



ESTUDO DO INÍCIO DA DELAMINAÇÃO EM COMPÓSITOS

FILIPE GOMES FERREIRA

Outubro de 2015

Estudo da Delaminação em Compósitos de Epóxico Reforçado com Borracha e Fibras Naturais

Filipe Gomes Ferreira

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



16 de outubro de 2015

“One never notices what has been done; one can only see what remains to be done.”

Marie Curie

Relatório da Unidade Curricular de Dissertação/Projecto/Estágio do 2º ano do Mestrado em
Engenharia Mecânica

Candidato: Filipe Gomes Ferreira, 1100922, 1100922@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Luís Miguel Pereira Durão, lmd@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica
Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



16 de outubro de 2015

Agradecimentos

Gostaria de aproveitar a secção de agradecimentos desta dissertação para agradecer especialmente ao Prof. Dr. Luís Miguel Pereira Durão pelo apoio, orientação e aconselhamento durante a elaboração deste trabalho.

Gostaria também de prestar a minha gratidão à instituição ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto e ao Departamento de Engenharia Meânica, a todos os responsáveis pelo Mestrado de Materiais e Tecnologias de Fabrico.

Aproveito também para expressar a minha gratidão ao Prof. Dr. João Emílio Matos e à Prof^a. Dra. Stella Abreu por todo o apoio, o ensino, motivação e contribuição durante a realização deste trabalho.

Agradeço também ao Eng. Victor Ribeiro pelo apoio e assistência prestados nas oficinas durante a realização da parte experimental.

E por fim aproveito para agradecer à minha família, amigos e namorada por toda a compreensão, apoio, motivação e disponibilidade durante toda a minha vida académica.

Gostaria de finalizar esta secção com um agradecimento especial ao Eng. Jorge Silva pelo enorme contributo que deu para este trabalho que sem ele não teria sido concluído.

Índice

ÍNDICE	VII
RESUMO	I
ABSTRACT	III
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABELAS	IX
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	3
2. MATERIAIS COMPÓSITOS	4
2.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS	8
2.1.1. <i>Matrizes</i>	11
2.1.2. <i>Reforços</i>	13
2.2. PROCESSAMENTO DE MATERIAIS COMPÓSITOS	17
2.2.1. <i>Moldação por contacto</i>	18
2.2.2. <i>Moldação por vácuo</i>	20
2.2.3. <i>Moldação por compressão</i>	21
2.2.4. <i>Moldação por injeção</i>	22
2.2.5. <i>Moldação em autoclave</i>	23
2.2.6. <i>Enrolamento filamentar</i>	24
2.2.7. <i>Pultrusão</i>	25
2.3. MATERIAL UTILIZADO NO TRABALHO	26
3. FURAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS	27
3.1. INTRODUÇÃO	27
3.2. MAQUINAGEM NÃO CONVENCIONAL	29
3.3. DELAMINAÇÃO INDUZIDA PELA FURAÇÃO	30
3.4. AVALIAÇÃO DA DELAMINAÇÃO	31
3.5. EFEITO DAS DIFERENTES VARIÁVEIS NA DELAMINAÇÃO	34
4. TRABALHO EXPERIMENTAL	39
4.1. MATERIAIS UTILIZADOS	39
4.2. PREPARAÇÃO DOS PROVETES	42

4.3.	RADIOGRAFIA.....	44
4.4.	ENSAIOS MECÂNICOS.....	45
5.	PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGEM.....	47
5.1.	INTRODUÇÃO.....	47
5.2.	FORMATO ESCOLHIDO	50
5.3.	THRESHOLDING.....	52
5.4.	FRONTEIRA DA IMAGEM.....	54
5.5.	DIMENSÃO FRACTAL	56
5.6.	ÁREA.....	59
6.	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	61
6.1.	PROPRIEDADES DOS MATERIAIS.....	61
6.2.	RADIOGRAFIA.....	70
6.3.	ENSAIOS DE ESMAGAMENTO.....	79
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86
8.	BIBLIOGRAFIA.....	89
9.	ANEXOS	94

Resumo

Nos últimos anos, a utilização dos materiais compósitos tem vindo a tornar-se cada vez mais comum em várias indústrias, onde se verifica uma ascensão na procura pelos mesmos. Características como o baixo peso aliado à sua alta resistência e rigidez permitem que estes materiais possuam diversas aplicações em variadas áreas, desde a medicina, aeronáutica, indústria automóvel e aeroespacial, até à indústria eletrónica.

Hoje em dia, o uso de desperdícios sólidos de borracha e fibras naturais na produção de materiais compósitos é, mais que uma opção, uma necessidade ambiental. De forma a reduzir as enormes quantidades de desperdícios, foi criado um material compósito constituído por uma resina termoendurecível reforçada com esses dois tipos de desperdícios. Parâmetros de fabrico como a percentagem de borracha, o tamanho das partículas de borracha, a percentagem de fibras de cana-de-açúcar e o comprimento dessas fibras foram variados, com o objetivo de estudar a influência destes dois materiais nas propriedades mecânicas do compósito.

Apesar da maior parte dos compósitos serem fabricados na forma de uma peça funcional quase pronta a ser utilizada, por vezes é necessário recorrer à maquinação de furos. Apesar das muitas técnicas de furação existentes, os defeitos resultantes deste processo aplicado aos materiais compósitos são ainda muito comuns. Desses defeitos o que mais se destaca é sem dúvida a delaminação.

Trinta e seis provetes de epóxido reforçado com borracha e fibra de cana-de-açúcar foram fabricados e furados, de modo a possibilitar o estudo das propriedades mecânicas do material compósito, assim como a análise da zona danificada durante a furação. Diferentes condições de furação, como tipos de broca e velocidades de avanço diferentes, foram impostas aos provetes de forma a variar o mais possível a zona de dano de uns furos para os outros.

Parâmetros como a área de dano ou ainda o fator de delaminação provam ser muito úteis na caracterização e quantificação do dano na zona periférica de um furo. Recorrendo a técnicas de processamento de imagem foi possível obter esses parâmetros. O processamento e análise

de imagem pode ser feito através de vários métodos. O método utilizado neste trabalho foi o *software* MATLAB[®] associado a ferramentas de processamento de imagem.

Depois de feita a análise dos furos foram realizados ensaios de esmagamento a todos os provetes. Este passo permitiu assim avaliar de que forma os parâmetros de furação influenciam a resistência mecânica do material, e se a avaliação realizada aos furos é um método viável para a avaliação da extensão de dano nesses furos.

Palavras-Chave

Materiais compósitos, Furação, delaminação, compósitos com fibras naturais, cana-de-açúcar, borracha, sustentabilidade, maquinação, radiografia, estudo do dano, ensaios de esmagamento.

Abstract

In the last years, composite materials have become used more and more in many industries. Low weight, high resistance and rigidity allow the introduction of this materials in various applications. Medicine, aeronautics, automotive industry, aerospace and electronics are some examples of industries where we can find this highly sought type of materials.

Today the utilization of rubber and sugar cane wastes for the production of composite materials is more than an option, is an environmental need. One way that was found in order to reduce the large amount of rubber and sugar cane wastes, was through the concept of this new composite material, made of epoxy resin reinforced with this two different waste materials. Manufacturing parameters such as rubber quantity, rubber particle size, sugar cane fibers quantity and length were changed in order to study the impact of these two materials on the mechanical properties of the composite.

In spite of the fact that most of composite materials are produced to near-net-shape condition, sometimes an additional machining operation such as drilling is often required. There are many drilling techniques known, cutting tool action during machining may damage the work material surface. In addition to aesthetic issues, there's an high risk of mechanical failures associated with this process. Of all different types of damage, delamination is the one who stands out the most from the crowd.

Thirty six test subjects of epoxy reinforced with rubber and sugar cane wastes were manufactured, in order to study the mechanical properties of this composite material and analyze the damage affected area of drilled holes. Different hole drilling conditions such as type of drilling tools and feed rate were used in order to diversify the damage area of the various holes.

Damage area and some delamination factors were proven to be very effective in the qualification and quantification of damaged zone around holes. This quantification parameter were possible to obtain due to the usage of image processing techniques. The technique chosen for this project was the MATLAB[®] software with an image processing toolbox.

After the analysis of all drilled holes, the test plates were subjected to bearing tests with the objective of evaluating the effects of drilling parameters in the mechanical properties of the holes.

Keywords

Composite materials, machining, delamination, natural fibers, sugar cane, bagasse fibers, rubber waste, sustainable composites, sustainability, enhanced radiography, mechanical test, bearing test, damage assessment

Índice de Figuras

Figura 1- Boeing 787 são usados polímeros reforçados com fibra de carbono (PRFC) para alguns componentes da estrutura do avião.....	5
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).....	5
Figura 3 – Airbus A350 com as pontas das asas em PRFC quase verticais, aumentando assim a eficiência das asas	6
Figura 4 - Cadeira feita de um termoendurecível reforçado com fibras naturais.....	7
Figura 5 – Carro eléctrico da BMW onde é utilizado um compósito de PRFC.....	9
Figura 6 – Esquema de classificação dos materiais compósitos segundo o tipo de reforço, adaptado de	13
Figura 7 - Exemplos de aplicações das fibras de aramida na indústria militar	16
Figura 8 - Construção de casco de navio em fibra de vidro	17
Figura 9 - Processo de moldação manual por contacto	18
Figura 10 - Moldação por projecção	19
Figura 11 - Processo de moldação por vácuo	20
Figura 12- Moldação por compressão	21
Figura 13 - Processo RTM	22
Figura 14 - Moldação por autoclave	23

Figura 15 - Processo de enrolamento filamental	24
Figura 16 - Alguns exemplos de aplicações do processo de enrolamento filamental.....	24
Figura 17 - Processo de pultrusão	25
Figura 18 - Dispositivo para amortecer o avanço da broca, conforme Capello et. al	28
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	29
Figura 20 - Furo realizado através de furação a laser	30
Figura 21 - Delaminação durante o processo de furação numa placa em PRFC : a) à entrada e b) à saída	30
Figura 22 - Diferentes áreas de dano mas com o mesmo Fator de delaminação (F_d)	32
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	33
Figura 24 - Representação esquemática da delaminação com várias geometrias de broca	37
Figura 25 - Operação de furação com e sem placas de suporte	37
Figura 26 - Brocas utilizadas na realização dos furos : a) Broca helicoidal; b) Broca tipo brad; c) Broca bimétrica.....	43
Figura 27 - Gráfico tensão x deformação obtido após tratamento de dados do ensaio de esmagamento.....	46
Figura 28. Exemplo da zona de fronteira	48
Figura 29. Vários estágios da imagem após correr o programa de processamento de imagem	49
Figura 30 - Exemplo do fenómeno de Gibbs	51

Figura 31 - Imagem obtida a partir do programa de processamento de imagem feito em MATLAB ® antes de ser definido o contorno da zona de dano.....	54
Figura 32 - Contorno do dano	55
Figura 33 - Curva de Koch.....	56
Figura 34 - Exemplo de curva "suave" e curva fractal.....	57
Figura 35 - Exemplo do método de <i>box-counting</i>	58
Figura 36 - Imagem resultante da função <i>imfill</i>	59
Figura 37 - Gráfico de barras dos valores médios da tensão de rotura para provetes com 25% e 50% de borracha.	65
Figura 38 -Gráfico de barras dos valores médios do módulo de elasticidade para provetes com 25% e 50% de borracha.	65
Figura 39 – Gráfico de barras dos valores médios da tensão de rotura para provetes com 25% de borracha e partículas com 50-80 e 100-200 <i>US Tyler</i>	67
Figura 40 – Gráfico de barras dos valores médios do módulo de elasticidade para provetes com 25% de borracha e partículas com 50-80 e 100-200 <i>US Tyler</i>	68
Figura 41 - Radiografia de furo, exemplo de imagem com muito ruído.....	71
Figura 42 - Gráfico que relaciona a área de dano com F_{ed}	72
Figura 43 - Gráfico que relaciona a área de dano do furo com dimensão fratal do contorno da zona de dano.	73
Figura 44 - Gráfico que relaciona a F_{ed} com a dimensão fratal do contorno da zona de dano.	74
Figura 45 - Gráfico que relaciona DRAT com a dimensão fratal do contorno da zona de dano.	75

Figura 46 - Gráfico de barras com valores médios da área de dano, agrupados de acordo com o tipo de broca e velocidade de avanço.	76
Figura 47 - Gráfico de barras com valores médios da área de dano, agrupados de acordo com o tipo de broca e velocidade de avanço.	77
Figura 48 - Gráfico de barras com valores médios da área de dano, agrupados de acordo com o tipo de broca e velocidade de avanço, para provetes com 25% e 50% de borracha.	78
Figura 49 - Gráfico de barras com valores médios da tensão máxima, agrupados de acordo com o tipo de broca e velocidade de avanço.....	81
Figura 50 – Gráfico de barras com valores médios da tensão máxima, agrupados de acordo com o tipo de broca e velocidade de avanço.....	82
Figura 51 - Gráfico de comparação entre tensão máxima no ensaio de esmagamento e a área de dano do furo	83
Figura 52 - Gráfico de comparação entre tensão máxima no ensaio de esmagamento e o fator de delaminação equivalente (F_{de}) do furo.	84
Figura 53 - Gráfico de comparação entre tensão máxima no ensaio de esmagamento e a dimensão fractal do contorno da zona de dano do furo.	84

Índice de Tabelas

Tabela 1 Propriedades de algumas fibras e materiais, adaptado de	8
Tabela 2 - Propriedades de alguns polímeros, adaptado	12
Tabela 3- Propriedades de alguns tipos de fibras de vidro	14
Tabela 4 - Propriedades de algumas fibras de carbono	15
Tabela 5 - Propriedades de algumas fibras de aramida	16
Tabela 6 - Tabela com conversão de valores de <i>US Tyler</i> para milímetros	40
Tabela 7 - Características dos provetes	41
Tabela 8 – Exemplo de numeração de alguns provetes	42
Tabela 9 - Parâmetros de corte utilizados	43
Tabela 10 - Propriedades resultantes dos ensaios de tração e características dos provetes	62
Tabela 11 – Valores médios de rigidez e tensão de cedência	63
Tabela 12 – Valores médios de rigidez e tensão de cedência divididos por quantidade de borracha, valores médios 25% do lado esquerdo e 50% do lado direito	64
Tabela 13 – Valores médios de tensão de cedência e rigidez dos provetes com 25% de borracha.....	66
Tabela 14 – Características dos provetes com maior e menor módulo de elasticidade (E)	69
Tabela 15 - Características dos provetes com maior e menor tensão de cedência (σ_{ced}).....	69
Tabela 16 - Valores resultantes do processamento e análise das imagens obtidas na radiografia das peças.	70

Tabela 17 - Tabela resumo dos parâmetros de furação e resistência ao esmagamento dos provetes.....	79
---	----

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 peças de um compósito de borracha reforçada com fibras de cana-de-açúcar.

1.2. Objetivos

Os principais objetivos deste projeto são caracterizar e analisar o dano à volta de um furo e a perda de resistência mecânica associada à furação e propor uma melhoria dos critérios de quantificação do dano. Desta forma pretende-se estimar de forma mais rigorosa e precisa a resistência mecânica de um furo realizado numa peça de compósito de epóxico reforçado com borracha e cana-de-açúcar/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 borracha reforçada com fibras de cana-de-açúcar/resina epóxico reforçada com fibras 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;
- Identificar a percentagem ideal de reforço de cana-de-açúcar no compósito, de modo a obter uma peça com as melhores propriedades possíveis.

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 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, um composto por ferro e cimento, ou até mesmo um material composto por fibras naturais e resina que nos é tão conhecido, a madeira.

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 suas virtudes, diminuindo assim o efeito das características menos desejadas. São geralmente constituídos por uma fase de reforço, fibras, partículas ou outros elementos de reforço 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[42]



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) [43]–[45]



Figura 3 – Airbus A350 com as pontas das asas em PRFC quase verticais, aumentando assim a eficiência das asas [42]

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 [7], e na indústria médica onde se podem ver alguns exemplos de como os materiais compósitos podem ajudar a vida de pessoas amputadas, figura 2.

Os compósitos de polímeros reforçados com fibras naturais são pouco utilizados, mas a sua utilização tem vindo a crescer e podem ser excelentes formas de redução de resíduos. São atualmente utilizados em cadeiras como podemos ver na Figura 4 e ainda em algumas aplicações de peças para o habitáculo de automóveis.



Figura 4 - Cadeira feita de um termoendurecível reforçado com fibras naturais [46]

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 a utilizar os compósitos na forma em que hoje os conhecemos [8].

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. 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 [9]

Material	Módulo de elasticidade E (GPa)	Resistência à tração σ_u (GPa)	Densidade ρ (g/m³)	Módulo específico E/ρ	Resistência específica σ_u/ρ
Fibras:					
Vidro E	72.4	3.5	2.54	2.85	1.38
vidro S	85.5	4.6	2.48	34.5	1.85
Carbono (high Module)	390	5.5	1.90	205	2.9
Boro	385	2.8	2.63	146	1.1
Tungsténio	414	4.2	19.3	21	0.22
Kevlar®49	130	2.8	1.50	87	1.87
Materiais Convencionais:					
Aço	210	0.34-2.1	7.8	26.9	0.043-0.27
Ligas de Al	70	0.14-0.62	2.7	25.9	0.052-0.23
Vidro	70	0.7-2.1	2.5	28	0.28-0.84
Tungsténio	350	1.1-4.1	19.3	18.1	0.057-0.21
Berílio	300	0.7	1.83	164	0.38

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 (σ_u), com a densidade (ρ). 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 [10].



Figura 5 – Carro eléctrico da BMW onde é utilizado um compósito de PRFC [47]

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) [9].

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.

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 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 fracturas.

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, respectivamente.

As matrizes cerâmicas são muito utilizadas para ferramentas de corte para maquinagem de ligas metálicas duras [9].

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 [11]

Tipo e Polímero	Temperatura de transição vítrea T_g [°C]	Temp. máxima de utilização [°C]
Termoendurecíveis		
Poliéster	80-100	50
Epoxy	120-180	150
Fenólicos	130-180	200
Poliimidas	300-330	280
Termoplásticos		
Poliamida (PA-NYLON)	80	125
Polietercetona (PEEK)	143	250
Policarbonato (PC)	145	125
Poliestireno (PS)	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”. [12]

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 fiação, 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 [12]). 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 [9]

Tabela 3- Propriedades de alguns tipos de fibras de vidro [9]

Propriedade	Vidro E	Vidro S
Densidade (g/cm ³)	2.6	2.49
Módulo de <i>Young</i> (GPa)	73	85.5
Tensão de rotura (MPa)	3400	4580
Deformação na rotura (%)	4.4	5.3
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /oC)	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*”) [9].

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): $E > 500\text{GPa}$;
- HM (High modulus): $E > 300\text{GPa}$;
- IM (Intermediate modulus): $E < 300\text{GPa}$;
- HS (High strength): resistência à tração superior a 3000MPa 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 percursos.

Tabela 4 - Propriedades de algumas fibras de carbono [9]

Propriedade	PAN	Alcatrão	"Rayon fibers"
Densidade (g/cm ³)	1.8	2.0	1.7
Módulo de <i>Young</i> (GPa)	200-400	400	415-680
Tensão de rotura (MPa)	2480-3100	1550	2070-2760
Deformação na rotura (%)	0.6-1.2	1-1.5	0.5-0.6
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /oC)	-0.7 a -0.5	-1.6 a -0.9	-



Figura 7 - Exemplos de aplicações das fibras de aramida na indústria militar [13]

Outro tipo de fibras bastante utilizadas são as fibras de aramida, comercialmente conhecidas como KEVLAR[®], 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 abaixo podem ser observadas algumas propriedades de alguns tipos de fibras de aramida.

Tabela 5 - Propriedades de algumas fibras de aramida [9]

Propriedade	Kevlar [®] 29	Kevlar [®] 49	Twaron [®]
Densidade (g/cm ³)	1.44	1.45	1.44
Módulo de <i>Young</i> (GPa)	60	129	60
Tensão de rotura (MPa)	3000	3000	3000
Deformação na rotura (%)	3.6	1.9	3
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /oC)	-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 de o 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.



Figura 8 - Construção de casco de navio em fibra de vidro [48]

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.

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

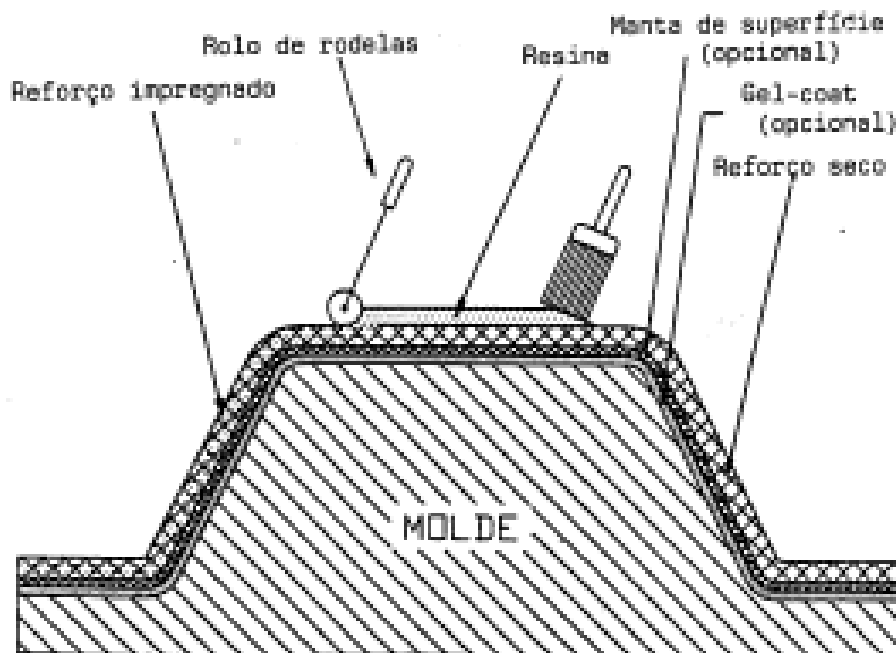


Figura 9 - Processo de moldação manual por contacto[9]

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 podemos ver um esquema deste processo.

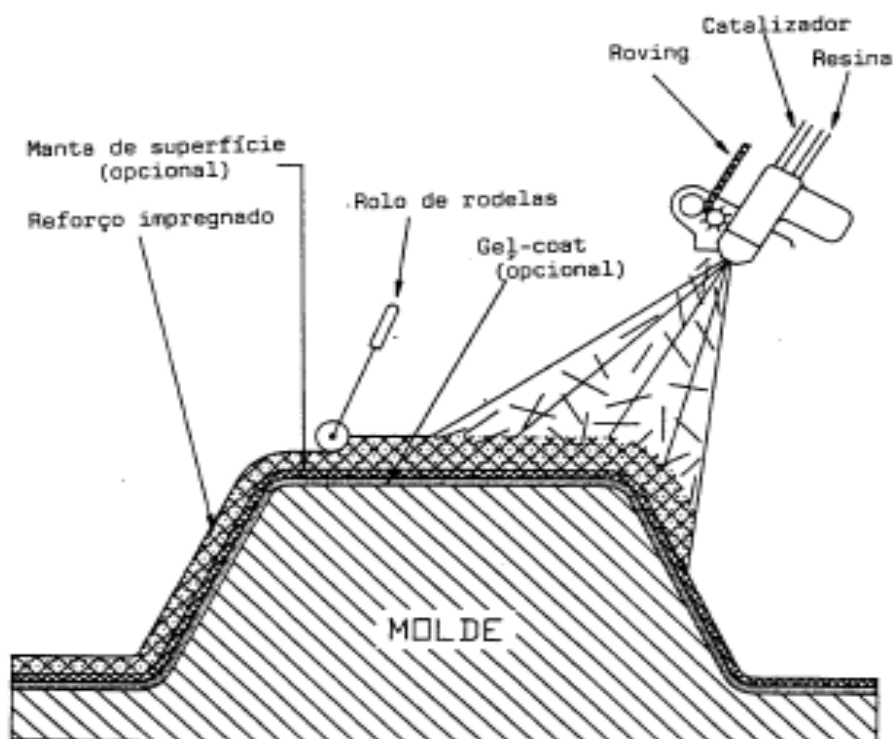


Figura 10 - Moldação por projeção [9]

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 11 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. [9]

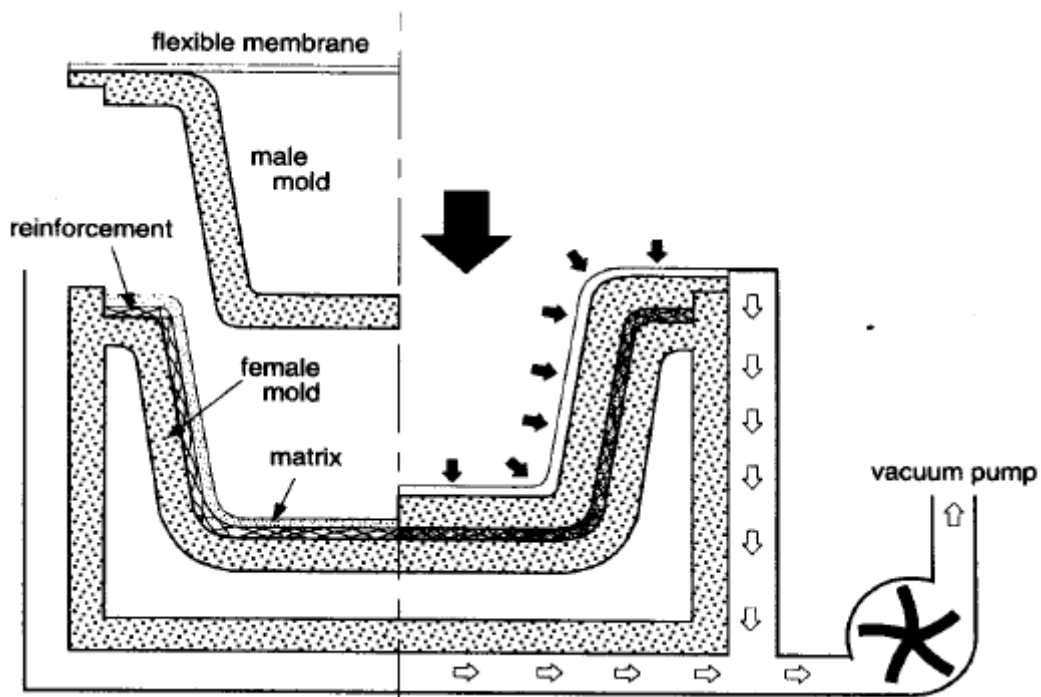


Figura 11 - Processo de moldação por vácuo [9]

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. [livro compósitos]

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.

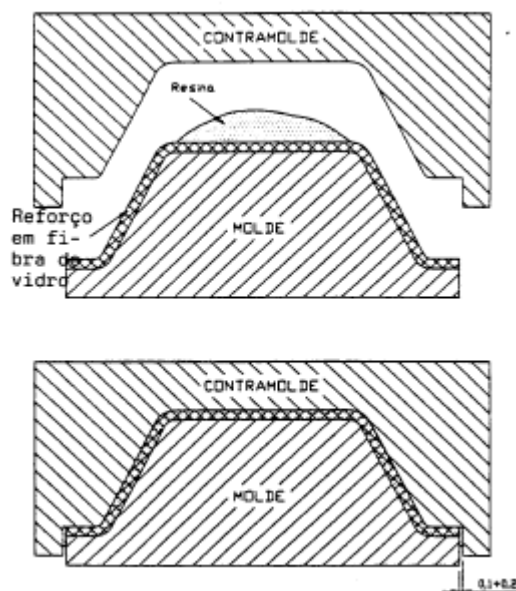


Figura 12- Moldação por compressão [9]

Este processo permite a obtenção de peças com percentagem de fibras elevada, ou seja, com boas propriedades mecânicas. [12]

2.2.4. Moldação por injeção

A moldação 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. As pressões de injeção rondam os 30 MPa e os 150 MPa e as temperaturas de aquecimento da matéria-prima os 200 °C e 350°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.

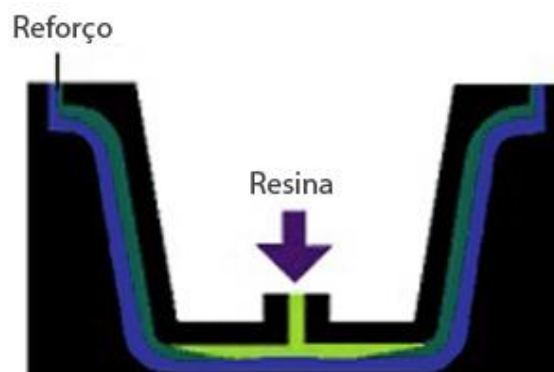


Figura 13 - Processo RTM [49]

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.

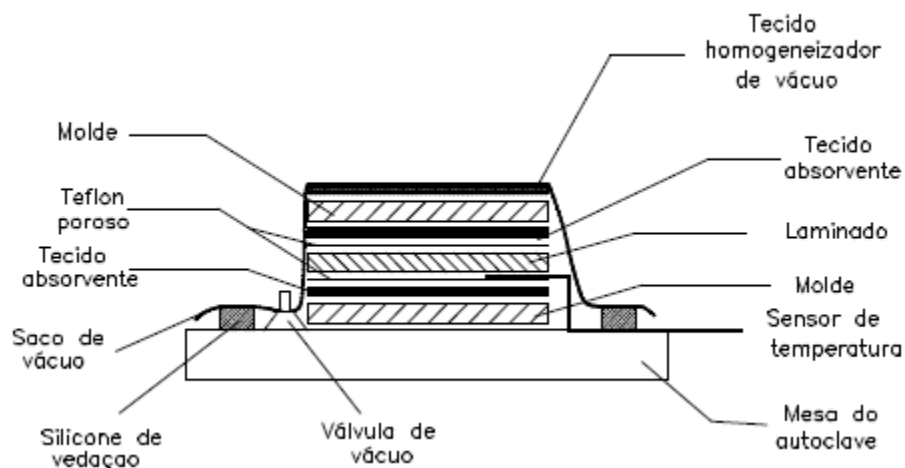


Figura 14 - Moldação por autoclave [50]

2.2.6. Enrolamento filamentar

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 filamentar.

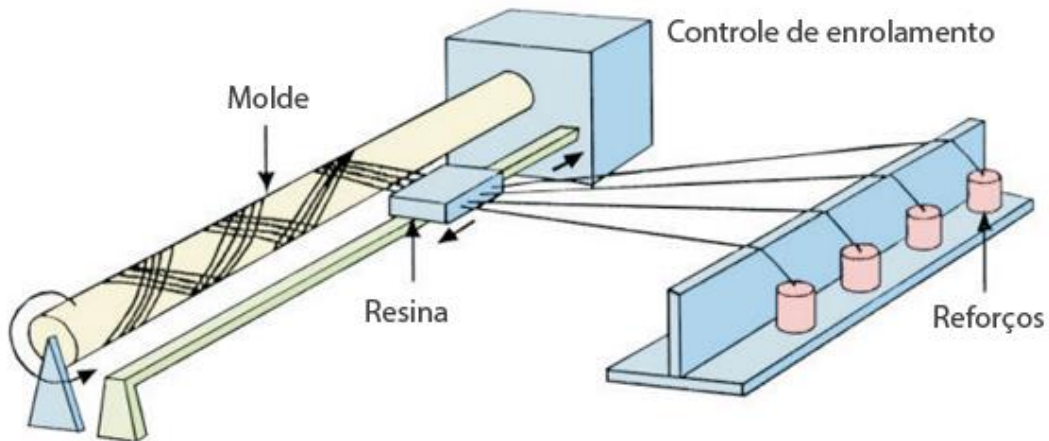


Figura 15 - Processo de enrolamento filamentar [51]

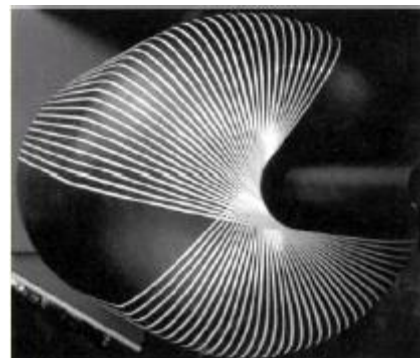


Figura 16 - Alguns exemplos de aplicações do processo de enrolamento filamentar[52],[50]

Na Figura 16 podemos observar algumas aplicações do processo de enrolamento filamento: à esquerda podemos ver uma garrafa de gás reforçada com fibra de vidro, desenvolvida por um professor da Faculdade de Engenharia do Porto.

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.

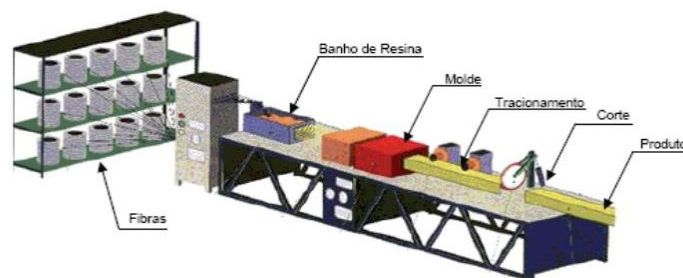


Figura 17 - Processo de pultrusão [53]

2.3. Material utilizado no trabalho

O material utilizado para a realização deste trabalho foi um compósito constituído por uma matriz de epóxico (*RenLam M/HY956 – Huntsman*), reforçada com partículas de um elastómero (desperdícios de borracha) e fibras de cana-de-açúcar. As partículas de borracha foram desfeitas, lavadas, secadas a 80 °C durante 24 horas e classificadas por tamanho. A mercerização (tratamento alcalino dado às fibras) das fibras de cana-de-açúcar foi feita por imersão das fibras numa solução de 10% de NaOH durante 1 hora à temperatura ambiente. Após a mercerização, as fibras foram passadas por água até atingirem um pH neutro. Posteriormente foram deixadas em água destilada durante 24 horas e secadas a 100 °C.

Os 3 diferentes materiais foram combinados e mexidos à mão durante 5 minutos. Moldes de silicone foram cheios com a mistura e depois colocados sobre uma mesa de vibração durante 5 minutos. A cura foi feita durante 7 dias à temperatura ambiente (22 °C)

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. De todos os defeitos que a furação pode originar, a delaminação pode ser considerado o mais crítico[14].

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[15]. 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 [16] 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[17].

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 conceção à aplicação dos compósitos.

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

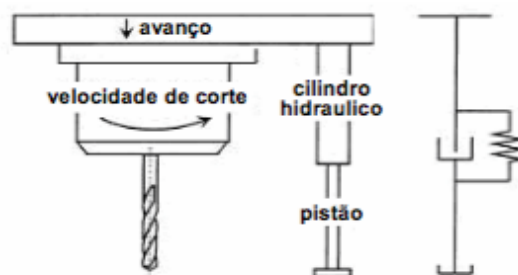


Figura 18 - Dispositivo para amortecer o avanço da broca, conforme Capello et. al [18]

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).

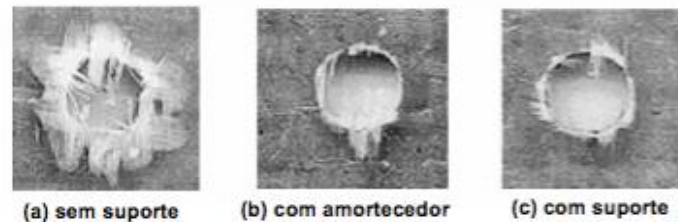


Figura 19 - Fotografia dos furos: (a) furo com delaminação gerado sem utilizar suporte, (b) furo com pouca delaminação, utilizando-se amortecedor e (c) furo com pouca delaminação, utilizando-se suporte [18].

3.2. Maquinagem não Convencional

Devido ao facto dos materiais compósitos serem difíceis de maquinar, a utilização e desenvolvimento de técnicas alternativas é cada vez mais comum. Algumas dessas técnicas, como a maquinagem a laser ou por descarga elétrica [19], 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. [20] 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. [20] 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.

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

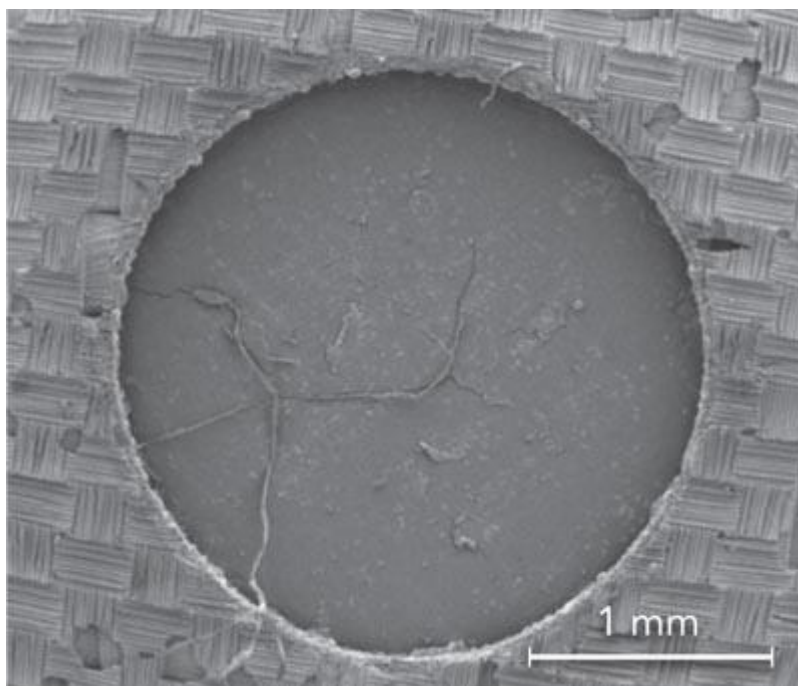


Figura 20 - Furo realizado através de furação a laser [54]

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 [21].

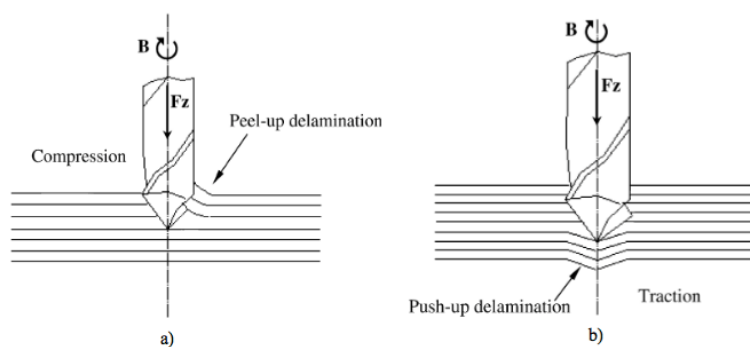


Figura 21 - Delaminação durante o processo de furação numa placa em PRFC [55] : a) à entrada e b) à saída

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) respectivamente.

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[22]. 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[23].

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 diâmetro e área desse dano. A inspeção visual apresenta algumas desvantagens associadas à medição da extensão do dano e da sua profundidade [24].

Depois de se obter os diâmetros 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 [25].

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 [25].

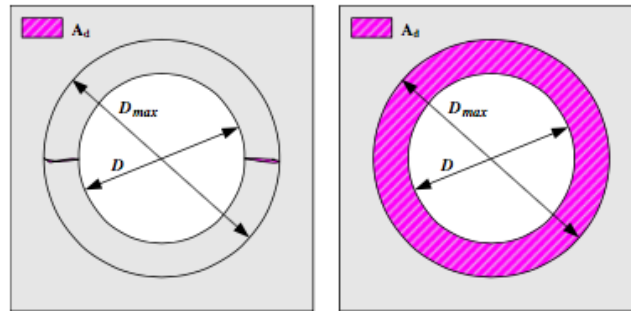


Figura 22 - Diferentes áreas de dano mas com o mesmo Fator de delaminação (F_d) [25]

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}) [25]. De modo a ultrapassar as limitações do fator acima descrito, foram apresentados diversos critérios de delaminação. Davim et al. [26] 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:

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

A_{max} representa a área máxima relativa ao diâmetro máximo da área delaminada (D_{max}) como é explicado na eq. 3. A_o é a área nominal do furo com diâmetro (D). As variáveis α e β são parâmetros usados para definir o peso de cada parcela da equação. Na Figura 23 conseguimos ter uma perceção 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

$$\begin{cases} F_{ed} = \frac{D_e}{D_o} \\ D_e = \left(\frac{4(A_d + A_o)}{\pi} \right)^{0,5} \end{cases}$$

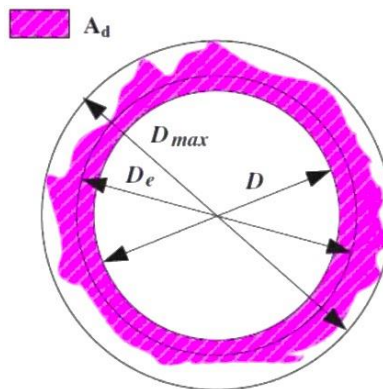


Figura 23 - Pelo o critério de C.C.Tsao et al. A_d – área de dano; D_{max} – Diâmetro máximo; D_e – Diâmetro equivalente; D - Diâmetro nominal do furo [25]

Um critério bidimensional baseado na área de delaminação foi apresentado por Mehta et al. [44] 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 ($A_{AVG} = A_o$) 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 [27] 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. Essas 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 e broca [28-29]. Eles justificam este fenómeno do aumento da força axial com o aumento da taxa de avanço da ferramenta.

Relativamente à velocidade de corte, alguns autores identificaram dois fenómenos diferentes, Davim et al. [28] afirmam que a delaminação aumenta com o aumento da velocidade de corte durante a furação. Por outro lado, Khashaba et al. [29] 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. [30]. 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 [31].

O ângulo de ponta da broca é também uma variável com impacto na delaminação, Gaitonde et al. [30] 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 [32] 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. [33] 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 [34]. Ho-Cheng et. al [15] 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

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

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 ν o coeficiente de Poisson. A força exercida pelo centro da broca é considerada como uma carga concentrada.

Lachaud et. al. [23], 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

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

Outros modelos foram apresentados também por Hocheng et. al [14] 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 25.

Capello [18], em testes de furação com brocas helicoidais comprovou que a utilização de suporte pode reduzir drasticamente a ocorrência de delaminação

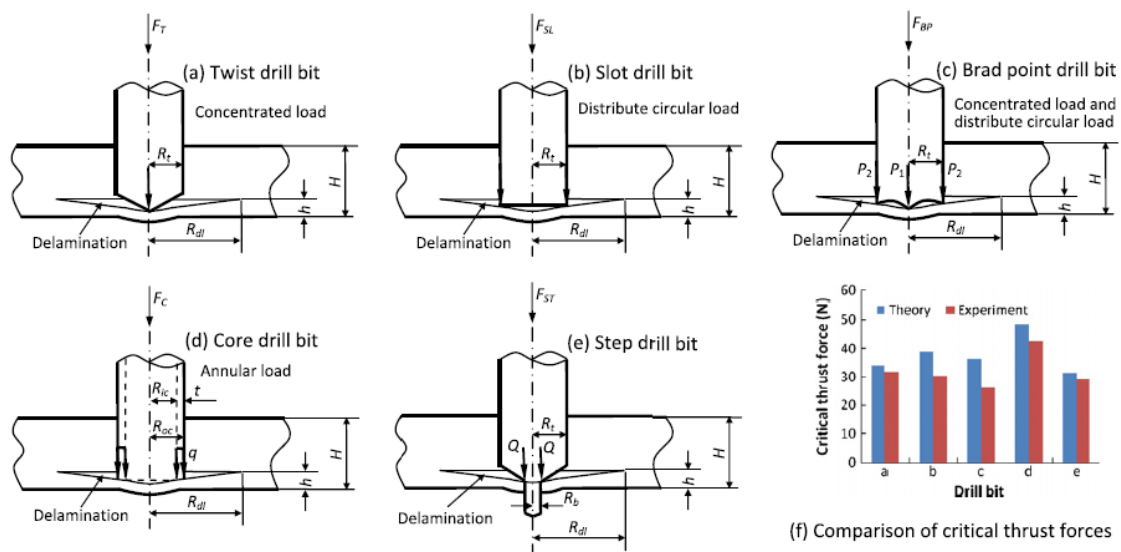


Figura 24 - Representação esquemática da delaminação com várias geometrias de broca [36]

Dharan et. al [35] 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 aramidas 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%.

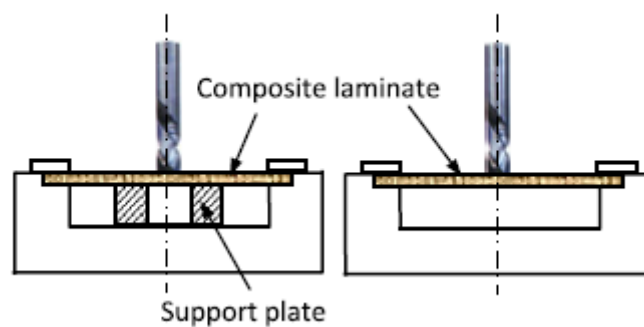


Figura 25 - Operação de furação com e sem placas de suporte [36]

Krishnamurthy et. al [36] 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.

4. Trabalho experimental

4.1. Materiais Utilizados

O material utilizado para a realização deste estudo foi um compósito híbrido constituído por uma matriz de epóxico reforçado por partículas de borracha e fibras de cana-de-açúcar. Diz-se que um compósito é híbrido quando são utilizados dois ou mais tipos de reforços diferentes (fibras e/ou partículas) na mesma matriz. Os materiais compósitos que utilizam fibras naturais como reforço são muitas vezes utilizados de maneira a ser possível a obtenção de um material mais barato e também como forma de reduzir resíduos como é o exemplo da borracha e das fibras de cana-de-açúcar, contribuindo assim para a sustentabilidade do planeta. A combinação de partículas de borracha e fibras naturais é bastante interessante, pois é possível obter um material com grande tenacidade e com uma resistência mecânica moderada. Este tipo de materiais pode ser bastante promissor quando pensamos nas possíveis aplicações que poderão ter na área dos transportes, como por exemplo em algumas partes de carros ou bancos de aviões [37].

Os resíduos de borracha produzidos pela indústria automóvel têm claramente um grande impacto ambiental. Apenas uma pequena parte desses resíduos é reciclada, o resto é guardado em sucatas, enterrado ou queimado[38].

Os resíduos de cana-de-açúcar são actualmente produzidos pelas indústrias de produção de combustíveis, açúcar e outros produtos[37].

Neste trabalho foram utilizadas placas de compósitos híbridos constituídos por uma matriz de resina epóxida (RenLam M/HY956 – Huntsman) reforçada com partículas de borracha com tamanhos de 50-80 e 100-200 US-Tyler (na Tabela 6 pode ver-se a conversão de *US Tyler* para milímetros) e percentagens de 25% e 50% (fracção mássica – wt), fibras de cana-de-açúcar (3 e 5 wt%) com 5 e 20mm de comprimento podendo estas serem ou não tratadas.

Tabela 6 - Tabela com conversão de valores de *US Tyler* para milímetros [39]

<i>US Tyler</i>	Opening [mm]
48	0.297
80	0.177
100	0.149
200	0.074

US Tyler é uma escala utilizada para caracterizar tamanho de partículas através de peneiras com furos de tamanhos específicos. O tamanho das partículas são normalmente definidos por um limite entre 2 números de malha (*mesh*), como por exemplo 50-80 *US Tyler*. Quanto maior for o número da malha maior é o número de espaços por unidade de área e por sua vez mais pequenas são as partículas.

Na Tabela 7 podemos ver os diferentes parâmetros de fabricação de cada grupo de provetes utilizado neste trabalho.

Tabela 7 - Características dos provetes

Grupo	Borracha [%]	Tamanho partículas borrcha [US Tyler]	Fibras [%]	Comprimento fibras [mm]	Tratamento
C2	25	50-80	3	5	Sem
C3	25	50-80	3	20	Com
C6	25	50-80	5	5	Sem
C9	25	100-200	3	5	Com
C10	25	100-200	3	5	Sem
C11	25	100-200	3	20	Com
C13	25	100-200	5	5	Com
C15	25	100-200	5	20	Com
C16	25	100-200	5	20	Sem
C17	50	50-80	3	5	Com
C18	50	50-80	3	5	Sem
C19	50	50-80	3	20	Com
C22	50	50-80	5	5	Sem
C23	50	50-80	5	20	Com
C24	50	50-80	5	20	Sem
C27	50	100-200	3	20	Com
C28	50	100-200	3	20	Sem
C29	50	100-200	5	5	Com

4.2. Preparação dos provetes

Os provetes foram obtidos a partir do corte de placas quadradas fornecidas pelo Eng. Luís Durão. A partir do corte das placas na mesa de corte de serra circular das oficinas do laboratório de mecânica do ISEP, (*BATISTI MECCANICA DV25* corte manual) e foi possível serem obtidos provetes com 3,5mm de espessura e 40mm de largura.

Para se conseguir fazer uma distinção entre os provetes, foi necessário proceder a uma etiquetagem de todos eles. Cada referência contém o grupo a que cada um dos provetes pertence e uma letra no fim com a finalidade de distinguir os provetes do mesmo grupo. O provete “C2A” pertence ao grupo dos provetes “C2” e como é o primeiro provete tem a letra “A”. Na tabela 7 é possível observar o nome de alguns provetes utilizados neste trabalho.

A furação dos provetes foi feita recorrendo a 3 tipos diferentes de brocas: brocas tipo *brad*, brocas helicoidais e brocas bimétricas, todas com 6mm de diâmetro. Na Figura 26 podemos ver uma imagem com os diferentes tipos de brocas utilizadas. Os parâmetros de furação também variaram sendo utilizadas velocidades de rotação de 1120 rpm (rotações por minuto), e velocidades de avanço de 0,12 e 0,3 mm/rot (mm por rotação). Foram utilizadas brocas diferentes e parâmetros de furação diferentes, com o objectivo de obter zonas de dano o mais diferentes possível. Isto faz com que os resultados sejam mais variados, conseguindo assim correlacionar de forma mais fácil os valores teóricos com os práticos.

Tabela 8 – Exemplo de numeração de alguns provetes

Numeração dos provetes	
C2A	C17A
C2D	C17B
C3A	C18A
C3D	C18B
C6B	C19B
C6D	C19D

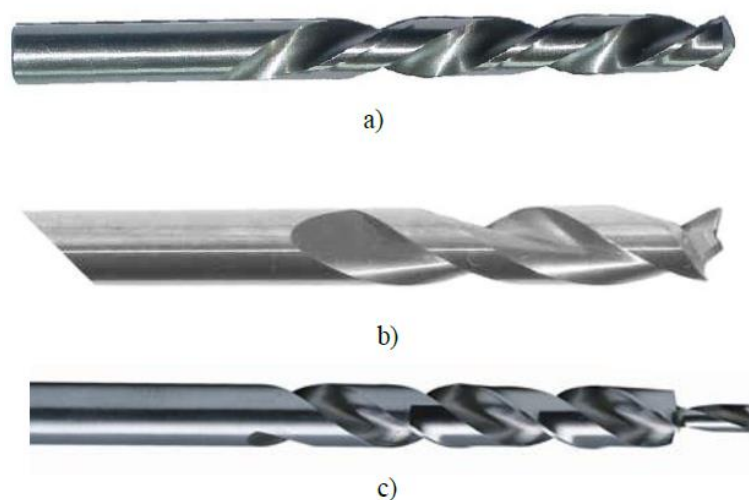


Figura 26 - Brocas utilizadas na realização dos furos : a) Broca helicoidal; b) Broca tipo brad; c) Broca bimétrica

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

Número	Referência	Tipo	Rotação (rpm)	Avanço (mm/rot)
1	C27B	Helicoidal	1120	0,12
2	C27D	Helicoidal	1120	0,12
3	C22D	Helicoidal	1120	0,12
4	C22A	Helicoidal	1120	0,3
5	C24B	Helicoidal	1120	0,3
6	C24A	Helicoidal	1120	0,3
7	C29A	Brad	1120	0,12
8	C29B	Brad	1120	0,12
9	C23B	Brad	1120	0,12
10	C23A	Brad	1120	0,3
11	C18A	Brad	1120	0,3
12	C18B	Brad	1120	0,3
13	C17B	Bimétrica	1120	0,12
14	C17A	Bimétrica	1120	0,12
15	C28B	Bimétrica	1120	0,12
16	C28A	Bimétrica	1120	0,3
17	C19B	Bimétrica	1120	0,3
18	C19D	Bimétrica	1120	0,3

19	C2A	Helicoidal	1120	0,12
20	C2D	Helicoidal	1120	0,12
21	C11A	Helicoidal	1120	0,12
22	C11B	Helicoidal	1120	0,3
23	C13A	Helicoidal	1120	0,3
24	C13B	Helicoidal	1120	0,3
25	C16D	Brad	1120	0,12
26	C16A	Brad	1120	0,12
27	C15A	Brad	1120	0,12
28	C15D	Brad	1120	0,3
29	C3A	Brad	1120	0,3
30	C3D	Brad	1120	0,3
31	C9B	Bimétrica	1120	0,12
32	C9D	Bimétrica	1120	0,12
33	C10D	Bimétrica	1120	0,12
34	C10C	Bimétrica	1120	0,3
35	C6D	Bimétrica	1120	0,3
36	C6B	Bimétrica	1120	0,3

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.

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

4.3. Radiografia

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 que é um líquido de contraste. Como o nome indica, esse líquido tem como objectivo criar um contraste maior na imagem, as zonas claras ficam mais claras e as zonas escuras mais escuras, o que faz com que a análise da imagem seja feita de forma mais fácil. 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

4.4. Ensaios mecânicos

Os resultados obtidos através dos ensaios mecânicos têm como objectivo a comparação e a correlação com os resultados obtidos no processamento e análise de imagem. Os ensaios mecânicos de esmagamento foram realizados de acordo com a norma ASTM D5961M-13. Os ensaios mecânicos são também importantes pois permite-nos perceber de que forma os parâmetros de furação influenciam a resistência mecânica do material. Foi utilizada a máquina de ensaios mecânicos do laboratório 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 x deformação. Na Figura 27 podemos ver um gráfico tensão x deformação feito a partir dos dados do ensaio de esmagamento realizado ao provete C6B.

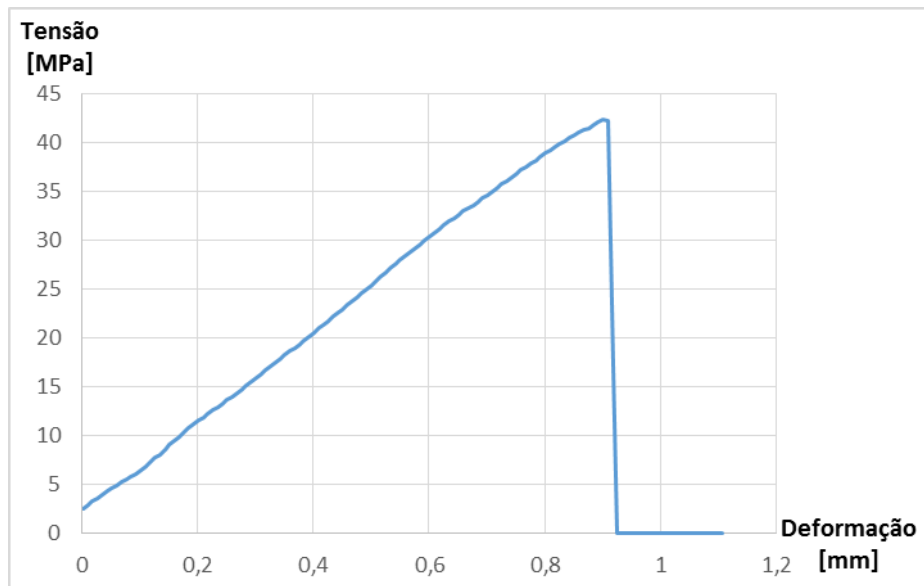


Figura 27 - Gráfico tensão x deformação obtido após tratamento de dados do ensaio de esmagamento

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.

5. Processamento e análise de imagem

5.1. Introdução

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

Todo o processamento das imagens que foi feito neste trabalho 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 28 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.

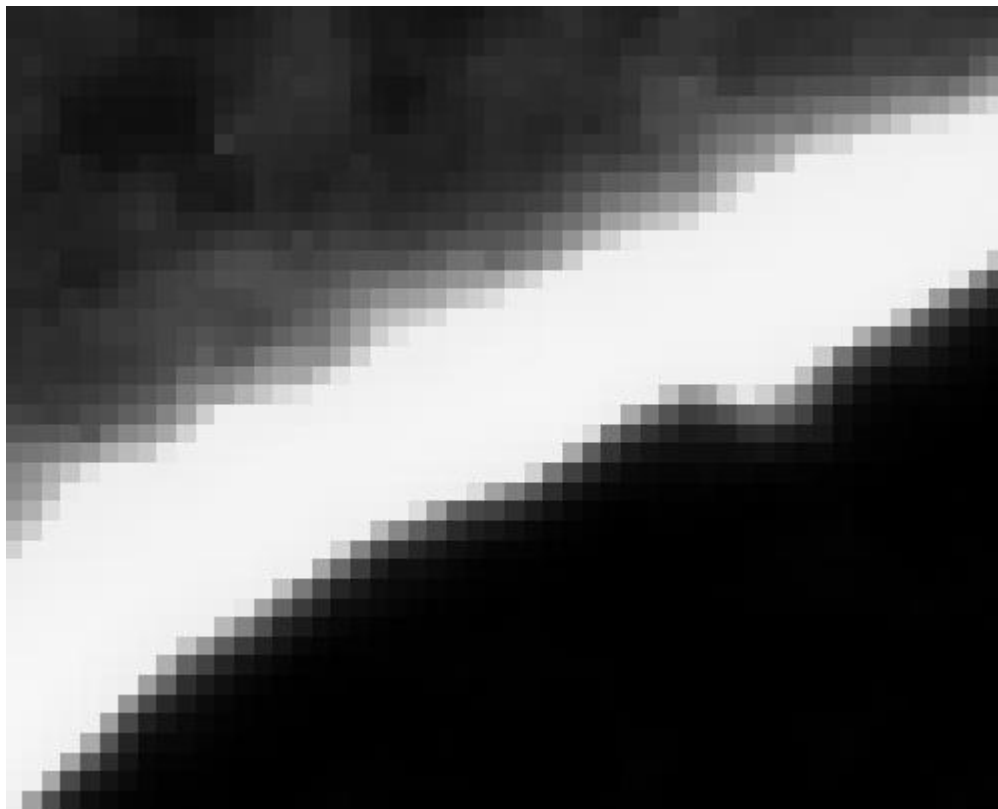


Figura 28. Exemplo da zona de fronteira

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 Figura 29 é possível observar as diferentes etapas obtidas no processamento das imagens. Na Figura 29 a) podemos ver o furo sem processamento de imagem, a Figura 29 b) resulta da conversão da Figura 29 a) em binário e na Figura 29 c) é visível o contorno da zona de dano do furo bem definido. É a partir da imagem da última Figura (29 c) que é possível obter o valor da área de dano e da dimensão fractal do contorno do dano.

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.



Figura 29. 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.

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.

Na Figura 30 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.

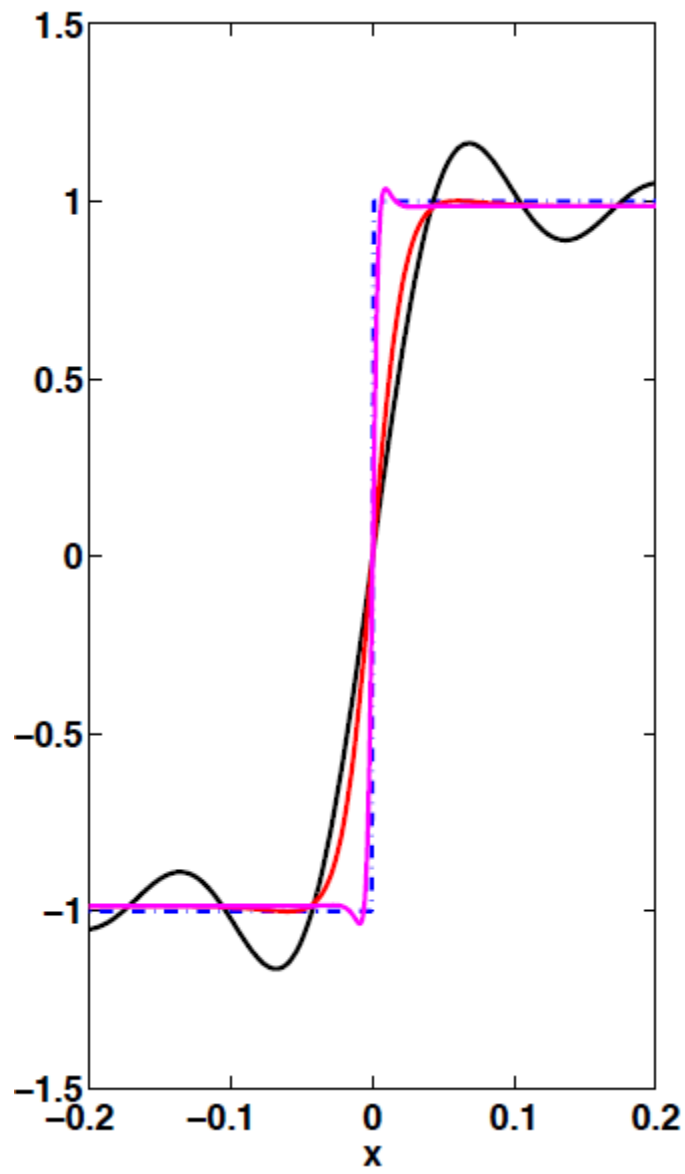


Figura 30 - Exemplo do fenómeno de Gibbs

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:

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

onde,

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

σ_i^2 – são as variâncias das classes

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

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

onde,

ω_i – termo expresso em probabilidade de classes

μ_i - termo expresso em média das classes

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

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

Os termos da média das classes são obtidos usando,

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

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®.

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 ®. 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.

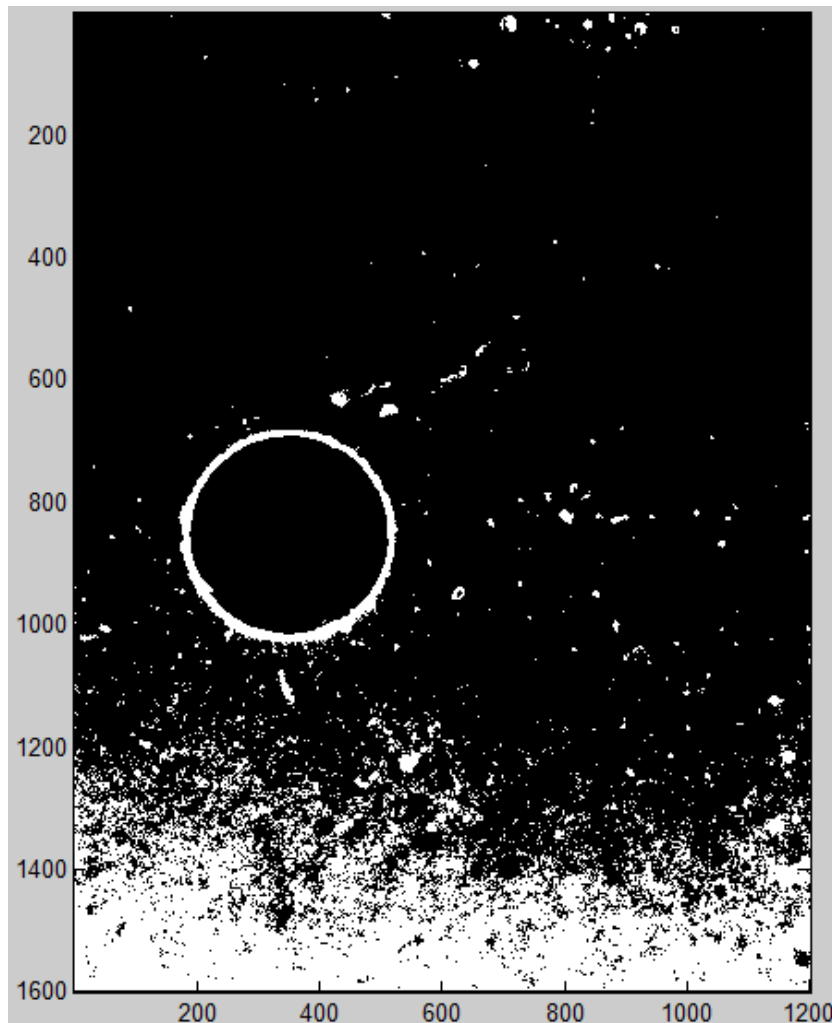


Figura 31 - Imagem obtida a partir do programa de processamento de imagem feito em MATLAB ® antes de ser definido o contorno da zona de dano

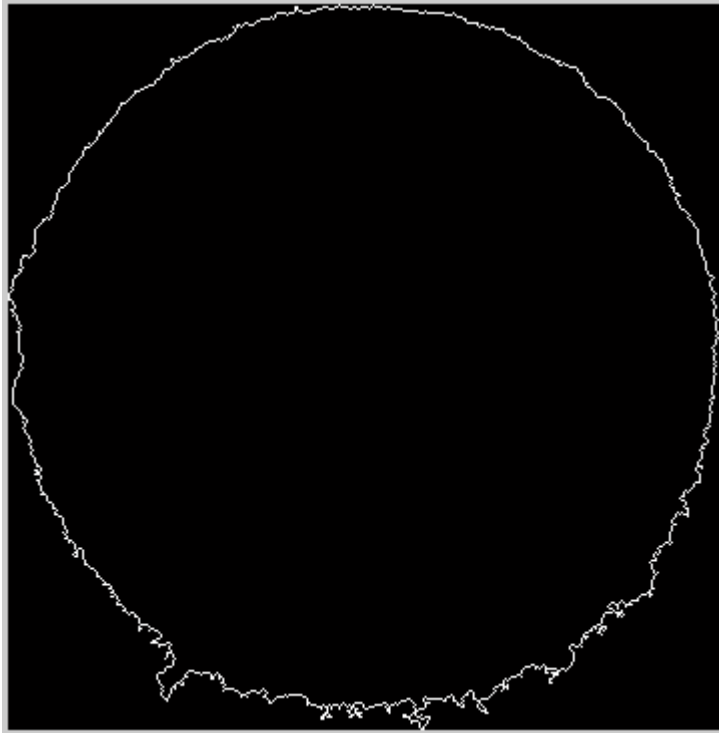


Figura 32 - Contorno do dano

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 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 31 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.

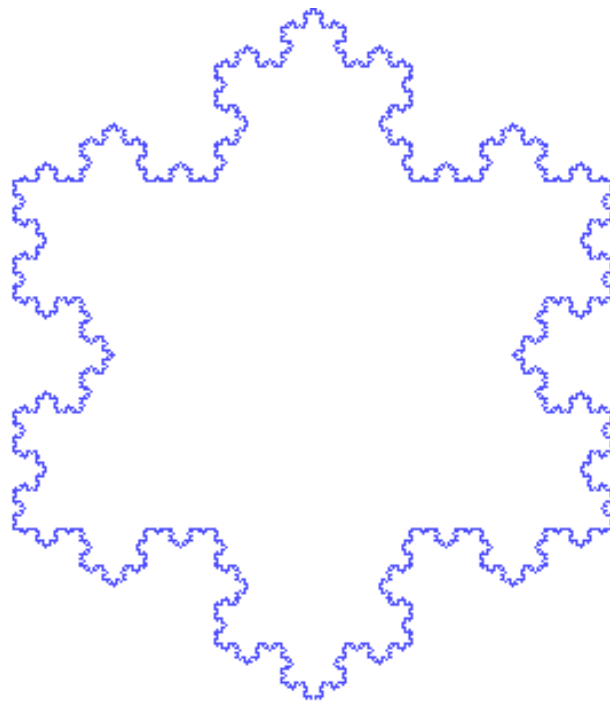


Figura 33 - Curva de Koch

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 32 é representada com uma linha vermelha uma curva suave, e a azul a curva de Weierstrass com dimensão de Hausdorff superior a 1.

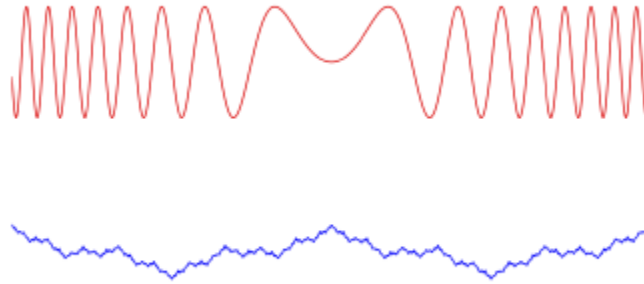


Figura 34 - Exemplo de curva "suave" e curva fractal

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 μ 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 $d_k = -\frac{\ln(N_r(A))}{\ln(r)}$.

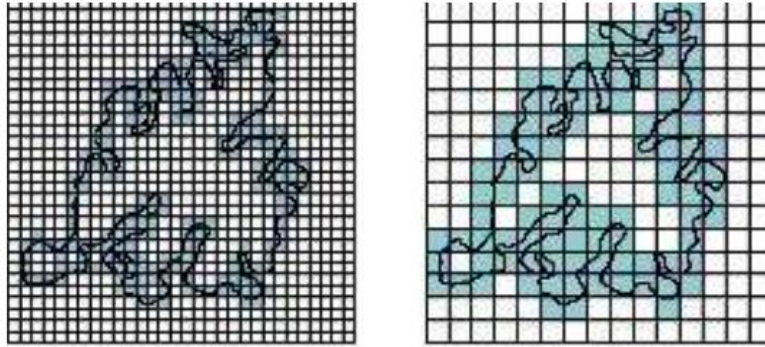


Figura 35 - Exemplo do método de *box-counting*

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 31 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 35 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.

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.

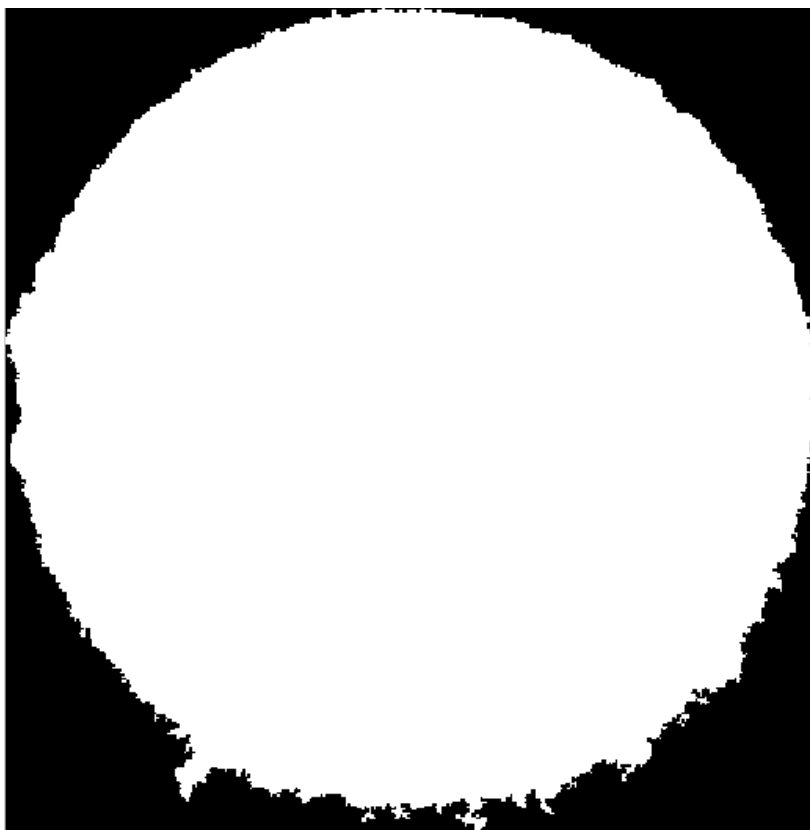


Figura 36 - Imagem resultante da função *imfill*

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 4.

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 nos capítulos anteriores, foi um compósito híbrido de epóxido reforçado com partículas de borracha e cana-de-açúcar. A utilização deste material baseia-se principalmente em questões ambientais, nomeadamente na redução dos desperdícios. Quer a borracha quer a cana-de-açúcar utilizadas na fabricação deste material resultam de resíduos resultantes indústrias como a alimentar e a automóvel. As propriedades deste material foram estudadas inicialmente por Durão et. al [37]. Desse estudo resultaram os valores que constam na Tabela 10, obtidos a partir de ensaios de tração realizados a vários provetes.

Tabela 10 - Propriedades resultantes dos ensaios de tração e características dos provetes

Nº Proвете	Borracha [%]	Tamanho partículas borracha [US Tyler]	Fibras [%]	Comprimento fibras [mm]	Tratamento	Módulo Elasticidade médio (GPa)	Tensão de rotura (MPa)
C2	25	50-80	3	5	Sem	1,83	15,67
C3	25	50-80	3	20	Com	1,37	13,86
C6	25	50-80	5	5	Sem	1,62	15,40
C9	25	100-200	3	5	Com	1,57	11,19
C10	25	100-200	3	5	Sem	1,47	14,80
C11	25	100-200	3	20	Com	1,40	15,02
C13	25	100-200	5	5	Com	1,48	14,49
C15	25	100-200	5	20	Com	1,78	10,97
C16	25	100-200	5	20	Sem	1,54	19,00
C17	50	50-80	3	5	Com	0,89	3,52
C18	50	50-80	3	5	Sem	0,92	6,05
C19	50	50-80	3	20	Com	1,04	8,26
C22	50	50-80	5	5	Sem	1,07	5,84
C23	50	50-80	5	20	Com	0,93	9,92
C24	50	50-80	5	20	Sem	0,92	6,55
C27	50	100-200	3	20	Com	1,25	10,56
C28	50	100-200	3	20	Sem	1,28	5,37
C29	50	100-200	5	5	Com	0,89	7,06

Na Tabela 10 (acima) é de realçar o que valor de médio tensão de cedência (σ_{ced}) mais alto foi de 19,00 MPa conseguido nos provetes do tipo C16. Este constituído por 25% (fração mássica) de borracha com partículas de 100-200 *US Tyler*, e 5% de fibras de cana-de-açúcar (fração mássica) com comprimento de 20mm e sem tratamento químico. O grupo de provetes com valor médio de rigidez mais alto foi o C2, com média de 1,83 GPa. Este tipo de provetes contem 25% de borracha com partículas de 50-80 *US Tyler* e 3% de fibras com comprimento de 5mm e sem tratamento químico.

Na Tabela 11 é apresentado um quadro resumo onde constam os valores médios da tensão de rotura (σ_{rot}) e do módulo de rigidez de cada grupo de provetes segundo as características de variáveis na fabricação dos provetes, como a percentagem de borracha, o tamanho das partículas de borracha, percentagem de fibras de cana-de-açúcar, o comprimento das fibras e se foram tratadas quimicamente ou não. Desta tabela é fácil concluir que o fator que mais influência as propriedades do material é a percentagem de borracha que o material contém, pois todos os provetes com 25% de borracha têm maior resistência que os provetes com 50% de borracha. O mesmo não é observado para os outros fatores.

Tabela 11 – Valores médios de rigidez e tensão de cedência

Factor		E (GPa)	σ_{ced} (MPa)
% Borracha	25%	1,5642	14,4882
	50%	1,0214	7,0135
Tamanho Borracha	50-80	1,1772	9,4522
	100-200	1,4085	12,0494
% Fibras	3%	1,3029	10,4292
	5%	1,2802	11,1528
Comprimento	5mm	1,3034	10,4470
	20mm	1,2823	11,0546
Tratamento	com	1,2608	10,4835
	sem	1,3328	11,0850

O tamanho das partículas de borracha parece também ter influência na resistência (σ_{rot}) e rigidez (E) das peças, sendo este factor menos significativo do que a percentagem de borracha. Quando as partículas têm entre 100-200 *US Tyler* apresentam valores médios de σ_{rot} e rigidez mais elevados

Como foi observado na tabela anterior, o fator que mais influência as propriedades mecânicas do material é a % de borracha, na Tabela 12 são apresentados os valores médios do módulo de elasticidade e da tensão de cedência para provetes com 25% e 50% de borracha. Esta tabela tem como objectivo ver a influência que os outros fatores têm nas propriedades mecânicas sem a influência da percentagem de borracha.

Tabela 12 – Valores médios de rigidez e tensão de cedência divididos por quantidade de borracha, valores médios 25% do lado esquerdo e 50% do lado direito

25%	E (Gpa)	σ_{ced} (MPa)	50%	E (Gpa)	σ_{ced} (MPa)
50-80	1,61	14,98	50-80	0,96	6,69
100-200	1,54	14,24	100-200	1,14	7,66
5mm	1,59	14,31	5mm	0,94	5,62
20mm	1,53	14,71	20mm	1,09	8,13
3%	1,53	14,11	3%	1,08	6,75
5%	1,61	14,96	5%	0,95	7,34
com	1,52	13,10	com	1,00	7,86
sem	1,62	16,22	sem	1,05	5,95

Como podemos ver na Tabela 12 (acima) os vários fatores de fabricação do material influenciam de forma diferente as propriedades mecânicas para provetes com 25% e 50% de borracha. Ao analisar a tabela podemos constatar que a média dos valores do Módulo de elasticidade (E) para provetes com 25% de borracha, é maior quando temos partículas com dimensões de 50-80 *US Tyler*, comprimentos de fibras de 5mm e com 5% de fibras de cana-de-açúcar. No entanto quando os provetes têm 50% de borracha as melhores propriedades mecânicas são obtidas quando temos borracha com partículas de dimensão de 100-200 *US Tyler*, 3% de cana-de-açúcar e fibras com 20mm de comprimento.

Na Figura 37 e 38 podemos ver os gráficos de tabelas com os valores da Tabela 12 (acima), Figura 37 valores médios de resistência mecânica e Figura 38 valores médios do módulo de elasticidade tanto para os provetes com 25% como para os que contêm 50% de borracha.

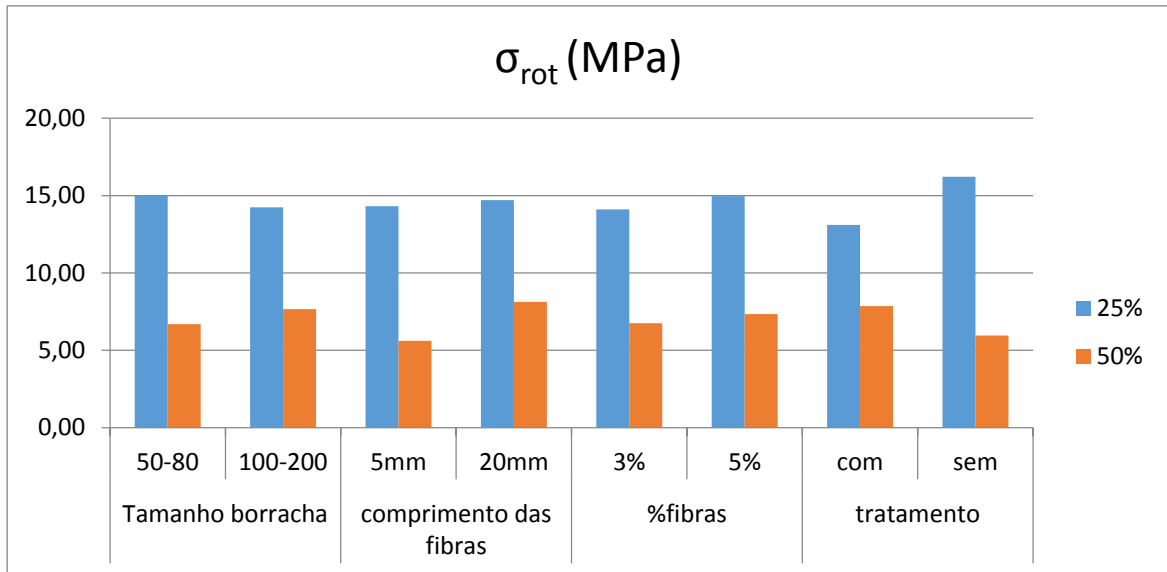


Figura 37 - Gráfico de barras dos valores médios da tensão de rotura para provetes com 25% e 50% de borracha.

Tanto na Figura 36 (acima) como na Figura 37 (abaixo), é claramente visível que os valores de tensão de rotura e módulo de elasticidade são mais elevados para os provetes com 25% de fração mássica de borracha do que os provetes com 50%.

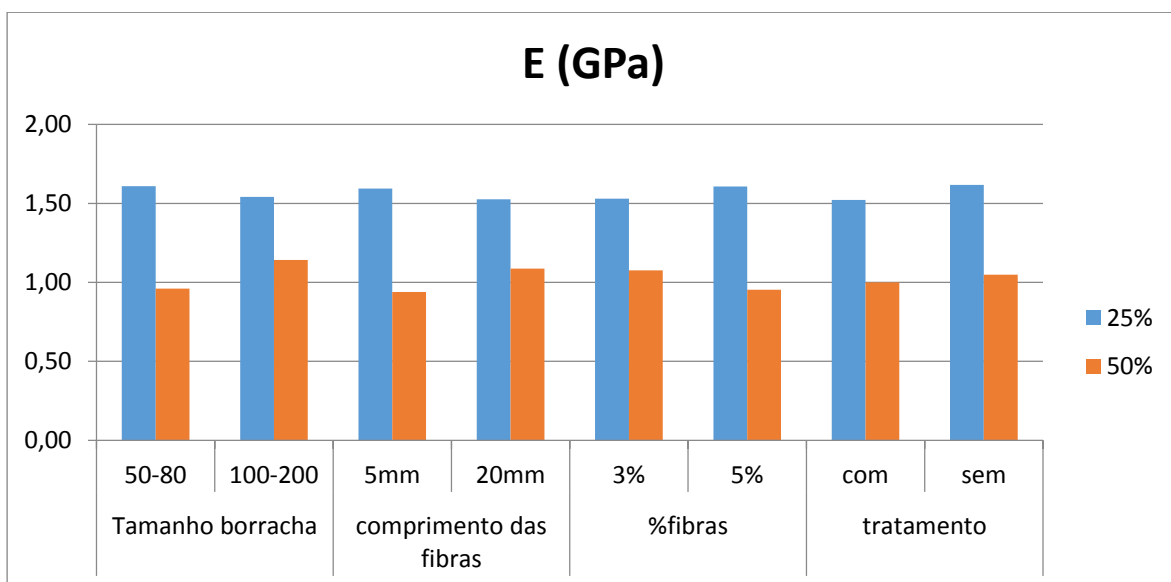


Figura 38 -Gráfico de barras dos valores médios do módulo de elasticidade para provetes com 25% e 50% de borracha.

Na Tabela 13 (abaixo) podemos comparar os resultados obtidos para os provetes com 25% de borracha e partículas com tamanho de 50-80 *US Tyler*, do lado esquerdo da tabela, e para os provetes com 25% de borracha com tamanho de 100-200 *US Tyler*, do lado direito da tabela. Como estas são duas propriedades da borracha, a percentagem de borracha presente no provete e o tamanho das partículas, na tabela podemos ver qual a influência das propriedades das fibras nos valores de rigidez e resistência mecânica do material.

Tabela 13 – Valores médios de tensão de cedência e rigidez dos provetes com 25% de borracha.

25% - 50/80	E (Gpa)	σ_{rot} (MPa)	25% - 100/200	E (Gpa)	σ_{rot} (MPa)
5mm	1,73	15,54	5mm	1,51	13,49
20mm	1,37	13,86	20mm	1,58	14,99
3%	1,60	14,77	3%	1,48	13,67
5%	1,62	15,40	5%	1,60	14,82
com	1,37	13,86	com	1,56	12,92
sem	1,73	15,54	sem	1,51	16,90

Desta tabela é difícil concluir qual a influência do comprimento das fibras nas propriedades mecânicas deste material. Do lado esquerdo, provetes com 25% de borracha e tamanho de partículas de 50-80 *US Tyler*, observamos que tanto a rigidez (E) como a resistência à tracção (σ_{ced}) apresentam valores maiores para fibras com 5mm de comprimento, no entanto do lado direito da tabela observamos o oposto, as melhores propriedades mecânicas são obtidas em materiais com fibras de 20mm.

A percentagem de fibras de cana-de-açúcar presente no material influencia ligeiramente as propriedades mecânicas deste. Podemos observar que tanto para partículas de borracha com 50-80 *US Tyler* como para partículas de 100-200 *US Tyler*, os valores médios da resistência mecânica e da rigidez são mais elevados para os provetes com 5% de fibras. Ainda que seja uma diferença mínima de 0,02 GPa do lado esquerdo, no lado direito da Tabela XX (a cima) vemos uma diferença de 0,12 GPa no valor médio da rigidez (E). Isto significa que uma maior

percentagem de fibras aumenta assim as propriedades mecânicas do material. Em trabalhos futuros seria interessante estudar qual a quantidade de fibras de cana-de-açúcar máxima, que nos permite obter as melhores propriedades mecânicas, de modo a que outras propriedades, como a maquinabilidade, não sejam muito afetadas.

Da Tabela 13 (acima) podemos também observar que os provetes com partículas de dimensões de 50-80 *US Tyler*, partículas de borracha maiores, apresentam melhores propriedades mecânicas do que os provetes com partículas de borracha de dimensões mais reduzidas (100-200 *US Tyler*). Este facto pode estar relacionado com o facto de as partículas de maiores dimensões absorverem e amortecerem melhor as forças aplicadas durante os ensaios mecânicos.

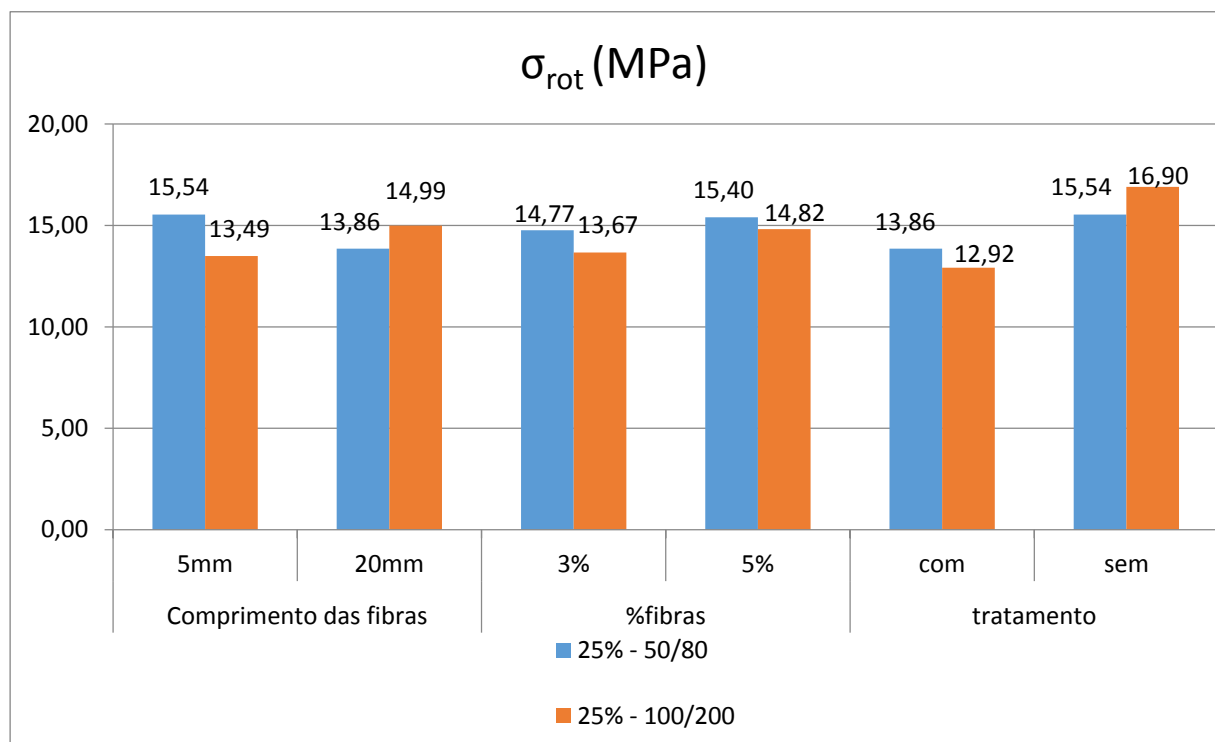


Figura 39 – Gráfico de barras dos valores médios da tensão de rotura para provetes com 25% de borracha e partículas com 50-80 e 100-200 *US Tyler*.

Podemos ver nas Figuras 39 e 40 os gráficos de barras que podem ser feitos a partir dos valores da Tabela 13 (acima). No gráfico da Figura 39 podemos observar a diferença dos

valores médios da tensão de rotura à tração entre os provetes com 25 % de borracha, com partículas de 50-80 e 100-200 *US Tyler*.

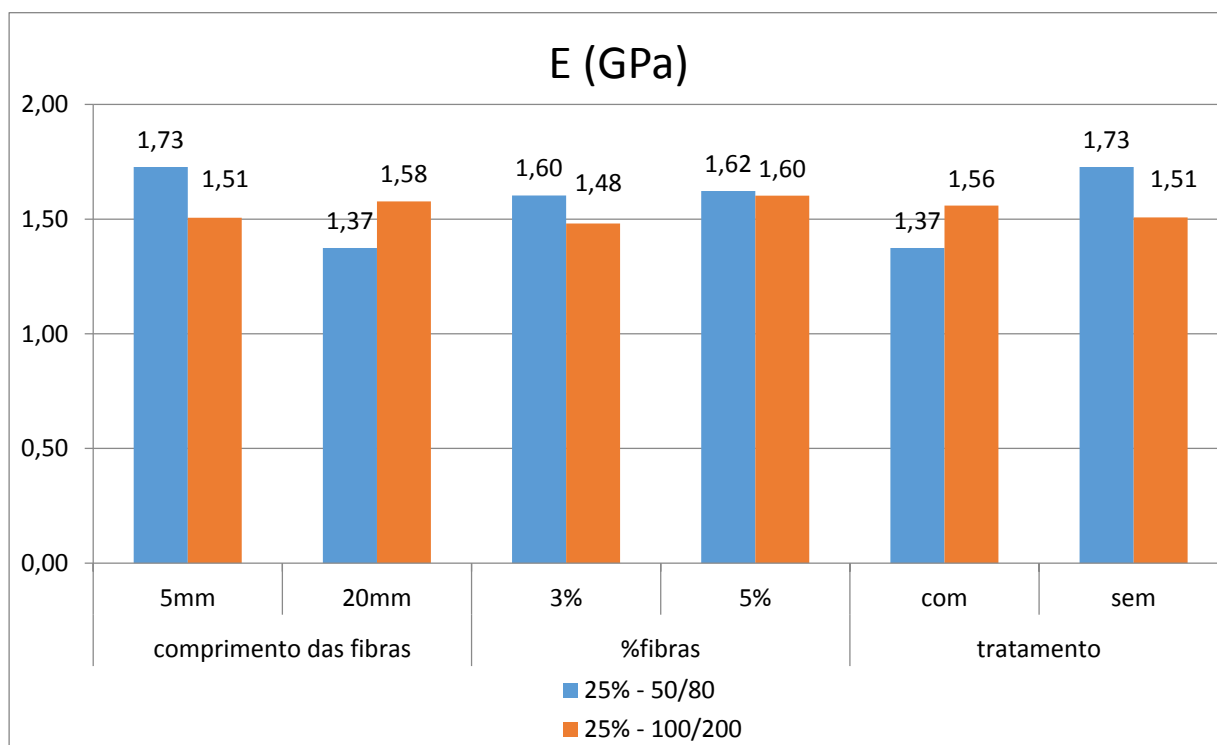


Figura 40 – Gráfico de barras dos valores médios do módulo de elasticidade para provetes com 25% de borracha e partículas com 50-80 e 100-200 *US Tyler*.

Na Tabela 14 podemos ver a comparação entre o grupo de provetes, dentro das amostras com 25% de borracha, com valor médio de módulo de elasticidade (E) mais alto (provetes do tipo C2) e E mais baixo (provetes do tipo C3). É também visível que as propriedades que variam de C2 para C3 são o comprimento de fibras e se foram ou não tratadas. Desta tabela concluímos que as fibras mais curtas e não tratadas contribuem positivamente para a resistência mecânica do material, ao contrário das fibras longas sujeitas a tratamento químico. A diferença do valor médio da rigidez do material é de 0,46 GPa, que representa 33% do valor médio da rigidez dos provetes C3. Isto representa uma diferença significativa de rigidez entre os dois provetes.

Tabela 14 – Características dos provetes com maior e menor módulo de elasticidade (E)

Nº Provede	Borracha [%]	Tamanho partículas borrcha [US Tyler]	Fibras [%]	Comprimento fibras [mm]	Tratamento	E (GPa)	
C2	25	50-80	3	5	Sem	1,83	
C3	25	50-80	3	20	Com	1,37	
Diferença						0,46	33%

Na Tabela 15 (abaixo) podemos também ver o grupo de provetes, (dentro dos que têm 25% de borracha) com maior tensão de cedência, provetes C16, e menor tensão de cedência, provetes C15. Nestes provetes, podemos ver que o único parâmetro que mudou foi o tratamento das fibras, se estas foram ou não tratadas. Desta comparação podemos ver que o tratamento influencia negativamente a resistência mecânica das fibras. A diferença entre os dois valores é de 8,03 MPa que representa 73% do valor de resistência mecânica do grupo de provetes C15, e quase metade do valor médio de σ_{ced} dos provetes C16.

Tabela 15 - Características dos provetes com maior e menor tensão de cedência (σ_{ced})

Nº Provede	Borracha [%]	Tamanho partículas borrcha [US Tyler]	Fibras [%]	Comprimento fibras [mm]	Tratamento	σ_{rot} (MPa)	
C16	25	100-200	5	20	Sem	19,00	
C15	25	100-200	5	20	Com	10,97	
Diferença						8,03	73%

Tanto na Tabela 14 como na Tabela 15, podemos ver que o tratamento dado às fibras de cana-de-açúcar influencia negativamente as propriedades mecânicas. Seria também interessante em trabalhos futuros ver qual a influência que o tratamento feito às fibras, tem nas propriedades mecânicas destas. De modo a melhorar a resistência mecânica e rigidez do material seria necessário optar por outro tipo de tratamento, visto que este aparenta prejudicar a resistência mecânica do produto final.

6.2. Radiografia

Apesar de estarmos perante um material com baixa percentagem de fibras (3% e 5%), a delaminação da zona de dano do furo foi também analisada a partir das imagens obtidas durante as radiografias. Foi também quantificado o dano do furo através dos fatores de delaminação.

Na Tabela 16 (abaixo) 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 (Fator de delaminação expresso em %).

Tabela 16 - Valores resultantes do processamento e análise das imagens obtidas na radiografia das peças.

Referência	Ad	DRAT %	Fed	Dim F Média
C2A	4,5146	15,9671	1,0769	0,9894
C2D	3,9189	13,8602	1,0671	0,9748
C11A	3,6559	12,9302	1,0627	0,9887
C11B	4,4510	15,7422	1,0758	1,1262
C13A	5,1536	18,2273	1,0873	0,9598
C13B	4,5143	15,9659	1,0769	0,9950
C16D	4,9604	17,5440	1,0842	1,0081
C16A	6,2780	22,2040	1,1055	1,0362
C15A	-	-	-	-
C15D	4,2791	15,1343	1,0730	0,9517
C3A	4,1612	14,7173	1,0711	1,0103
C3D	5,3334	18,8631	1,0902	1,0095
C9B	4,6975	16,6139	1,0799	1,0068
C9D	4,8587	17,1841	1,0825	0,9832
C10D	3,8395	13,5794	1,0657	1,0513
C10C	5,2602	18,6041	1,0891	1,0183
C6D	3,2266	11,4117	1,0555	0,9298
C6B	5,3853	19,0467	1,0911	1,0227
C27B	3,9027	13,8031	1,0668	0,9242
C27D	4,5937	16,2468	1,0782	0,9917
C22D	5,4984	19,4467	1,0929	0,9343
C22A	5,3045	18,7610	1,0898	0,9841
C24B	4,3245	15,2948	1,0738	0,9875
C24A	4,4627	15,7836	1,0760	0,9873
C29A	3,9106	13,8310	1,0669	0,9815

C29B	4,3637	15,4334	1,0744	0,9800
C23B	4,1616	14,7186	1,0711	1,0127
C23A	4,2647	15,0833	1,0728	0,9655
C18A	4,6858	16,5726	1,0797	1,0065
C18B	10,5777	37,4108	1,1722	0,9989
C17B	6,1790	21,8539	1,1039	0,9887
C17A	5,9535	21,0563	1,1003	1,0013
C28B	4,5981	16,2626	1,0783	0,9733
C28A	4,4885	15,8747	1,0765	0,9861
C19B	5,3241	18,8303	1,0901	0,9553
C19D	4,6322	16,3829	1,0788	0,9917

A imagem do provete C15A continha muito ruído e daí surgiu a impossibilidade de se obter os valores da área de dano, dos fatores de delaminação e o valor da dimensão fractal. Na Figura 41 (abaixo) podemos ver um exemplo de uma imagem de um furo com muito ruído



Figura 41 - Radiografia de furo, exemplo de imagem com muito ruído

Na Figura 42 (abaixo) podemos ver um gráfico onde se relaciona a área de dano com o fator equivalente de delaminação.

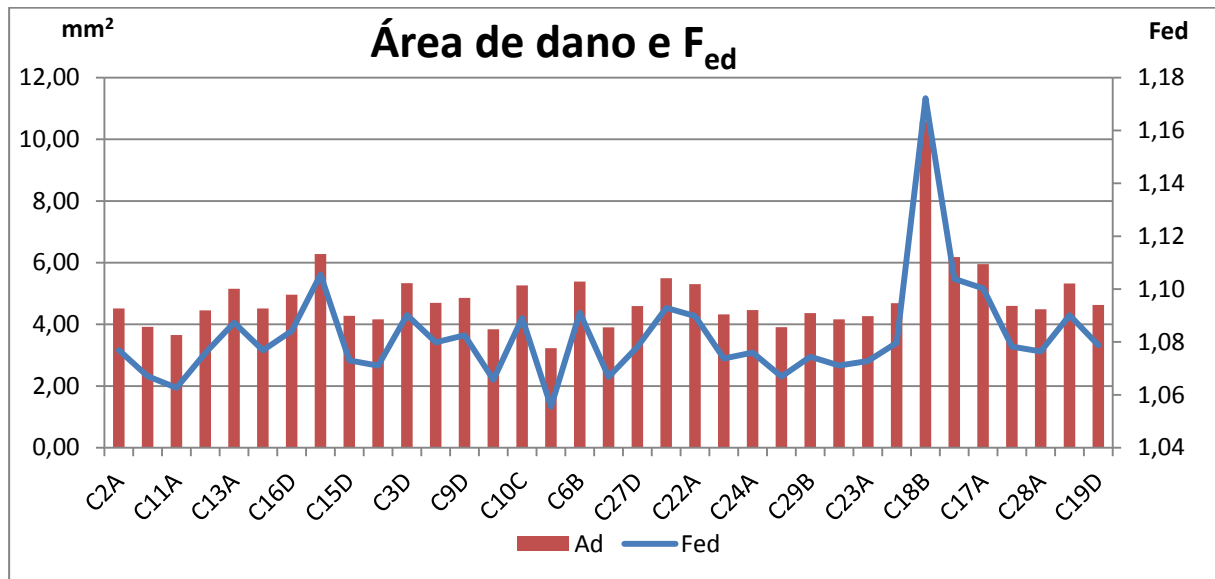


Figura 42 - Gráfico que relaciona a área de dano com F_{ed} .

Como seria de esperar, podemos ver que, graficamente, 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 directamente do valor da área de dano, uma área de dano maior traduz-se num aumento do valor do fator equivalente de delaminação.

Um dos principais objetivos deste trabalho foi ver se havia alguma relação entre a dimensão fractal do contorno da zona de dano de um furo, e de que forma se relacionava com a área de dano e os fatores de delaminação. Nos gráficos das figuras seguintes podemos ver o anterior referido.

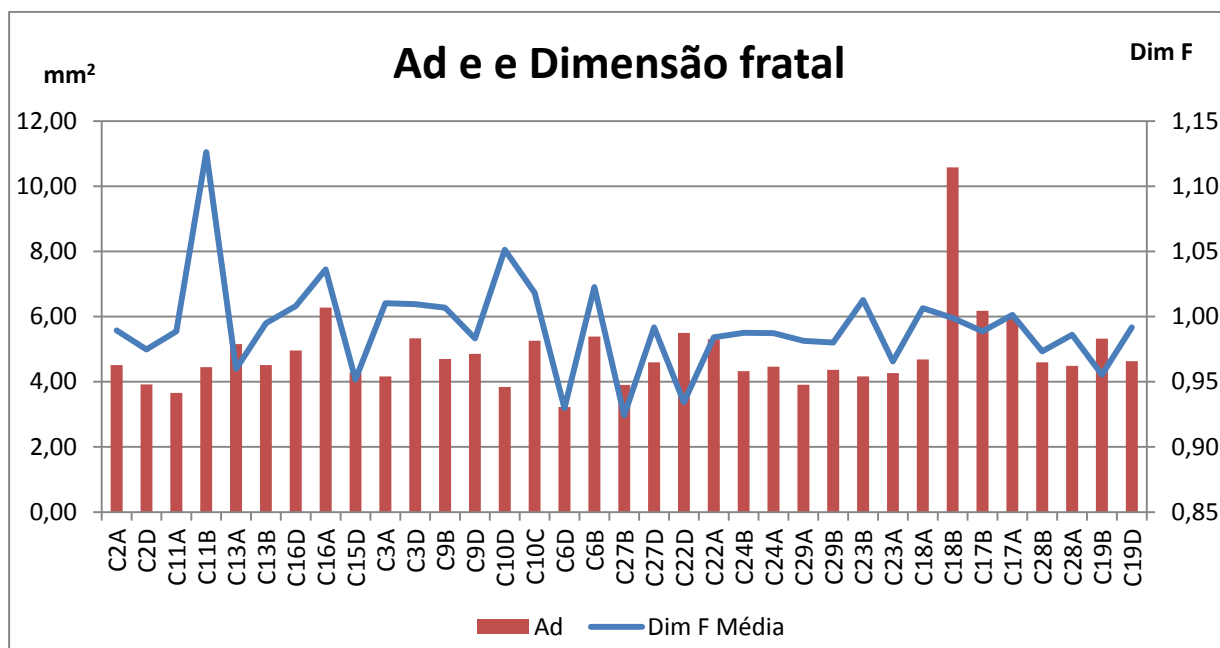


Figura 43 - Gráfico que relaciona a área de dano do furo com dimensão fractal do contorno da zona de dano.

Apesar de não ser constante, conseguimos ver uma relação entre algumas sucessões de valores de área de dano e a dimensão fractal. Podemos ver que entre o provete C13B e o C15D os valores da dimensão fractal acompanham o aumento e diminuição no valor da área de dano. Por outro lado é também visível que o aumento ligeiro da área de dano do provete C11A para o C11B, é traduzido num aumento abrupto no valor da dimensão fractal.

Na Figura 44 podemos ver os resultados de F_{ed} e da dimensão fractal. Sendo uma função que depende da área de dano, podemos ver que F_{ed} tem um comportamento muito semelhante ao da área de dano quando o relacionamos com a dimensão fractal.

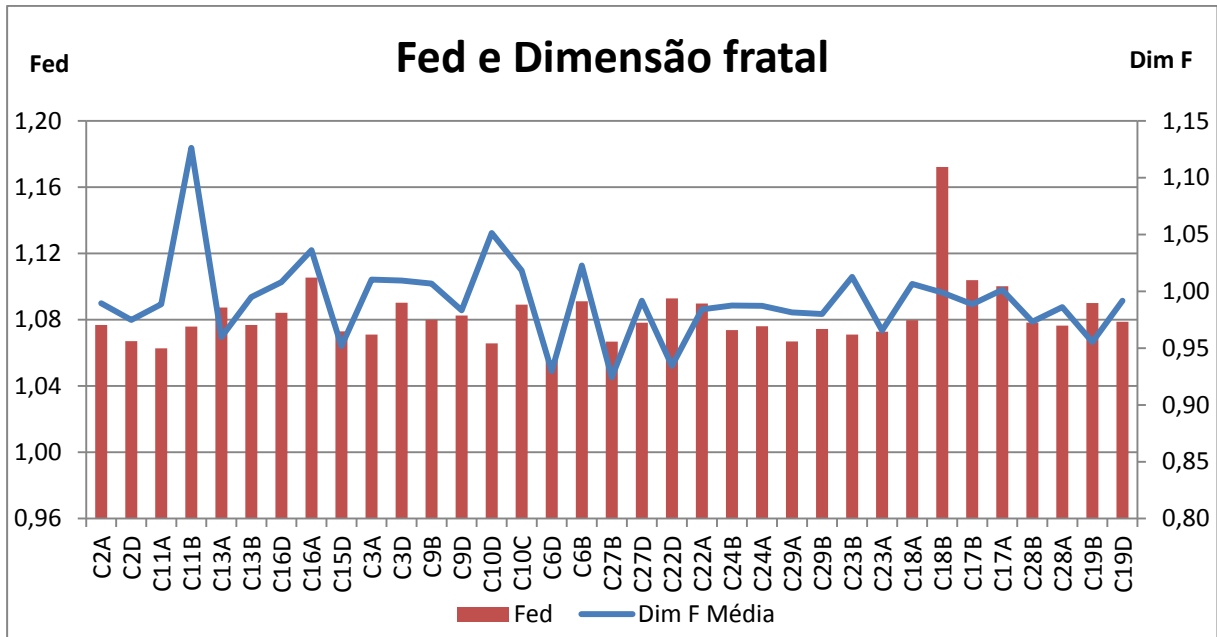


Figura 44 - Gráfico que relaciona a F_{ed} com a dimensão fractal do contorno da zona de dano.

Com a Figura 45 (abaixo) pretende-se comparar os valores de DRAT com os valores da dimensão fractal. DRAT é também um fator que depende da área de dano, e por isso tem um comportamento semelhante a F_{ed} quando comparado com a dimensão fractal do contorno da zona de dano do furo.

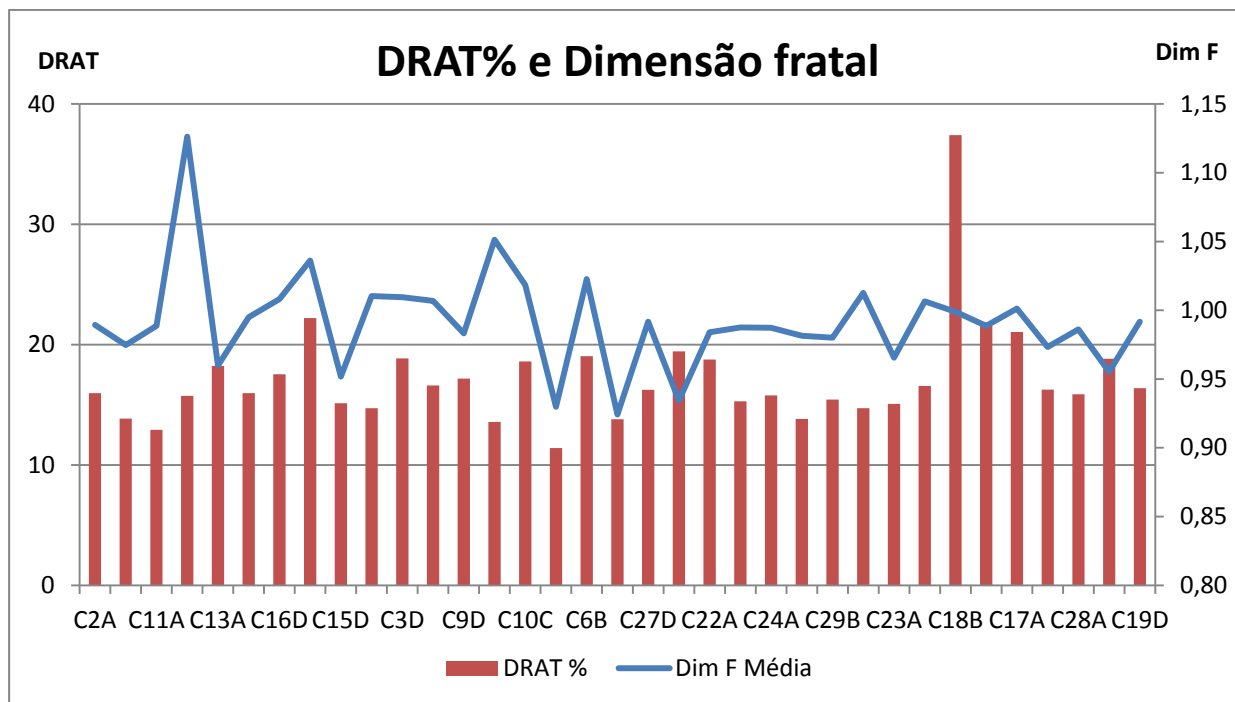


Figura 45 - Gráfico que relaciona DRAT com a dimensão fractal do contorno da zona de dano.

Os valores da área de dano e dimensão fractal que foram obtidos através do processamento e análise de imagem foram muito trabalhosos. As imagens obtidas a partir das radiografias para este material, epóxido reforçado com borracha e fibra de cana-de-açúcar, continham um ruído muito grande devido á grande heterogeneidade do material. O material continha também 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. O facto de haver muitas zonas de contraste devido à alta porosidade das peças fez com que a área de dano fosse maior em alguns provetes e menor noutros do que deveria ser. Ao ser feito o *thersholding* (explicado no capítulo anterior) às imagens, nalguns casos a área de dano foi considerada maior e noutros do que era na verdade. Tudo isto pode levar a um erro crasso nos resultados finais.

De todos os fatores analisados, o valor da dimensão fractal parece relacionar-se melhor com o fator equivalente de delaminação (F_{ed}). 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 (Fda) proposto por Davim et. al [26]. Este fator não relaciona apenas áreas mas também relaciona diâmetros.

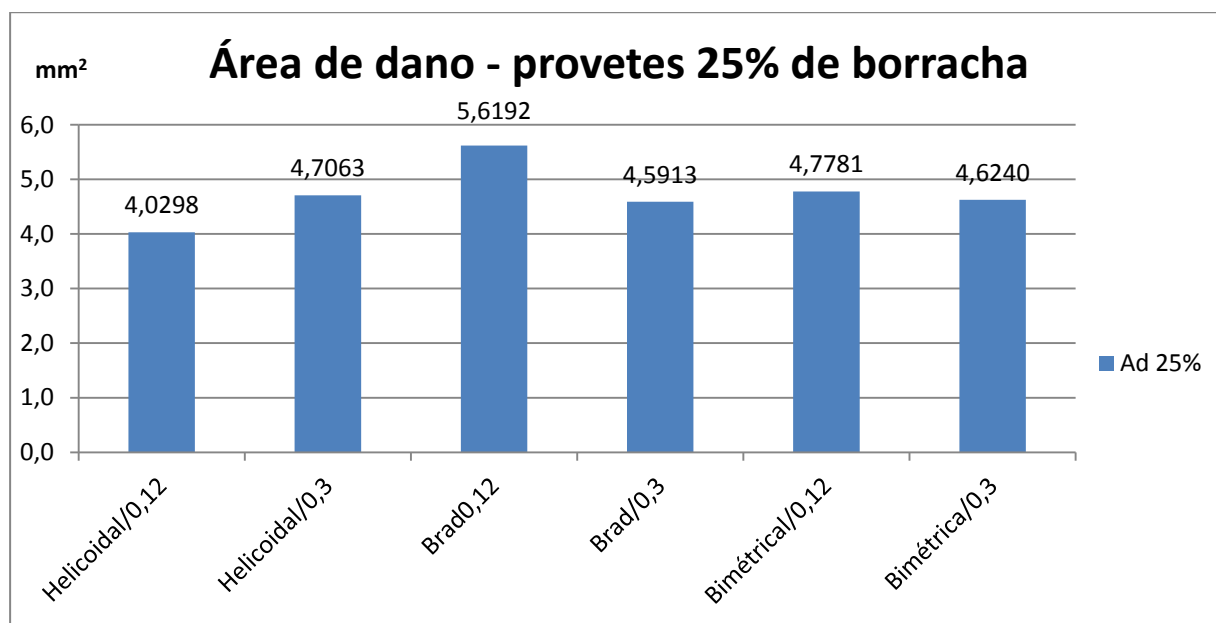


Figura 46 - Gráfico de barras com valores médios da área de dano, agrupados de acordo com o tipo de broca e velocidade de avanço.

Na Figura 46 (acima) podemos ver um gráfico de barras com os valores médios da área de dano do furo dos provetes com 25% de borracha. Os valores da área foram agrupados de acordo com os parâmetros de furagem. Podemos ver que o valor médio mais baixo da área de dano foi obtido em furos efetuados com a broca helicoidal e com um avanço de 0,12mm/rotação. É espetável que sejam os provetes furados nestas condições que tenham maior resistência ao esmagamento, traduzindo-se num valor de tensão máxima mais alto durante o ensaio. Os parâmetros de furagem menos indicados para este tipo de material são então a utilização de brocas tipo *Brad* e simultaneamente a utilização de avanços baixos.

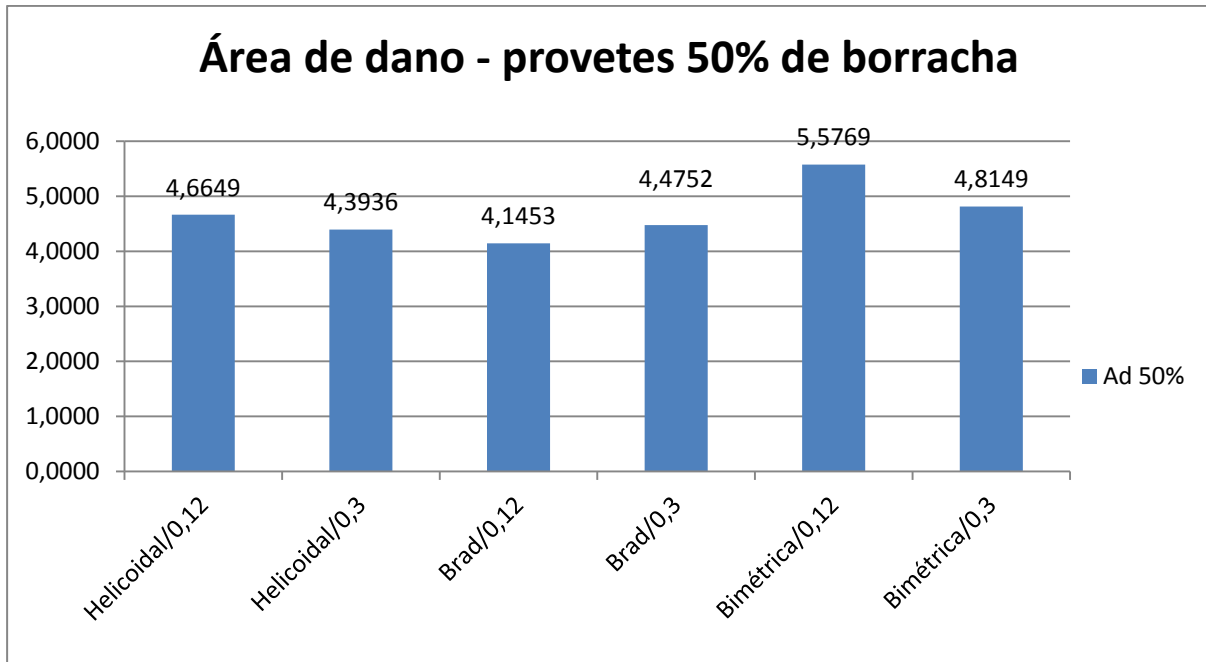


Figura 47 - Gráfico de barras com valores médios da área de dano, agrupados de acordo com o tipo de broca e velocidade de avanço.

Para os provetes com 50% de borracha os parâmetros mais indicados são a utilização de brocas tipo *Brad* e velocidades de avanço baixas. As brocas menos indicadas para este material são as bimétricas, pois com estas temos uma área de dano mais elevada, diminuindo assim a resistência ao esmagamento da nossa peça.

Podemos também comparar os valores obtidos para os provetes com 25% e 50% de borracha. No gráfico de barras da Figura 48 (abaixo) podemos ver os valores médios da área de dano lado a lado.

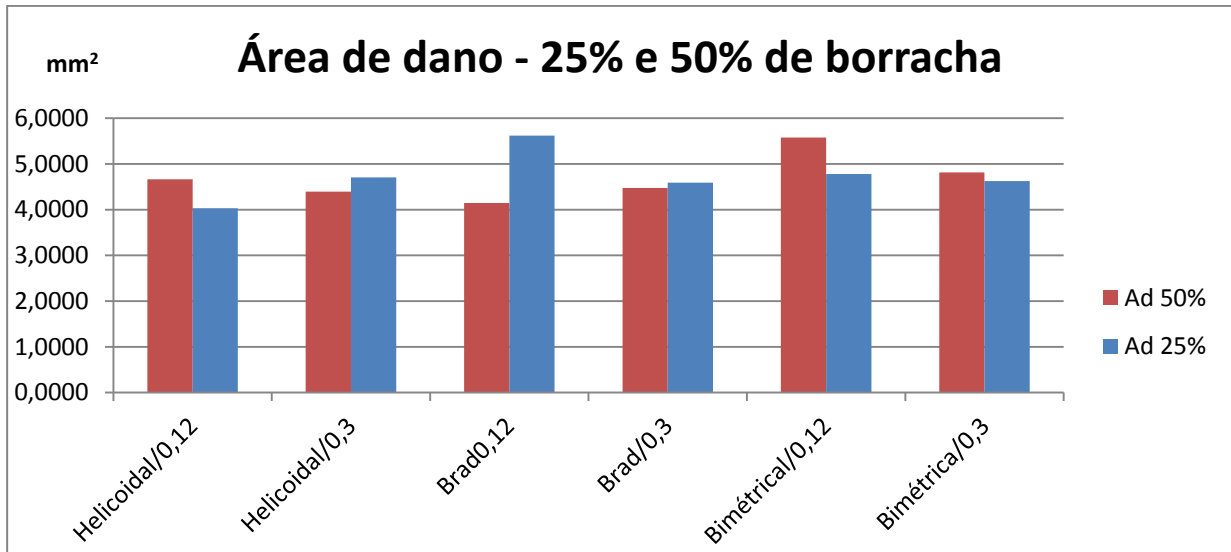


Figura 48 - Gráfico de barras com valores médios da área de dano, agrupados de acordo com o tipo de broca e velocidade de avanço, para provetes com 25% e 50% de borracha.

Deste gráfico podemos ver que os valores médios da área de dano são muito semelhantes entre os provetes com 25% de borracha e os com 50% de borracha. A maior diferença entre os valores médios é a quando da utilização da broca tipo *Brad* e avanço de 0,12mm, que são os parâmetros mais indicados para a furação de peças com 50% de borracha e menos indicados para a furação de peças com 25%.

Ao contrário do que estudado por outros autores [41], a utilização de brocas helicoidais e bimétricas para a furação deste tipo de material, associadas a velocidades de avanço mais baixas é desaconselhada. A utilização dos parâmetros atrás referidos aumenta a área de dano o que se traduz numa maior delaminação e conseqüente diminuição da resistência do furo.

6.3. Ensaio de esmagamento

Como foi concluído no início deste capítulo, os fatores de fabricação do material, como a percentagem de borracha, o tamanho das partículas de borracha, a percentagem e o comprimento das fibras e ainda se estas são ou não tratadas têm grande influência nas propriedades mecânicas do material. Estes fatores irão também ter grande influência na resistência do furo, nomeadamente a % de borracha do material. Deste modo foram separados os provetes com 25% de borracha dos com 50%, e analisados de forma separada. Nesta secção iremos ver essencialmente se os parâmetros de furação influenciam e de que maneira influenciam a resistência dos furos.

Na Tabela 17 (abaixo) podemos ver os resultados dos ensaios de esmagamento de cada provete e ainda o tipo de broca e o avanço utilizados para na furação.

Tabela 17 - Tabela resumo dos parâmetros de furação e resistência ao esmagamento dos provetes.

% Borracha	Referência	Tipo de broca	Avanço (mm/rot)	$\sigma_{\text{máx}}$ Mpa
25%	C2A	Helicoidal	0,12	36,02
	C2D	Helicoidal	0,12	21,45
	C11A	Helicoidal	0,12	27,24
	C11B	Helicoidal	0,3	30,76
	C13A	Helicoidal	0,3	43,57
	C13B	Helicoidal	0,3	61,58
	C16D	Brad	0,12	37,99
	C16A	Brad	0,12	33,62
	C15A	Brad	0,12	19,89
	C15D	Brad	0,3	53,05
	C3A	Brad	0,3	28,60
	C3D	Brad	0,3	29,49
	C9B	Bimétrica	0,12	37,23
	C9D	Bimétrica	0,12	31,09
	C10D	Bimétrica	0,12	11,17
	C10C	Bimétrica	0,3	38,69
	C6D	Bimétrica	0,3	27,88
	C6B	Bimétrica	0,3	32,28

50%	C27B	Helicoidal	0,12	25,50
	C27D	Helicoidal	0,12	40,64
	C22D	Helicoidal	0,12	29,75
	C22A	Helicoidal	0,3	6,93
	C24B	Helicoidal	0,3	26,83
	C24A	Helicoidal	0,3	23,96
	C29A	Brad	0,12	33,32
	C29B	Brad	0,12	30,50
	C23B	Brad	0,12	26,69
	C23A	Brad	0,3	29,33
	C18A	Brad	0,3	8,45
	C18B	Brad	0,3	33,50
	C17B	Bimétrica	0,12	29,36
	C17A	Bimétrica	0,12	29,93
	C28B	Bimétrica	0,12	33,12
	C28A	Bimétrica	0,3	36,65
	C19B	Bimétrica	0,3	33,45
	C19D	Bimétrica	0,3	32,93

Como podemos ver na Tabela 17 alguns valores de tensão foram muito baixos em relação aos outros, como por exemplo o provete C18A (8,45 MPa) em relação ao provete C18B (33,50 MPa). Tanto o material como os parâmetros de furação foram os mesmos para os dois provetes mas a tensão máxima no ensaio de esmagamento foi muito inferior no provete C18A. Isto pode estar relacionado com a qualidade dos provetes. Alguns provetes tinham uma qualidade muito baixa, ou seja, tinham muitos defeitos. A grande quantidade de porosidades foi o maior defeito encontrado nos provetes. No início do trabalho prático foram selecionados os provetes e tentou-se fazer uma dos provetes com melhor aspeto visual. Deste modo optou-se por eliminar o valor de tensão máxima mais baixo aquando da realização da média dos resultados. Assim foi possível garantir uma influência mínima dos provetes com fraca qualidade de fabricação, nos resultados finais. Os valores médios dos resultados obtidos serão analisados nos gráficos de barras mais a baixo.

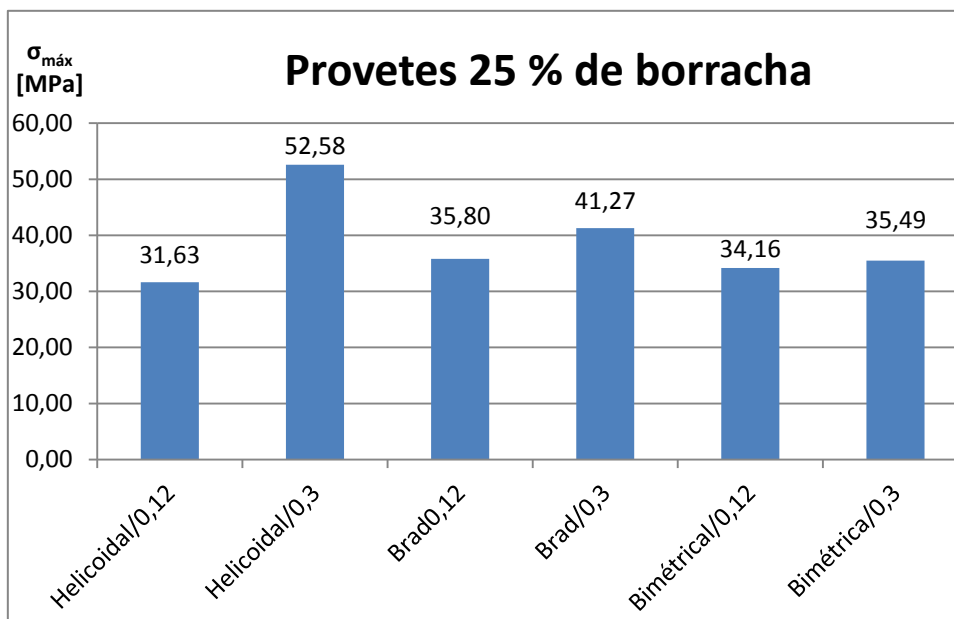


Figura 49 - Gráfico de barras com valores médios da tensão máxima, agrupados de acordo com o tipo de broca e velocidade de avanço.

Para se construir o gráfico de barras da Figura 49 os resultados foram agrupados por tipo de broca e pela velocidade de avanço utilizados na furação e posteriormente foi feita a média dos valores de tensão. Deste gráfico podemos ver que quando as peças foram furadas com avanço de 0,3mm/rotação, a resistência no ensaio de esmagamento foi maior. É também visível que os valores mais altos de tensão foram obtidos quando as peças foram furadas com a broca helicoidal e com avanço de 0,3mm/rotação. 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.

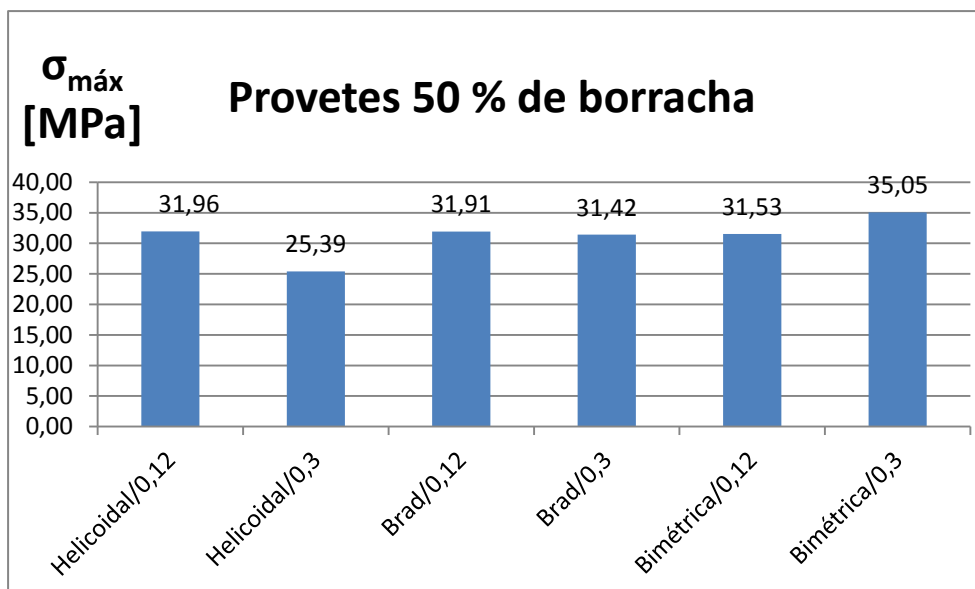


Figura 50 – Gráfico de barras com valores médios da tensão máxima, agrupados de acordo com o tipo de broca e velocidade de avanço.

Foi repetido o procedimento anterior mas para os resultados das peças com 50% de borracha, na Figura 50 (acima) podemos ver o respetivo gráfico de barras. Para os provetes com 50% de borracha podemos ver que a diferença entre valores não foi tão significativa ao variar o tipo de broca e o avanço. Para os provetes com 25% de borracha o valor mais alto de tensão no ensaio de esmagamento foi de 61,58 MPa e o valor mais baixo foi de 27,24MPa, ou seja, entre o valor mais alto e o mais baixo temos uma diferença de 34,35MPa. Para as amostras com 50% de borracha o valor mais alto foi de 40,64MPa e o mais baixo de 23,96MPa, uma diferença de 16,68 MPa. Desta comparação podemos ver que a diferença de valores para os provetes com 25% de borracha é bem mais elevada do que para os com 50% de borracha. Podemos então concluir que apesar de os parâmetros de furação influenciarem ligeiramente a tensão máxima para os provetes com 50% de borracha, influenciam bem mais quando nos referimos aos que contêm 25% de borracha.

Nos gráficos das figuras abaixo podemos ver como se relacionam os valores da tensão de alguns provetes com o factor de delaminação equivalente (F_{de}), com a área de dano e com a dimensão fractal do contorno da zona de dano de cada furo.

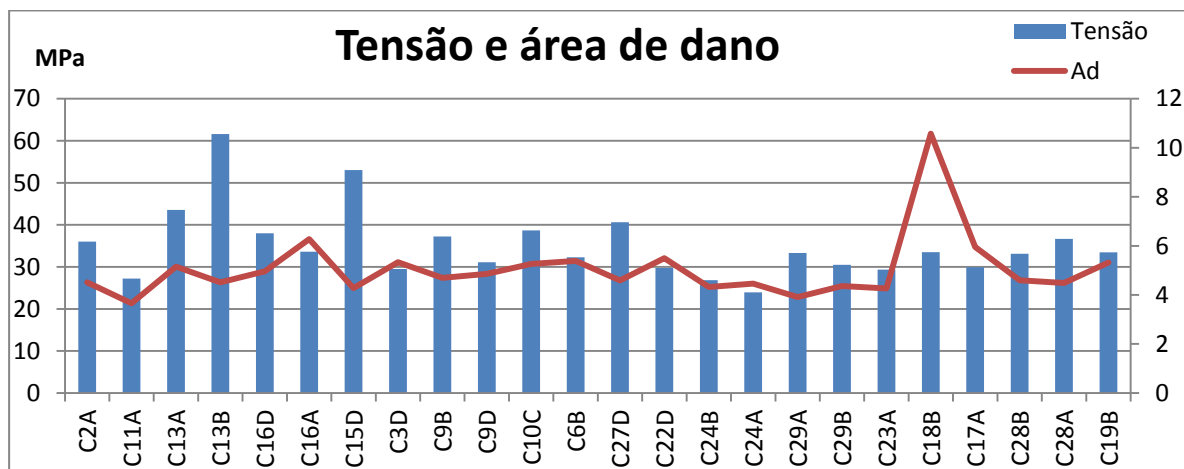


Figura 51 - Gráfico de comparação entre tensão máxima no ensaio de esmagamento e a área de dano do furo

Desta parte do trabalho experimental foi também possível analisar qual a influência da área de dano nos resultados dos ensaios de esmagamento. Identificar uma relação entre a área de dano e a tensão máxima obtida nos ensaios, ou ainda a relação entre os fatores de delaminação e a tensão máxima eram também objetivos desta tese.

Do gráfico da Figura 51 (acima) podemos ver que existe uma relação entre os valores da resistência no ensaio de esmagamento e a área de dano do furo. Entre o provete C3D e o C23A vemos que tal como o valor da tensão máxima, a área de dano sofre ligeiras alterações. Idealmente seria encontrar uma relação que traduzisse um aumento da área de dano num aumento da tensão máxima, o que não conseguimos observar nesta amostra de provetes.

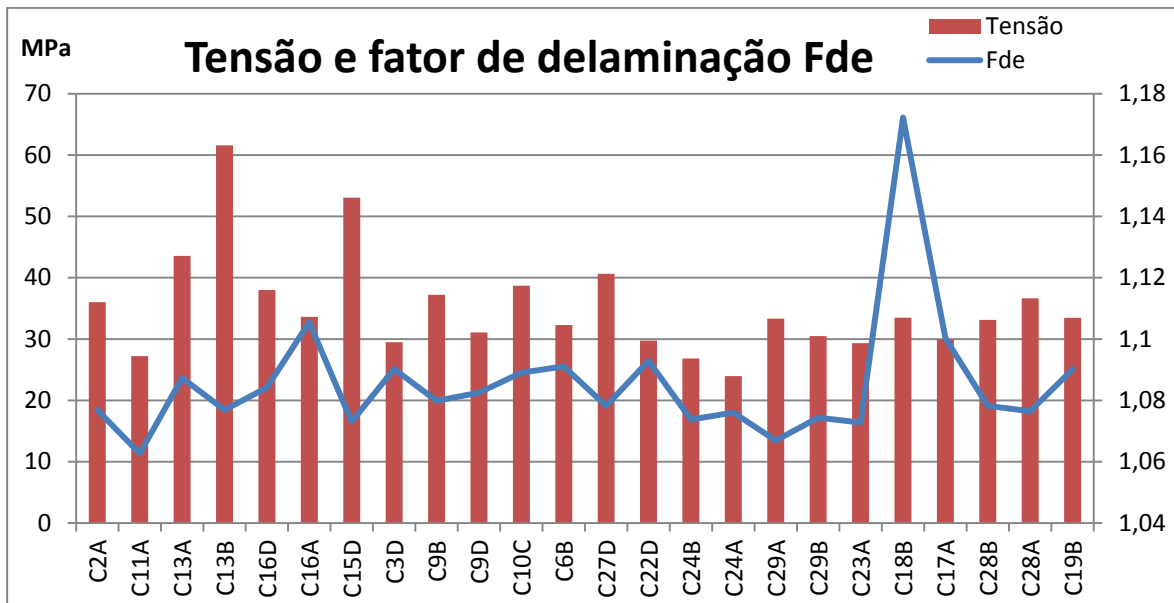


Figura 52 - Gráfico de comparação entre tensão máxima no ensaio de esmagamento e o fator de delaminação equivalente (F_{de}) do furo.

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 % de fibras, sendo este material composto com quantidades de fibras de 3% e 5%, é espectável que a dimensão fractal não se relacione de forma tão direta com a tensão.

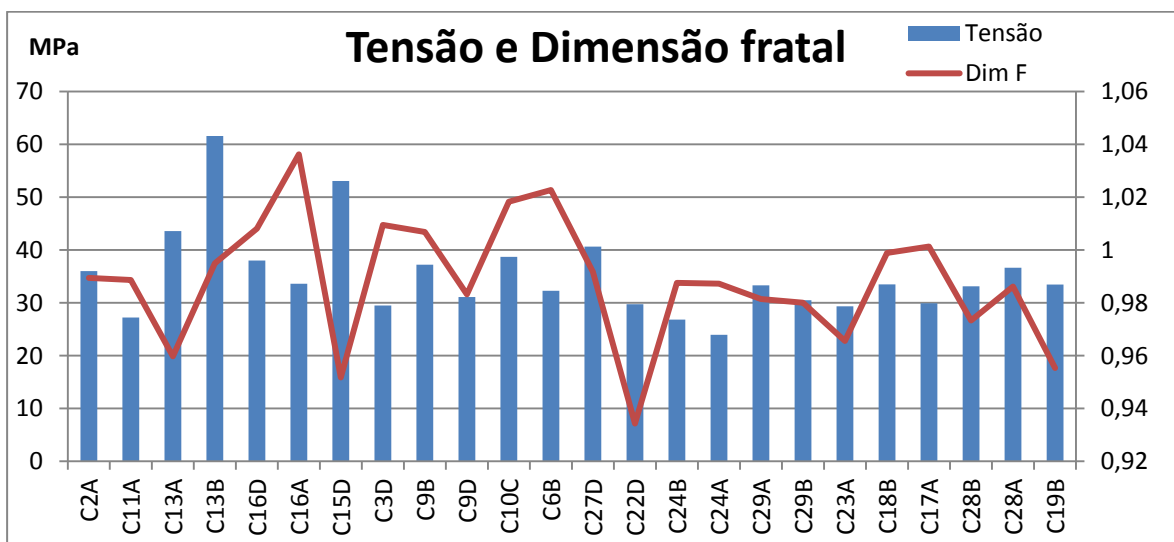


Figura 53 - Gráfico de comparação entre tensão máxima no ensaio de esmagamento e a dimensão fractal do contorno da zona de dano do furo.

Quanto à dimensão fractal, conseguimos ver no gráfico uma relação com a tensão em algumas sucessões de provetes mas não de forma tão direta como no caso da área de dano. Do provete C24A ao provete C18B, podemos ver que a dimensão fractal acompanha as subidas e descidas do valor de tensão.

A partir deste trabalho conseguiu-se fazer um poster e apresentá-lo na conferência “Materiais 2015” realizada em Julho. Foi também possível a elaboração de um artigo

7. Conclusões e recomendações para trabalhos futuros

A resina de epóxico reforçada com partículas de borracha e fibras de cana-de-açúcar apresenta interessantes características mecânicas e é uma alternativa à queima dos desperdícios desses dois tipos de reforço.

Com este trabalho, os principais objetivos foram a análise do material, identificando qual a composição ideal tendo em vista as melhores propriedades mecânicas, a furação de placas e posterior análise e caracterização do dano, e ainda a realização de ensaio mecânico de esmagamento às placas furadas.

Com este trabalho podemos tirar várias conclusões interessantes acerca do material estudado. Relativamente à quantidade de borracha presente no material, facilmente se conclui que com 25% de borracha conseguimos assim obter melhores propriedades mecânicas do que com 50% de borracha. Quanto ao tamanho das partículas podemos concluir que a diferença entre os valores de tensão de rotura (σ_{rot}) e módulo de elasticidade (E) não é muito elevada, mas para provetes com 25% de borracha é mais indicado o uso de partículas maiores (50-80 *US*

Tyler), e para provetes com 50% será melhor usar partículas de borracha mais pequenas (100-200 *US Tyler*).

Quanto à quantidade de fibras presente nas amostras se olharmos para as Tabelas 14 e 15 (página 69) podemos ver o grupo de provetes com módulo de elasticidade (E) mais alto e mais baixo e com tensão de rotura (σ_{rot}) mais alta e mais baixa. Destas tabelas podemos então concluir que a percentagem de fibras presente nos provetes pouco ou nada influencia os resultados que podem ser retirados dos ensaios de tração (σ_{rot} e E). De maneira a saber qual é verdadeiramente a influência que a quantidade de fibras tem nas propriedades mecânicas, deveria ser feito um estudo onde apenas esse parâmetro fosse variado.

À semelhança do tamanho das partículas de borracha, o tamanho e a quantidade de fibras de cana-de-açúcar também não influencia muito as propriedades mecânicas deste tipo de material. Em provetes com 25% de borracha (ω_t - fração mássica) a utilização de fibras curtas (5mm de comprimento) permite obter provetes com maior rigidez (E), enquanto que com fibras longas (20mm) os provetes apresentam maior resistência mecânica (maior σ_{rot}). Para os provetes com 50% de borracha observou-se que a utilização de fibras longas é aconselhada.

Relativamente ao tratamento das fibras é difícil tirar conclusões deste parâmetro. Sabemos que a quantidade de fibras pouco influencia as propriedades mecânicas, mas quando observamos as tabelas da primeira secção do capítulo 6, em todas elas vemos que os provetes com melhores propriedades mecânicas são os provetes cujo as fibras não levaram tratamento químico. Na Tabela 15 podemos ver que dois provetes com os mesmos parâmetros de fabricação, exceto se as fibras levaram ou não tratamento, podemos ver que existe uma diferença de valor de σ_{rot} de quase metade do maior para o menor (19,00 MPa e 10,97 MPa). Num material onde a percentagem de fibras não influencia muito as propriedades mecânicas do mesmo, observar que o tratamento das fibras influencia muito essas propriedades é uma incongruência. Isto pode estar relacionado com a qualidade de fabricação dos provetes, pois, como já foi referido no capítulo anterior, alguns provetes apresentavam grande quantidade de defeitos, o que pode ter induzido um erro aos resultados obtidos.

O tipo de processamento de imagem utilizado durante a realização deste trabalho pode ser muito útil não só para o estudo da furação e delaminação de compósitos de fibras naturais

como também para os compósitos em geral. Especialmente para os compósitos reforçados com elevadas percentagens de fibras onde a delaminação tem grande importância.

Da análise e do processamento de imagem podemos concluir que parâmetros como a área de dano e os fatores de delaminação são muito úteis para a caracterização da zona de dano de um furo. Conseguimos também concluir que de todos os parâmetros analisados, o fator equivalente de delaminação é o que melhor se relaciona dimensão fractal do contorno da zona de dano de um furo.

Existem ainda outros fatores de delaminação, uns mais complexos e outros menos, que seria também interessante estudar e analisar o seu comportamento quando relacionados com a dimensão fractal.

Apesar dos parâmetros de caracterização da zona de dano de um furo serem mais úteis para materiais com maiores quantidades de fibras, podemos ver a utilidade da sua aplicação para o material estudado neste trabalho.

A resina de epóxico, reforçada com partículas de borracha e fibras de cana-de-açúcar apresenta uma boa maquinabilidade. Isto deve-se em parte à baixa quantidade de fibras presente no material e à utilização de borracha como reforço. Dos vários parâmetros de maquinação de furos utilizados, podemos então concluir que os mais indicados para provetes com 25% de borracha são a utilização de uma broca helicoidal e um avanço de 0,12mm/rotação, e para os provetes com 50% de borracha a utilização de uma broca tipo *Brad* com um avanço de 0,12 mm/rotação ou então de uma broca helicoidal com um avanço de 0,3 mm/rotação.

Um maior cuidado durante a fabricação dos provetes, utilização de um número maior de provetes e uma melhor gestão do tempo são algumas recomendações deixadas para trabalhos futuros.

8. 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] W. G. Roeseler, B. Sarh, and M. U. Kismarton, “Composite Structures: The First 100 Years,” *16th Int. Conf. Compos. Mater.*, pp. 1–10, 2007.

- [8] “History of Composites; <http://composite.about.com/od/aboutcompositesplastics/a/HistoryofComposites.htm>; Consultado em: 01-10-2015,” *Nature*.
- [9] A. G. de Magalhães and M. Dores de Castro, “Apontamentos de Materiais Não Metálicos - Instituto Superior de Engenharia do Porto,” 2011.
- [10] “<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.”
- [11] D. F. Adams, “Engineering composite materials,” *Composites*, vol. 18, no. 3, p. 261, 1987.
- [12] M. F. S. F. de Moura, A. B. de Morais, and A. G. de Magalhães, “Materiais compósitos Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico.” Publindústria, Produção de Comunicação, Lda., 2005.
- [13] “<http://www.dupont.com/>, consultado em 13-08-2015,” p. 2015, 2010.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.

- [22] 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.
- [23] F. Lachaud, R. Piquet, F. Collombet, and L. Surcin, "Drilling of composite structures," *Compos. Struct.*, vol. 52, no. 3–4, pp. 511–516, 2001.
- [24] Z. L. Yu and S. Boseck, "Scanning acoustic microscopy and its applications to material characterization," *Rev Mod Phys*, vol. 67. pp. 863–891, 1995.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] U. A. Khashaba, "Delamination in drilling GFR-thermoset composites," *Compos. Struct.*, vol. 63, no. 3–4, pp. 313–327, 2004.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.

- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] P. D. Luís Miguel, H. P. Túlio, S. c Fabrizio, S. L. M. R. Filho, and P. R. Oliveira, “Damage assessment of fibre reinforced laminates,” *Compos. Struct.*, vol. 1, 2015.
- [38] F. Pacheco-Torgal, Y. Ding, and S. Jalali, “Properties and durability of concrete containing polymeric wastes (tyre rubber and polyethylene terephthalate bottles): An overview,” *Construction and Building Materials*, vol. 30. pp. 714–724, 2012.
- [39] “<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1417>, consultado em 07-10-2015.”
- [40] “<http://www.mathworks.com/discovery/image-segmentation.html>; Consultado em 14-10-2015.”
- [41] L. M. P. Durão, A. G. Magalhães, A. T. Marques, A. M. Baptista, and M. Figueiredo, “Drilling of Fibre Reinforced Plastic Laminates,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 587–588, no. April, pp. 706–710, 2008.
- [42] B. T. Bowler, “Carbon fibre planes: Lighter and stronger by design,” no. January, pp. 27–29, 2014.
- [43] 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.
- [44] C. Cavette, “<http://www.carbonfiberglass.com/carbon-fiber-robotic-arm/>, consultado em 01-10-2015,” *How Prod. Are Made*.
- [45] “<http://www.brendanlove.com/blog/category/viking-inc/>, consultado em 01-10-2015,” pp. 1–8, 2015.
- [46] “<http://www.jecomposites.com/news/composites-news/first-natural-fiber-monobloc-chair>, consultado em 01-10-2015.”
- [47] “<http://www.autoconnesse.it/auto-connesse/bmw-i3/>; consultado em 01-10-2015.”
- [48] “<http://www.allatsea.net/inside-grady-white>, consultado em 13-08-2015.”
- [49] “<http://pbr.cpicfiber.com/processos.aspxcodigo=3&cat=Processos>, consultado em 14-08-2015.”.
- [50] A. G. de Magalhães, “Apontamentos de Seleção de Materiais e Processos de Fabrico-Instituto Superior de Engenharia do Porto,” 2014.

- [51] “<http://br.cpicfiber.com/processos.asp?codigo=7&cat=Processos>, consultado em 12-10-2015.” .
- [52] “http://www.boasnoticias.pt/noticias_Design-portugu%C3%AAs-ganha-pr%C3%A9mio-nos-EUA_4653.html, consultado em 12-10-2015.”
- [53] “<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABa7kAF/pultrusao-arrumado>, consultado em 12-10-2015.”
- [54] M. Naeem, “Laser machining fiber - reinforced composites,” no. 5, pp. 1–10, 2015.
- [55] D. Kim and M. Ramulu, “Drilling process optimization for graphite/bismaleimide-titanium alloy stacks,” *Compos. Struct.*, vol. 63, no. 1, pp. 101–114, 2004.

9. Anexos

DAMAGE ASSESSMENT MODEL FOR DRILLED COMPOSITES LAMINATE PLATES

Resumo. As características distintivas dos materiais compostos, 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 maquinação, como por exemplo a furação, para 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 no 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 D5961M-13). 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: Compositos de matriz polimérica; tratamento e análise de imagem; avaliação do dano; ensaios não-destrutivos; ensaio de esmagamento

Introdução

Os materiais compostos 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 automóvel, a aeronáutica ou a aeroespacial. Apesar das suas vantagens, este tipo de materiais apresenta certas dificuldades perante a maior parte dos processos de maquinação. A desagregação da matriz, o arrancamento das fibras e o mau aspeto superficial resultante são obstáculos ao seu uso. A furação de materiais compostos, é uma operação de maquinação indispensável em muitas aplicações. Contudo pode ser considerada uma operação que apresenta uma grande tendência para causar a delaminação do material sendo este o mais crítico. [drilling aircrafts].

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

Este estudo foi realizado, de forma a apresentar um parâmetro para auxiliar ao 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 medição 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 radiografias e com o auxílio de algoritmos de análise e processamento de imagem no MatLab®. Os resultados obtidos neste trabalho, demonstram que o conhecimento das propriedades do material e os parâmetros de maquinação são de elevada importância na obtenção de uma estratégia de furação de materiais compostos que conduza a um aumento da fiabilidade das peças.

Geometria da Broca

Twist (120° / 85° point angle)



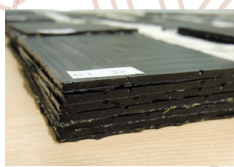
Parâmetros de Corte

Rotação:
1180 rpm (21 m/min) e 1800 rpm (34 m/min)

Avanço:
0.12 (baixo) e 0.30 mm/rev (alto)

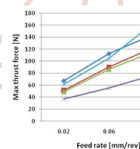


Equipamento e Material

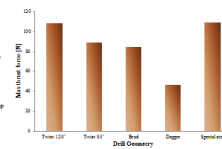


Resultados

Feed rate influence

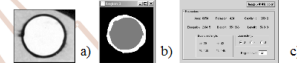


Drill geometry effect



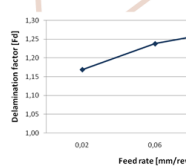
Delamination Factor (F_d) [10], a ratio between the maximum delaminated diameter (D_{max}) and hole nominal diameter (D)

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

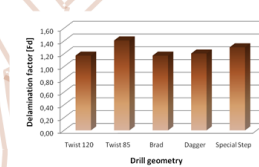


Example of image processing and analysis results [11]: a) original radiography; b) resultant image (in grey is the hole are; in white is the delaminated region); c) measurement results.

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.

Referências

- [1] H. Hocheng and C. C. Tsao, J. of Materials Processing Technology, v. 167, (2005), p. 251.
- [2] H. Hocheng, C. K. H. Dhasan, Journal of Engineering for Industry, v. 112, (1990), p. 236.
- [3] R. Piquet, B. Ferret, F. Lachaud and P. Swider, Composites A, v. 31, (2000), p. 1107.
- [4] L. M. P. Durão, J. M. R. S. Tavares, A. T. Marques, A. M. Baptista, A. G. Magalhães, Int. Journal of Materials and Product Technology, v. 32, (2008), p. 226.
- [5] K.-Y. Park, J. H. Choi, D. G. Lee, J. Composite Materials, v. 29, (1995), p. 1988.
- [6] R. Sibone and K. Krishnamurthy, Int. J. Machine Tools & Manufacture, v. 36 (1996), p. 983.
- [7] J. P. Davau, P. Emt, Materials and Design, v. 24, (2003), p. 312.
- [8] H. Hocheng and C. C. Tsao, Int. J. Machine Tools & Manufacture, v. 46, (2006), p. 1403.
- [9] C. C. Tsao and H. Hocheng, J. Materials Processing Technology, v. 192-193, (2007), p. 37.
- [10] W. C. Chen, Int. J. Machine Tools & Manufacture, v. 37, (1997), p. 1097.
- [11] A. T. Marques, L. M. Durão, A. G. Magalhães, J. F. Silva, J. M. R. S. Tavares, Composites Science and Technology, DOI: 10.1016/j.compscitech.2009.01.025

DRILLING DELAMINATION OUTCOMES ON GLASS AND SISAL REINFORCED PLASTICS

Luís Miguel P. Durão^{1a}; Daniel J.S. Gonçalves², João Manuel R.S. Tavares²,
Victor Hugo C. de Albuquerque^{2,3}, Túlio H. Panzera⁴, Leandro J. Silva⁴,
A.A. Vieira², A. M. Baptista²

1 Inst. Superior de Eng. do Porto (ISEP) / Centro Invest. e Desenv. em Eng. Mecânica (CIDEM)

2 Fac. Eng. da Universidade Porto (FEUP) / Inst. de Eng. Mecânica e Gestão Industrial (INEGI)

3 Graduate Program in Applied Informatics, Center of Techn. Sciences, Univ. of Fortaleza, Brasil

4 Universidade Federal de São João Del-Rei – UFSJ; DEMEC – Dept. Eng. Mecânica, Brasil

^a imd@eu.ipp.pt (corresponding author)

Keywords: glass fibre; sisal fibre; drilling; delamination; image analysis.

Abstract. Nowadays, fibre reinforced plastics are used in a wide variety of applications. Apart from the most known reinforcement fibres, like glass or carbon, natural fibres can be seen as an economical alternative. However, some mistrust is yet limiting the use of such materials, being one of the main reasons the inconsistency normally found in their mechanical properties. It should be noticed that these materials are more used for their low density than for their high stiffness.

In this work, two different types of reinforced plates were compared: glass reinforced epoxy plate and sisal reinforced epoxy plate. For material characterization purposes, tensile and flexural tests were carried out. Main properties of both materials, like elastic modulus, tensile strength or flexural modulus, are presented and compared with reference values.

Afterwards, plates were drilled under two different feed rates: low and high, with two diverse tools: twist and brad type drill, while cutting speed was kept constant. Thrust forces during drilling were monitored. Then, delamination area around the hole was assessed by using digital images that were processed using a computational platform previously developed. Finally, drilled plates were mechanically tested for bearing and open-hole resistance. Results were compared and correlated with the measured delamination.

Conclusions contribute to the understanding of natural fibres reinforced plastics as a substitute to glass fibres reinforced plastics, helping on cost reductions without compromising reliability, as well as the consequence of delamination on mechanical resistance of this type of composites.

Introduction

The increased knowledge of their properties and the advances on its processing techniques have allowed an increasingly wide use of polymer matrix composite materials. Although the most common applications are related to the use of glass or carbon fibres as reinforcement material, the use of natural reinforcement fibres has deserved greater attention. One of the reinforcement materials whose interest has increased is sisal fibre. According to Silva [1] this interest in sisal fibres as reinforcement material emerged due to the increasing search for low-

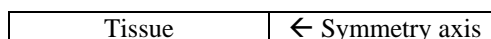
cost materials from renewable environmental friendly materials. The use of natural fibre composites is still limited to the mistrust on their properties. Recent studies [2-8] involving the addition of nano-particles in composite laminates, has shown an improvement of mechanical properties such as impact resistance, fracture toughness, tensile and flexural strength, elastic modulus, structural damping, decomposition and glass transition temperatures. The comparison of different types of composites, having in common the matrix material, allows the assessment of mechanical performance improvements obtained. The synthetic reinforcement material whose properties have minor differences to the composites reinforced with sisal is glass fibre.

Although composite parts are produced to near-net shape, finishing operations as drilling, to allow the assembly of parts, are usually required. It is accepted that these operations can be carried out with conventional tools and machining equipments with some adaptations. However, as a result of composites anisotropy, this operation can lead to different kind of damages. The most frequent and visible evidence of damage is the existence of a damage border around the machined hole, namely at the exit side of the drill. The most referred damages that can occur in consequence of drilling operations are delamination, fiber pull-out and thermal damages [9]. From these damages, delamination is considered the most serious one as it can lead to a reduction of the mechanical properties of the laminate [10]. Thus, it is evident that minimization or even the elimination of this damage is of paramount importance to the industries associated to composite materials. However, this outcome has to be the result of increased knowledge of the damage mechanisms and control of the cutting conditions that lead to its onset and propagation. Focusing on delamination, two different mechanisms are normally referred to: peel-up and push-out. The first mechanism is a consequence of the drill entrance in the upper plies of the plate and can be avoided with the use of low feeds [11]. On the other hand, the second mechanism is a result of the indentation effect caused by the quasi-stationary drill chisel edge, acting over the uncut plies of the laminate. Then, the plies tend to be pushed away from the plate, causing the separation of two adjacent plies of the laminate [11]. Finally, if the thrust force exerted by the drill exceeds the interlaminar fracture toughness of the plies, delamination takes place [11]. The reduction of delamination has been the subject of several studies, see for example, [12-16]. The reduction of delamination can be achieved through the proper selection of machining conditions involving feed or cutting speed [13-14], the material and the tool geometry [15] as well as drilling parameters monitoring and control [16].

In this work, two materials for composite plates are compared for thrust force during drilling, delamination extension and mechanical properties of drilled plates, using two different drill geometries: twist and Brad, and two feed rates: low (0.05 mm/rev) and high (0.20 mm/rev). Thrust forces were monitored during drilling for thrust force data collection; delamination extension was carried out through digital scanner and enhanced digital radiography; mechanical testing was performed in order to evaluate mechanical strength loss due to hole machining. Finally, the consequences of hole drilling in these two types of composite plates are discussed.

Materials and Methods

Glass/epoxy plates. Composite plates with glass fibre reinforcement were obtained by manual lay-up combining symmetrical tissue and mat. In order to have a final thickness of 2.5 mm, 7 plies were stacked according to Figure 1. Laminate was cured at room temperature until a Barcol hardness of 40 was reached.



Mat	
Tissue	
Mat	
Tissue	
Mat	
Tissue	

Figure 1 – Stacking sequence adopted for the glass/epoxy plates.

From these plates, coupons for drilling and mechanical tests were cut. Dimensions of coupons were according to ASTM D 5766M-07 - Open Hole Tensile Strength Test [17] and ASTM D 5961M-08 - Bearing Test [18].

Sisal/epoxy plates. For these plates, the fabrication method was also hand lay-up. Sisal fibres were used as received from SisalSul (São Paulo, Brazil). In order to ensure fibre alignment a special accessory was used. Laminate cure was at room temperature for 24h and then the plates were cut in the same dimensions as those used for glass/epoxy plates.

Final properties of both plates are presented in Table 1.

PROPERTY	GLASS/EPOXY	SISAL/EPOXY
Specific weight (g/cm ³)	1.70	1.14
Tensile strength (MPa)	223.0	156.9
Elastic Modulus (GPa)	11.8	5.7
Flexural strengthss (MPa)	176.0	62.5
Flexural modulus (GPa)	4.1	2.3

Table 1 – Mechanical properties of glass/epoxy and sisal epoxy plates.

Plate drilling. Drilling operation was carried out in a 3.7 kW *DENFORD Triac Centre* CNC machine. During drilling, axial thrust forces were monitored with a *Kistler 9257B* dynamometer associated to an amplifier and a computer for data collection. The composite laminate was fixed on the machine using an appropriate clamping device. No sacrificial plates were used.

Considering the purpose of this work, two different 6 mm tungsten carbide drills were used: twist drill and ‘Brad’ drill, Figure 2.

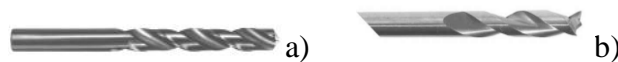


Figure 2 – Drills: a) twist; b) Brad.

Twist drill is a standard drill commonly used in workshops. Brad drill has a specific point geometry causing the fibre tensioning prior to cut thus enabling a “clean cut” of the fibres. In consequence, machined surfaces are smoother. Cutting parameters were selected in accordance with past experience [13, 14, 19]. Spindle speed was set to 2800 rpm for all tryouts, and two feeds, low and high, were used. Low and high feeds were set to 0.05 mm/rev and 0.20 mm/rev, respectively.

Damage extension assessment. After machining completion, it was necessary to evaluate the delaminated region around the drilled hole by using digital images. With this purpose, two different methods were used for further comparison: digitalization of the plate in a table scanner connected to a PC, and enhanced digital radiography.

For the first method, grayscale images of the tool exit side of the plate were acquired. These images needed posterior processing in order to improve contrast and help on the

separation of delaminated areas. The delaminated region corresponds to a circular area around the drilled hole, as shown in Figure 3.

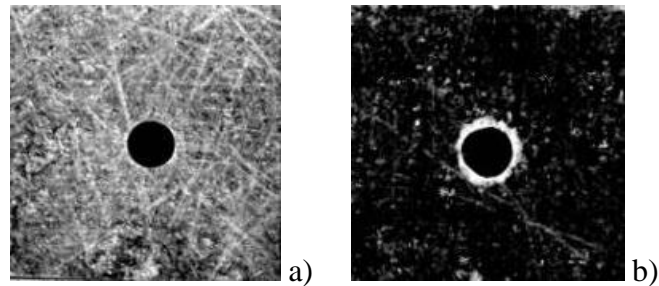


Figure 3 – Original scanner image a) and after contrast enhancement b).

For the second process, plates were prior immersed in di-iodomethane for contrast: ten minutes for glass/epoxy plates and fifteen seconds for sisal/epoxy plates, due to their hygroscopic nature. Then the radiography images were acquired using a 60 kV, 300 kHz Kodak 2100 X-Ray system associated with a Kodak RVG 5100 digital acquisition system. Figure 4a) shows an image obtained. Digital radiographies were processed by using a computational platform in order to obtain the segmentation and characterization of the interest regions [19]. From the measurement procedure, the values of the damaged area, according to the delamination factor criterion proposed by Chen [20] that is defined as the ratio of the maximum delaminated diameter to the nominal hole diameter, were obtained. Figure 4 shows an example image of a sisal/epoxy plate with correct immersion time (Figure 4a) and an extended immersion time (Figure 4b).

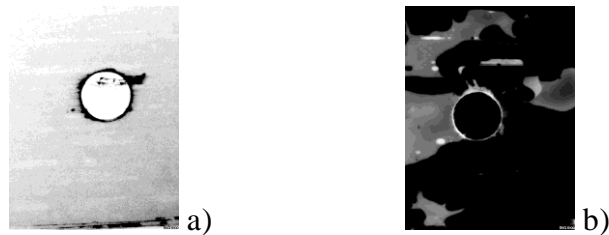


Figure 4 – Sisal/epoxy plate radiography images with correct immersion time a) and after an extended immersion time b).

Mechanical Testing. The mechanical tests carried out were the Open-hole tensile strength test, ASTM D5766M-07 [17], and the Bearing test, ASTM D5961M-08 [18]. These tests were considered with the purpose of assessing the effect of delamination on the mechanical properties of the drilled plates. For that, test coupons of $250 \times 36 \text{ mm}^2$ and $135 \times 36 \text{ mm}^2$ were cut and drilled under the same experimental conditions previously described. The tests were performed in a *Shimadzu AG-X/100 kN Universal Testing* machine equipped with the necessary accessories to run the different tests and connected to a computer for machine control and data acquisition and processing.

Results and discussion.

Thrust forces during drilling. Results considered for thrust force are the maximum value observed during drilling. As the delamination onset largely depends on thrust force during drilling, higher thrust forces normally correspond to higher delamination, everything else remaining constant. Due to signal variation along drill rotation, thrust force values were

averaged over one spindle revolution. Additionally, to reduce the influence of outlier values, the results considered were the average of four experiments under identical conditions.

Independently of the drill geometry or plate material, the thrust force was always superior with increased feed rates, Figure 5. This was an expected outcome and it confirms previous works [13, 14]. However, the variation due to feed increase was more evident for twist drill. Thrust force analysis shows that Brad drills are more recommendable for the drilling of these plates, under the experimental conditions described. Thrust forces in sisal/epoxy plates drilling were always lower. This can be attributed to the reduced mechanical resistance of these plates, when compared to glass/epoxy plates (Table 1).

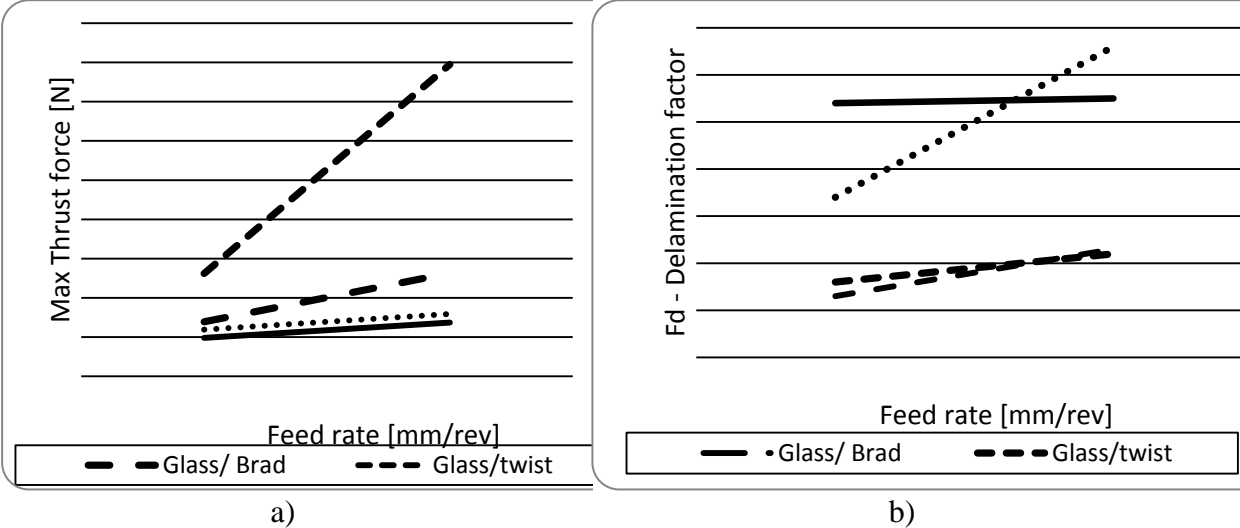


Figure 5 – Effect of feed rate on thrust force a) and delamination factor b).

Delamination extension. Delamination extension was measured according to both procedures already described. Due to the bad quality of sisal images obtained by scanner process, the results from this method are only presented for glass/epoxy plates. As expected, for large feed rate, delamination is more extended, Figure 5b). This outcome stresses the general idea that low feed rates should be used when drilling composite laminates. Another result to be noted is the variation due to feed rate, more evident for twist drill in sisal/epoxy plates and for Brad drill in glass/epoxy plates. This can give an indication on the choice of drill geometry according to the type of composite plate to be drilled. In addition, it is possible to say that delamination at sisal/epoxy plates is always higher, due to their lower mechanical resistance.

Mechanical test results. Results from the two mechanical tests used to evaluate mechanical properties after drilling are presented in Figure 6. From the results, it is not clear that a correlation between cutting parameters or delamination extension with tensile strength or bearing strength can be established. However, it is possible to draw some conclusions. The results seem to be more dependent on the material properties than on the drilling conditions. A blunt effect appears to exist, decreasing residual stresses around the hole, thus increasing open-hole tensile strength for higher feed rate plates. Sisal/epoxy plates are not very reliable for screw or bolt connections as it is revealed by the low bearing test results. It should be noted that this can also be the consequence of the stacking sequence of sisal/epoxy plates, as the fibre orientation is unidirectional. Future tests with cross-ply plates should study this assumption.

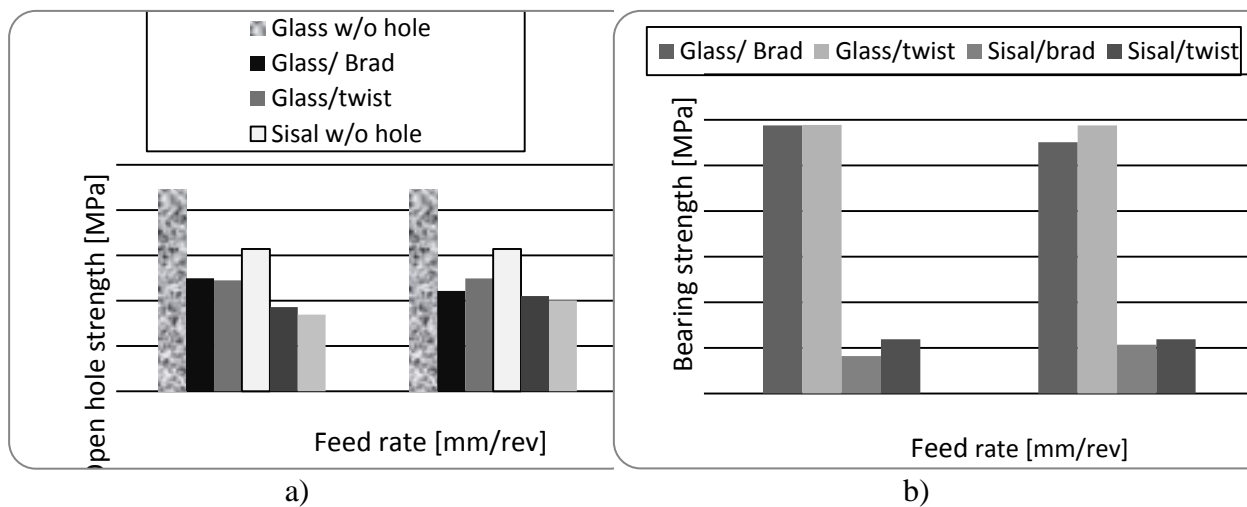


Figure 6 – Mechanical test results: open-hole tensile strength test a) and bearing test b).

Conclusions

A comparison of glass/epoxy and sisal/epoxy plates mechanical performance after drilling was presented. Experimental work included thrust force monitoring during drilling and measurement of delamination extension and mechanical testing after drilling. Based on the experimental work and conditions presented, some conclusions can be drawn:

- maximum thrust force and delamination extension depend on drilling conditions, tool geometry and material;
- for higher feed rates, thrust force and delamination extension are superior;
- mechanical test results are more dependent of material nature than on drilling conditions;
- sisal/epoxy unidirectional plates are not well suited for screw or bolt connections;
- these results need to be further confirmed by testing cross-ply or mat sisal/epoxy plates.

Acknowledgements

This work was partially supported by FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia) – Portugal, in the scope of the strategic funding project PEst-OE/EME/UI0615/2011.

Authors would like to acknowledge the support given by the Workshop Section of DEM/ISEP, namely Eng. Victor Ribeiro and to the second cycle students of Mechanical Engineering João Silva, David Silva e Pedro Pereira for the cooperation given in order to accomplish this work.

The fourth author thanks National Council for Research and Development (CNPq) and Cearense Foundation for the Support of Scientific and Technological Development (FUNCAP) for providing financial support through a DCR grant (project number 35.0053/2011.1) to UNIFOR.