS, ADAPTADO DE [12]	31
TABELA 2 - PROPRIEDADES DE ALGUNS POLÍMEROS, ADAPTADO [15]	33
TABELA 3- PROPRIEDADES DE ALGUNS TIPOS DE FIBRAS DE VIDRO [12]	35
TABELA 4 - PROPRIEDADES DE ALGUMAS FIBRAS DE CARBONO [12]	37
TABELA 5 - PROPRIEDADES DE ALGUMAS FIBRAS DE ARAMIDA [12]	38
TABELA 6 – PROPRIEDADES DO PRÉ-IMPREGNADO HS160REM APÓS CURA – FABRICANTE: SEAL	65
TABELA 7. – SEQUENCIA DE EMPILHAMENTO, ESPESSURA E NÚMERO DE CAMADAS DA PLACA USADA NO ENSAIO	65
TABELA 8 – EXEMPLO DE NOMENCLATURA DE ALGUNS PROVETES	66
TABELA 9 -PARÂMETROS DE CORTE UTILIZADOS	68
TABELA 10 – VALORES RESULTANTES DO PROCESSAMENTO E ANÁLISE DAS IMAGENS OBTIDAS NA RADIOGRAFIA DAS PEÇAS	90
TABELA 11 – VALORES RESULTANTES DO ENSAIO DE ESMAGAMENTO EFETUADOS NOS PROVETES	103



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>25</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b>	<b>25</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>26</b>
<b>1.3</b>	<b>Organização do relatório</b>	<b>26</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAIS COMPÓSITOS</b>	<b>28</b>
<b>2.1</b>	<b>Caracterização dos Materiais Compósitos</b>	<b>30</b>
2.1.1	Matrizes	32
2.1.2	Reforços	34
<b>2.2</b>	<b>Processamento de materiais compósitos</b>	<b>38</b>
2.2.1	Moldação por contacto	39
2.2.2	Moldação por vácuo	41
2.2.3	Moldação por compressão	42
2.2.4	Moldação por injeção	43
2.2.5	Moldação em autoclave	44
2.2.6	Enrolamento filamentar	45
2.2.7	Pultrusão	46
<b>3</b>	<b>FURAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS</b>	<b>49</b>
<b>3.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>49</b>
<b>3.2</b>	<b>Maquinagem não Convencional</b>	<b>51</b>
<b>3.3</b>	<b>Delaminação induzida pela furação</b>	<b>52</b>
<b>3.4</b>	<b>Avaliação da delaminação</b>	<b>52</b>
<b>3.5</b>	<b>Efeito das diferentes variáveis na delaminação</b>	<b>56</b>
<b>4</b>	<b>TRABALHO EXPERIMENTAL</b>	<b>63</b>

---

<b>4.1</b>	<b>Materiais Utilizados</b>	<b>63</b>
<b>4.2</b>	<b>Materiais Utilizados</b>	<b>64</b>
<b>4.3</b>	<b>Radiografias</b>	<b>67</b>
<b>4.4</b>	<b>Ensaio mecânicos</b>	<b>68</b>
<b>5</b>	<b>PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGEM</b>	<b>73</b>
<b>5.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>73</b>
<b>5.2</b>	<b>Formato escolhido</b>	<b>75</b>
<b>5.3</b>	<b>Thresholding</b>	<b>76</b>
<b>5.4</b>	<b>Fronteira da Imagem</b>	<b>78</b>
<b>5.5</b>	<b>Dimensão fractal</b>	<b>79</b>
<b>5.6</b>	<b>Área</b>	<b>82</b>
<b>6</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS</b>	<b>87</b>
<b>6.1</b>	<b>Propriedades dos materiais</b>	<b>87</b>
<b>6.2</b>	<b>Radiografia</b>	<b>87</b>
<b>6.3</b>	<b>Ensaio de esmagamento</b>	<b>101</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>111</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>113</b>
<b>9</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>117</b>

# INTRODUÇÃO

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

### 1.2 OBJETIVOS

### 1.3 ORGANIZAÇÃO

## 2. MATERIAIS COMPÓSITOS

### 2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS

### 2.2 PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

As aplicações dos materiais compósitos estão a aumentar cada vez mais, não só pela flexibilidade que apresentam em termos de processamento como também pelas suas excelentes propriedades, como a sua baixa densidade, elevada rigidez, boa resistência ao impacto e elevada tensão de rotura.

Apesar de conseguirmos evitar maquinar furos em peças produzidas em materiais compósitos em várias situações, não só pela facilidade de fabrico que estes apresentam, mas também pelo desenvolvimento de outras formas de ligação, como é o caso dos adesivos estruturais, a verdade é que a furação de compósitos é ainda um processo muito importante. No entanto, devido à anisotropia dos compósitos, a furação pode ser a causa de graves danos na peça [1].

Vários estudos foram feitos no sentido de tentar encontrar os parâmetros de furação ideais, como por exemplo a velocidade de avanço, a velocidade de rotação, o material e a geometria das ferramentas, de modo a ser obtida uma zona de dano mínima na zona circundante ao furo [2-4].

Existem várias formas diferentes de dano associadas à furação dos materiais compósitos, e neste trabalho irá ser abordado um tipo designado por delaminação. A delaminação consiste na separação entre duas camadas adjacentes de laminado [5]. Este fenómeno ocorre tanto na entrada como na saída da ferramenta na peça [6].

É da necessidade do conhecimento dos danos provocados pela furação em peças de materiais compósitos que surge este trabalho. Parte dele consiste em propor um novo fator de delaminação e encontrar uma relação matemática entre o novo fator e a resistência mecânica dos furos, obtida através de ensaios pin-bearing em provetes de resina de epóxido reforçada com fibra de carbono.

## 1.2 Objetivos

Os principais objetivos deste projeto são analisar o dano à volta de um furo, a perda de resistência mecânica associada à furação e propor uma melhoria aos critérios já existentes de quantificação do dano. Desta forma pretende-se estimar de forma mais rigorosa e precisa a resistência mecânica de um furo realizado num provete em material compósito, sendo este epóxido reforçado com fibra de carbono. De forma a conseguir cumprir esse objetivo surgiu a necessidade de definir objetivos secundários. Esses objetivos são:

- Calcular a dimensão fractal do contorno da zona de dano de alguns furos feitos em provetes de resina de epóxido reforçada com fibra de carbono;
- Tentar relacionar o valor da dimensão fractal do contorno dos vários furos com os fatores de delaminação existentes;
- Relacionar os resultados obtidos com resultados apresentados por outros autores;

## 1.3 Organização do relatório

Esta tese apresenta-se organizada da seguinte forma:

O Capítulo 1 serve de introdução ao trabalho e guia de leitura com a organização e estrutura da dissertação.

No capítulo seguinte, 2, são apresentadas algumas considerações e generalidades sobre os materiais compósitos. Neste capítulo encontram-se também algumas aplicações dos compósitos, como podem ser divididos e alguns dos diferentes processos de fabrico associados a este tipo de material.

No capítulo 3 é abordada a furação de materiais compósitos, com especial atenção nos danos que este tipo de processo pode originar, como é o caso da delaminação.

No capítulo 4 é descrito o procedimento experimental de toda a parte prática desenvolvida durante a realização deste trabalho.

No capítulo 5 é desenvolvido o tema do processamento de imagem, onde é descrito e explicado o código utilizado no *software* MATLAB®.

No capítulo 6 são apresentados e analisados os resultados obtidos.

As conclusões finais do trabalho são apresentadas no capítulo 7, onde constam também algumas recomendações para trabalhos futuros.

## 2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais compósitos têm vindo a ter um impacto cada vez maior nos materiais de engenharia. São cada vez mais as utilizações deste tipo de material, não só a nível da indústria aeronáutica, aeroespacial e automóvel, mas também na medicina como é o exemplo de algumas próteses, ou ainda em alguns desportos como as raquetes usadas no ténis feitas em polímeros reforçados com fibra de carbono, quadros de bicicletas ou pranchas usadas em desportos aquáticos. Existem ainda outras aplicações deste tipo de material para as quais não direcionamos de imediato o nosso pensamento, como é o caso do betão, composto por ferro e cimento, ou até mesmo a madeira, um material constituído por fibras naturais e resina.

Estamos perante um compósito quando dois ou mais materiais se combinam, mas com uma interface clara entre eles, de modo a criar um material que nos permita usufruir das virtudes dos seus constituintes, diminuindo assim o efeito das características menos desejadas. São geralmente constituídos por um reforço, normalmente fibras, partículas ou outros elementos de reforço (fase dispersa), dispersos numa matriz denominada de fase contínua.

Neste capítulo serão abordadas algumas características dos materiais compósitos, o que os distingue dos outros materiais, como são caracterizados e alguns modos de processamento dos mesmos.



Figura 1- Boeing 787 são usados polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) para alguns componentes da estrutura do avião[7]



Figura 2 - Alguns exemplos de aplicações da utilização dos compósitos na área da medicina. Na figura do lado esquerdo podemos ver uma mão biônica. Do lado direito podem ser observadas as próteses de PRFC de Oscar Pistorius, o primeiro atleta amputado a competir nos jogos Olímpicos (2012) [8]–[9]

Nas figuras acima podemos ver algumas aplicações dos materiais compósitos na indústria aeronáutica (Figura 1 e 3) onde as primeiras utilizações deste tipo de material foram feitas nos anos de 1940 [10]. Também a aplicação de novos materiais na indústria médica como é o exemplo de como os materiais compósitos podem ajudar a vida de pessoas amputadas, Figura 2.



Figura 3 – Airbus A350 com as pontas das asas em PRFC quase verticais, aumentando assim a eficiência das asas [7]

Com o avanço da tecnologia e o processo de fabrico deste material sendo mais barato, é possível implementar na indústria automóvel, mais concretamente em carros citadinos (ver Figura 4), peças em PFRC tornando o veículo mais leve e consequentemente mais económico.



Figura 4 – Chassi automóvel do BMW i3 em resina epóxida reforçado com fibra de carbono [14]

## 2.1 Caracterização dos Materiais Compósitos

A utilização dos materiais compósitos pelo ser humano remonta há milhares de anos atrás com a utilização da madeira como material de construção, mas apenas no século XX com “o nascimento da era dos plásticos” é que se começou a dar importância e utilização aos compósitos na forma em que hoje os conhecemos [11].

À medida que aprofundamos o estudo dos materiais, rapidamente tomamos conhecimento de um aspeto importante que os caracteriza: os materiais, na prática, nunca apresentam uma resistência tão elevada quanto seria previsível teoricamente. A razão por detrás disto deve-se ao facto de estes conterem defeitos que têm origem durante a sua produção. Por exemplo, a resistência mecânica de um bloco de vidro será muito mais baixa do que a de uma fibra desse mesmo material, pois o bloco de vidro terá muito mais defeitos do que uma pequena fibra. Este fenómeno foi primeiramente observado por Griffith. A tabela 1 contém algumas propriedades de fibras de certos

materiais comparados com outros materiais convencionais. É neste princípio que se baseiam os materiais compósitos reforçados por fibras.

Tabela 1 Propriedades de algumas fibras e materiais, adaptado de [12]

<i>Material</i>	<i>Módulo de elasticidade E (GPa)</i>	<i>Resistência à tração <math>\sigma_u</math> (GPa)</i>	<i>Densidade <math>\rho</math> (g/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Módulo específico E/<math>\rho</math></i>	<i>Resistência específica <math>\sigma_u/\rho</math></i>
<i>Fibras:</i>					
<i>Vidro E</i>	72,4	3,5	2,54	28,5	1,38
<i>vidro S</i>	85,5	4,6	2,48	34,5	1,85
<b><i>Carbono (high Module)</i></b>	<b>390</b>	<b>5,5</b>	<b>1,90</b>	<b>205</b>	<b>2,9</b>
<i>Boro</i>	385	2,8	2,63	146	1,1
<i>Tungsténio</i>	414	4,2	19,3	21	0,22
<i>Kevlar®49</i>	130	2,8	1,50	87	1,87
<b><i>Materiais Convencionais:</i></b>					
<i>Aço</i>	210	0,34-2,1	7,8	26,9	0,04-0,27
<i>Ligas de Al</i>	70	0,14-0,62	2,7	25,9	0,05-0,23
<i>Liga de Titânio</i>	120	0,9-1	4,43	27	0,20-0,22
<i>Liga de Cobre</i>	101	0,24	8,74	11,5	0,03
<i>Liga de Magnésio</i>	44,7	0,15-0,27	1,83	24,5	0,08-0,15

Um dos grandes trunfos dos materiais compósitos é a sua elevada resistência específica e elevado módulo específico. Estas duas características surgem da relação entre o módulo de elasticidade (E) e resistência à tração ( $\sigma_u$ ), com a densidade ( $\rho$ ). Com estas duas características torna-se mais fácil avaliar a resistência de um certo material quando comparado com outros.

A baixa densidade e a facilidade de processamento dos compósitos fazem com que este grupo de materiais desempenhe um papel importantíssimo em várias indústrias que necessitam de materiais de alta *performance*. Na indústria automóvel são cada vez mais os carros produzidos em série que utilizam plásticos reforçados com fibra de carbono. Não são só os “super-carros” que apresentam peças de resinas reforçadas com fibras de carbono; por exemplo, o chassis do BMW I3 (carro eléctrico citadino da BMW) é quase todo feito neste compósito. Esta foi uma opção que os engenheiros da BMW

encontraram para contrariar o peso excessivo que as baterias iriam acrescentar ao carro [13].

Os materiais compósitos podem ser classificados segundo vários critérios, sendo a mais importante a classificação segundo o tipo de matriz. Podem então ser separados como compósitos de matriz metálica (CMM), polimérica (CMP) ou cerâmica (CMC) [12].

Quando falamos de reforços podemos também dividir os compósitos em diferentes tipos. Podem estes ser reforçados com partículas, com fibras ou podem ser considerados como compósitos estruturais.



Figura 5 – Carro eléctrico da BMW onde é utilizado um compósito de PRFC [14]

### 2.1.1 Matrizes

É exigido à matriz (fase contínua) de um material compósito que cumpra várias funções, muitas delas fundamentais para o bom desempenho do mesmo. Os reforços em forma de fibras por si só não possuem qualquer valor enquanto material, sendo apenas na presença da matriz que adquirem as características desejadas. A função desempenhada pela matriz num material reforçado por partículas é muito diferente do que se pretende

num material reforçado por fibras. Enquanto que nos compósitos reforçados por partículas a matriz serve apenas para tornar o material num só sólido, nos reforçados por fibras a matriz tem a função de unir as fibras para agirem como um só material aumentando assim a resistência global do material, proteger os filamentos do reforço e diminuir a velocidade de avanço de fraturas.

Os compósitos mais conhecidos são os que utilizam matrizes poliméricas, que como já foi referido apresentam inúmeras aplicações, desde próteses a estruturas para aviões. Dos materiais com matriz metálica são utilizadas as ligas de alumínio reforçadas com fibras de alumina, fibras de boro e fibras de grafite, usadas em componentes de motores de automóvel, reforços para naves espaciais e telescópios espaciais, respetivamente.

As matrizes cerâmicas são muito utilizadas para ferramentas de corte para maquinaria de ligas metálicas duras [12].

São poucos ou nenhuns os polímeros que apresentam boa estabilidade térmica quando comparados com os metais ou os cerâmicos, sendo que até os mais estáveis são facilmente degradados quando expostos a temperaturas acima dos 300°C. Na tabela 2 são apresentadas as propriedades térmicas de alguns polímeros.

Tabela 2 - Propriedades de alguns polímeros, adaptado [15]

<b>Tipo e Polímero</b>	<b>Temperatura de transição vítrea <math>T_g</math> [°C]</b>	<b>Temp. máxima de utilização [°C]</b>
<b><u>Termoendurecíveis</u></b>		
<i>Poliéster</i>	80-100	50
<i>Epoxy</i>	120-180	150
<i>Fenólicos</i>	130-180	200
<i>Poliimidas</i>	300-330	280
<b><u>Termoplásticos</u></b>		
<i>Poliamida (PA-NYLON)</i>	80	125
<i>Polietercetona (PEEK)</i>	143	250
<i>Policarbonato (PC)</i>	145	125
<i>Poliestireno (PS)</i>	190	150

Os polímeros podem ser divididos em dois tipos, os termoplásticos e os termoendurecíveis. Os termoplásticos são constituídos por grandes cadeias moleculares ligadas entre si através de ligações secundárias (forças intermoleculares). Quando são aquecidos, estas ligações intermoleculares são quebradas, fazendo com que o material passe de um estado rígido (mais ou menos rígido dependendo do tipo de polímero) para um estado “borrachoso” (temperatura de transição vítrea  $T_g$ ) podendo até chegar a um estado líquido viscoso, caso a temperatura de fusão seja ultrapassada. É este o principal fator que diferencia os termoplásticos dos termoendurecíveis. Apesar de os últimos também terem uma  $T_g$ , as alterações à estrutura do polímero são muito menos acentuadas do que nos termoplásticos. Quando aquecidos assumem uma forma permanente. Também não apresentam temperatura de fusão, a temperaturas elevadas simplesmente são degradados de forma irreversível, o que faz com que não possam ser reprocessados. As suas estruturas são também diferentes. As moléculas dos termoendurecíveis formam estruturas tridimensionais bastante rígidas e diferentes das longas cadeias moleculares dos termoplásticos. São normalmente fornecidos em resinas, e necessitam geralmente de um catalisador e de um acelerador nas proporções adequadas para que possa ocorrer a polimerização, processo normalmente designado de “cura”. [16]

### 2.1.2 Reforços

Enquanto que a matriz tem as funções de suportar os reforços, absorver deformações e conferir resistência à compressão, reforços contribuem para aumentar a tenacidade, resistência ao impacto, rigidez e resistência à tração do material. Na figura 6 podemos observar um esquema de classificação dos compósitos quanto ao tipo de reforço.

As fibras de vidro podem ser obtidas através do estiramento de vidro fundido. Mal saem da feira, são de imediato sujeitas a tratamentos superficiais que as protegem do contacto com a atmosfera, diminuindo assim o risco de defeito nas fibras. Apesar da sua boa resistência mecânica estas fibras apresentam baixos valores de rigidez (72-97 GPa [16]). O material mais utilizado para fazer fibra de vidro é o vidro de borossilicato,

conhecido como vidro do tipo E. O vidro do tipo S apresenta propriedades ligeiramente melhores, incluindo melhor estabilidade térmica, mas devido ao seu elevado custo, por vezes não compensa a utilização deste tipo de material. Na tabela 3 podem ser observadas algumas das propriedades das fibras de vidro.



Figura 6 – Esquema de classificação dos materiais compósitos segundo o tipo de reforço, adaptado de [12]

Tabela 3- Propriedades de alguns tipos de fibras de vidro [12]

<i>Propriedade</i>	<i>Vidro E</i>	<i>Vidro S</i>
<i>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</i>	2,6	2,49
<i>Módulo de Young (GPa)</i>	73	85,5
<i>Tensão de rotura (MPa)</i>	3400	4580
<i>Deformação na rotura (%)</i>	4,4	5,3
<i>Coefficiente de expansão térmica (10<sup>-6</sup>/oC)</i>	5,0	2,9

Existem dois tipos de fibras de carbono, as fibras com percentagens de carbono entre os 80% e 95%, e as fibras de grafite com percentagens de carbono que podem chegar aos 99%, utilizadas normalmente para aplicações muito exigentes na indústria aeronáutica e aeroespacial.

A produção de fibras de carbono consiste na decomposição térmica de vários precursores orgânicos. Podemos ter fibras obtidas a partir de celulose (*“Rayon fibers”*), poliacrilonitrilo (PAN) ou a partir do alcatrão (*“pitch”*) [12].

As fibras de carbono obtidas através da celulose exigem temperaturas muito elevadas, o que torna o processo muito dispendioso, no entanto as fibras obtidas a partir de alcatrão (*“pitch”*) apresentam geralmente propriedades mecânicas inferiores. O precursor mais utilizado actualmente é o poliacrilonitrilo (PAN). Através da oxidação seguida de pirólise de filamentos de PAN, e subsequente realização de um estiramento a quente, é possível convertê-los em filamentos de carbono com o módulo de elasticidade que se aproxima do valor teórico, considerando a estrutura cristalina da grafite. [Engineering composites, Bryan Harris, 1999]

As fibras de carbono podem ser designadas com base no valor da sua resistência à tração ou no seu módulo elasticidade (E).

- UHM (Ultra high modulus):  $E > 500$  GPa;
- HM (High modulus):  $E > 300$  GPa;
- IM (Intermediate modulus):  $E < 300$  GPa;
- HS (High strength): resistência à tração superior a 3000 MPa e rácio entre Resistência/Rigidez entre 1,5% e 2%;

A tabela 4 mostra algumas propriedades das fibras de carbono que podem ser obtidas a partir dos diferentes precursores.

Tabela 4 - Propriedades de algumas fibras de carbono [12]

<i>Propriedade</i>	<i>PAN</i>	<i>Alcatrão</i>	<i>"Rayon fibers"</i>
<i>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</i>	1,8	2,0	1,7
<i>Módulo de Young (GPa)</i>	200-400	400	415-680
<i>Tensão de rotura (MPa)</i>	2480-3100	1550	2070-2760
<i>Deformação na rotura (%)</i>	0,6-1,2	1-1,5	0,5-0,6
<i>Coefficiente de expansão térmica (10<sup>-6</sup>/oC)</i>	-0,7 a -0,5	-1,6 a -0,9	-



Figura 7 - Exemplos de aplicações das fibras de aramida na indústria militar [18]

Outro tipo de fibras bastante utilizadas são as fibras de aramida, comercialmente conhecidas como KEVLAR<sup>®</sup>, que são produzidas à base de poliamidas aromáticas. Este tipo de fibras apresenta boa resistência ao impacto, à fadiga e à tração, o que faz com que sejam muito usadas em equipamentos à prova de bala como capacetes e coletes.

Na tabela 5 podem ser observadas algumas propriedades de alguns tipos de fibras de aramida.

Tabela 5 - Propriedades de algumas fibras de aramida [12]

<b>Propriedade</b>	<b>Kevlar® 29</b>	<b>Kevlar® 49</b>	<b>Twaron®</b>
<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1,44	1,45	1,44
<b>Módulo de Young (GPa)</b>	60	129	60
<b>Tensão de rotura (MPa)</b>	3000	3000	3000
<b>Deformação na rotura (%)</b>	3,6	1,9	3
<b>Coefficiente de expansão térmica (10<sup>-6</sup>/oC)</b>	-2,0	-2,0	-

## 2.2 Processamento de materiais compósitos

As fibras podem ser fornecidas de várias formas, em fio (rolo), mantas, tecidos, malhas ou em pré-formas. Estas formas são usadas para os diferentes tipos de processamento dos compósitos.

Os métodos de processamento dos compósitos podem ser divididos em dois grupos, processos em molde aberto e em molde fechado. A moldação em aberto é geralmente utilizada para peças de grandes dimensões, como é o caso dos barcos feitos em fibra de vidro. Na Figura 8 podemos ver a construção do casco de um navio em fibra de vidro. Estas geralmente apresentam bom acabamento, mas só numa das faces, ao contrário dos processos em molde fechado em que se consegue ter um bom acabamento em todas as faces. Este tipo de moldação é utilizado para peças com maior precisão e de menores dimensões.

### 2.2.1 Moldação por contacto

Este método é um dos mais comuns e mais económicos, e pode ser dividido em duas vertentes, a moldação manual ou moldação por projeção.

A moldação manual consiste em empilhar e impregnar com resina sucessivas camadas de reforço (tecido ou manta) sobre um molde aberto (Figura 9). Este é um processo adequado para pequenas séries, até 1000 peças por ano. É um processo simples e requer baixos investimentos iniciais, apresentando também poucas restrições a nível da complexidade das peças. A qualidade final da peça depende muito da perícia do operador, sendo por isso muito difícil obter peças com menos de 1mm de espessura. A produção é lenta e podemos até ter várias percentagens de fibra/resina na mesma peça. Quando são usados termoendurecíveis como matriz, a emissão de gases nocivos é elevada, por isso existe a necessidade de uma boa ventilação.



Figura 8 - Construção de casco de navio em fibra de vidro [19]

Na moldação por projeção a fibra e a resina são aplicadas simultaneamente sobre um molde. As fibras, geralmente em forma de *roving*, são conduzidas até à cabeça da pistola de projeção onde são cortadas com o comprimento desejado e lançadas num jato de resina. É um processo semelhante à moldação manual e adequado para pequenas séries.

Apesar de ser um processo ligeiramente mais rápido que a moldação manual, as características mecânicas das peças são inferiores às das peças obtidas por moldação manual, o que acontece devido à percentagem de fibras/resina que é também inferior à do processo de moldação manual.

Na Figura 10 e 11 podemos ver um esquema deste processo.

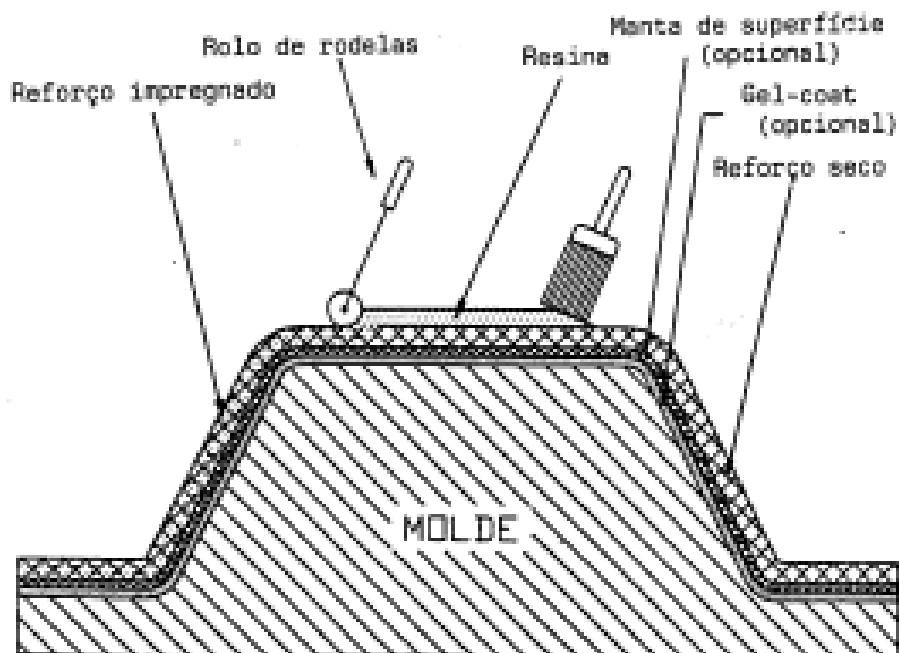


Figura 9 - Processo de moldação manual por contacto[12]

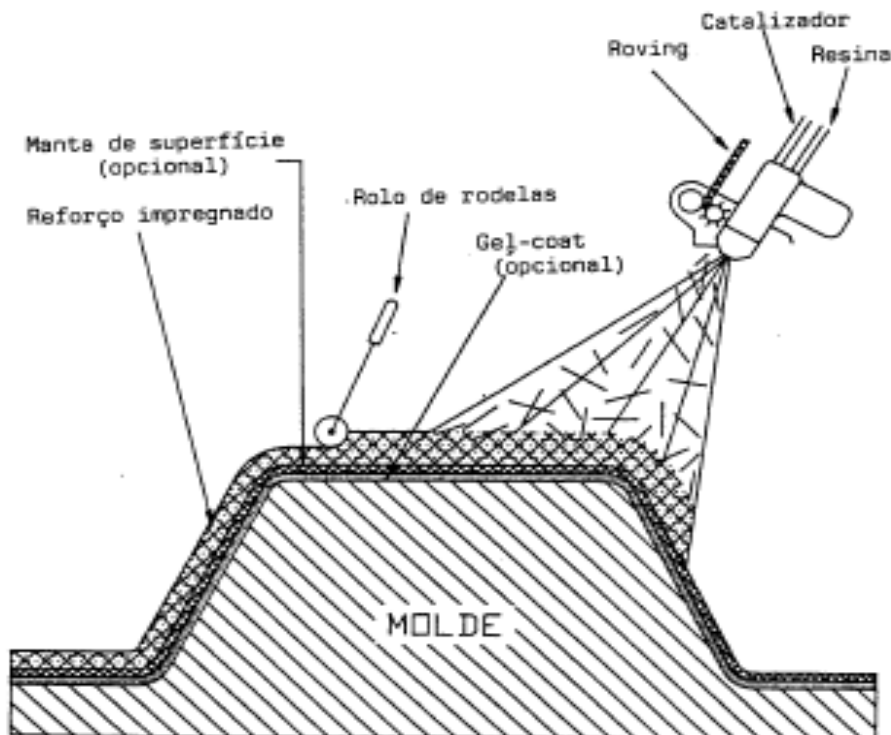


Figura 10 - Moldação por projeção [12]

### 2.2.2 Moldação por vácuo

Este processo consiste na aplicação de vácuo no interior de um molde com as fibras e a resina. O sistema de vácuo é constituído por um molde estanque, uma bomba de vácuo e uma válvula anti-retorno que permite assim manter a baixa pressão (vácuo) após a bomba ser desligada. Quando o molde é fechado a resina e o reforço já se encontram dentro deste, a bomba de vácuo é ligada e dá-se o início do processo.

A Figura 12 representa uma pequena ilustração do processo. Este é um método adequado para séries médias (500 a 5000 peças/ano) e permite a obtenção de peças com características mecânicas muito boas. As peças apresentam bom acabamento em todas as faces e um baixo teor de bolhas de ar. [12]

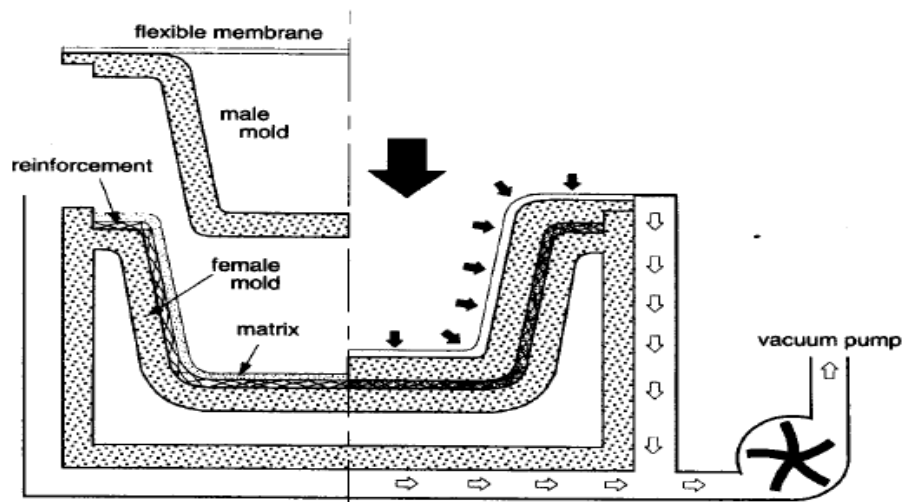


Figura 11 - Processo de moldação por vácuo [9]

### 2.2.3 Moldação por compressão

Existem duas vertentes da moldação por compressão, compressão a quente e a frio. Ambos consistem na compressão de reforços de fibras sobre os quais é previamente depositada uma resina em estado líquido. Na Figura 12 podemos ver a representação do processo de moldação por compressão.

Na moldação a frio, são normalmente utilizadas resinas de poliésteres insaturados associados a um sistema catalítico ativo fortemente exotérmico, que assegura o aquecimento progressivo do molde. Devido às baixas pressões (inferiores a 0,4 MPa) e temperaturas (30°C a 45°C) utilizadas é possível utilizar prensas mais leves e moldes mais baratos. É adequado para séries médias (4 a 12 peças por hora). Uma desvantagem deste processo é a falta de precisão dimensional devido à contração. É também aconselhável evitar ângulos vivos ou nervuras na superfície do molde [20].

A moldação a quente caracteriza-se pelo pré-aquecimento dos moldes a temperaturas entre os 80°C e os 170°C e pelas pressões de trabalho que podem variar entre os 0,5 e 15 MPa. O ciclo de produção pode rondar os 30 segundos, dependendo da temperatura, da complexidade e peso da peça, sendo o mais comum tempos entre 2 a 4 minutos por ciclo.

Este processo permite a obtenção de peças com percentagem de fibras elevada, ou seja, com boas propriedades mecânicas. [16]

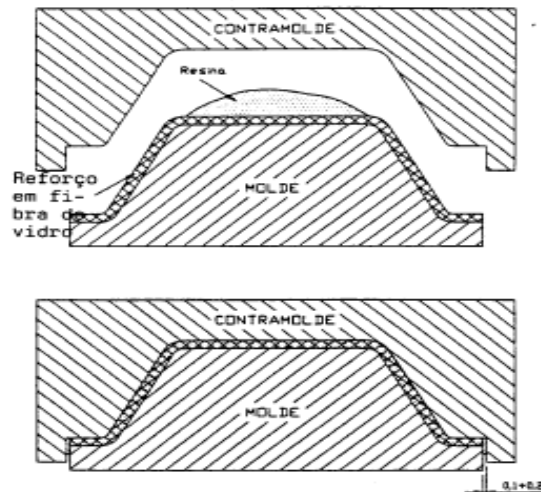


Figura 12- Moldagem por compressão [12]

#### 2.2.4 Moldagem por injeção

A moldagem por injeção consiste na injeção de granulados reforçados prontos a moldar ou de compósitos de moldação dentro de um molde. Os primeiros são geralmente matrizes fenólicas ou de poliéster reforçadas com fibras muito curtas. Os segundos são preparados a partir de uma resina líquida e fibras (6 a 12 mm de comprimento). Em ambos os casos a matéria-prima é alimentada através de um êmbolo ou de um parafuso helicoidal para dentro de um molde.

O molde é mantido sob pressão até que a resina cure. Dependendo do tipo de molde, as pressões de injeção rondam os 30 MPa e os 150 MPa. A temperatura para o aquecimento da matéria-prima ronda os 265 – 295 °C. Neste processo as cadências de produção podem chegar às 100 peças por hora.

Uma vertente muito importante da injeção é o RTM (*Resin transfer moulding*). A resina, já catalisada, é injetada a baixa pressão num molde fechado onde foi colocado previamente o reforço. A resina vai impregnar o reforço expulsando o ar de dentro do

molde. É possível obter peças com grandes percentagens de reforço e com formas bastante complexas, o que torna o projecto dos moldes e execução das peças um processo bastante complexo e difícil. A Figura 13 representa uma ilustração do processo de RTM.

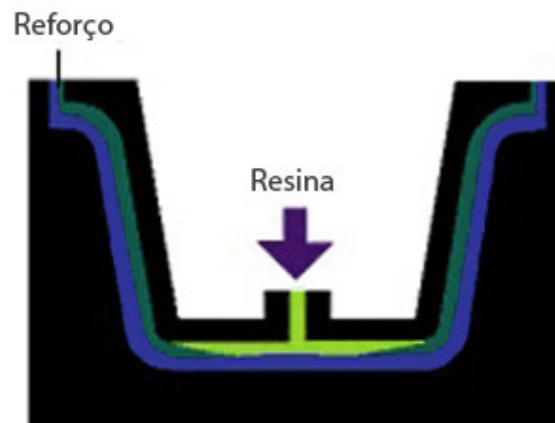


Figura 13 - Processo RTM [17]

### 2.2.5 Moldação em autoclave

Neste processo um componente pré-formado e pré-impregnado é cortado e empilhado sobre um molde. O conjunto é inserido num saco de vácuo e é submetido a um ciclo de pressão e temperatura. É um processo frequentemente utilizado na produção de laminados. Na Figura 14 podemos ver que o laminado está inserido entre duas placas de Teflon poroso, que permitem o escoamento do excesso de resina.

Este é um processo adequado para pequenas séries, mas tem a capacidade de produzir peças com elevada percentagem de fibras (mais de 60%), ou seja, peças com propriedades mecânicas muito boas. O custo da autoclave é elevado o que faz com que seja necessário um forte investimento inicial.

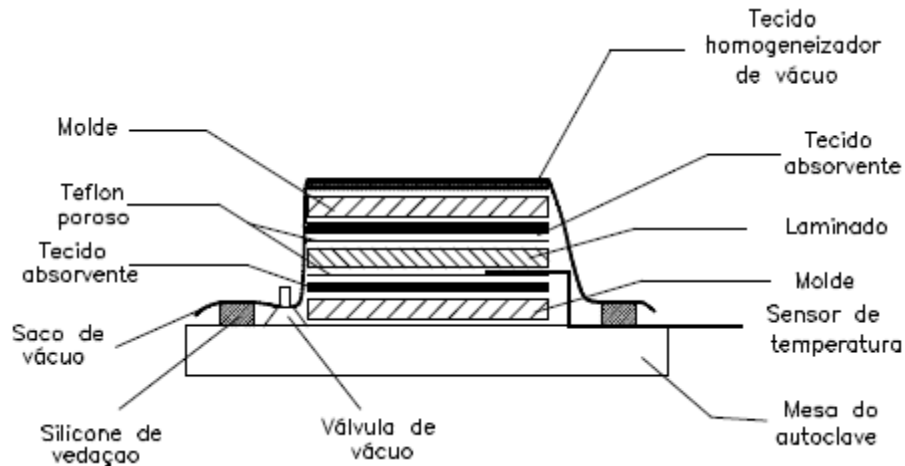


Figura 14 - Moldação por autoclave [21]

### 2.2.6 Enrolamento filментар

É um processo que consiste em depositar uma fibra, pré-impregnada em forma de *roving*, sobre um mandril em rotação. Uma técnica muito utilizada para reforçar reservatórios de pressão, tubos ou peças esféricas. A Figura 15 exemplifica o processo de enrolamento filментар.

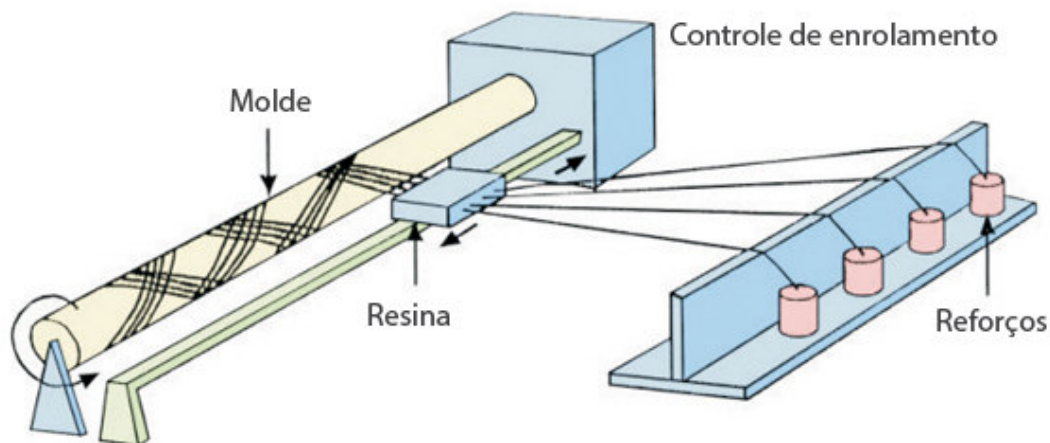


Figura 15 - Processo de enrolamento filментар [22]

Na Figura 16 podemos observar algumas aplicações do processo de enrolamento filментар: à esquerda podemos ver uma garrafa de gás reforçada com fibra de vidro bastante comercializada.



Figura 16 - Alguns exemplos de aplicações do processo de enrolamento filamental[23],[21]

### 2.2.7 Pultrusão

Este processo consiste em puxar o reforço através de um recipiente com resina termoendurecível líquida. O reforço impregnado é forçado a passar por uma fiação, aquecida, que lhe dá a forma (perfil) desejado retirando também algum excesso de resina. É um processo que permite a obtenção em contínuo de perfis com secção constante. Na Figura 17 podemos ver uma ilustração do processo de pultrusão. Este método de fabrico permite a obtenção de perfis com várias formas e com boas características mecânicas. É um processo algo limitado a nível do rigor dimensional das peças.

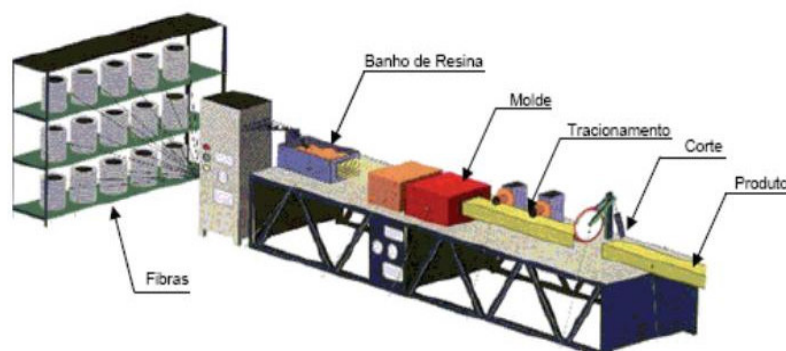


Figura 17 - Processo de pultrusão [24]

# FURAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

3.1 INTRODUÇÃO

3.2 MAQUINAGEM NÃO CONVENCIONAL

3.3 DELAMINAÇÃO INDUZIDA PELA FURAÇÃO

3.4 AVALIAÇÃO DA DELAMINAÇÃO

3.5 EFEITO DAS DIFERENTES VARIÁVEIS NA DELAMINAÇÃO



## 3 FURAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

### 3.1 Introdução

A furação de materiais compósitos é uma operação necessária em muitas aplicações, no entanto este processo apresenta uma grande tendência para causar defeitos nas peças. Os defeitos em materiais compósitos podem ter várias origens. Durante os processos de fabrico, maquinagem ou até no manuseamento e transporte de peças, os defeitos podem surgir de formas inesperadas. Frações de fibra incorretas, seja por excesso ou falta de resina, aparecimento de vazios, desalinhamentos das fibras, delaminação, danos nos reforços ou ainda fraca adesão entre reforço e a matriz são alguns exemplos de defeitos que podem ser encontrados desde a concepção à aplicação dos compósitos. De todos os defeitos que a furação pode originar, a delaminação pode ser considerado o mais crítico[25].

A heterogeneidade, anisotropia, sensibilidade ao calor e as características abrasivas de alguns reforços, tornam a furação de materiais compósitos num processo bastante complicado e com um resultado difícil de prever. Muitos são os autores que estudam os parâmetros ideais para a obtenção de uma furação com uma qualidade cada vez melhor. Hocheng e Tsao afirmam que a geometria e o tipo de material da ferramenta são fatores muito importantes que estão diretamente relacionados com a qualidade dos furos[26]. Entende-se por qualidade do furo, uma zona de dano mínima e uma superfície livre de defeitos. Uma fraca qualidade do furo além de ser um problema estético, está também associada a um alto risco de falha mecânica.

De acordo com um estudo efectuado por Ramulu Et. al [3] o tipo, a velocidade de avanço e rotação da ferramenta são também factores com grande influência na furação de compósitos.

Caprino et. al [28] concluíram que a velocidade de avanço é um parâmetro com grande influência na furação de um compósito de poliéster reforçado com fibra de vidro recorrendo a brocas de aço rápido.

Com o objetivo de analisar a influência da ponta da broca sobre a delaminação de compósito, Hocheng et. al elaboraram um modelo matemático demonstrando que a pré-furação diminui a delaminação[29].

Capello et. al [30] criaram um dispositivo para amortecer o avanço da broca, mostrado na Figura 18 que consiste num sistema mola-amortecedor que controla o avanço da broca, evitando ou minimizando a delaminação.

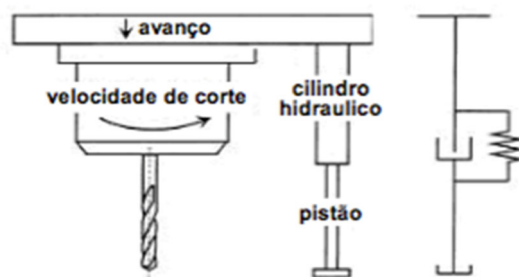


Figura 18 - Dispositivo para amortecer o avanço da broca, conforme Capello et. al [30]

O autor demonstra que esse dispositivo pode substituir o suporte de apoio e serve para furos de quaisquer diâmetros. A Figura 19 mostra as áreas de delaminação de furos realizados sem suporte (a), com amortecedor (b) e com suporte (c).

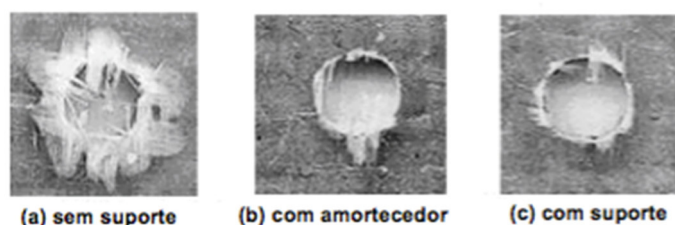


Figura 19 - Fotografia dos furos: (a) furo com delaminação gerado sem utilizar suporte, (b) furo com pouca delaminação, utilizando-se amortecedor e (c) furo com pouca delaminação, utilizando-se suporte [30].

### 3.2 Maquinagem não Convencional

Devido ao facto dos materiais compósitos serem difíceis de maquinar, a utilização e o desenvolvimento de técnicas alternativas é cada vez mais comum. Algumas dessas técnicas, como a maquinagem a laser ou por descarga elétrica [31], mostram ser boas alternativas e bastante eficazes quando comparadas com a maquinagem com ferramentas de corte.

O processo de furação a laser tem também sido estudado por vários autores. Lau et al. [32] estudaram os efeitos de maquinagem a laser em materiais compósitos. Desde então muitos são os autores que direccionaram os seus estudos para esta área da maquinagem. Lau et al. [32] fazem uma análise da eficiência, profundidade máxima e defeitos provocados pela furação a laser e pela furação por descarga elétrica.

Na Figura 20 podemos ver uma imagem de um furo realizado através de furação por laser num microscópio de varrimento eletrónico, onde quase não é visível a zona de dano.

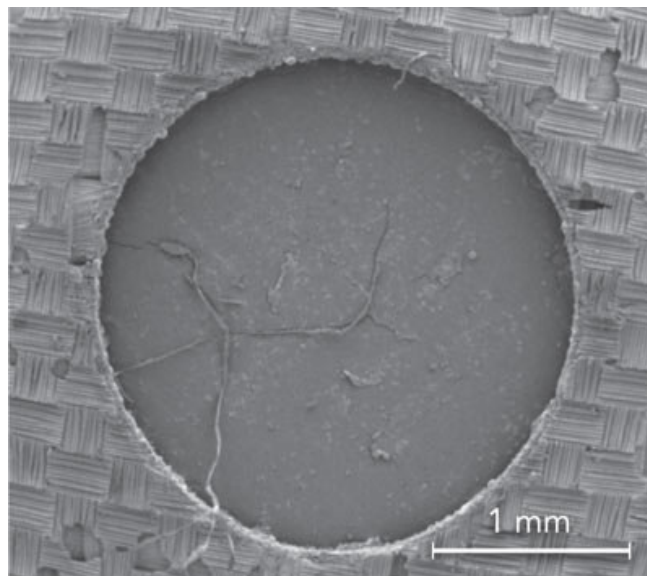


Figura 20 - Furo realizado através de furação a laser [33]

A maquinagem por jato de água é outra técnica que tem vindo a ser utilizada e estudada por alguns investigadores.

### 3.3 Delaminação induzida pela furação

A delaminação é a separação de camadas adjacentes do laminado e representa um tipo de dano em que a propagação está confinada a um plano [34].

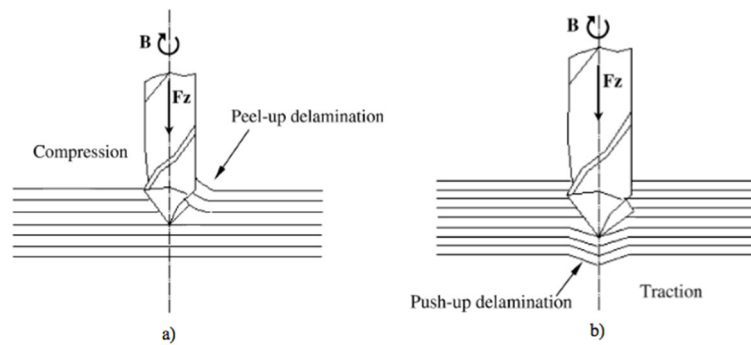


Figura 21- Delaminação durante o processo de furação numa placa em PRFC [35] : a) à entrada e b) à saída

Na Figura 21 podemos ver dois tipos de delaminação que podem ocorrer durante a operação de furação: a delaminação à entrada e à saída, a) e b) respetivamente. Como referido anteriormente, a delaminação em compósitos (superficial ou entre camadas) é um fenómeno que ocorre durante a furação e que pode afetar severamente o desempenho de uma peça. Existem vários fatores que influenciam a ocorrência deste defeito, um dos tipos de delaminação dá-se quando na furação a broca exerce uma força de compressão na peça que faz com que as camadas de fibra subjacentes sejam sujeitas a flexão. A deformação resultante dessa flexão pode causar delaminação entre as camadas de reforço[36]. A condutividade térmica da peça é também uma característica importante, pois o aumento da temperatura durante a furação faz com que o risco de delaminação seja mais elevado[37].

### 3.4 Avaliação da delaminação

Concluída a furação, por vezes, é necessário observar a extensão da delaminação através de métodos de processamento de imagem, conseguindo assim obter o diâmetro e área desse dano. A inspeção visual apresenta algumas desvantagens associadas à medição da extensão do dano e da sua profundidade [38].

Depois de se obter o valor do diâmetro e da área através das técnicas de processamento e análise de imagem, é possível quantificar a extensão do dano aplicando por exemplo o Fator de Delaminação ( $F_d$ ) proposto por Chen [39].

Equação 1

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

O convencional Fator de Delaminação definido por Chen, resulta da relação entre o diâmetro máximo do dano e o diâmetro nominal do furo [39].

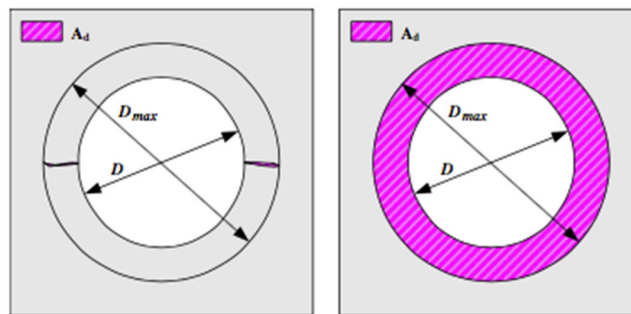


Figura 22 - Diferentes áreas de dano mas com o mesmo Fator de delaminação ( $F_d$ ) [39]

No entanto, este Fator de Delaminação apresenta limitações. Como se pode observar na Figura 22 este fator não define com clareza a extensão da delaminação, apenas tem em conta a orla circular à volta do furo ( $D_{max}$ ) [39]. De modo a ultrapassar as limitações do fator acima descrito, foram apresentados diversos critérios de delaminação. Davim et al. [40] apresentam um Fator de Delaminação ajustado ( $F_{da}$ ) como se pode ver na eq. 2, alternativa ao Fator de Delaminação ( $F_d$ ) desenvolvido por Chen.

Equação 2

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

$A_{max}$  representa a área máxima relativa ao diâmetro máximo da área delaminada ( $D_{max}$ ) como é explicado na eq. 3.  $A_0$  é a área nominal do furo com diâmetro ( $D$ ). As variáveis  $\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros usados para definir o peso de cada parcela da equação. Na Figura 24 conseguimos ter uma percepção visual dos diferentes parâmetros.

#### Equação 3

$$A_{max} = \pi \cdot \frac{D_{max}^2}{4}$$

Foram também desenvolvidos outros fatores como o Fator de Delaminação Equivalente ( $F_{ed}$ ), este critério proposto por C.C.Tsao et al. é obtido através da relação entre o Diâmetro Equivalente ( $D_e$ ) e o Diâmetro nominal do furo ( $D$ ). Como se pode ver na Equação 4,  $D_e$  é uma equação que relaciona área de dano e a área nominal do furo.

#### Equação 4

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{ed} = \frac{D_e}{D_0} \\ D_e = \left( \frac{4 (A_d + A_0)}{\pi} \right)^{0,5} \end{array} \right.$$

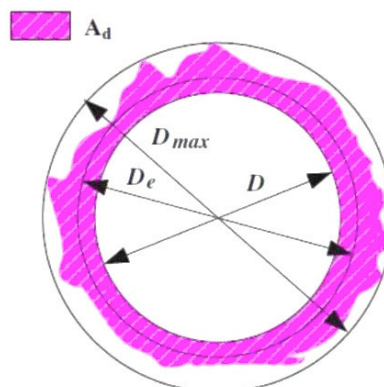


Figura 23 - Pelo o critério de C.C.Tsao et al.  $A_d$  – área de dano;  $D_{max}$  – Diâmetro máximo;  $D_e$  – Diâmetro equivalente;  $D$ - Diâmetro nominal do furo [25]

Um critério bidimensional baseado na área de delaminação foi apresentado por Mehta et al. [41] também conhecido como Rácio de Dano ( $D_{RAT}$ ). Este é definido pela razão entre a área delaminada ( $D_{MAR} = A_d$ ) e a área nominal do furo ( $A_{AVG} = A_0$ ) de acordo com a equação 4.

Equação 5

$$D_{RAT} = \frac{D_{MAR}}{A_{AVG}}$$

Neste estudo realizado por Mehta et al, são realizados furos com três diferentes tipos de brocas. Os resultados estatísticos demonstram que a variação da ferramenta de corte influencia a qualidade do furo. Para além disso, com a utilização do suporte de furação verificou-se que apenas influencia na diminuição da rebarba inferior produzida pela furação.

Faraz et. al [42] afirmam que  $F_d$  não descreve completamente a delaminação, visto que a delaminação de algumas fibras pode causar um diâmetro de delaminação ( $D_{max}$ ) muito grande, e a delaminação na zona à volta do furo é pouca. Tendo isto em consideração, Faraz et. al propuseram também um fator de delaminação, este adimensional ( $F_a$ ) e consiste na relação entre a área de delaminação ( $A_d$ ) e a área nominal do furo ( $A_0$ ) como se pode ver na Equação 6.

Equação 6

$$F_a = \frac{A_d}{A_{nom}} \%$$

### 3.5 Efeito das diferentes variáveis na delaminação

O estudo do impacto que os diferentes parâmetros têm na delaminação é muito importante nos processos de furação em compósitos. Esses parâmetros são o avanço, a velocidade de corte e a geometria da ferramenta de corte. A maioria dos autores afirmam que a delaminação num processo de furação aumenta com a taxa de avanço para qualquer velocidade de corte e para diferentes tipos de broca [43-44]. Eles justificam este fenômeno do aumento da força axial com o aumento da taxa de avanço da ferramenta.

Relativamente à velocidade de corte, alguns autores identificaram dois fenômenos diferentes, Davim et al. [43] afirmam que a delaminação aumenta com o aumento da velocidade de corte durante a furação. Por outro lado, Khashaba et al. [44] verificaram que em laminados de polímeros reforçados com fibra de vidro (PRFV) com tecidos entrelaçados, a delaminação diminui com o aumento da velocidade de corte. Em laminados de polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) com tecidos entrelaçados foi verificada também uma diminuição da delaminação com o aumento da velocidade de corte, por Gaitonde et al. [45]. O impacto do avanço na delaminação é superior ao efeito da velocidade de corte. Davim et al. procuraram avaliar os parâmetros de corte (velocidade e avanço) e a influência do material da matriz na furação de compósitos, chegando à conclusão de que o avanço é o parâmetro de corte que apresenta estatisticamente maior influência na delaminação [46].

O ângulo de ponta da broca é também uma variável com impacto na delaminação, Gaitonde et al. [45] verificaram que para brocas Helicoidais de carboneto de tungstênio a delaminação tende a aumentar com o aumento do ângulo de ponta da broca. Este fenômeno foi observado durante a realização de testes furação convencional e furação de alta velocidade em laminados de PRFC com tecidos entrelaçados. Kilickap [47] verificou o inverso no seu estudo sobre a influência dos parâmetros de corte na furação de PRFV. Verificou nesse estudo uma tendência de diminuição da delaminação com o aumento do ângulo de ponta na furação com uma broca Helicoidal.

Piquet et al. [48] num estudo sobre a influência do material da broca, recomendam a utilização de brocas de carboneto de tungstênio para a furação de placas de carbono/epóxico com disposição quasi-isotrópica.

Para além das variáveis de entrada que já foram atrás apresentadas, é preciso também ter em conta a força axial exercida pela broca. Esta é uma das variáveis chave para a descrição da maquinabilidade de um compósito laminado, dado que aparece diretamente associada à qualidade do furo e à delaminação [49]. Ho-Cheng et. al [26] apresentam uma formulação simples para a determinação da força crítica ( $F_{CT}$ ) para a ocorrência de delaminação com brocas helicoidais, que pode ser definida também como força responsável pelo início de delaminação e é representada pela equação 7.

Equação 7

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

$G_{IC}$  representa a taxa crítica de libertação de energia em Modo I,  $E$  é o módulo de elasticidade do material,  $h$  a espessura não cortada e  $\nu$  o coeficiente de Poisson. A força exercida pelo centro da broca é considerada como uma carga concentrada.

Lachaud et. al. [37], apresentam dois modelos para calcular a força axial crítica, um deles considerando a carga concentrada (equação 8) e um outro em que a carga é considerada distribuída (equação 9) onde  $D$  e  $D'$  são constantes do material calculadas a partir da matriz de rigidez à flexão de laminados.

Equação 8

$$F_Z = 8\pi \left[ \frac{2G_{IC}D}{1 - \left(\frac{D}{8D}\right)} \right]^{1/2}$$

Equação 9

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

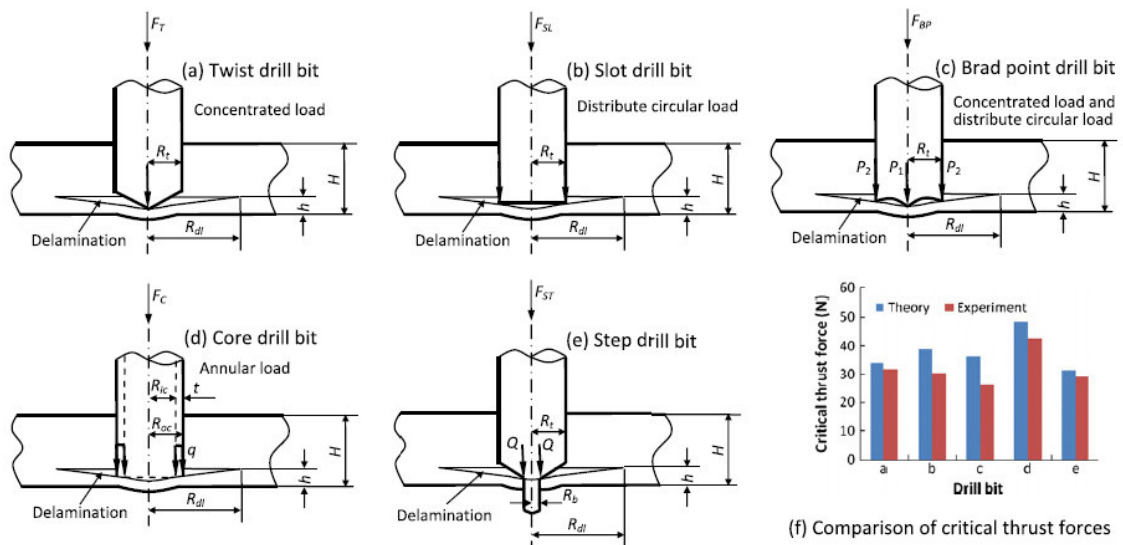


Figura 24 – Representação esquemática da delaminação com várias geometrias de broca [50]

Outros modelos foram apresentados também por Hocheng et. al [25] para a delaminação à saída recorrendo a diferentes geometrias de brocas. Na Figura 24 são apresentadas imagens esquemáticas sobre como ocorre a delaminação à saída para várias geometrias de broca.

Para reduzir ou até evitar a delaminação numa operação de furação, vários métodos foram testados de forma a reduzir a força axial aplicada à peça. Neste sentido alguns autores sugerem a utilização de placas de apoio, tal como mostra a Figura 26.

Capello [30], em testes de furação com brocas helicoidais comprovou que a utilização de suporte pode reduzir drasticamente a ocorrência de delaminação. O suporte é usado por baixo do provete a ser furado e serve para limitar a flexão da placa diminuindo assim a possibilidade de deformação como se pode observar na figura 25.

Dharan et. al [51] fizeram monitorização de forças axiais em furos executados de uma vez só e com recurso a pré-furação, executando os furos em duas fases, durante a furação de laminados compósitos com fibras aramidicas e de carbono utilizando brocas em carboneto de tungsténio. Observaram desta forma que a redução da força axial obtida com recurso à pré-furação pode chegar aos 60%. A pré-furação, como o nome indica, refere-se a uma primeira abordagem na realização do furo com uma broca que pode ser de diâmetro inferior. Esta primeira furação permite realizar um segundo furo evitando as vibrações iniciais da broca ao penetrar o material e, como já foi referido, diminuir a força axial. A força axial exercida pelo centro estacionário da broca é o principal fator para o aparecimento da delimação.

Krishnamurthy et. al [50] propõem um controlador neural da força axial para minimizar a delaminação durante a furação, em que a força seria continuamente monitorizada, e a cada três rotações da broca, seria possível alterar o avanço de acordo com os valores de força axial verificados.

Num estudo com o objetivo de identificar condições de operação que garantissem furos livres de defeitos em PRFC, Enemuoh et al. [2] indicaram que o emprego de altas velocidades de rotação associadas a baixos valores de avanço assegura a produção de furos sem delaminação e com baixa rugosidade.

Nesta secção foram apresentados os principais problemas da furação em materiais compósitos, com ênfase para a delaminação, e recomendações de alguns autores sobre a melhor forma de ultrapassar tais problemas. Na secção seguinte é apresentado o procedimento experimental de toda a parte prática desenvolvida neste trabalho.

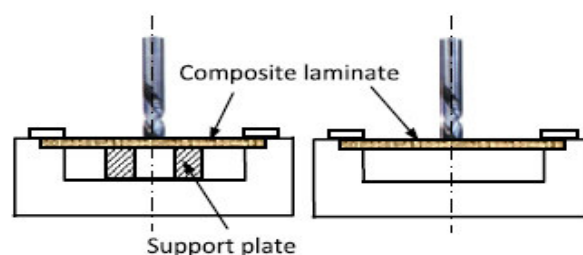


Figura 25 - Operação de furação com e sem placas de suporte [50]



# TRABALHO EXPERIMENTAL

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

4.2 PREPARAÇÃO DOS PROVETES

4.3 RADIOGRAFIA

4.4 ENSAIOS MECÂNICOS



## 4 TRABALHO EXPERIMENTAL

### 4.1 Materiais Utilizados

Para a concretização da parte experimental deste trabalho foram utilizadas placas de resina de epóxico reforçadas com fibra de carbono obtidas de pré-impregnados TEXIPREG R HS 160 REM. Este material é constituído por carbono de alta resistência unidirecional e pela resina de epóxico REM. As placas têm sequência de empilhamento do tipo “cross-ply”. Sendo que as propriedades após cura deste material são apresentadas na Tabela 6

Tabela 6 - Propriedades do pré-impregnado HS160REM após cura – Fabricante:SEAL

Propriedade	Valor Comum	Unidades	Norma
Resistência à tração	1700	MPa	ASTM D 3039
Módulo de elasticidade	150	GPa	ASTM D 3039
Resistência à flexão	1400	MPa	ASTM D 790
Módulo de flexão	130	GPa	ASTM D 790
I.L.S.S.	60	MPa	ASTM D 2344

Tabela7- Sequência de empilhamento, espessura e número de camadas da placa usada no ensaio

Designação da placa	Sequência de empilhamento	Espessura (mm)	Número de Camadas
Cross-ply	[0/90]6s	3,7	24

## 4.2 Materiais Utilizados

Para a realização deste trabalho experimental, foram efetuados provetes com as seguintes dimensões: 250 mm (comprimento), 25 mm (largura) e 3,7 mm (espessura). Os cortes dos provetes foram efetuados numa mesa de corte de serra circular – *BATISTI MECCANICA DV25* nas oficinas do laboratório de materiais compósitos do ISEP.

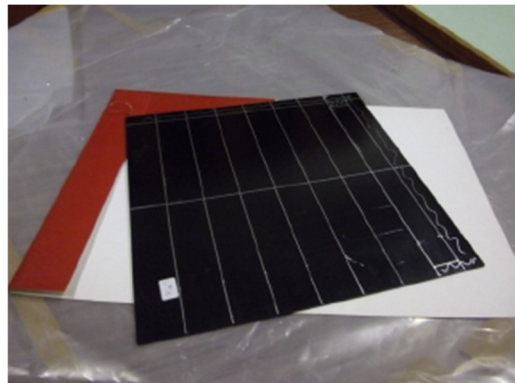


Figura 26 – Marcação das placas

Embora o material usado no ensaio tenha as mesmas características, procedeu-se a etiquetagem de todos eles devido a alteração dos diversos parâmetros de furação. Desta forma, a nomenclatura usada foi, por exemplo, 2F1, sendo que 2 é o número do provete e F1 refere-se ao primeiro furo realizado. Na tabela 8 é possível observar a nomenclatura usada em alguns provetes.

Tabela 8 – Exemplo da nomenclatura de alguns provetes

Referência
1F1
2F1
3F1
4F1
5F1
6F1

Os parâmetros que são estudados neste trabalho experimental são o avanço, a velocidade de rotação e o tipo de ferramenta. Foram usados 3 tipos diferentes de brocas: brocas helicoidais, brocas bimétricas e brocas brad, sendo todas de 6 mm de diâmetro. Na figura 27 podemos ver uma imagem com os diferentes tipos de brocas. Foi também alterado a velocidade de rotação que variou entre 1120rpm e 1800rpm. O avanço utilizado na furação variou entre 0,12 mm/rot e 0,3mm/rot (mm/rotação).

O objetivo da alteração dos parâmetros de furação com diferentes ferramentas de corte tem como objetivo conseguir zonas de dano distintas umas das outras, de forma a conseguir obter um padrão que nos seja possível correlacionar os valores práticos, como a área de dano, com os fatores de delaminação e dimensão fratal.

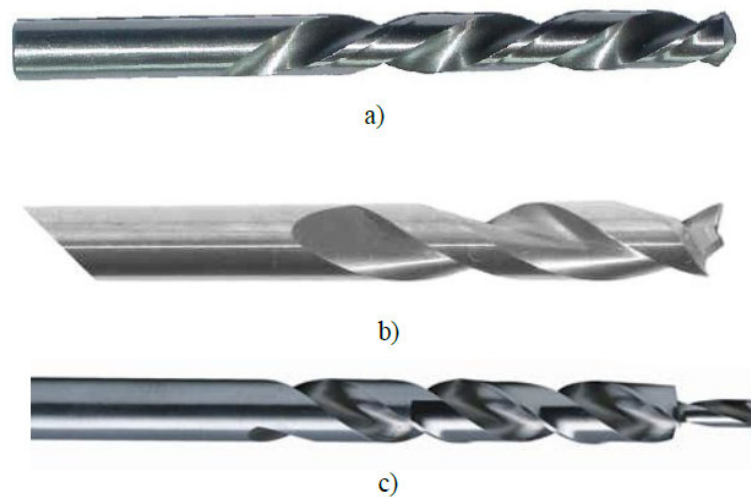


Figura 27 - Brocas utilizadas na realização dos furos : a) Broca helicoidal; b) Broca tipo brad; c) Broca bimétrica

Na Tabela 9 podemos ver o tipo de broca, a velocidade de rotação e a velocidade de avanço que foram utilizadas para furar os diferentes provetes.

Tabela 9 - Parâmetros de corte utilizados

Referência	Tipo	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rot)
1F1	Helicoidal	1120	0,12
2F1	Helicoidal	1120	0,12
3F1	Helicoidal	1120	0,12
4F1	Helicoidal	1120	0,30
5F1	Helicoidal	1120	0,30
6F1	Helicoidal	1120	0,30
7F1	Brad	1120	0,12
8F1	Brad	1120	0,12
9F1	Brad	1120	0,12
10F1	Brad	1120	0,30
11F1	Brad	1120	0,30
12F1	Brad	1120	0,30
13F1	Bimétrica	1120	0,12
14F1	Bimétrica	1120	0,12
15F1	Bimétrica	1120	0,12
16F1	Bimétrica	1120	0,30
17F1	Bimétrica	1120	0,30
18F1	Bimétrica	1120	0,30
19F1	Helicoidal	1800	0,12
20F1	Helicoidal	1800	0,12
21F1	Helicoidal	1800	0,12
22F1	Helicoidal	1800	0,30
23F1	Helicoidal	1800	0,30
24F1	Helicoidal	1800	0,30
25F1	Brad	1800	0,12
26F1	Brad	1800	0,12
27F1	Brad	1800	0,12
28F1	Brad	1800	0,30
29F1	Brad	1800	0,30
30F1	Brad	1800	0,30
31F1	Bimétrica	1800	0,12
32F1	Bimétrica	1800	0,12
33F1	Bimétrica	1800	0,12
34F1	Bimétrica	1800	0,30
35F1	Bimétrica	1800	0,30
36F1	Bimétrica	1800	0,30

Com estes parâmetros pretende-se concluir qual a influência que os diferentes tipos de broca e as velocidades de avanço têm na furação de materiais compósitos. Esta influência caracteriza-se numa maior ou menor zona de dano.

Quanto ao tipo de ferramenta de corte adotada para o ensaio experimental, foi escolhido a ferramenta de corte mais comum, a helicoidal. A bimétrica foi escolhida pela a sua pré-furação que resulta numa diminuição da força axial de corte que está diretamente ligada à delaminação na furação. Quanto à ferramenta de corte tipo Brad, esta apresenta uma geometria de ponto específico causando, durante a furação, tensão nas fibras permitindo um “corte limpo” [37].

Esta parte do trabalho experimental tem como objetivo fornecer e preparar os provetes para que estes possam ser radiografados e testados mecanicamente.

### 4.3 Radiografias

Depois de furadas as placas, foi necessário analisar os furos feitos nestas, de maneira a avaliar a extensão do dano na zona periférica do furo. A técnica não destrutiva escolhida para fazer essa análise foi a radiografia com contraste. Este é um método que permite avaliar e comparar a extensão da delaminação causada pela furação a partir das imagens obtidas neste processo. Deste modo, foi necessária a utilização de di-iodometano da AnalAR NORMATOR (ver ficha do produto) que é um líquido de contraste. Como o nome indica, esse líquido tem como objetivo criar um contraste maior na imagem. Permite também verificar até onde se estende o dano originado durante a furação e identificar outro tipo de defeitos nas peças. O equipamento utilizado foi a máquina de Raio-X Kodak 2100 de 60 kV e 300 kHz, associada ao sensor digital *Kodak RVG 5100 System*, e este ligado a um computador com o Software de obtenção de imagem “*Kodak Dental Imaging Software*”. As radiografias foram feitas com 0,1 segundos de tempo de exposição. Na figura 28, podemos observar uma radiografia do provete 8F1 .

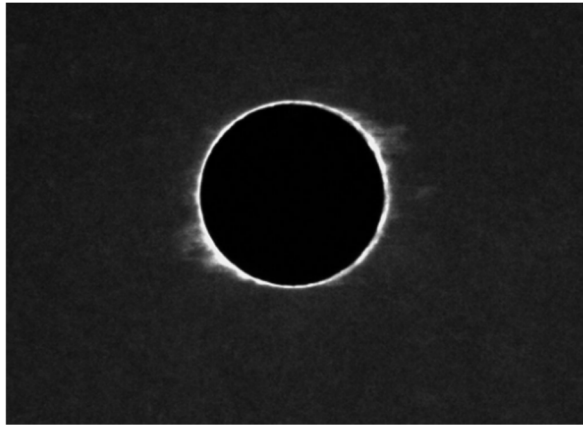


Figura 28 – Radiografia do provete 8F1 (zona de dano a branco resultante da furação) com uma broca tipo brad, avanço de 0,12 mm/rot e 1120 rpm.

#### 4.4 Ensaios mecânicos

Os resultados obtidos através dos ensaios mecânicos têm como objetivo a comparação e a correlação com os resultados do processamento e análise de imagem. Os ensaios mecânicos de esmagamento foram realizados de acordo com a norma ASTM D5961M-13. Este tipo de ensaio mecânico de esmagamento (pin-bearing) é importante pois permite-nos perceber de que forma os parâmetros de furação influenciam a resistência mecânica do provete depois de furado e apresentar a zona de delaminação. Foi utilizada a máquina de ensaios mecânicos do laboratório dos ensaios tecnológicos do Departamento de Engenharia mecânica do ISEP, SHIMADZU AG-X *Plus* com uma célula de carga de 100 kN, associada a um software de recolha de dados. Todos os ensaios foram realizados a uma velocidade de 2 mm/min e foram parados depois de haver uma queda abrupta na força, ou em alguns casos após o provete partir.

Dos dados obtidos a partir do programa de recolha de dados foi possível fazer o gráfico tensão vs deformação. Na Figura 29 podemos ver um gráfico tensão x deformação feito a partir dos dados do ensaio de esmagamento realizado ao provete 5F1.

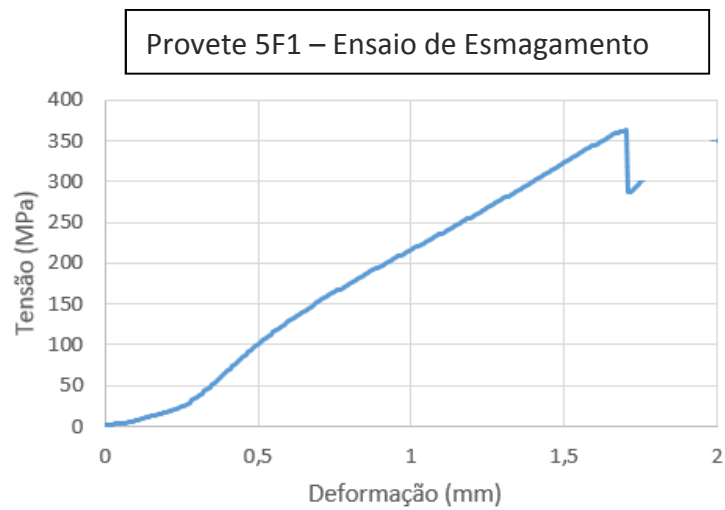


Figura 29 - Gráfico tensão x deformação obtido após tratamento de dados do ensaio de esmagamento

Com os dados obtidos nos ensaios é possível calcular a tensão de esmagamento máxima que cada provete foi capaz de suportar, propriedade essencial para a caracterização e definição da resistência da peça furada.



# PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGEM

5.1 INTRODUÇÃO

5.2 FORMATO ESCOLHIDO

5.3 THRESHOLDING

5.4 FRONTEIRA DA IMAGEM

5.5 DIMENSÃO FRACTAL

5.6 ÁREA



## 5 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGEM

### 5.1 Introdução

Neste capítulo é descrita a digitalização, o processamento e análise das imagens. Estes aspetos constituem uma das partes mais importantes desta dissertação.

Todo o processamento das imagens deste trabalho experimental foi realizado recorrendo ao *software* MATLAB®. O processamento e análise das imagens permite calcular certas medidas relacionadas com o dano causado pelo furo e que influenciam a resistência mecânica das peças.

A obtenção das imagens foi efetuada recorrendo à máquina de raios-x descrita no capítulo 4. Esta máquina é composta por um emissor de raios-x, um sensor de imagem e um computador, com o *software* que digitaliza as imagens. Na digitalização, as imagens são representadas por *arrays*, onde cada *pixel* corresponde a uma entrada do *array*. Nas imagens a cores, cada elemento do *array* é composto por três níveis (*layer/camadas*), os quais correspondem às cores do sistema RGB (R - vermelho, G - Verde, B – Azul). A cada um desses níveis é atribuído um valor entre 1 e 255. Contudo, é necessário transformar a representação das imagens do sistema RGB para a representação binária das imagens. Ou seja, as imagens são guardadas em matrizes com entradas no conjunto  $\{0,1\}$ . Neste sistema, uma entrada com valor 1 representa um *pixel* branco e uma entrada com valor 0 um *pixel* preto. Esta transformação é feita com o objetivo de definir claramente a fronteira do objeto que pretendemos analisar [40]. No entanto, isto acarreta uma dificuldade, pois quando uma imagem é ampliada, nota-se que a zona de fronteira não é bem definida. A Figura 30 é um bom exemplo deste fenómeno (neste caso é uma figura RGB em escala de cinzentos). O principal obstáculo da transformação da imagem obtida para o sistema binário é então decidir o que faz parte do objeto e o que não faz. Neste caso, pretende-se decidir o que faz parte da zona de dano, causada pelo processo de furação, daquilo que é o resto da peça (zona não afetada). Esta transformação, conhecida como *thresholding*, é efetuada usando o algoritmo de Otsu, que encontra um valor limiar (*threshold*) que divide os valores da

escala de cinzentos em valores binários. Quando a imagem é apenas constituída por *pixels* brancos e pretos é mais fácil delimitar a zona de dano à volta do furo, possibilitando assim a criação de uma linha de contorno dessa zona.

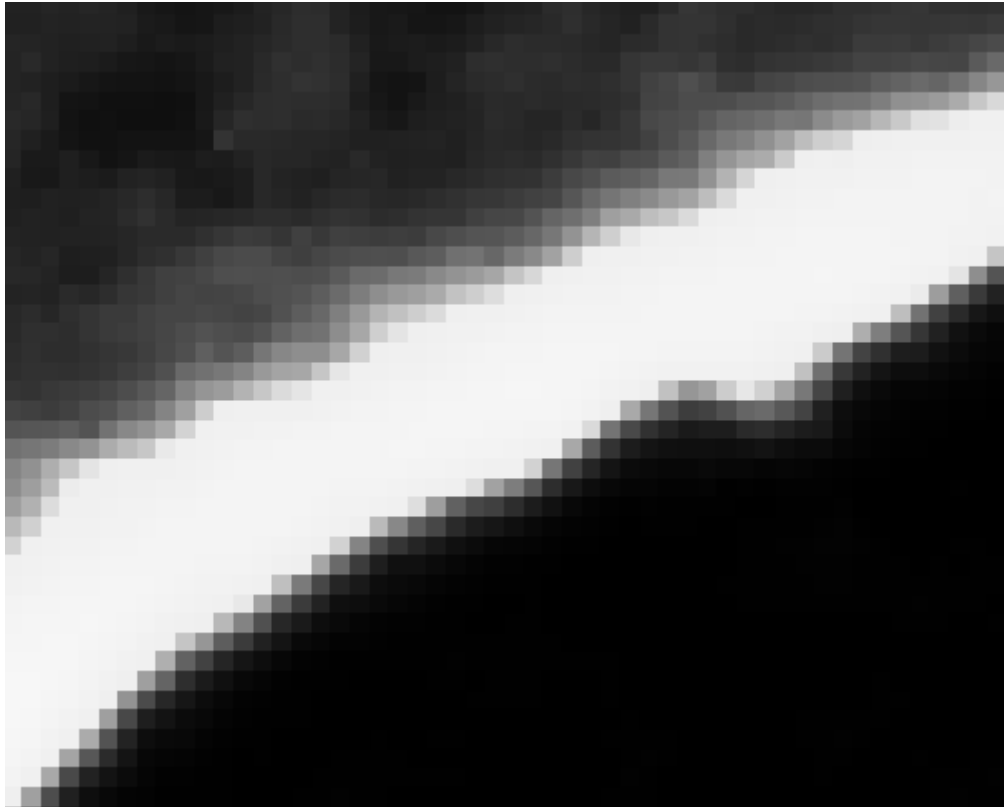


Figura 30. Exemplo da zona de fronteira

Depois de definida a fronteira da zona de dano, é então calculada a área total do dano, o valor da dimensão fractal do contorno e os fatores de delaminação mencionados no Capítulo 3. Deste modo, é possível quantificar a perda de resistência associada à furação.

Na próxima secção serão abordados os diversos tipos de formato das imagens que podem ser importadas para o MATLAB® e a justificação da opção do formato escolhido. A terceira secção contém a descrição de como foi feito o *thresholding*. Na secção 4 aborda-se o método usado para definir a fronteira de dano do furo. Na secção 5 explica-se a dimensão de *Box-counting* referindo também um algoritmo para estimar a dimensão de *Box-counting*. Na última secção é exposto o método utilizado para a obtenção do valor da área de dano.

## 5.2 Formato escolhido

Depois de efetuadas as radiografias às placas, através do software de recolha de imagem *Carestream Dental – RVG 5100*, é possível escolher diversos formatos de imagem. No entanto, os formatos compatíveis suportados entre os programas ( *MATLAB*® e *Carestream Dental – RVG 5100*) são o .jpg, .bmp, e .pcx.

Estes três formatos têm características técnicas diferentes. O formato escolhido para realizar a análise e o processamento das imagens foi o .bmp pelas razões que a seguir são descritas.

No caso do formato .pcx, é aplicada uma compressão RLE (Run-Length Encoding) à imagem para economizar memória e diminuir a largura de banda. No entanto, ao formato .bmp não é aplicado nenhum tipo de compressão às imagens, logo o .bmp possui vantagem relativamente ao formato .pcx.

O formato .bmp possui igualmente vantagens relativamente ao formato .jpg. De facto o formato .bmp apresenta maior resolução e melhor qualidade face ao .jpg. Isto dá-se em parte pelo formato .bmp atenuar o fenómeno de Gibbs. Na realidade, quando obtemos imagens, os objetos não possuem fronteiras bem definidas, porque ocorre o chamado fenómeno de Gibbs durante o processo de digitalização. Esta característica vai dificultar o *Thresholding* que se pretende efetuar.

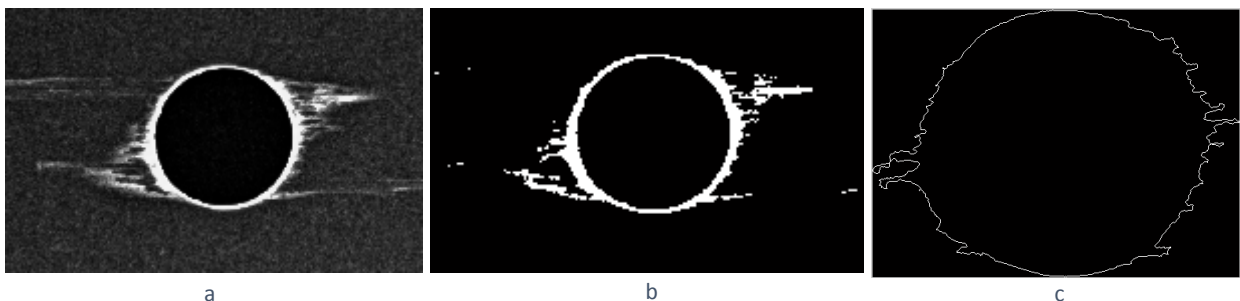


Figura 31. Vários estágios da imagem após correr o programa de processamento de imagem a) Imagem obtida a partir da radiografia; b) Imagem transformada em binário; c) Imagem que representa fronteira da zona de dano.

Na Figura 32 podemos ver dois exemplos de filtragem de uma função que exhibe o fenómeno de Gibbs. A função indicada a preto aproxima a função descontínua indicada a tracejado azul. Numa vizinhança do ponto de descontinuidade verifica-se o *overshooting* característico do fenómeno de Gibbs. A curva vermelha e a curva magenta atenuam o fenómeno de Gibbs exibido pela função representado a preto. Pode-se observar que o filtro representado pela cor magenta é mais eficiente que o filtro apresentado pela curva a vermelho.

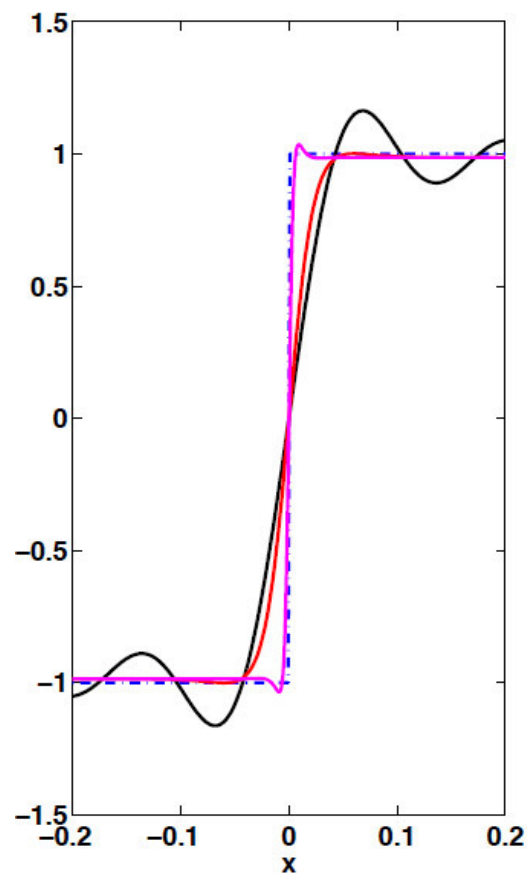


Figura 32 - Exemplo do fenómeno de Gibbs

### 5.3 Thresholding

O *thresholding* pode ser efetuado de duas formas. Uma consiste na análise do histograma de cores, sendo este processo feito de modo não automático dependendo do observador. A outra forma é automática e baseia-se em algoritmos de classificação estatística. De facto o elevado número de placas dificulta o *thresholding* baseado na

análise do histograma e implica um erro associado ao utilizador. Por estas razões optou-se pela utilização do *thresholding* automático.

No *thresholding* automático, pretende-se encontrar um o valor limiar  $T$  tal que, se um *pixel* tiver valor inferior a  $T$ , é transformado em 0, caso contrário é transformado em 1.

O algoritmo de Otsu, no qual o *thresholding* automático se baseia, encontra o valor de  $T$  de modo a minimizar a variância ponderada dentro da classe.

Considerando as soma das variâncias das duas classes como:

Equação 10

$$\sigma_{\omega}^2(T) = \omega_1(T)\sigma_1^2(T) + \omega_2(T)\sigma_2^2(T)$$

onde,

$\omega_i$  – são as probabilidade das duas classes que pretendemos separar pelo o valor limiar de  $T$

$\sigma_i^2$  – são as variâncias das classes

Otsu demonstrou que a minimização da variância intra-classe é o mesmo que a maximização inter-classe.

Equação 11

$$\sigma_b^2(T) = \sigma^2 - \sigma_{\omega}^2(T) = \omega_1(T)\omega_2(T)[\mu_1(T) - \mu_2(T)]^2$$

onde,

$\omega_i$  – termo expresso em probabilidade de classes

$\mu_i$  - termo expresso em média das classes

Os termos da probabilidade das classes  $\omega_1(T)$  são calculados pelo somatório:

Equação 12

$$\omega_1(T) = \sum_{i=0}^T \rho(i).$$

Os termos da média das classes são obtidos usando,

Equação 13

$$\mu_1(T) = \frac{[\sum_0^T p(i)x(i)]}{\omega_1}$$

Os valores  $\omega_2(T)$  e  $\mu_2(T)$  são calculados de forma semelhante à usada para  $\omega_1(T)$  e  $\mu_1(T)$ .

Este algoritmo está incluído na função *graythresh* da *toolbox* de processamento de imagem do MATLAB<sup>®</sup>.

#### 5.4 Fronteira da Imagem

Para se determinar a fronteira da zona de dano foi utilizada a rotina *bwtraceboundary* da *Toolbox* de processamento de imagem do MATLAB<sup>®</sup>. Este algoritmo delinea a fronteira entre um objeto e o fundo (ou ambiente) de uma imagem. Contudo, é necessário encontrar previamente a localização de uma entrada (ou *pixel*) da matriz que representa a imagem que pertença à fronteira. Na Figura 33 ilustramos a imagem de um furo antes de ser definida a fronteira.

Após o processamento da Figura 33, obtivemos o contorno indicado na Figura 34. Podemos observar a linha de contorno delineada onde foi eliminado o “ruído” existente na imagem anterior. A eliminação destes ruídos evitou a interferência no cálculo dos valores da área e da dimensão fractal.

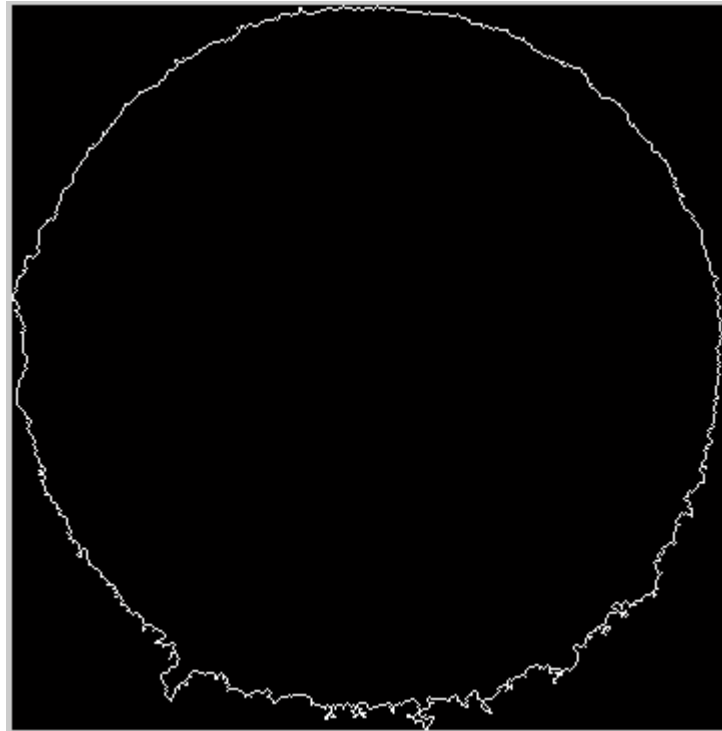


Figura 33 - Contorno do dano

### 5.5 Dimensão fractal

A geometria fractal é uma extensão da geometria clássica e é usada como modelo para estruturas complexas. Como Benoit Mandelbrot observou, “as montanhas não são cones, as nuvens não são esferas nem as árvores são cilindros”. Os fractais são utilizados

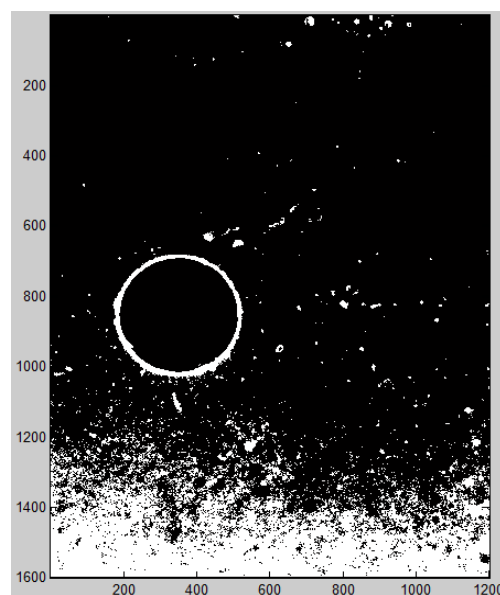


Figura 34 - Imagem obtida a partir do programa de processamento de imagem feito em MATLAB® antes de ser definido o contorno da zona de dano

em várias áreas tais como: biologia, medicina computacional, mercado de ações, sistemas dinâmicos, computação gráfica 2D e 3D, etc.

A geometria fractal 2D estuda curvas que possuem propriedades pouco intuitivas, como por exemplo curvas limitadas mas com comprimento ilimitado. Exemplos disto são a curva de H. Koch, os conjuntos de G. Julia e o conjunto de B. Mandelbrot. Na Figura 35 é apresentada a curva de Koch. Como podemos observar, esta curva apresenta um “rendilhado” característico dos objetos fractais 2D. Benoit Mandelbrot definiu um conjunto fractal como sendo um conjunto em que a dimensão de Hausdorff é superior à dimensão topológica.

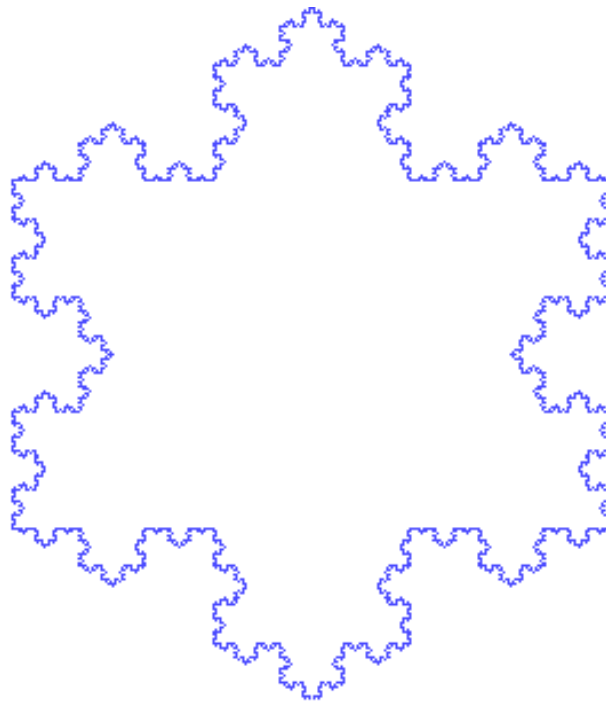


Figura 35 - Curva de Koch

A dimensão de Hausdorff de uma curva “suave” contida no plano coincide com a sua dimensão topológica, que é igual a 1. Contudo, a dimensão de Hausdorff de uma curva fractal varia entre 1 e 2. Na Figura 36 é representada com uma linha vermelha uma curva suave, e a azul a curva de Weierstrass com dimensão de Hausdorff superior a 1.

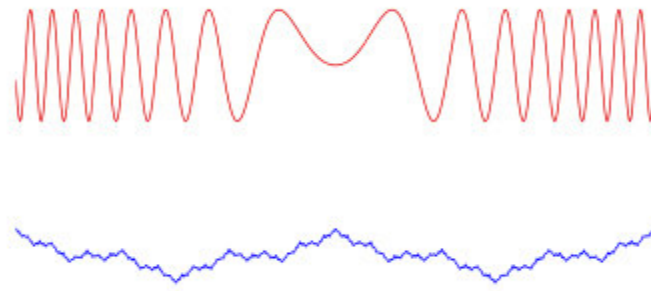


Figura 36 - Exemplo de curva "suave" e curva fractal

A dimensão de Hausdorff mede, deste modo, o grau de "irregularidade" de uma curva fractal. Este facto levou-nos a testar se esta medida aplicada à fronteira da zona de dano de um furo, tem influência na resistência mecânica de uma peça. Do ponto de vista prático, não é viável calcular a dimensão de Hausdorff de objetos reais. Em vez do cálculo da dimensão de Hausdorff estimou-se uma outra medida de irregularidade chamada de dimensão de *box-counting*. Apesar da definição da dimensão de *box-counting* ser assintótica (no sentido que exige o cálculo de um limite quando os valores da escala tendem para 0) possui a vantagem de ser facilmente estimada, desde que a curva seja limitada e satisfaça uma condição de proporcionalidade.

O algoritmo adotado para estimar a dimensão *box-counting* de uma curva  $A$  consiste resumidamente em:

1. Sobrepor à imagem uma malha de  $2^k$  quadrados com lados de comprimento  $r = 2^{-k}$ .
2. Nessa malha é contado o número  $N_r(A)$  de quadrados que intersejam  $A$
3. Verificar se existe um intervalo  $I$  para valores de  $k$  tal que se verifica a relação  $N_r(A) = \mu r^{-D}$  onde  $\mu$  é uma constante de proporcionalidade e  $D$  é a estimativa da dimensão *box-counting*;
4. A estimativa da dimensão de *box-counting*  $D$  é obtida pela média dos valores de  $d_k$ , com  $k$  pertencente a  $I$ , onde  $d_k = -\frac{\ln(N_r(A))}{\ln(r)}$ .

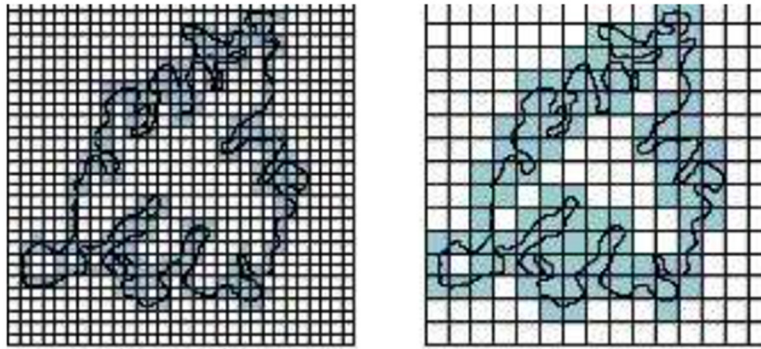


Figura 37 - Exemplo do método de *box-counting*

Tendo em vista testar o algoritmo, foram estimadas as dimensões de *box-counting* de conjuntos dos quais se conhece a dimensão exata. Os resultados obtidos foram satisfatórios. Por exemplo, a curva de Von Koch mostrada na Figura 36 possui dimensão  $\frac{\log 4}{\log 3} = 1,2619 \dots$  e a estimada foi de 1,2688.

## 5.6 Área

A área de dano resultante da furação foi obtida a partir de uma rotina que utiliza a função *imfill* da *Toolbox* de processamento de imagem do MATLAB®. Esta função usa um algoritmo baseado na reconstrução morfológica, um método útil que permite extrair informações importantes sobre as formas de uma imagem. A função *imfill* vai detetar e preencher o interior da fronteira fechada encontrada pelo processo atrás descrito.

Todos os *pixels* que estão no interior da fronteira passam do valor 0 para o valor 1. Na Figura 36 podemos ver a imagem que se obtém depois de correr a função *imfill*.

Para se conseguir obter o valor da área foi necessário saber o número de *pixels* brancos da imagem da Figura 38 e o tamanho dos *pixels* do sensor digital da máquina de Raios-X. O número de *pixels* brancos da imagem é fácil de saber contando o número de elementos não nulos da matriz da imagem.

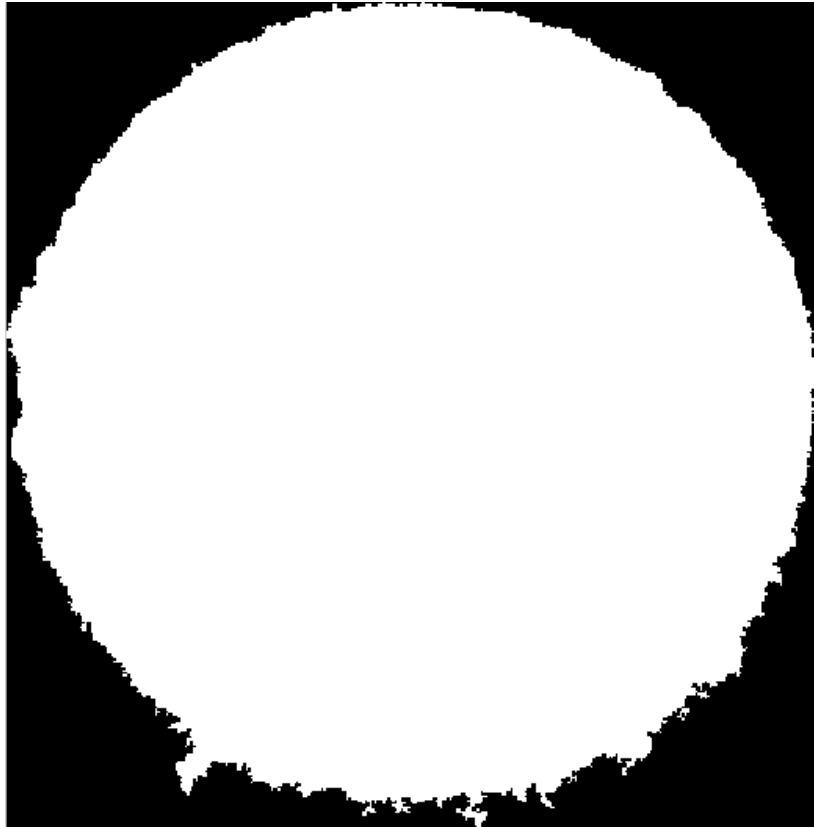


Figura 38 - Imagem resultante da função *imfill*

Para saber o tamanho de cada *pixel* do sensor digital, foi necessário consultar a ficha técnica do sensor, onde se encontra o tamanho do sensor e o número de *pixels* deste. Com o número de *pixels* e a área de cada *pixel* é fácil calcular a área de dano do furo. Este valor da área e da dimensão fractal, referida na secção anterior, são utilizados no cálculo de alguns dos parâmetros de caracterização do dano do furo referido no capítulo 6.



# ANÁLISE DE RESULTADOS

6.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

6.2 RADIOGRAFIA

6.3 ENSAIO DE ESMAGAMENTO



## 6 ANÁLISE DE RESULTADOS

### 6.1 Propriedades dos materiais

As propriedades dos materiais têm grande influência nos resultados finais. O material dos provetes usados para a realização deste trabalho, como referido no capítulo 4, foi um compósito de epóxido reforçado com fibra de carbono. A utilização deste material baseia-se principalmente em questões tecnológicas, nomeadamente na importância da aplicação deste material como material alternativo em diversas indústrias. O problema aqui abordado, a delaminação, é um dos problemas associados na furação que necessita de ser estudado de forma a diminuir/eliminar. As propriedades deste material foram estudadas inicialmente por Durão et. al [37].

### 6.2 Radiografia

Sendo sempre o mesmo tipo de material usado neste trabalho experimental, as principais variáveis que foram alteradas, neste ensaio, foi o tipo de ferramenta, o avanço e a rotação. Desta forma, para se poder quantificar a delaminação da zona de dano do furo, foram analisadas imagens obtidas através das radiografias. Esta quantificação do dano foi recorrida através de fatores de delaminação [37].

Na Tabela 10 podemos ver os valores que resultaram da análise das imagens recorrendo ao MATLAB e os valores do fator de delaminação equivalente ( $F_{de}$ ) e DRAT (Rácio de Delaminação expresso em %).

Tabela 10 - Valores resultantes do processamento e análise das imagens obtidas na radiografia das peças.

Referencia	PARAMETROS DE CORTE			FATORES DE DELAMINAÇÃO			
	Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Rotação (rpm)	DRAT (%)	De (mm)	Fed	DimF
1F1	Helicoidal	0,12	1120	21,024	6,601	1,100	1,0146
2F1	Helicoidal	0,12	1120	21,743	6,620	1,103	1,1168
3F1	Helicoidal	0,12	1120	19,084	6,548	1,091	1,0425
4F1	Helicoidal	0,3	1120	NÃO VÁLIDO			
5F1	Helicoidal	0,3	1120	17,229	6,496	1,083	0,998
6F1	Helicoidal	0,3	1120	26,851	6,758	1,126	1,0926
7F1	Brad	0,12	1120	NÃO VÁLIDO			
8F1	Brad	0,12	1120	19,586	6,561	1,094	1,0530
9F1	Brad	0,12	1120	14,134	6,410	1,068	1,0970
10F1	Brad	0,3	1120	18,928	6,543	1,091	1,2153
11F1	Brad	0,3	1120	19,889	6,570	1,095	1,1728
12F1	Brad	0,3	1120	21,097	6,603	1,100	1,0783
13F1	Bimétrica	0,12	1120	21,423	6,612	1,102	1,0099
14F1	Bimétrica	0,12	1120	15,374	6,445	1,074	1,1251
15F1	Bimétrica	0,12	1120	24,736	6,701	1,117	1,0013
16F1	Bimétrica	0,3	1120	33,171	6,924	1,154	1,1013
17F1	Bimétrica	0,3	1120	31,371	6,877	1,146	1,1523
18F1	Bimétrica	0,3	1120	19,498	6,559	1,093	1,0085
19F1	Helicoidal	0,12	1800	19,498	6,559	1,093	1,042
20F1	Helicoidal	0,12	1800	16,902	6,487	1,081	0,994
21F1	Helicoidal	0,12	1800	14,920	6,432	1,072	0,990
22F1	Helicoidal	0,3	1800	24,753	6,702	1,117	1,043
23F1	Helicoidal	0,3	1800	20,675	6,591	1,099	1,014
24F1	Helicoidal	0,3	1800	24,929	6,706	1,118	1,022
25F1	Brad	0,12	1800	16,085	6,465	1,077	1,005
26F1	Brad	0,12	1800	26,860	6,758	1,126	1,160
27F1	Brad	0,12	1800	22,057	6,629	1,105	1,090
28F1	Brad	0,3	1800	25,861	6,731	1,122	1,179
29F1	Brad	0,3	1800	27,883	6,785	1,131	1,135
30F1	Brad	0,3	1800	24,303	6,689	1,115	1,096
31F1	Bimétrica	0,12	1800	17,982	6,517	1,086	1,218
32F1	Bimétrica	0,12	1800	32,742	6,913	1,152	1,120
33F1	Bimétrica	0,12	1800	22,431	6,639	1,106	1,039
34F1	Bimétrica	0,3	1800	22,299	6,635	1,106	1,047
35F1	Bimétrica	0,3	1800	25,115	6,711	1,119	1,002
36F1	Bimétrica	0,3	1800	25,575	6,724	1,121	1,112

As imagens do provete 4F1 e 7F1 contêm muito ruído e daí surgiu a impossibilidade de se obter os valores da área de dano credíveis, bem como os fatores de delaminação e o valor da dimensão fractal sendo classificados como “Não Válido”. Na Figura 39 podemos ver um exemplo de uma imagem de um furo com muito ruído. Uma imagem com ruído resulta muitas vezes na impossibilidade de encontrar bem definida a zona de dano.

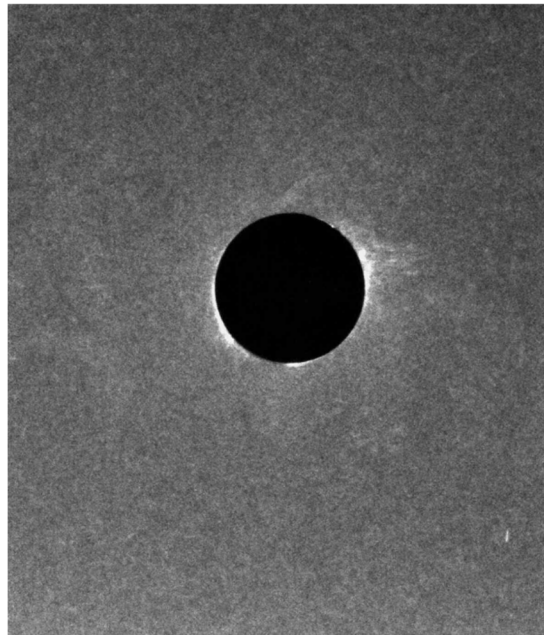


Figura 39 - Radiografia do furo, exemplo de imagem com muito ruído

Na Figura 40 podemos ver o gráfico onde se demonstra os resultados da dimensão fractal obtidos através do tratamento de imagem.

Com o tratamento de imagem efectuado através do MATLAB®, foi possível obter a Dimensão Fractal (DimF) e a área de dano.

Analisando os gráficos da figura 40 e 41, consegue-se facilmente observar que neste caso, com uma rotação de 1120 rpm e um avanço de 0,12 mm/rot, existe uma relação entre a Dimensão Fractal e a área de dano resultante do furo. Nos seguintes gráficos, apenas foi alterada a ferramenta usada na furação.

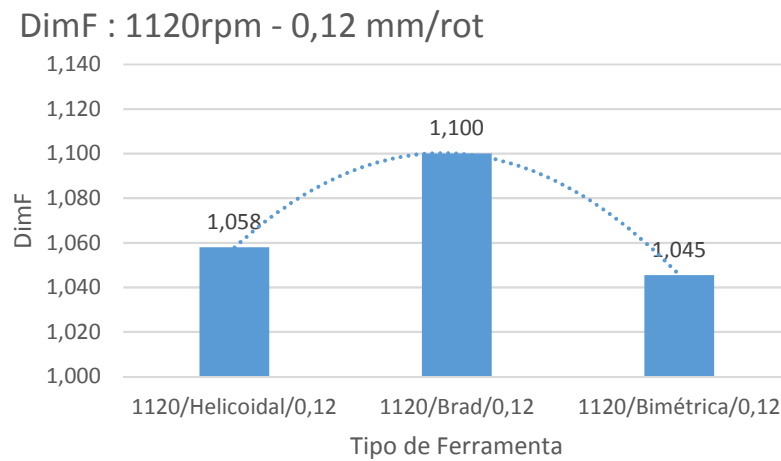


Figura 40 – Gráfico da Dimensão Fractal resultante da furação com rotação a 1120 rpm e avanço de 0,12 mm/rot

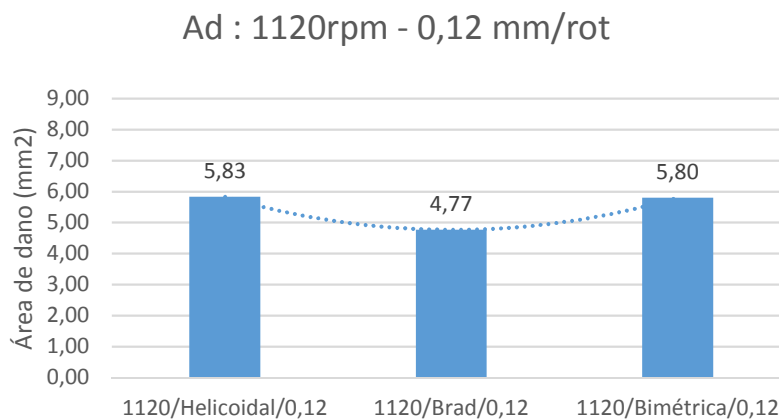


Figura 41 – Gráfico da área de dano resultante da furação com rotação a 1120 rpm e avanço de 0,12 mm/rot

Através destes gráficos, ordenando por ordem crescente é possível observar que com o aumento da Dimensão Fractal existe uma diminuição da área de dano. Sendo que com estes parâmetros de furação, a broca com geometria Brad apresenta menor área de dano. O mesmo fenômeno acontece alterando a velocidade de avanço para 0,3 mm/rot, como se pode verificar nos gráficos 42 e 43.

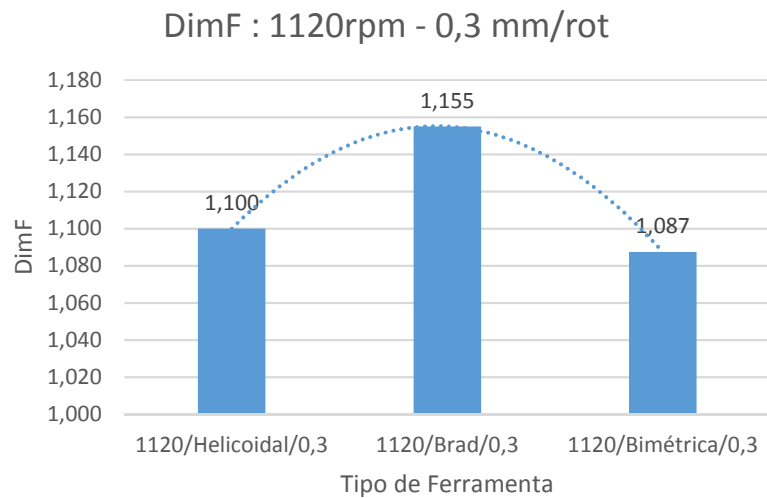


Figura 42 – Gráfico da Dimensão Fractal resultante da furação com rotação a 1120 rpm e avanço de 0,3 mm/rot

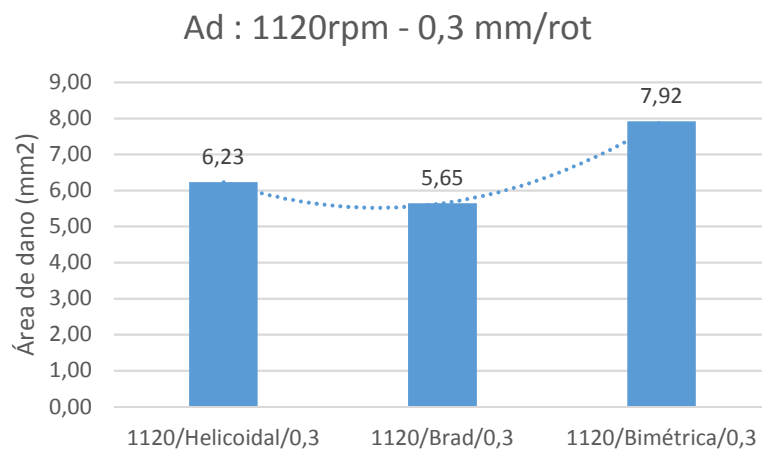


Figura 43 – Gráfico da área de dano resultante da furação com rotação a 1120 rpm e avanço de 0,3 mm/rot

A tentativa de descobrir relação entre a dimensão fractal do contorno da zona de dano de um furo alternando os parâmetros de furação e o tipo de geometria da broca foi um dos principais objetivos deste trabalho. Para além disso, é possível também verificar a relação da área de dano e os fatores de delaminação [37].

Paralelamente à obtenção dos resultados da Dimensão Fractal e da área de dano, foram calculados o Fator de delaminação equivalente ( $F_{ed}$ ) e o Rácio de Dano ( $D_{RAT}$ ).

O Fator de delaminação equivalente (Equação 4) é uma função que depende diretamente do valor da área de dano, isto é, uma área de dano maior traduz-se num aumento do valor do  $F_{ed}$ . O Rácio de dano -  $D_{RAT}$  (Equação 5) é definido pela razão entre a área delaminada e a área nominal do furo.

Os valores da área de dano e dimensão fractal que foram obtidos através do processamento e análise de imagem foram muito trabalhosos, isto porque o material continha grande porosidade, o que causou imagens com muitas zonas de contraste. Isto causou grandes problemas durante o processamento e que levou à necessidade de várias repetições das radiografias a vários provetes.

Nos gráficos abaixo é possível observar a média dos fatores de delaminação para uma rotação de 1120 rpm e uma velocidade de avanço de 0,12 mm/rot consoante a ferramenta utilizada.

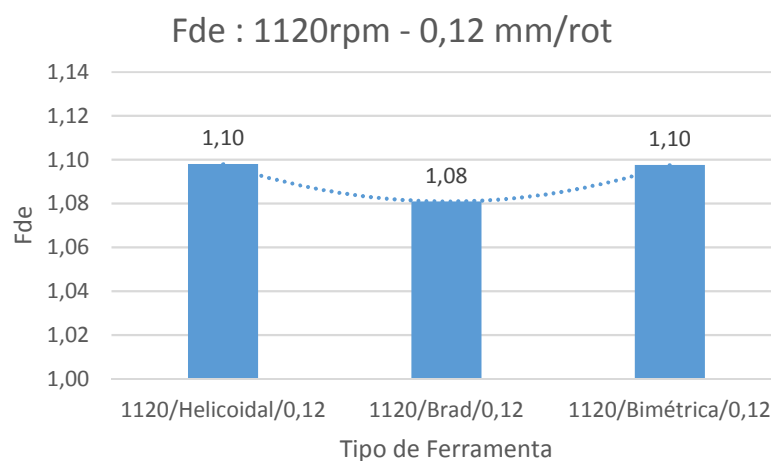


Figura 44 – Gráfico do fator de delaminação equivalente resultante da furação com rotação a 1120 rpm e avanço de 0,3 mm/rot

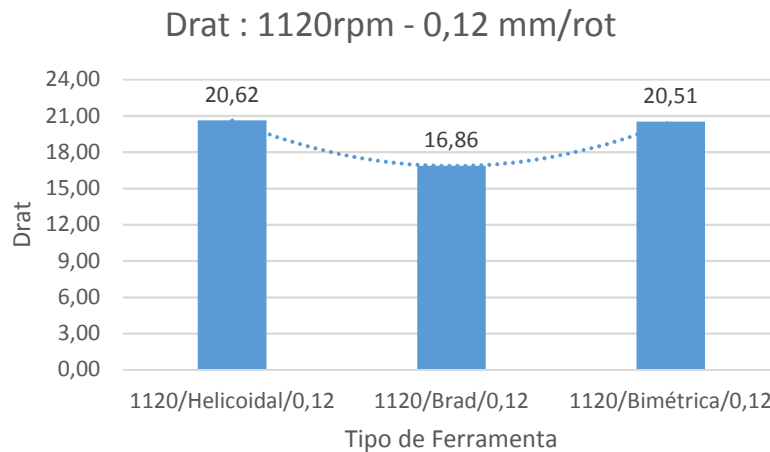


Figura 45 – Gráfico do Rácio de delaminação (Drat) resultante da furação com rotação a 1120 rpm e avanço de 0,12 mm/rot

Numa forma global, consegue-se observar que o comportamento dos fatores de delaminação é igual ao comportamento da área de dano em função do tipo de ferramenta usada na furação.

De todos os fatores analisados, o valor da dimensão fractal parece relacionar-se melhor com o fator equivalente de delaminação ( $F_{ed}$ ). No entanto, existem outros fatores de que podem apresentar resultados ainda mais satisfatórios quando relacionados com a dimensão fractal. Um exemplo disso é o fator de delaminação ajustado ( $F_{da}$ ) proposto por Davim et. al [26]. Este fator não relaciona apenas áreas, mas também relaciona diâmetros.

Como seria de esperar, podemos ver que, no gráfico, existe claramente uma relação entre a área de dano e a fator de equivalente delaminação. Isto acontece porque  $F_{ed}$  é uma função que depende diretamente do valor da área de dano. Como já foi referido, uma área de dano maior traduz-se num aumento do valor do fator equivalente de delaminação.

Nos gráficos seguintes, são apresentados os dados resultantes da furação a uma rotação de 1800rpm e com uma velocidade a 0,12 mm/rot e 0,3 mm/rot, respectivamente

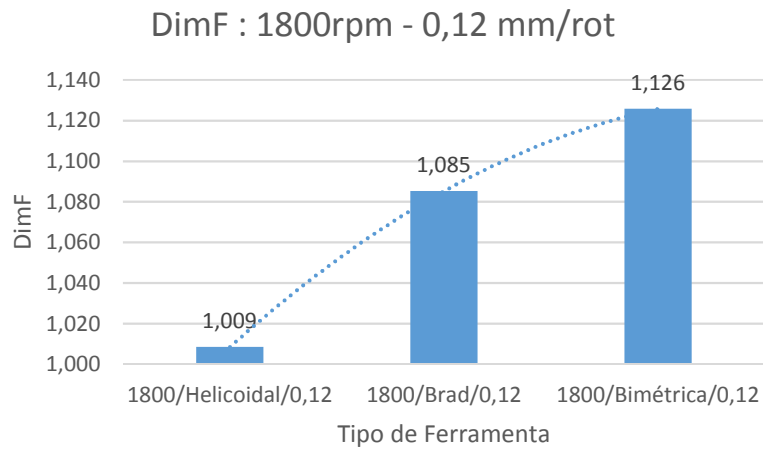


Figura 46 – Gráfico da Dimensão Fractal resultante da furação com rotação a 1800 rpm e avanço de 0,12 mm/rot

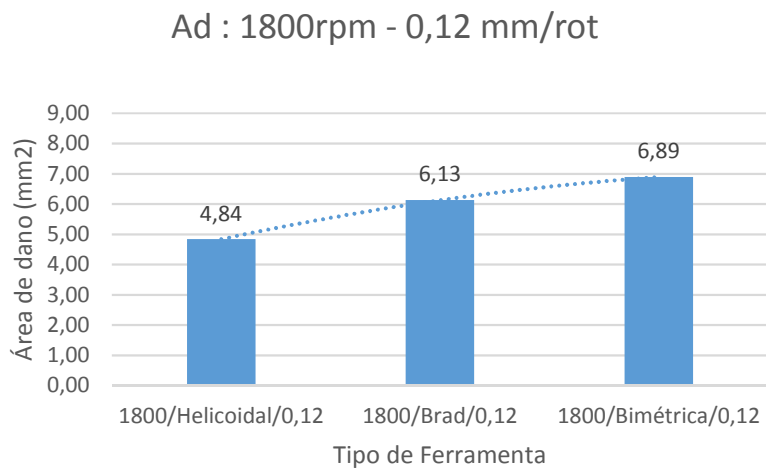


Figura 47 – Gráfico da área de dano resultante da furação com rotação a 1800 rpm e avanço de 0,12 mm/rot

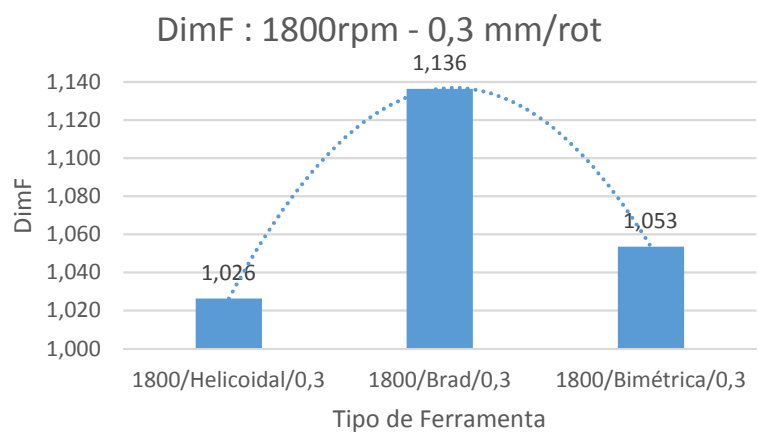


Figura 48 – Gráfico da Dimensão Fractal resultante da furação com rotação a 1800 rpm e avanço de 0,3 mm/rot

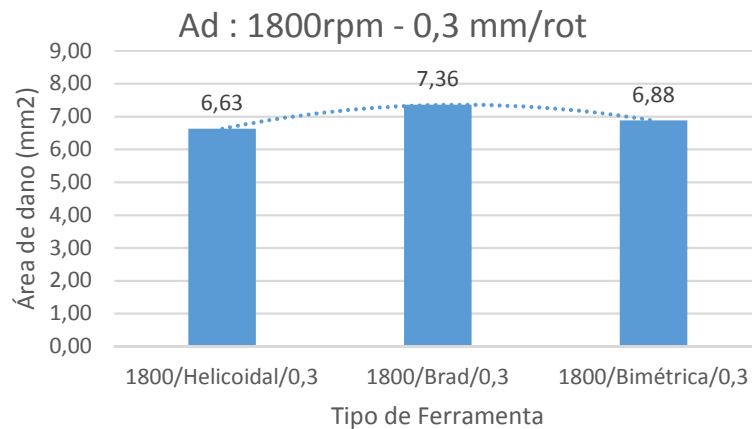


Figura 49 – Gráfico da área de dano resultante da furação com rotação a 1800 rpm e avanço de 0,3 mm/rot

Curiosamente, neste caso, o ensaio a 1800 rpm verifica-se um comportamento totalmente diferente ao ensaio a 1120 rpm. Analisado os dados a 1800 rpm observa-se que com o aumento da dimensão fractal resulta num aumento da área de dano. No entanto, no ensaio a 1120 rpm com o aumento da dimensão da fractal resulta na diminuição da área de dano. Um dos possíveis motivos para esta diferença relativamente aos dados obtidos a 1120 rpm é devido à pequena amostra que resulta em valores obtidos que destoam da amostra (*outliers*)

Para além disso, com uma rotação de 1120 rpm a ferramenta que apresenta menor área de dano é a com geometria tipo brad. No caso do ensaio a 1800 rpm a ferramenta que promove menor área danificada é a helicoidal.

Adicionalmente, foi também analisado qual o comportamento da área de dano em função da velocidade de avanço independentemente da rotação usada (1120 rpm ou 1800 rpm). Isto permite-nos analisar qual é a contribuição da velocidade de avanço da área de delaminação.

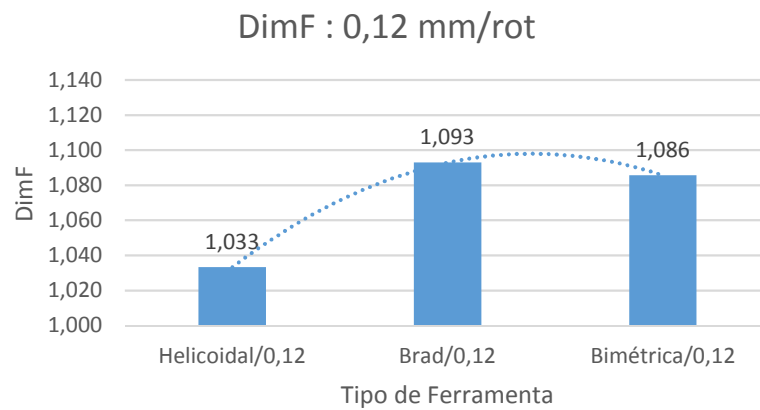


Figura 50 – Gráfico da Dimensão Fractal resultante da furação com avanço de 0,12 mm/rot

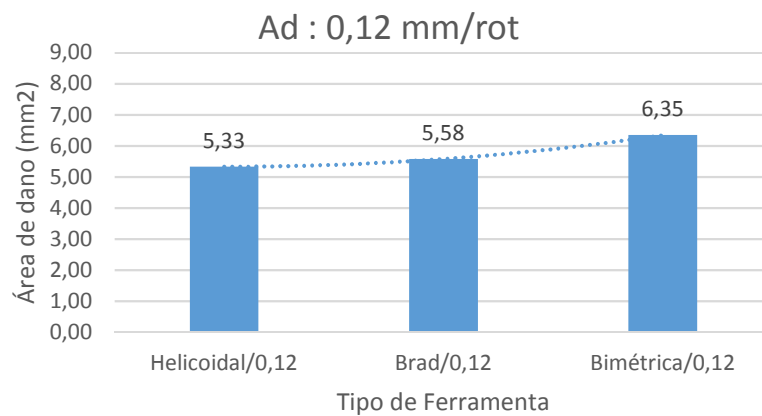


Figura 51 – Gráfico da Área de dano resultante da furação com avanço de 0,12mm/rot

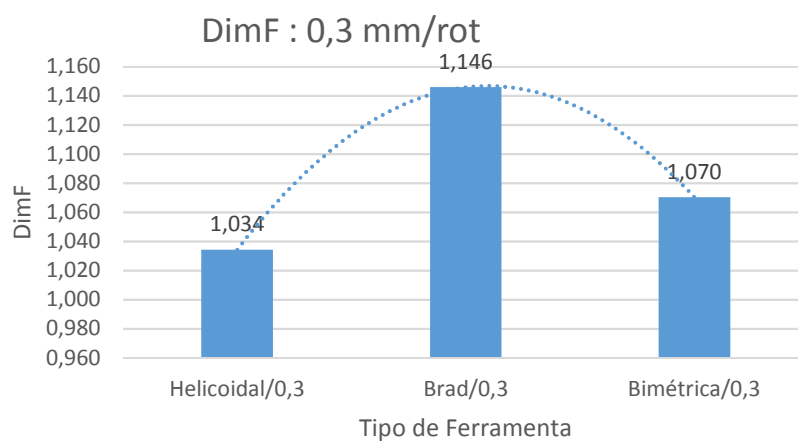


Figura 52 – Gráfico da Dimensão Fractal resultante da furação com avanço de 0,3 mm/rot

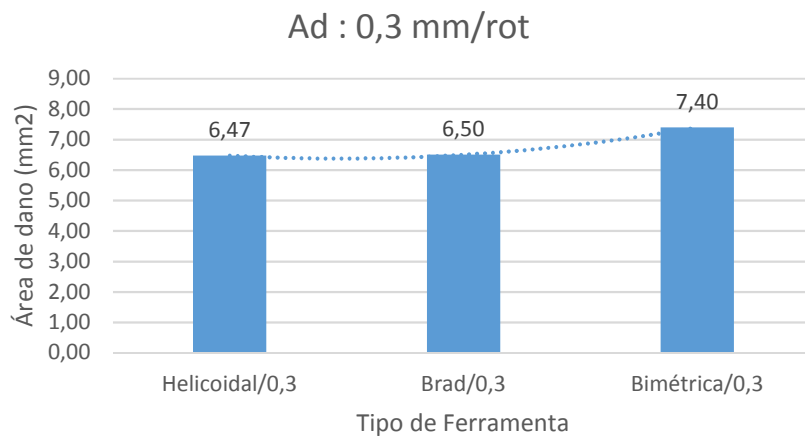


Figura 53 – Gráfico da Área de dano resultante da furação com avanço de 0,3 mm/rot

Como se pode observar nos gráficos a cima, a ferramenta que menor danifica a zona envolvente ao furo é a broca helicoidal. Curiosamente a variação da zona de dano de 0,12 mm/rot para 0,3 mm/rot ainda é significativa, isto é, a maior área de delaminação a 0,12 mm/rot corresponde à menor área efectuada com um avanço de 0,3 mm/rot. Este tipo de geometria é a ferramenta de corte usada na furação de diversos materiais na industria para furar madeira, metal, cimento, betão, pedra ou outros produtos cerâmicos.

Com estes dados da área de dano, as brocas com geometria helicoidal e geometria brad apresentam menor área de dano. A variação entre elas é mínima quando comparado com a broca tipo bimétrica.

Com o intuito de analisar qual a importância do avanço na furação, foram efectuado dois gráficos: a influência do avanço na dimensão fractal e a influência do avanço na área de dano.

Neste gráficos da figura 51 e 53, consegue-se facilmente observar que independentemente do tipo de rotação usada e da velocidade de avanço, a 0,12 mm/rot a área de dano é bastante menor que a 0,3 mm/rot (cerca de 1 mm<sup>2</sup> de diferença).

É de salientar que a diferença entre a área máxima e mínima de dano é de 5,3 mm<sup>2</sup>. No entanto, a média da área de dano dos provetes é de 6,32 mm<sup>2</sup>.

Para verificar isoladamente o que cada parâmetro influencia a furação, foi realizado também um tratamento de dados de modo a demonstrar a variação da área de dano mediante a alteração da rotação. No seguinte gráfico, verifica-se mais uma vez que com a rotação mais baixa (independentemente dos outros parâmetros) é possível obter uma menor área de delaminação.

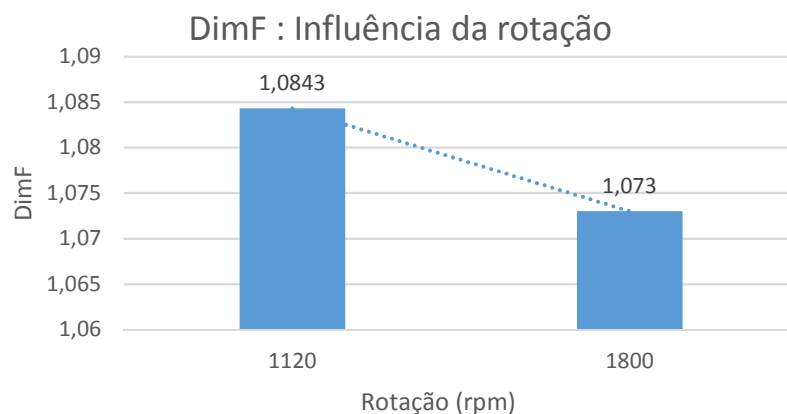


Figura 54 – Gráfico da Dimensão Fractal alterando a rotação de 1120 rpm para 1800 rpm

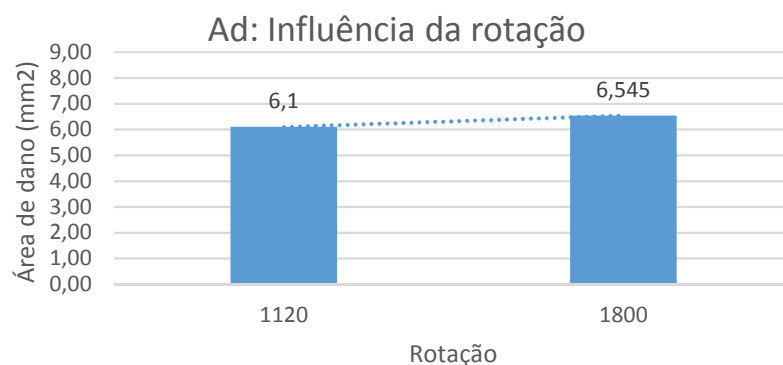


Figura 55 – Gráfico da Área de dano alterando a rotação de 1120 rpm para 1800 rpm

Comparando os ensaios com as diferentes rotações e velocidades de avanço, é possível observar que o parâmetro que mais influencia a área de dano é a avanço. Como se pode observar no gráfico da figura 56, com o avanço a 0,12 mm/rot em ambas as rotações experimentadas conseguimos verificar uma menor área de delaminação.

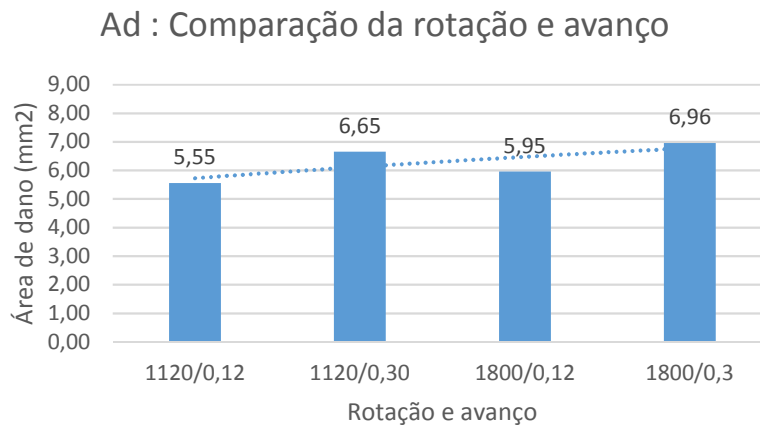


Figura 56 – Gráfico da comparação da Área de dano alterando a rotação e o avanço

Com este estudo em que os parâmetros foram comparados em conjunto e separadamente, é possível saber quais são os parâmetros que contribuem para uma menor área de delaminação.

Desta forma, analisando cada parâmetro isoladamente facilmente chegamos a conclusão que para se obter uma menor área de delaminação é necessário ter uma velocidade de avanço de 0,12 mm/rot. Quando comparado as rotações também conseguimos verificar que a 1120 rpm é possível obter uma melhor qualidade do furo. O efeito do aumento de rotação quando resulta numa maior área de dano.

### DimF : Comparação da rotação e avanço

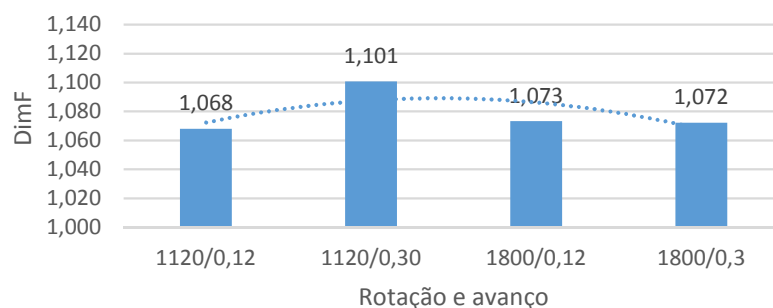


Figura 57 – Gráfico da comparação da Dimensão Fractal alterando a rotação e o avanço

Relativamente ao tipo de ferramenta que melhor se adequa para a realização de furos em compósitos é a broca helicoidal. Contudo, a broca com a geometria tipo brad apresenta-se com uma zona de dano um pouco superior à broca helicoidal como se pode verificar nos gráficos da figura 53.

Como já foi referido, um dos objectivos deste trabalho experimental é tentar relacionar a Dimensão Fractal obtido através do tratamento de imagem com a área de dano. Perante os resultados demonstrados para as diferentes rotações, tipo de ferramenta e velocidades de avanço é possível verificar que no geral a dimensão fractal segue um padrão mediante a variação a zona de dano.

Analisando os gráficos das figuras 40 e 42, com rotação a 1120 rpm e uma velocidade de avanço de 0,12 e 0,3 mm/rot, verifica-se que com o aumento da dimensão fractal a área de dano diminui. Em ambas as situações, a ferramenta que apresenta menor zona de delaminação é a broca tipo Brad seguida da broca helicoidal.

Já analisando os resultados do ensaio com a rotação a 1800 rpm e uma velocidade de avanço de 0,12 mm/rot e 0,3 mm/rot, verifica-se um comportamento totalmente diferente relativamente aos ensaios a 1120 rpm. Com o aumento da Dimensão fractal a área de dano também aumenta, no entanto, a ferramenta usada que apresenta menor área de delaminação do furo é a broca helicoidal.

Com o objectivo de descobrir a importância de cada parâmetro que resulte na menor área de dano afectada, foram obtidos resultados da furação com uma rotação de 1120 rpm e velocidade de avanço de 0,12 e 0,3 mm/rot (independentemente do tipo de ferramenta usada), tendo sido verificado que com o aumento da Dimensão fractal aumentou simultaneamente a área de dano. Os dados obtidos para o ensaio a 1800 rpm e velocidade de avanço de 0,12 e 0,3 mm/rot também se verificou o mesmo, isto é, aumento da DimF resulta no aumento da Ad.

No tratamento de dados, foram selecionados os resultados para demonstrar a influência apenas da velocidade de avanço e mais uma vez verifica-se o aumento da Dimensão fractal bem como o aumento da área de dano, como se pode ver no gráfico das figuras 56 e 57.

Conforme o estudado por outros autores [41], a utilização de brocas helicoidais para a furação deste tipo de material, associadas a velocidades de avanço mais baixas é aconselhada. A utilização dos parâmetros atrás referidos diminui a área de dano o que se traduz numa menor delaminação e conseqüente aumento da resistência do furo.

### 6.3 Ensaio de esmagamento

Ao longo deste capítulo, tem-se demonstrado que o material usado neste ensaio experimental, o tipo de ferramenta usado bem como os parâmetros de furação contribuem diretamente para a qualidade do furo. A qualidade do furo está associada à menor zona de delaminação possível e uma resistência do material o mais elevado possível. Deste modo, foram separados os provetes como se pode observar na tabela seguinte.

Tabela 11 - Valores resultantes do ensaio de esmagamento efetuados nos provetes.

Referência	PARÂMETROS DE CORTE			ENSAIO MECÂNICO
	Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Rotação (rpm)	T max (MPa)
1F1	Helicoidal	0,12	1120	298,949
2F1	Helicoidal	0,12	1120	427,031
3F1	Helicoidal	0,12	1120	328,096
4F1	Helicoidal	0,3	1120	360,870
5F1	Helicoidal	0,3	1120	362,760
6F1	Helicoidal	0,3	1120	398,634
7F1	Brad	0,12	1120	339,974
8F1	Brad	0,12	1120	405,221
9F1	Brad	0,12	1120	356,739
10F1	Brad	0,3	1120	323,491
11F1	Brad	0,3	1120	401,293
12F1	Brad	0,3	1120	368,874
13F1	Bimétrica	0,12	1120	383,726
14F1	Bimétrica	0,12	1120	375,223
15F1	Bimétrica	0,12	1120	363,543
16F1	Bimétrica	0,3	1120	341,445
17F1	Bimétrica	0,3	1120	349,400
18F1	Bimétrica	0,3	1120	362,592
19F1	Helicoidal	0,12	1800	435,175
20F1	Helicoidal	0,12	1800	370,114
21F1	Helicoidal	0,12	1800	356,503
22F1	Helicoidal	0,3	1800	334,051
23F1	Helicoidal	0,3	1800	373,246
24F1	Helicoidal	0,3	1800	335,947
25F1	Brad	0,12	1800	380,179
26F1	Brad	0,12	1800	373,846
27F1	Brad	0,12	1800	371,314
28F1	Brad	0,3	1800	111,912
29F1	Brad	0,3	1800	411,171
30F1	Brad	0,3	1800	359,611
31F1	Bimétrica	0,12	1800	427,372
32F1	Bimétrica	0,12	1800	398,405
33F1	Bimétrica	0,12	1800	405,609
34F1	Bimétrica	0,3	1800	449,392
35F1	Bimétrica	0,3	1800	366,867
36F1	Bimétrica	0,3	1800	374,749

Nesta secção iremos abordar de que maneira os parâmetros de furação e o tipo de ferramenta utilizados influencia a resistência dos furos. Na tabela 11, podemos observar os resultados do ensaio de esmagamento que foram efetuados a cada provete e ainda o tipo de broca e o avanço utilizados para na furação. Teoricamente, o que é pretendido para a furação, neste caso, de material compósito é uma menor área de dano associado a uma elevada resistência. No entanto, como já se pode comprovar, os parâmetros de corte e o tipo de ferramenta adotada influenciam muito a qualidade do furo.

Numa primeira fase, iremos analisar a área de dano com os dados obtidos do ensaio de esmagamento. Para o ensaio com uma rotação a 1120 rpm e uma velocidade de avanço de 0,12 mm/rot obteve-se o gráfico.

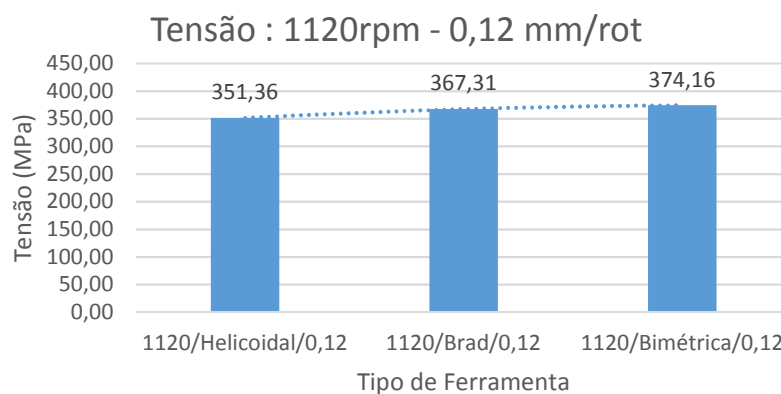


Figura 58 – Gráfico da Dimensão Fractal resultante da furação com rotação a 1120 rpm e avanço de 0,12 mm/rot

Para se construir o gráfico de barras da Figura 58, os resultados foram agrupados por tipo de broca com a mesma velocidade de avanço e rotação. Aos resultados obtidos na furação foi feita a média dos valores de tensão. Deste gráfico podemos ver que quando as peças foram furadas com avanço de 0,12mm/rotação, a resistência no ensaio de esmagamento foi aumentando consoante o tipo de ferramenta utilizada. Neste caso, o valor mais alto de tensão foi obtido na furação com a broca bimétrica.

Com a variação das condições de furação, o objetivo desta parte do trabalho foi tentar saber qual a influência dos parâmetros de fabricação na resistência dos provetes ao ensaio de esmagamento. Queríamos saber qual a broca e qual o avanço mais indicados

para furar este tipo de material, ou seja, que nos permite obter maior resistência no ensaio de esmagamento.

Foi repetido o procedimento anterior, para os resultados dos provetes com a mesma rotação (1120 rpm) e o avanço de 0,3 mm/rot. Sendo os gráficos da figura 59 e 60 totalmente diferentes relativamente aos gráficos anteriores.

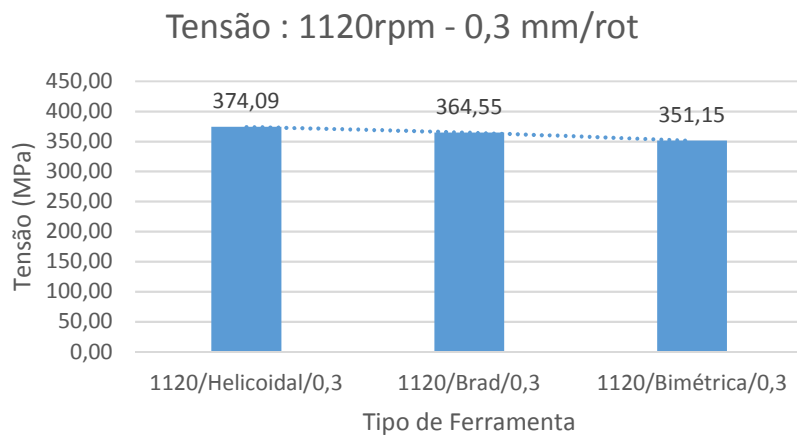


Figura 59 – Gráfico da Dimensão Fractal resultante da furação com rotação a 1120 rpm e avanço de 0,3 mm/rot

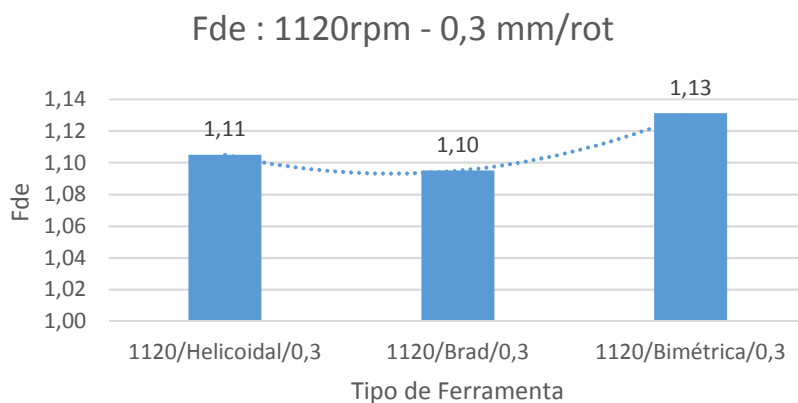


Figura 60 – Gráfico do Fator de Delaminação equivalente resultante da furação com rotação a 1120 rpm e avanço de 0,3 mm/rot

Como se pode observar relativamente ao gráfico anterior, a tensão máxima tem o valor máximo com a ferramenta com geometria helicoidal. Nesse gráfico, a resistência ao esmagamento vai diminuindo com o tipo de ferramenta. Remetendo para o gráfico da figura 53, a diminuição da resistência de esmagamento está associada a um aumento da área de dano.

A relação entre o fator de delaminação e a tensão máxima obtida no ensaio de esmagamento torna-se mais difícil de encontrar. Normalmente os fatores de delaminação são mais utilizados para compósitos com mais percentagem de fibras, tornando a zona de dano melhor delimitada. Desta forma, torna-se mais espectável que a dimensão fractal não se relacione de forma tão direta com a tensão.

Como já foi referido no capítulo anterior, decidiu-se apenas analisar o efeito de cada parâmetro sendo que neste caso apenas a variação resulta da alteração da rotação e do avanço.

Analisando o ensaio de esmagamento para os diferentes parâmetros de furação, é possível verificar uma relação entre a área de dano, o fator de delaminação equivalente e o ensaio mecânico.



Figura 61 – Gráfico da comparação da Área de dano alterando a rotação e o avanço

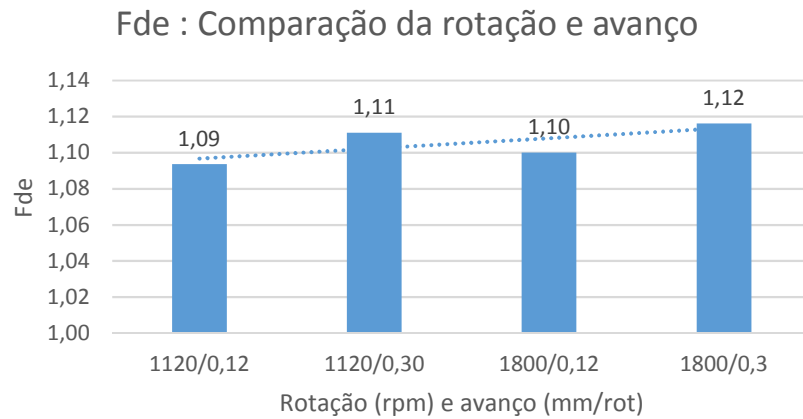


Figura 62 – Gráfico da comparação do Fator de Delaminação equivalente alterando a rotação e o avanço

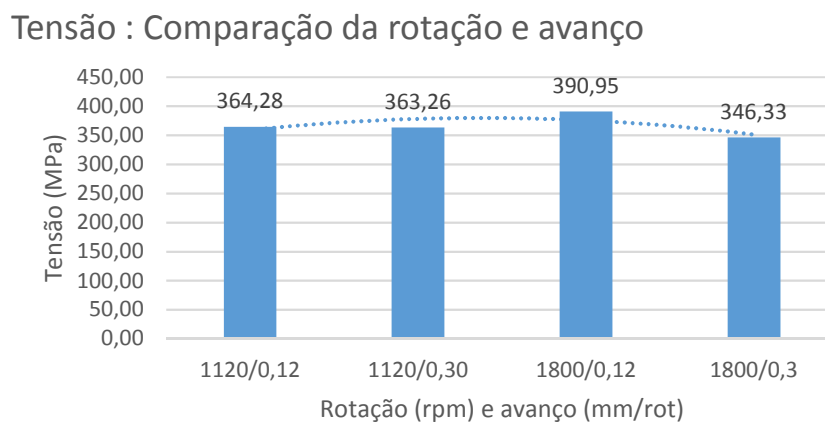


Figura 63 – Gráfico da comparação da tensão máxima alterando a rotação e o avanço

Com a análise dos três gráficos, é possível observar que com o avanço de 0,12 mm/rot para 0,3 mm/rot verifica-se um aumento da zona de delaminação e, para além disso, existe também um aumento da área de dano quando a rotação aumenta de 1120 rpm para 1800 rpm. Ao analisar o fator de delaminação equivalente verifica-se o que já foi mencionado anteriormente. Com o aumento da área de dano resulta consequentemente no aumento do Fator de delaminação equivalente (o mesmo se verifica na Dimensão fractal).

Através dos gráficos da figura 62 e 63, é possível verificar a relação entre a delaminação na furação e a perda de resistência do material. Isto é, aumentando a delaminação (Fde) diminui a resistência do material.

Com o ensaio de esmagamento, neste caso, torna-se bastante fácil de observar que com o aumento da área de dano e do fator de delaminação, a tensão máxima de esmagamento diminui.

Em suma, existe uma relação direta entre a área de dano e o fator de delaminação equivalente enquanto que a tensão máxima obtida tem uma relação inversa com estes dois fatores.

Como já foi referido, para verificar a influência de cada parâmetro na qualidade do furo, foram tratados os dados para determinar a variação da tensão máxima para um avanço de 0,12 mm/rot e 0,3 mm/rot. O procedimento anterior foi repetido, no entanto, a comparação dos resultados é apenas para uma variação da velocidade de avanço de 0,12 mm/rot para 0,3 mm/rot.

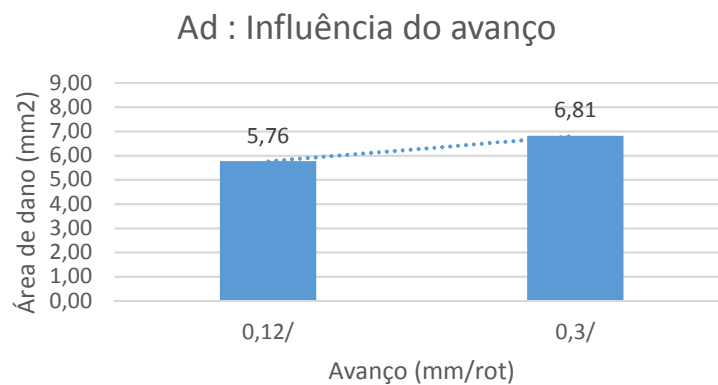


Figura 64 – Gráfico da Área de dano alterando a rotação de 1120 rpm para 1800 rpm

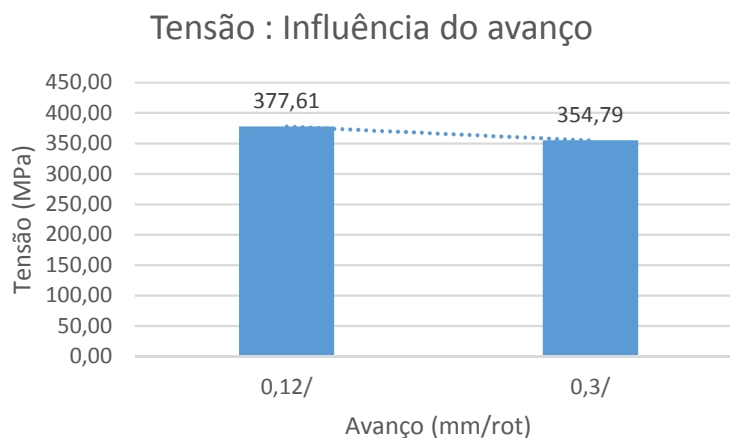


Figura 65 – Gráfico da Tensão máxima alterando a rotação de 1120 rpm para 1800 rpm

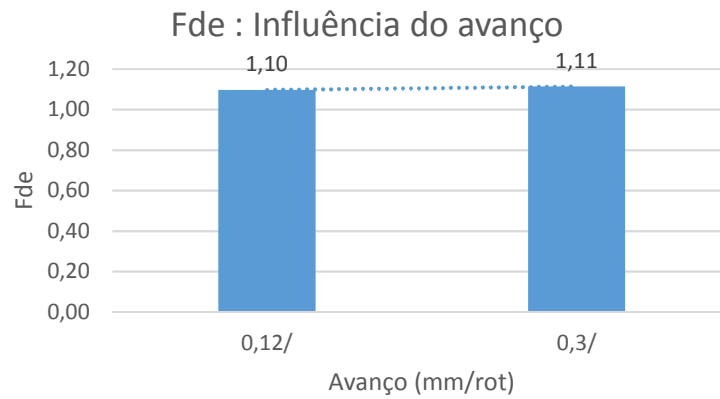


Figura 66 – Gráfico do Fator de Delaminação equivalente máxima alterando a rotação de 1120 rpm para 1800 rpm

Mais uma vez, é possível ver que numa forma mais abrangente, o aumento da área de dano resulta do aumento da velocidade de avanço. Simultaneamente, com o aumento da área de dano verifica-se o aumento do fator de delaminação equivalente. Com o aumento da área de dano verifica-se uma perda de resistência mecânica como se pode observar a variação da tensão máxima de 0,12 mm/rot para 0,3 mm/rot.

# CONCLUSÃO



## 7 Conclusão

O trabalho aqui apresentado teve como objetivo a comparação das diferentes geometrias e parâmetros de corte que influenciam a delaminação na furação. Nesta análise, foram selecionadas duas velocidades de avanço, 0,12 e 0,3 mm/rot e duas velocidades de rotação, 1120 rpm e 1800 rpm. Os diâmetros das brocas foram mantidos constantes.

Durante este trabalho experimental foi possível através do processamento e análise da imagem obter a área de dano consequente da furação e foram efetuados ensaios mecânicos de esmagamento com o intuito de avaliar a perda de resistência mecânica e relacionar com os fatores de delaminação calculados.

Com o trabalho aqui efetuado, é possível obter as seguintes conclusões:

- As geometrias aqui estudadas têm influencia direta na extensão da área de dano e consequentemente na resistência mecânica.
- Relativamente à área delaminada, os melhores resultados foram conseguidos com os seguintes parâmetros: rotação a 1120 rpm, velocidade de avanço de 0,12 mm/rot. A ferramenta broca helicoidal.
- Com o aumentando do avanço de 0,12 para 0,3 mm/rot, ocorre um aumento da área delaminada e dos fatores de delaminação.
- De uma forma geral, é possível relacionar o fator de delaminação com a resistência de material. Com os resultados obtidos no aumento do avanço verifica-se que com o aumento do fator de delaminação equivalevente existe uma perda de resistência do material.
- Os valores obtidos no ensaio mecânico de esmagamento indicam a broca bidiametral com menor perda de resistência relativamente às outras ferramentas.

Para uma maior fiabilidade dos resultados pretende-se efetuar estudos adicionais para corroborar resultados obtido.

# BIBLIOGRAFIA

- [1] L. M. P. Durao, D. J. Goncalves, J. M. R. Tavares, V. H. C. de Albuquerque, and a. T. Marques, "Comparative analysis of drills for composite laminates," *J. Compos. Mater.*, vol. 46, no. 14, pp. 1649–1659, 2012.
- [2] E. U. Enemuoh, a. S. El-Gizawy, and a. Chukwujekwu Okafor, "An approach for development of damage-free drilling of carbon fiber reinforced thermosets," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 41, no. 12, pp. 1795–1814, 2001.
- [3] M. Ramulu, T. Branson, and D. Kim, "A study on the drilling of composite and titanium stacks," *Compos. Struct.*, vol. 54, no. 1, pp. 67–77, 2001.
- [4] A. M. Abrao, P. E. Faria, J. C. C. Rubio, P. Reis, and J. P. Davim, "Drilling of fiber reinforced plastics: A review," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 186, no. 1–3, pp. 1–7, 2007.
- [5] L. M. P. Durão, "Estruturas especiais, Comportamento Mecânico de componentes em materiais compósitos de matriz polimérica," 2012.
- [6] C. C. Tsao and H. Hocheng, "Computerized tomography and C-Scan for measuring delamination in the drilling of composite materials using various drills," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 45, no. 11, pp. 1282–1287, 2005.
- [7] B. T. Bowler, "Carbon fibre planes: Lighter and stronger by design," no. January, pp. 27–29, 2014.
- [8] B. Paul, R. Wolpe, and O. Pistorius, "<http://edition.cnn.com/2012/08/07/opinion/wolpe-oscar-pistorius>, consultado em 01-10-2015," pp. 1–4, 2015.
- [9] "<http://www.brendanlove.com/blog/category/viking-inc/>, consultado em 01-10-2015," pp. 1–8, 2015.
- [10] W. G. Roeseler, B. Sarh, and M. U. Kismarton, "Composite Structures: The First 100 Years," *16th Int. Conf. Compos. Mater.*, pp. 1–10, 2007.
- [11] "History of Composites; <http://composite.about.com/od/aboutcompositesplastics/a/HistoryofComposites.htm>; Consultado em: 01-10-2015," *Nature*.
- [12] A. G. de Magalhães and M. Dores de Castro, "Apontamentos de Materiais Não Metálicos - Instituto Superior de Engenharia do Porto," 2011.

- [13] “<http://www.extremetech.com/extreme/162582-bmw-i3-will-bmws-new-ev-finally-be-the-breakthrough-for-carbon-fiber-cars>; consultado em 01-10-2015.”
- [14] “<http://www.autoconnesse.it/auto-connesse/bmw-i3/>; consultado em 01-10-2015.”
- [15] D. F. Adams, “Engineering composite materials,” *Composites*, vol. 18, no. 3, p. 261, 1987.
- [16] M. F. S. F. de Moura, A. B. de Moraes, and A. G. de Magalhães, “Materiais compósitos Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico.” Publindústria, Produção de Comunicação, Lda., 2005.
- [17] “<http://pbr.cpicfiber.com/processos.aspx?codigo=3&cat=Processos>, consultado em 14-08-2015.” .
- [18] “<http://www.dupont.com/>, consultado em 13-08-2015,” p. 2015, 2010.
- [19] “<http://www.allatsea.net/inside-grady-white>, consultado em 13-08-2015.”
- z
- [21] A. G. de Magalhães, “Apontamentos de Seleção de Materiais e Processos de Fabrico- Instituto Superior de Engenharia do Porto,” 2014.
- [22] “<http://br.cpicfiber.com/processos.asp?codigo=7&cat=Processos>, consultado em 12-10-2015.” .
- [23] “[http://www.boasnoticias.pt/noticias\\_Design-portugu%C3%AAs-ganha-pr%C3%A9mio-nos-EUA\\_4653.html](http://www.boasnoticias.pt/noticias_Design-portugu%C3%AAs-ganha-pr%C3%A9mio-nos-EUA_4653.html), consultado em 12-10-2015.”
- [24] “<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABa7kAF/pultrusao-arrumado>, consultado em 12-10-2015.”
- [25] H. Hocheng and C. C. Tsao, “The path towards delamination-free drilling of composite materials,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 167, no. 2–3, pp. 251–264, 2005.
- [26] H. Ho-Cheng and C. K. H. Dharan, “Delamination During Drilling in Composite Laminates,” *Journal of Engineering for Industry*, vol. 112, no. 3. p. 236, 1990.
- [28] G. Caprino and V. Tagliaferri, “Damage development in drilling glass fiber reinforced plastics,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 35, no. 6, pp. 817–829, 1995.
- [29] H. Hocheng and C. C. Tsao, “Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 12–

- 13, pp. 1403–1416, 2006.
- [30] E. Capello, “Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 148, pp. 186–195, 2004.
- [31] Y. H. Guu, H. Hocheng, N. H. Tai, and S. Y. Liu, “Effect of electrical discharge machining on the characteristics of carbon fiber reinforced carbon composites,” *J. Mater. Sci.*, vol. 36, no. 8, pp. 2037–2043, 2001.
- [32] W. S. Lau, W. B. Lee, and S. Q. Pang, “Pulsed Nd: YAG Laser Cutting of Carbon Fibre Composite Materials,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 39, no. 1, pp. 179–182, 1990.
- [33] M. Naeem, “Laser machining fiber - reinforced composites,” no. 5, pp. 1–10, 2015.
- [34] L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, J. M. R. S. Tavares, V. H. C. De Albuquerque, and a. M. Baptista, “Delaminação na furação de laminados carbono/epóxico,” *Cibim 10*, 2011.
- [35] D. Kim and M. Ramulu, “Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloy stacks,” *Compos. Struct.*, vol. 63, no. 1, pp. 101–114, 2004.
- [36] L. M. P. Durão, J. M. R. S. Tavares, A. G. de Magalhães, A. T. Marques, and A. P. M. Baptista, “Damage analysis of carbon/epoxy plates after drilling,” no. 1994, 2004.
- [37] F. Lachaud, R. Piquet, F. Collombet, and L. Surcin, “Drilling of composite structures,” *Compos. Struct.*, vol. 52, no. 3–4, pp. 511–516, 2001.
- [38] Z. L. Yu and S. Boseck, “Scanning acoustic microscopy and its applications to material characterization,” *Rev Mod Phys*, vol. 67, pp. 863–891, 1995.
- [39] 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.
- [40] J. P. Davim, J. C. Rubio, and A. M. Abrao, “A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 9, pp. 1939–1945, 2007.
- [41] C. Cavette, “<http://www.carbonfiberglass.com/carbon-fiber-robotic-arm/>,

- consultado em 01-10-2015," *How Prod. Are Made*.
- [42] A. Faraz, D. Biermann, and K. Weinert, "Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 49, no. 15, pp. 1185–1196, 2009.
- [43] J. P. Davim, P. Reis, and C. C. António, "Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 64, no. 2, pp. 289–297, 2004.
- [44] U. A. Khashaba, "Delamination in drilling GFR-thermoset composites," *Compos. Struct.*, vol. 63, no. 3–4, pp. 313–327, 2004.
- [45] V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, J. C. Rubio, A. E. Correia, A. M. Abrao, and J. P. Davim, "Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 203, no. 1–3, pp. 431–438, 2008.
- [46] J. P. Davim, P. Reis, and C. C. António, "Drilling fiber reinforced plastics (FRPs) manufactured by hand lay-up: Influence of matrix (Viapal VHP 9731 and ATLAC 382-05)," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 155–156, pp. 1828–1833, 2004.
- [47] E. Kilickap, "Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite," *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, no. 8, pp. 6116–6122, 2010.
- [48] R. Piquet, B. Ferret, F. Lachaud, and P. Swider, "Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 31, no. 10, pp. 1107–1115, 2000.
- [49] U. a. Khashaba, I. a. El-Sonbaty, a. I. Selmy, and a. a. Megahed, "Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: Part II - Effect of drill wear," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 41, no. 9, pp. 1130–1137, 2010.
- [50] V. Tagliaferri, G. Caprino, and A. Diterlizzi, "Effect of drilling parameters on the finish and mechanical properties of GFRP composites," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 30, no. 1, pp. 77–84, 1990.
- [51] M. S. Won and C. K. H. Dharan, "Drilling of Aramid and Carbon Fiber Polymer Composites," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 124, no. 4, p. 778, 2002.

# ANEXOS

9.1 ARTIGOS PUBLICADOS

9.2 FICHAS TÉCNICAS

# DAMAGE ASSESSMENT MODEL FOR DRILLED COMPOSITES LAMINATE PLATES



-Luís Miguel Pereira Durão, Daniel J. S. Gonçalves  
lmd@ua.ipp.pt

-João Manuel R. S. Tavares, Victor H. C. Albuquerque,  
A. Torres Marques, A. M. Baptista



**Resumo** As características distintivas dos materiais compósitos, nomeadamente os reforçados com fibra de carbono, conduzem a uma utilização cada vez mais alargada, nomeadamente em diversas aplicações na indústria. No entanto, a necessidade de realizar algumas operações de maquinagem, como por exemplo a furação, após posterior montagem em estruturas de maior ou menor complexidade, limita a sua aplicação devido a alguma incerteza nas suas propriedades mecânicas, particularmente na zona de ligação entre peças. O principal objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia de análise do dano causado por furação num lote de placas carbono/epoxy ao qual são realizadas operações de furação com diferentes brocas. A extensão do dano e a forma como se distribui à volta do furo são analisados e quantificados, com recurso a ferramentas do Matlab® para posterior correlação com o ensaio mecânico de esmagamento (ASTM D5963M-15). Os resultados demonstram a importância de uma boa avaliação do dano na análise de resistência e aumento da confiança na fiabilidade destas peças.

**Palavras Chaves:** Compósitos de matriz polimérica; tratamento e análise de imagem; avaliação do dano; ensaios não-destrutivos; ensaio de esmagamento

## Introdução

Os materiais compósitos reforçados com fibras apresentam ótimas propriedades mecânicas e físicas, tais como elevada resistência específica e elevada rigidez específica. Características que fazem com que sejam vastamente utilizados em diversas indústrias, como a aeronáutica, a aeroespacial ou a aeroespacial. Apesar das suas vantagens, este tipo de materiais apresenta certas dificuldades perante a maior parte dos processos de maquinagem. A desagregação da matriz, o arrastamento das fibras e o mais aspeto superficial resultante são obstáculos ao seu uso. A furação de materiais compósitos, é uma operação de maquinagem indispensável em muitas aplicações. Contudo, pode ser considerada uma operação que apresenta uma grande resistência para causar a delaminação do material sendo este o mais crítico. [drilling research].

Um dos principais problemas que ocorre durante a furação é que pode afetar severamente o desempenho de uma peça, é a delaminação. Existem vários fatores que influenciam a delaminação. Segundo Hochberg e Dias, a geometria e tipo de ferramenta é considerado um importante fator que está diretamente relacionado com a qualidade do seu furo [1].

Este estudo foi realizado, de forma a apresentar um parâmetro para auxiliar no cálculo da delaminação e posteriormente o cálculo da resistência de um furo, quando sujeito a uma força de esmagamento com a ajuda dos parâmetros de delaminação já existentes. Será dada especial atenção à avaliação da extensão do dano, com rastreio dos seus diâmetros e áreas para aplicação de critérios de dano já publicados e a correlação da dimensão fractal com a operação de furação. Para tal, é analisada a orla de dano na periferia do furo, recorrendo a imagens obtidas através de um sistema de radiografia e com o auxílio de algoritmos de análise e processamento de imagens no Matlab®. Os resultados obtidos neste trabalho, demonstram que o conhecimento das propriedades do material e os parâmetros de maquinagem são de elevada importância na obtenção de uma estratégia de furação de materiais compósitos que conduza a um aumento da fiabilidade das peças.

## Geometria da Broca

Twist (120°/85° point angle)



Brad



Bidimensional



## Parâmetros de Corte

Rotação:  
1180 rpm (21 m/min) e 1800 rpm (34 m/min)  
Avanço:  
0.12 (bruto) e 0.20 mm/rev (líquido)

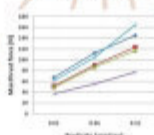


## Equipamento e Material

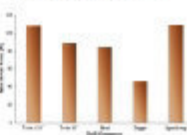


## Resultados

### Feed rate influence



### Drill geometry effect



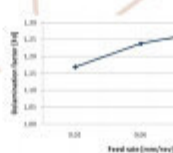
Delamination Factor (DF) [10], a ratio between the maximum delaminated diameter ( $D_{del}$ ) and hole nominal diameter ( $D$ )

$$DF = \frac{D_{del}}{D}$$

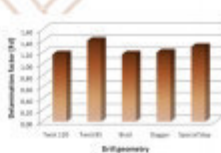


Example of image processing and analysis results [11]: a) original radiography; b) resultant image (in grey is the hole area, in white is the delaminated region); c) measurement results.

### Feed rate influence



### Drill geometry effect



## CONCLUSIONS

Low feed rates seem appropriate for laminate drilling, as it reduces the axial thrust force. However, this option can cause thermal degradation of the matrix and can be unsuitable for industrial processes where productivity is, as a rule, a priority.

Tool geometry had influenced the results for all the measurements considered. Results are not coincident, but it is advisable to pay more attention to minimize delamination and reduce thrust force.

Based on the work here presented, and considering the parameters used during the experimental procedure, a Brad drill with a cutting speed of 53 m/min should be combined with a feed rate of 0.02 mm/rev for delamination minimization.

## References

- [1] H. Hochberg and C. Dias, *J. Materials Processing Technology*, v. 181, (2005), p. 211.
- [2] H. Hochberg, K. E. Davies, *Journal of Engineering for Industry*, v. 111, (1990), p. 224.
- [3] E. Piquer, E. Fraga, F. Luchetti and P. Brodie, *Composites A*, v. 31, (2000), p. 110.
- [4] K. S. P. Dao, J. S. E. Tavares, A. T. Marques, A. M. Baptista, A. E. Magalhães, *Int. Journal of Materials and Product Technology*, v. 32, (2008), p. 134.
- [5] K. S. P. Dao, J. S. E. Tavares, J. S. E. Tavares, *Composites Materials*, v. 20, (1997), p. 149.
- [6] R. S. Tavares and K. Enderswary, *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, v. 38, (2000), p. 803.
- [7] J. P. Davim, *J. Eng. Materials and Design*, v. 34, (2005), p. 205.
- [8] H. Hochberg and C. Dias, *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, v. 48, (2006), p. 1083.
- [9] K. C. Dai and H. Hochberg, *J. Materials Processing Technology*, v. 110-110, (2007), p. 37.
- [10] M. C. Oates, *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, v. 37, (1997), p. 1007.
- [11] A. P. Marques, L. M. Dao, A. G. Magalhães, J. P. Silva, A. M. R. S. Tavares, *Composites Science and Technology*, DOI: 10.1016/j.compscitech.2015.01.021

## International Conference on Composite Structures 19th

### 11553 | Delamination concerns on carbon fibre reinforced laminates

Silva, Jorge ([Jorge-m-silva@sapo.pt](mailto:Jorge-m-silva@sapo.pt)), ISEP/CIDEM, School of Engineering – Polytechnic of Porto, Portugal

Ferreira, Filipe, ISEP/CIDEM, School of Engineering – Polytechnic of Porto, Portugal

Abreu, Stella M., ISEP/CIDEM, School of Engineering – Polytechnic of Porto, Portugal

Matos, João E., ISEP/CIDEM, School of Engineering – Polytechnic of Porto, Portugal

Durão, Luis M., ISEP/CIDEM, School of Engineering – Polytechnic of Porto, Portugal

The characteristics of carbon fibre reinforced laminates have widened their use for a crescent number of different industries. New possibilities for their usage emerge almost every day. Medicine, aeronautics, automotive industry, aerospace and electronics are just some examples of industries where we can find this type of materials. Their ability to be tailored for use and endless possibilities provided by the combination of reinforcements together with their alignment and fibre fraction allow design engineers to have almost total freedom in the design of new parts. Unique properties such as low weight, high strength and stiffness are normally referred to whenever the advantages of these materials are listed. As a consequence of these advantages, their usage has evolved from components where the level of requests was almost none to structural parts, as it was well demonstrated by the unprecedented use in modern passenger aircrafts, like the Boeing 787 or the Airbus A380, In spite of the fact that most of the composite materials are produced to near-net-shape condition, additional machining operations like drilling are often required for assembly purposes. From the diverse drilling techniques known, the outcome normally presents several concerns: machined parts have poor surface appearance, tool wear is higher: delamination is prone to occur as well as other mechanical and thermal damages. One of the problems related with composites machining is the nature of the fibre reinforcement, which is usually very abrasive and causes rapid tool wear and deterioration of the machined surfaces. These special characteristics make composites materials difficult to machine when compared to traditional materials. It is known that a drilling process that reduces the drill thrust force can decrease the risk of delamination thus increasing reliability. Delamination is the most usual damage and can severely reduce the bearing capacity of the plate. The typical solution to this problem is to use higher levels of safety factors with the consequent penalty in terms of final weight of the structure. This solution can be particularly penalizing in the case of vehicles where the final structural weight is an important factor. For that, damage assessment methods based on data extracted from images resulting from non-destructive testing of drilled plates are of primordial importance. In this work 36 specimens of carbon reinforced plates were produced to assess by diverse parameters the damaged region after drilling and to study the mechanical properties of the drilled

plates. Different hole conditions were used such as tool geometry and feed rate to diversify the damaged region obtained. Quantitative criteria for damage assessment were used as well as a quantification parameter based on an image processing technique using MATLAB software together with an appropriate image processing toolbox. Finally, bearing test, according to ASTM D5961, and pin-bearing test, according to the method presented by khashaba, of the specimens was carried out to evaluate the effects of the drilling parameters in the mechanical properties of the drilled plates. This work will highlight the importance of non-destructive assessment processes for the selection of appropriate drilling parameters, including tool selection, and the need for an adequate characterization of all the geometrical factors related with the damaged region – diameter, area and irregularity of the borderline, to extend the cycle of these laminates as a consequence of enhanced reliability.



# Safety Data Sheet

according to Regulation (EC) No. 1907/2006 (amended by Regulation (EU) No 453/2010)

Revision date: 30.07.2014

Version: 4.0

Print date: 06.08.2014

## SECTION 1: Identification of the substance/mixture and of the company/undertaking

### 1.1 Product identifier

Trade name/designation:	Diiodomethane AnalaR NORMAPUR® analytical reagent, for mineralogy
Product No.:	25633 (VWR International)
Substance name:	Diiodomethane
CAS No.:	75-11-6
INDEX No.:	000-000-00-0
REACH registration No.:	Not yet communicated down the supply chain.
Other means of identification:	

### 1.2 Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against

Relevant identified uses: General chemical reagent

### 1.3 Details of the supplier of the safety data sheet

Supplier (manufacturer/importer/only representative/downstream user/distributor)

#### *United Kingdom*

##### **VWR International Ltd.**

Street	Hunter Boulevard, Magna Park
Postal code/city	Lutterworth, LE17 4XN
Telephone	0800 22 33 44
Telefax	01455 55 85 86
E-mail (competent person)	vwr@sds@eu.vwr.com

##### **Emergency telephone**

Telephone +44 (0) 1270 502894

#### *Ireland*

##### **VWR International Ltd.**

Street	Orion Business Campus, Northwest Business Park
Postal code/city	Ballycoolin, Dublin 15
Telephone	+353 1 8822222
Telefax	+353 1 8822333
E-mail (competent person)	vwr@sds@eu.vwr.com

##### **Emergency telephone**

Telephone +44 (0) 1270 502894



---

## *Ireland*

### **VWR International (Northern Ireland) Ltd.**

Street	Orion Business Campus, Northwest Business Park
Postal code/city	Ballycoolin, Dublin 15
Telephone	+353 1 8822222
Telefax	+353 1 8822333
E-mail (competent person)	vwr@sds@eu.vwr.com

### **Emergency telephone**

Telephone	+44 (0) 1270 502894
-----------	---------------------

---

## *Netherlands*

### **VWR International B.V.**

Street	Basisweg 34
Postal code/city	1043 AP Amsterdam
Telephone	+32 16 385 011
Telefax	+32 16 385 385
E-mail (competent person)	vwr@sds@eu.vwr.com

### **Emergency telephone**

Telephone	+44 (0) 1270 502894
-----------	---------------------

---

## *Switzerland*

### **VWR International GmbH**

Street	Lerzenstrasse 16/18
Postal code/city	8953 Dietikon
Telephone	+44 (0) 745 13 13
Telefax	+44 (0) 745 13 10
E-mail (competent person)	vwr@sds@eu.vwr.com

### **Emergency telephone**

Telephone	145
-----------	-----



## SECTION 2: Hazards identification

### 2.1 Classification of the substance or mixture

#### 2.1.1 Classification according to Regulation (EC) No. 1272/2008 [CLP]

This substance is classified as not hazardous according to regulation (EC) No. 1272/2008 [CLP].

### 2.2 Label elements

#### 2.2.1 Labelling according to Regulation (EC) No. 1272/2008 [CLP]

According to EC directives or the corresponding national regulations the product does not have to be labelled.

Other hazards

SVHC No

## SECTION 3: Composition / information on ingredients

### 3.1 Substances

Molecular formula	CH2I2
Molecular weight	267,84 g/mol
CAS No.	75-11-6
REACH registration No.	Not yet communicated down the supply chain.
INDEX No.	000-000-00-0

## SECTION 4: First aid measures

### 4.1 General information

When in doubt or if symptoms are observed, get medical advice. If unconscious place in recovery position and seek medical advice. Never give anything by mouth to an unconscious person or a person with cramps. Change contaminated, saturated clothing. Do not leave affected person unattended.

#### After inhalation

Remove casualty to fresh air and keep warm and at rest. If breathing is irregular or stopped, administer artificial respiration. In case of respiratory tract irritation, consult a physician.

#### In case of skin contact

After contact with skin, wash immediately with plenty of water and soap. Remove contaminated, saturated clothing immediately. In case of skin reactions, consult a physician.

#### After eye contact

In case of contact with eyes flush immediately with plenty of flowing water for 10 to 15 minutes holding eyelids apart and consult an ophthalmologist. Protect uninjured eye. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing.

#### In case of ingestion

If accidentally swallowed rinse the mouth with plenty of water (only if the person is conscious) and obtain immediate medical attention. Do NOT induce vomiting. Give nothing to eat or drink.

### 4.2 Most important symptoms and effects, both acute and delayed

no data available

### 4.3 Indication of any immediate medical attention and special treatment needed

no data available



#### 4.4 Self-protection of the first aider

First aider: Pay attention to self-protection!

#### 4.5 Information to physician

no data available

### SECTION 5: Firefighting measures

#### 5.1 Extinguishing media

##### Suitable extinguishing media

The product itself does not burn. Co-ordinate fire-fighting measures to the fire surroundings.

##### Extinguishing media which must not be used for safety reasons

no restriction

#### 5.2 Special hazards arising from the substance or mixture

In case of fire may be liberated: Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) Carbon monoxide Hydrogen iodide (HI)

#### 5.3 Advice for firefighters

DO NOT fight fire when fire reaches explosives. In case of fire: Wear self-contained breathing apparatus.

#### 5.4 Additional information

Do not allow run-off from fire-fighting to enter drains or water courses. Do not inhale explosion and combustion gases. Use caution when applying carbon dioxide in confined spaces. Carbon dioxide can displace oxygen. Use water spray jet to protect personnel and to cool endangered containers.

### SECTION 6: Accidental release measures

#### 6.1 Personal precautions, protective equipment and emergency procedures

Avoid generation of dust. Do not breathe dust/fume/gas/mist/vapours/spray. Provide adequate ventilation. Use personal protection equipment.

#### 6.2 Environmental precautions

Do not allow to enter into surface water or drains.

#### 6.3 Methods and material for containment and cleaning up

Spilled product must never be returned to the original container for recycling. Soak up inert absorbent and dispose as waste requiring special attention. Collect in closed and suitable containers for disposal.

#### 6.4 Additional information

Clear spills immediately.

### SECTION 7: Handling and storage

#### 7.1 Precautions for safe handling

Avoid: Inhalation Avoid contact with skin and eyes. Use extractor hood (laboratory). If handled uncovered, arrangements with local exhaust ventilation have to be used. If local exhaust ventilation is not possible or not sufficient, the entire working area must be ventilated by technical means. Usual measures for fire prevention. Handle under (Gas): Protective gas, dry

#### 7.2 Conditions for safe storage, including any incompatibilities

storage temperature: 15-25 °C

Storage class: 10-13

Keep container tightly closed in a cool, well-ventilated place. Always close containers tightly after the removal of product.

#### 7.3 Specific end use(s)

no data available



## SECTION 8: Exposure controls/personal protection

### 8.1 Control parameters

Does not contain substances above concentration limits fixing an occupational exposure limit.

### 8.2 Exposure controls

#### 8.2.1 Appropriate engineering controls

Technical measures and the application of suitable work processes have priority over personal protection equipment. If handled uncovered, arrangements with local exhaust ventilation have to be used.

#### 8.2.2 Personal protection equipment

Wear suitable protective clothing. When handling with chemical substances, protective clothing with CE-labels including the four control digits must be worn. For the protection against direct skin contact, body protective clothing is essential (in addition to the usual working clothes).

##### *Eye/face protection*

Eye glasses with side protection DIN-/EN-Norms: DIN EN 166

Recommendation: VWR 111-0432

##### *Skin protection*

When handling with chemical substances, protective gloves must be worn with the CE-label including the four control digits. Recommended glove articles DIN-/EN-Norms: DIN EN 374 In the case of wanting to use the gloves again, clean them before taking off and air them well.

##### By short-term hand contact

Suitable material:	Butyl caoutchouc (butyl rubber)
Thickness of the glove material:	0,30 mm
Breakthrough time (maximum wearing time):	> 480 min
Recommended glove articles:	VWR 112-3779

##### By long-term hand contact

Suitable material:	Butyl caoutchouc (butyl rubber)
Thickness of the glove material:	0,50 mm
Breakthrough time (maximum wearing time):	> 480 min
Recommended glove articles:	VWR 112-1570

##### *Respiratory protection*

Usually no personal respirative protection necessary. Suitable respiratory protection apparatus:

Recommendation:	no data available
Suitable material:	no data available
Recommendation:	no data available

##### *Additional information*

Wash hands before breaks and after work. Avoid contact with skin and eyes. When using do not eat, drink or smoke. Provide eye shower and label its location conspicuously.

#### 8.2.3 Environmental exposure controls

no data available



## SECTION 9: Physical and chemical properties

### 9.1 Information on basic physical and chemical properties

(a) Appearance	
Physical state:	liquid
Colour:	colourless
(b) Odour:	no data available
(c) Odour threshold:	no data available

#### Safety relevant basic data

(d) pH:	no data available
(e) Melting point/freezing point:	6 °C
(f) Initial boiling point and boiling range:	182 °C (1013 hPa)
(g) Flash point:	110 °C
(h) Evaporation rate:	no data available
(i) Flammability (solid, gas):	not applicable
(j) Upper/lower flammability or explosive limits	
Lower explosion limit:	no data available
Upper explosion limit:	no data available
(k) Vapour pressure:	no data available
(l) Vapour density:	no data available
(m) Relative density:	3.32537 g/cm <sup>3</sup> (20 °C)
(n) Solubility(ies)	
at 20 °C:	0.83 g/l (25 °C)
Soluble (g/L) in:	no data available
(o) Partition coefficient: n-octanol/water:	2.3 (20 °C)
(p) Auto-ignition temperature:	no data available
(q) Decomposition temperature:	180 - 181 °C (1013 hPa)
(r) Viscosity	
Kinematic viscosity:	no data available
Dynamic viscosity:	2.8 mPa*s (20 °C)
(s) Explosive properties:	not applicable
(t) Oxidising properties:	not applicable

### 9.2 Other information

Bulk density:	no data available
Refraction index:	1.7559 (20 °C; 589 nm)
Dissociation constant:	no data available
Surface tension:	no data available
Henry constant:	no data available

## SECTION 10: Stability and reactivity

### 10.1 Reactivity

no data available

### 10.2 Chemical stability

The product is chemically stable under standard ambient conditions (room temperature).



### 10.3 Possibility of hazardous reactions

no data available

### 10.4 Conditions to avoid

no data available

### 10.5 Incompatible materials

no data available

### 10.6 Hazardous decomposition products

no data available

### 10.7 Additional information

no data available

## SECTION 11: Toxicological information

### 11.1 Information on toxicological effects

#### Acute effects

*Acute oral toxicity:*

no data available

*Acute dermal toxicity:*

no data available

*Acute inhalation toxicity:*

no data available

#### Irritant and corrosive effects

*Primary irritation to the skin:*

not applicable

*Irritation to eyes:*

not applicable

*Irritation to respiratory tract:*

not applicable

#### Respiratory or skin sensitisation

In case of skin contact: not sensitising

After inhalation: not sensitising

#### STOT-single exposure

not applicable

#### STOT-repeated exposure

not applicable

#### CMR effects (carcinogenicity, mutagenicity and toxicity for reproduction)

##### Carcinogenicity

No indication of human carcinogenicity.

##### Germ cell mutagenicity

No indications of human germ cell mutagenicity exist.

**Reproductive toxicity**

No indications of human reproductive toxicity exist.

**Aspiration hazard**

not applicable

**Other adverse effects**

no data available

**Additional information**

no data available

## SECTION 12: Ecological information

### 12.1 Ecotoxicity

**Acute (short-term) fish toxicity:**

no data available

**Chronic (long-term) fish toxicity:**

no data available

**Acute (short-term) daphnia toxicity:**

no data available

**Chronic (long-term) daphnia toxicity:**

no data available

**Acute (short-term) algae toxicity:**

no data available

**Chronic (long-term) algae toxicity:**

no data available

### 12.2 Persistence and degradability

no data available

### 12.3 Bioaccumulative potential

Partition coefficient: n-octanol/water: 2,3

### 12.4 Mobility in soil:

no data available

### 12.5 Results of PBT/vPvB assessment

no data available

### 12.6 Other adverse effects

no data available



## SECTION 13: Disposal considerations

### 13.1 Waste treatment methods

#### Appropriate disposal / Product

Dispose according to local legislation. Consult the appropriate local waste disposal expert about waste disposal. Send to a hazardous waste incinerator facility under observation of official regulations.

Waste code product: no data available

#### Appropriate disposal / Package

Dispose according to local legislation. Handle contaminated packages in the same way as the substance itself.

#### Additional information

no data available

## SECTION 14: Transport information

### Land transport (ADR/RID)

14.1 UN-No.:	2810
14.2 Proper Shipping Name:	TOXIC LIQUID, ORGANIC, N.O.S.
14.3 Class(es):	6.1
Classification code:	T1
Hazard label(s):	6.1
14.4 Packing group:	III
14.5 Environmental hazards:	<b>No</b>
14.6 Special precautions for user:	
Hazard identification number (Kemler No.):	60
tunnel restriction code:	E
	(Passage forbidden through tunnels of category E.)

### Sea transport (IMDG)

14.1 UN-No.:	2810
14.2 Proper Shipping Name:	TOXIC LIQUID, ORGANIC, N.O.S.
14.3 Class(es):	6.1
Classification code:	
Hazard label(s):	6.1
14.4 Packing group:	III
14.5 Environmental hazards:	<b>No</b>
MARINE POLLUTANT:	No
14.6 Special precautions for user:	
Segregation group:	-
EmS-No.	F-A                      S-A
14.7 Transport in bulk according to Annex II of MARPOL 73/78 and the IBC Code	
not relevant	





## SECTION 16: Other information

### Abbreviations and acronyms

ACGIH - American Conference of Governmental Industrial Hygienists

ADR - European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road

AGS - Committee on Hazardous Substances (Ausschuss für Gefahrstoffe)

CLP - Regulation on Classification, Labelling and Packaging of Substances and Mixtures

DFG - German Research Foundation (Deutsche Forschungsgemeinschaft)

Gestis - Information system on hazardous substances of the German Social Accident Insurance (Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung)

IATA-DGR - International Air Transport Association-Dangerous Goods Regulations

ICAO-TI - International Civil Aviation Organization-Technical Instructions

IMDG - International Maritime Code for Dangerous Goods

LTV - Long Term Value

NIOSH - National Institute for Occupational Safety and Health

OSHA - Occupational Safety & Health Administration

PBT - Persistent, Bioaccumulative and Toxic

RID - Regulation concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail

STV - Short Term Value

SVHC - Substances of Very High Concern

vPvB - very Persistent, very Bioaccumulative

### R-phrases

no data available

### S-phrases

no data available

### Additional information

Indication of changes:                      general update

*The above information describes exclusively the safety requirements of the product and is based on our present-day knowledge. The information is intended to give you advice about the safe handling of the product named in this safety data sheet, for storage, processing, transport and disposal. The information cannot be transferred to other products. In the case of mixing the product with other products or in the case of processing, the information on this safety data sheet is not necessarily valid for the new made-up material.*

# 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

*This information is properties of Composite Materials (Italy) s.r.l and correspond to the present knowledge and are without any legal binding. The values of the cured properties may change due to processing conditions. Modifications due to technical progress or commercial policy change are possible.*

RVG 5100



## Digital speed. Fast, confident diagnoses.

The RVG 5100 digital radiography system lets you capture and analyze high quality dental radiographs quickly and easily. Its exceptional ease of use and value for the money makes it an ideal solution to discover digital radiography, even for first-time users. Like all Carestream Dental products, the RVG 5100 system is designed to give you superior results, backed by expert support.

### **More practical. More comfortable. More reliable.**

Carestream Dental strives for excellence, providing innovative products enhanced by customer feedback, resulting in superior products tailored to meet your needs. With the new sensor design, positioning is easier and more accurate. The rounded corners of the sensor are more comfortable for patients, and the new cable attachment helps ensure complete reliability.

### **Sophisticated. Yet simple.**

As easy to use as it is to master, the RVG 5100 system will help you make your diagnosis quickly and easily. The sensor remote control allows for convenient chairside image capture so you can stay focused on your patients.

A complete set of positioners helps make proper sensor placement faster. The RVG 5100 system gives you everything you need by way of a gentle introduction to digital radiography.

### **Quality and value.**

With a 14 lp/mm true image resolution, the RVG 5100 system delivers high quality radiographs and provides great value for the money. It gives you the high definition you need to make confident diagnoses quickly. With the USB 2 technology, your radiographs are displayed in less than 2 seconds, minimizing the waiting time.

# Designed to make your life easier.

## Technology you can rely on.

The technology behind the RVG 5100 system is the result of decades of experience in digital radiography systems engineering. Innovative sensor technology with optical fiber yields high image resolution to help you make confident diagnoses every time. The technology also provides greater exposure latitude to help you capture the right image the first time.

## Simple sophistication.

### Complete integration.

Simple, efficient and intuitive, Carestream Dental's imaging software provides all the tools to manipulate, print and easily archive your images. What's more, you will be able to integrate other Carestream Dental dental

imaging systems and solutions and therefore minimize the learning curve for your staff. Also, images integrate easily into your practice management software.

## Count on Carestream Dental for ongoing support and guidance.

At Carestream Dental, we're committed to providing the ongoing guidance and support you need to get the most out of your imaging system. A wide network of authorized distributors and Carestream Dental product experts are ready to answer your questions. They're prepared to help you capture the highest quality radiographs from day one – and maximize your return on investment.



## Technical Specifications

True image resolution	14 lp/mm	
Theoretical sensor resolution	27.03 lp/mm	
Technology	RVG sensor technology with optical fiber	
Connection	USB 2 – high speed	
	Sensor Size 1	Sensor Size 2
	All-purpose sensor providing the best compromise between ease of use and active area	Designed with a larger surface - active area is 60% greater than size 1 sensor for Bite Wing images.
Outside dimensions	27.5 x 37.7 mm	32.2 x 44.1 mm
Dimensions of active area	22 x 30 mm	27 x 36 mm
Matrix dimension	1200 x 1600	1440 x 1920

Would you like to know more?

[www.carestreamdental.com](http://www.carestreamdental.com)

Alternatively, contact your local authorised dealer.

Want to subscribe to our newsletter?

E-mail [dentalnews@carestream.com](mailto:dentalnews@carestream.com).