



Marina Isabel Moreira Alves

Licenciatura em Ciências da Engenharia Mecânica

Metodologia de Quantificação do Dano Resultante da Furação de Materiais Compósitos

Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Doutora Carla Maria Moreira Machado, Professora
Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor António José Freire Mourão, Professor Associado,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa

Arguente: Doutora Teresa Leonor Ribeiro Cardoso Martins Morgado,
Professora Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade Nova de Lisboa

Vogal: Doutora Carla Maria Moreira Machado, Professora
Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2018

Metodologia de Quantificação do Dano Resultante da Furação de Materiais Compósitos

Copyright © Marina Isabel Moreira Alves, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais, irmã e sobrinho

Agradecimentos

Ao longo do meu percurso académico muitas foram as pessoas que me acompanharam. De alguma forma todas elas contribuíram para que eu pudesse alcançar este objetivo.

Um especial agradecimento à professora Carla Machado, pela oportunidade de realizar este trabalho desafiante, por toda a sua dedicação, motivação, disponibilidade e acima de tudo, pelos seus conselhos.

Aos meus pais, irmã e sobrinho, por toda a motivação, carinho, paciência e ajuda que me deram ao longo desta longa etapa. Mas sei que sem vocês não seria possível.

Um especial obrigado a todos os meus colegas, Joana Baracinha, Gonçalo Almeida, Tiago Joaquim, Nuno Pinto, Francisco Alho, Pedro Lopes, João Sá, João Gonzalez e Valter Escobar por todos os momentos, bons e menos bons, que passámos ao longo deste percurso. Colegas e amigos, pois continuam a fazer parte da minha vida.

A todos os meus antigos chefes e colegas do Continente Bom Dia do Pragal, que sempre me apoiaram e ajudaram, de forma que fosse possível a concretização deste meu projeto de vida.

Carolina Tavares, Bruna Fernandes, Susana Gerardo e Lucrecio Ramos, que sempre estiveram lá para me apoiar nos momentos mais importantes, fossem eles bons ou maus. Um muito obrigada.

Os materiais compósitos são cada vez utilizados a nível industrial, particularmente os materiais compósitos reforçados com fibra de carbono, devido às suas características, principalmente a alta resistência e o baixo peso. Os componentes produzidos a partir deste tipo de materiais são fabricados numa forma quase final, mas o processo de furação é normalmente utilizado para realizar os furos para ligações aparafusadas ou rebitadas. Este processo induz delaminação na periferia dos furos que deve ser estimada e caracterizada uma vez que pode originar problemas em relação às tolerâncias da montagem e provoca uma diminuição das propriedades mecânicas dos componentes de uma montagem. Da pesquisa bibliográfica, constata-se não existir um padrão para avaliação do dano provocado pelo processo de furação em materiais compósitos. Assim, se se pretender uma aplicação industrial generalizada que indique se um componente furado está ou não dentro de determinadas especificações, os resultados podem ser divergentes.

O objetivo principal deste trabalho é o estabelecimento de uma metodologia que permita quantificar, de forma unívoca, o dano que ocorre na furação a alta velocidade de materiais compósitos reforçados com fibra de carbono, no que diz respeito quer à sua dimensão, quer à sua geometria. Esta metodologia baseia-se no mínimo fator de delaminação, centrando a geometria do dano em si próprio e não no centro do furo como nos métodos atualmente utilizados. A outra diferença é o fato de a quantificação ser realizada através do cálculo do momento polar de inércia da área do dano. Aplicou-se esta nova metodologia a um conjunto de ensaios, e foi possível concluir que se consegue padronizar o dano induzido, uma vez que o valor quantificado é sempre único, por ser o menor possível, e é independente da sensibilidade do operador por toda a análise ser realizada automaticamente, através de algoritmos de processamento de imagem

Palavras-chave: Materiais Compósitos, Caracterização do dano, Delaminação, Processamento de imagem.

Abstract

Composite materials, particularly carbon fibre reinforced materials, increasingly are being used at several industries due to their characteristics, especially high strength and low weight. The composite components are manufactured in near-finished form, but the drilling process is usually applied to produce the holes for bolted or riveted connections. This process induces delamination at the periphery of the holes. As this damage causes problems with the tolerances of the assembly and causes a decrease in the mechanical properties of the components of an assembly, it should be accurately estimated and characterized. From the literature research, it is verified that there are no standards to evaluate the damage caused by the drilling process in composite materials. Thus, if a generalized industrial application is intended to indicate whether a drilled component is within certain specifications, the results may be divergent.

The main objective of this work is the establishment of a methodology that allows quantifying unequivocally the damage that occurs in the high speed drilling of carbon fibre reinforced composite materials, with respect to both their size and their geometry. This methodology is based on the minimum delamination factor, centring the geometry of the damage on itself and not in the centre of the hole as in the methods currently used. The other difference is that the quantification is performed by calculating the polar moment of inertia of the damage area. This new methodology was applied to a set of tests, and it was possible to conclude that it is possible to standardize the induced damage, as the quantified value is always unique since it is the smallest possible and independent from the operator's sensitivity. This methodology allows that the procedure analysis is performed automatically, using image processing algorithms.

Keywords: Composite materials, Damage characterization, Delamination, Image processing.

1. Enquadramento, Motivação e Objetivos	1
1.1. Introdução	1
1.2. Motivação e Objetivos	2
1.3. Estrutura da Dissertação.....	3
2. Estado da arte	5
2.1. Materiais Compósitos	5
2.2. Processo de furação.....	7
2.3. Dano resultante do Processo de Furação	8
2.4. Ensaios não Destrutivos	15
2.5. Momentos de inércia, vetores e valores próprios	17
3. Procedimento Experimental	19
3.1. Equipamento utilizado e caracterização do material.....	19
3.2. Aquisição e tratamento de imagem	21
3.3. Metodologia proposta.....	21
4. Apresentação e Discussão de Resultados	27
4.1. Fatores de delaminação	27
4.2. Quantificação do dano proposta	30
5. Conclusões e Trabalhos Futuros	35
5.1. Conclusões.....	35
5.2. Sugestões de Trabalhos Futuros.....	35
Referências Bibliográficas	37
Anexos	41

Índice de Tabelas

Tabela 3.1- Parâmetros estudados	25
Tabela 4.1- Valores do momento polar de inércia calculado com base no método proposto e no método clássico	33
Tabela A5.1- Valores do fator mínimo de delaminação proposto por <i>Silva</i> e do fator clássico de <i>Chen</i>	41
Tabela A5.2- Valores do fator de delaminação ajustado de <i>Davim</i> e fator clássico de <i>Chen</i>	42
Tabela A5.3- Valores da Dimensão do dano de <i>Khshaba</i> e fator clássico de <i>Chen</i>	43
Tabela A5.4- Valores do fator de delaminação bidimensional e fator clássico de <i>Chen</i>	44

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Composição do Boeing 787	5
Figura 2.2 - Composição do Airbus A350 XWB	6
Figura 2.3 - Tipos de orientação de fibras	7
Figura 2.4 - Delaminação causada pela furação	8
Figura 2.5 - Fator delaminação clássico (Fd)	9
Figura 2.6 - Diagrama do defeito	9
Figura 2.7 - Esquema da equação da dimensão do dano.....	9
Figura 2.8 - Esquema da evolução do fator bidimensional	10
Figura 2.9 - Diagrama do dano delaminação.....	10
Figura 2.10 - Caracterização do dano segundo Davim	11
Figura 2.11 - Caracterização do dano segundo Silva	12
Figura 2.12 - Ilustração dos fatores: (a) Fq e (b) Flq	14
Figura 2.13 - Esquema de funcionamento da radiografia convencional.....	16
Figura 3.1 - Centro de maquinagem LEADWELL VMC-15.....	19
Figura 3.2 - Sequência de produção dos provetes de CFRP	20
Figura 3.3 - Brocas helicoidais utilizadas (DIN 338 DORMER)	20
Figura 3.4 - Equipamento de análise radiográfica	21
Figura 3.5 - Metodologia proposta	22
Figura 3.6 - Imagem de subtração do furo teste V01	23
Figura 3.7 - Imagem do teste V04.....	23
Figura 3.8 - Circunferências dos fatores de delaminação clássico e mínimo proposto por Silva.....	24
Figura 3.9 - Representação gráfica dos resultados	24
Figura 3.10 - Tabela de <i>output</i> do programa desenvolvido	25
Figura 4.1 - Comparação do fator de delaminação de Chen com a dimensão do dano de Khashaba	27
Figura 4.2 - Comparação do fator de delaminação de Chen com o factor bidimensional de Faraz	28
Figura 4.3 - Comparação do fator de delaminação de Chen com o fator de delaminação ajustado de Davim.....	28
Figura 4.4 - Comparação do fator de delaminação de Chen com o fator de delaminação mínimo .	29
Figura 4.5 - Comparação do fator de delaminação de Davim com o fator de delaminação mínimo.....	29
Figura 4.6 - Comparação do Momento Polar de Inércia com origem no centro do furo e Momento Polar de Inércia com origem no centro do dano	31
Figura 4.7 - Ilustração das circunferências centradas na origem do furo e centradas na origem do dano.....	31
Figura 4.8 - Comparação do Momento Polar de Inércia com origem no centro do furo e Momento Polar de Inércia com origem no centro do dano	32
Figura 4.9- Ilustração das circunferências centradas na origem do furo e centradas na origem do dano em dano irregular	32

Nomenclatura

A nomenclatura utilizada ao longo deste trabalho segue-se acompanhada dos respetivos significados. Contudo estes significados podem-se obter na lista abaixo apresentada, facilitando assim a sua consulta. Esta encontra-se dividida em duas partes: Símbolos e Siglas.

Símbolos

F_d	Fator de delaminação
D_{max}	Diâmetro máximo da zona danificada (mm)
D	Diâmetro do furo (mm)
R_{max}	Raio máximo do dano (mm)
R	Raio do furo (mm)
F_a	Fator de delaminação bidimensional
A_d	Área do dano (mm^2)
A_{nom}	Área nominal do dano (mm^2)
F_{da}	Fator de delaminação ajustado
A_d	Área onde ocorre o dano (mm^2)
A_{max}	Área correspondente ao diâmetro máximo (mm^2)
A_0	Área do furo (mm^2)
F_{dmin}	Fator de delaminação mínimo
D_{min}	Diâmetro da área envolvente ao dano (mm^2)
D_0	Diâmetro do furo (mm^2)
F_q	Fator do rácio das áreas
F_{Iq}	Fator do rácio dos momentos de inércia
A_1	Área do 2º quadrante da circunferência (mm^2)
A_2	Área do 4º quadrante da circunferência (mm^2)
A_3	Área do 1º quadrante da circunferência (mm^2)
A_4	Área do 3º quadrante da circunferência (mm^2)
R_{nom}	Raio nominal do furo (mm)
I_x	Momento de inércia segundo o eixo do x (mm^4)
I_y	Momento de inércia segundo o eixo do y (mm^4)
$I_{x'}$	Momento de inércia segundo o eixo do x (mm^4)

$I_{y'}$	Momento de inércia segundo o eixo do y (mm^4)
J_0	Momento polar de inércia (mm^4)
I'_x	Momento de inércia através do eixo paralelo y (mm^4)
I'_y	Momento de inércia através do eixo paralelo x (mm^4)
A	Área nominal do dano (mm^2)
d_y	Distância do eixo do y ao novo centróide (mm)
d_x	Distância do eixo do x ao novo centróide (mm)
P_{xy}	Produto de inércia
I	Matriz de inércia
I_n	Matriz identidade

Siglas

CFRP	Polímeros reforçados com fibra de carbono
GFRP	Polímeros reforçados com fibra de vidro
END	Ensaio não destrutivo
HSS	<i>High-speed steel</i>
WC	<i>Tungsten Carbide Drill</i>
CFRP	Polímeros reforçados com fibra de carbono
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
DAQ NI	<i>Data Acquisition - National Instruments</i>

1. Enquadramento, Motivação e Objetivos

1.1. Introdução

Os avanços tecnológicos na indústria fazem com que seja cada vez mais uma prioridade desenvolver novas metodologias para o processamento dos diversos materiais, de forma a maximizar a eficiência dos processos envolvidos. O forte desenvolvimento na produção e utilização de novos materiais, nomeadamente os materiais compósitos, faz com que este tema esteja num crescente desenvolvimento a nível de produção. Uma vez que os compósitos utilizados na indústria aeronáutica, aeroespacial e automóvel, são os materiais com maior relevância por constituírem o grupo com maior e mais crescente utilização, faz todo o sentido a sua investigação [1].

Apesar de os componentes produzidos a partir deste tipo de materiais serem fabricados numa forma quase final, devido aos meios utilizados, é inevitável a maquinagem para a concretização do produto final. Assim sendo, os vários tipos de processos de maquinagem têm sido alvo de inúmeros estudos [2]. No entanto, em termos industriais, o mais utilizado é a furação, porque este tipo de componente necessita de ser montado em estruturas ligadas habitualmente por rebites ou parafusos.

A operação de furação induz danos nos componentes, nomeadamente na periferia dos furos realizados, e os mais frequentes são a delaminação (essencialmente à entrada e/ou saída da broca), as fissuras interlaminares, o descolamento fibra/matriz, o arrancamento das fibras e os danos térmicos [1]. O dano mais importante é a delaminação, uma vez que pode originar problemas em relação às tolerâncias da montagem e provoca uma diminuição das propriedades mecânicas dos componentes de uma montagem e, conseqüentemente, uma redução na sua fiabilidade quando em uso acrescentando o potencial de deterioração a longo prazo quando sujeitos a fadiga.

As estruturas consideradas, de alto desempenho e baixo peso, são conjuntos de componentes que devem ter um alto nível de integração. Como são projetadas para operar em condições extremas, é exigido um alto padrão no que diz respeito à segurança e fiabilidade. As estruturas referidas são solicitadas de forma distinta consoante a sua aplicação. Torna-se então de extrema importância a análise e caracterização do dano induzido nos furos e a sua relação com os possíveis mecanismos de falha das ligações estruturais [3].

Na literatura consultada [4, 5], em estudos realizados com o intuito de analisar os efeitos das variáveis do processo de furação, são apresentados vários métodos de quantificação do dano induzido. Em todos os métodos descritos, a metodologia em que são aplicados inicia-se com a aquisição de uma imagem do dano. No entanto, nenhum deles se pode considerar suficientemente

robusto para permitir a reprodutibilidade e ser considerado como uma potencial unidade comparativa de dano. Na realidade, alguns dos métodos apresentados possuem dependência de decisões do operador. Além disso, a quantificação do dano é em si um ponto de discussão, uma vez que não está estabelecido nenhum padrão sobre qual o método de quantificação de dano a ser utilizado. Adicionalmente, não estão definidos valores, quantitativos ou qualitativos, para o que constitui um dano aceitável em função da aplicação prevista do componente.

1.2. Motivação e Objetivos

Através da análise dos trabalhos de investigação já realizados [6, 7], constata-se não existir um padrão para avaliação do dano provocado pelo processo de furação em materiais compósitos. Na realidade, cada autor, como por exemplo Chen [4], Durão [5] e Silva [8], propõe uma diferente metodologia e, inclusivamente, diferentes meios de quantificação do dano. Desta forma, se se pretender uma aplicação industrial generalizada que indique efetivamente se um componente furado está ou não dentro de determinadas especificações, os resultados podem ser divergentes. Na realidade, mesmo estas especificações não se encontram totalmente definidas, provavelmente por não estar devidamente investigado o efeito deste tipo de dano na vida útil dos componentes.

A presente dissertação teve como base todo o trabalho que tem vindo a ser desenvolvido no Núcleo de Tecnologia Industrial do DEMI relativamente ao dano induzido pelo processo de furação em componentes de materiais compósitos reforçados com fibra de carbono de matriz epóxida. Até ao momento, as contribuições provenientes dos vários estudos realizados permitiram:

- Correlacionar as diferentes variáveis do processo de furação para minimização do dano induzido;
- Propor uma nova forma de fixação dos componentes para minimização do dano de delaminação;
- Diminuir a sensibilidade do método relativa ao operador com melhoria evidente em termos de comparabilidade de resultados utilizando algoritmos de *threshold* automáticos;
- Propor um novo método de quantificação baseado na mínima circunferência circunscrita ao dano e centrada no mesmo (fator de delaminação mínimo);
- Verificar que a quantificação através do cálculo de um fator não é suficiente para a caracterização do dano de delaminação e que a geometria do dano e a sua disposição em redor do furo realizado são de extrema importância;
- Desenvolver uma ferramenta computacional, em *software Matlab*, para caracterizar o dano de delaminação quer em termos dimensionais, quer geométricos, através dos valores e vetores próprios da imagem binarizada.

O objetivo principal deste trabalho é o estabelecimento de uma metodologia que permita quantificar, de forma unívoca, o dano que ocorre na furação a alta velocidade de materiais

compósitos reforçados com fibra de carbono, no que diz respeito quer à sua dimensão, quer à sua geometria. A proposta que se apresenta baseia-se no método do fator de delaminação mínimo, mas cuja quantificação é realizada através do momento polar de inércia da área do dano. Através desta metodologia, é possível permitir a padronização efetiva do dano induzido, uma vez que o valor quantificável é sempre o menor possível. Será assim viável assegurar uma forte contribuição para o estudo do efeito deste tipo de dano na vida útil das estruturas em materiais compósitos.

1.3. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está dividida em cinco partes:

Capítulo 1: Neste capítulo contextualiza-se o tema e apresenta-se a motivação que conduziu a este trabalho. Procede-se ainda à definição dos objetivos a atingir na conclusão deste trabalho e apresentação da estrutura do documento.

Capítulo 2: Este capítulo apresenta o resultado da pesquisa bibliográfica realizada. No estado da Arte são apresentados os fundamentos teóricos para que seja possível uma melhor compreensão do tema. Os pontos fundamentais do Estado da Arte são, Materiais Compósitos, Processo de Furação, Dano Resultante do Processo de Furação, Processo de Fresagem, Ensaio não Destrutivo e Momentos de Inércia.

Capítulo 3: O objetivo principal deste capítulo é definir os procedimentos experimentais, no que diz respeito aos materiais e métodos utilizados nos ensaios.

Capítulo 4: Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos através da ferramenta computacional desenvolvida.

Capítulo 5: Finalmente, neste capítulo apresentam-se as conclusões, as contribuições inovadoras propostas no presente trabalho e ainda sugestões para futuros desenvolvimentos.

2. Estado da arte

2.1. Materiais Compósitos

Os materiais compósitos são cada vez mais frequentes na utilização a nível industrial devido à boa relação entre a sua eficiência e o seu baixo custo. Material compósito é um material composto por dois ou mais materiais diferentes, a nível macroscópico, que quando conjugados apresentam propriedades finais, superiores às propriedades iniciais de cada um dos seus constituintes [1].

Em tempos remotos já eram produzidos materiais compósitos, como por exemplo, no tempo dos Egípcios, onde eram produzidos tijolos de barro reforçados com palhas no seu interior. Atualmente, estes tipos de materiais, como por exemplo os materiais compósitos, de matriz polimérica, reforçados por fibras de carbono, são muito frequentes na produção de estruturas para as aeronaves, material militar, bem como em chassis e discos de travão de veículos desportivos [1]. Das diversas aplicações deste tipo de materiais, são de realçar a utilização nos novos aviões comerciais Boeing 787 (Figura 2.1) e da Airbus A350 (Figura 2.2), onde grande parte da sua composição é feita de materiais compósitos [1, 9, 10].

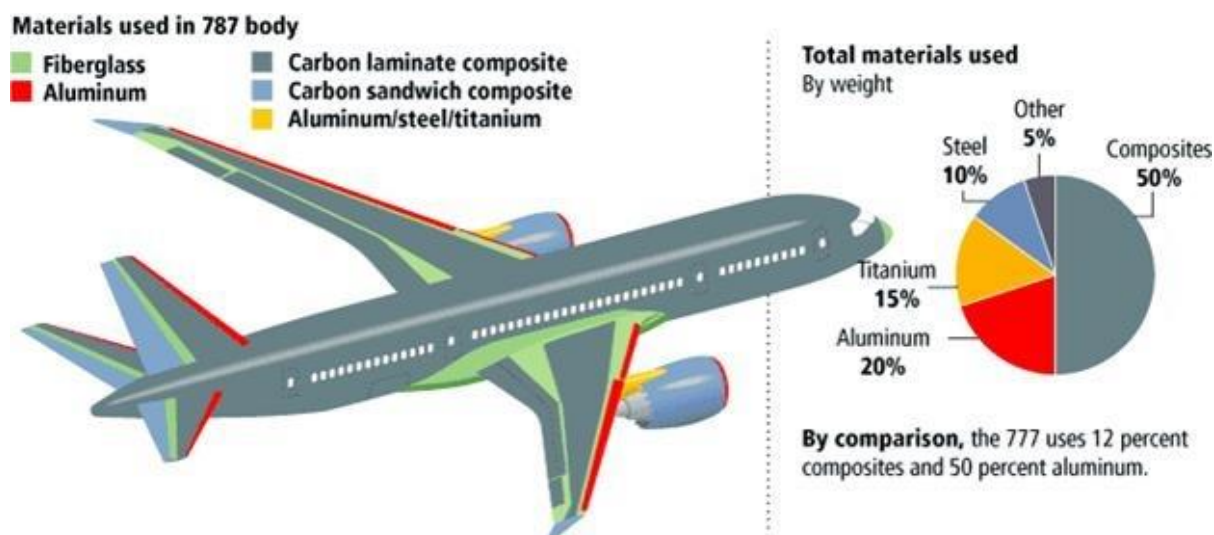


Figura 2.1 - Composição do Boeing 787 [9]



Figura 2.2 - Composição do Airbus A350 XWB [10]

Estes tipos de materiais são constituídos por um reforço e uma matriz, onde o reforço concede a dureza, resistência à tração, tenacidade e rigidez ao produto final, já a matriz funciona como proteção contra a abrasão e efeitos ambientais, manutenção das fibras na orientação apropriada e na transferência e distribuição das tensões no material. Temos como propriedades mais relevantes do produto final a rigidez, a boa resistência mecânica, o baixo peso, bom desempenho a altas temperaturas, assim como a dureza e a boa condutibilidade. Podemos ter matrizes metálica, poliméricas, cerâmicas ou cimentosa. No caso dos reforços podemos ter reforços em fibras de vidro, de carbono, aramídicas e boro [1].

Na execução deste tipo de materiais temos de ter em conta a sua funcionalidade, pois a seleção da matriz e do reforço dependem das necessidades requeridas para o produto final. Existem três tipos de combinações para fibras de camadas em compósitos, as fibras unidirecionais contínuas, fibras descontínuas orientadas de forma aleatória e fibras unidirecionais tecidas ortogonalmente, sendo este ultimo método a melhor combinação.

Existem tecidos 2D ou 3D e são definidos pela confeção de uma ligação entre feixes de fibras longas de carbono, aramida, vidro ou outro tipo de combinações, dependendo do tipo de aplicações que é requerido. Os tecidos 3D distinguem-se dos 2D por conterem fibras orientadas na direção da espessura, tendo desta forma uma maior resistência interlaminar. Os tecidos são caracterizados pela orientação das fibras, métodos utilizados durante a confeção e por massa por unidade de área. Desta forma, os tecidos 2D são classificados por tecidos entrelaçados, tecidos quase unidirecionais e por tecidos híbridos.

Os tecidos mais comuns, são os tecidos entrelaçados 2D, por conferirem melhores propriedades mecânicas. Dentro desta gama, ainda podemos encontrar padrões diferenciados, havendo três tipos que são mais utilizados. O que os distingue são as orientações das suas fibras.

Designam-se então por “plain weave”, “twill weave” e “satin weave” [1]. As diferentes orientações das fibras estão representadas na Figura 2.3.

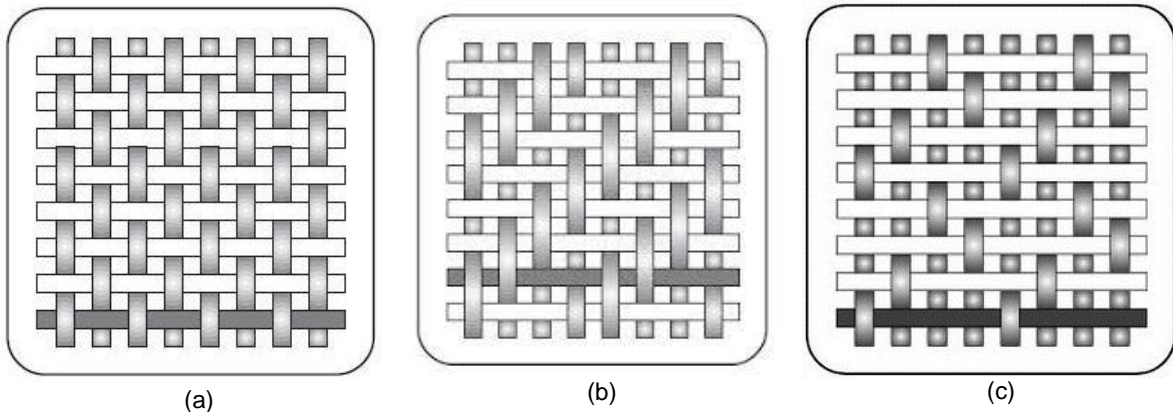


Figura 2.3 - Tipos de orientação de fibras: (a) "plain weave", (b) "twill weave" e (c) "satin weave" [1]

Os tecidos são tipicamente empilhados segundo direções que permitem melhorar o desempenho dos componentes. Este conjunto de tecidos empilhados designa-se por laminado, que pode ser unidirecional ou multidirecional, este ultimo com melhores propriedades mecânicas. Estes materiais são constituídos por camadas com diferentes orientações, dispostas em diversas sequências segundo a direção da espessura. Contudo, o número de camadas, as orientações e as sequências de empilhamento diferem consoante o projeto a que se destina [1].

2.2. Processo de furação

O produto final, quase acabado, pode necessitar de alguns processos de maquinagem, de forma a estar pronto para ser introduzido na montagem final para à qual se destina. A furação é uma das operações de maquinagem muito utilizadas e também uma das que requer maior importância em termos de projeto, pois durante a furação ocorrem danos no material compósito, sendo a delaminação [1] o dano mais frequente e também o mais relevante, tendo como origem a força axial exercida pelo centro estacionário da broca [11] pois pode diminuir as propriedades mecânicas dos componentes, podendo ser esta uma causa para a rejeição a nível de qualidade da peça fabricada. O desempenho das juntas aparafusadas depende da qualidade dos furos, pois são estes que estabelecem ligações ou reparações estruturais [1].

Atualmente são utilizados vários processos não convencionais de furação, como a eletroerosão, jato de água ou o corte a laser [1, 8] tendo estes acabamentos de superior qualidade relativamente à furação com broca. Contudo, por questões económicas e também pela vasta disponibilidade de recursos, o processo predominante na indústria continua a ser a maquinagem, nomeadamente o processo de furação, recorrendo à utilização de brocas helicoidais.

No processo de furação, temos de ter em conta a escolha do material, bem como a geometria da ferramenta de corte, pois podem influenciar a qualidade do furo executado [12],

assim como, ao serem executados vários furos com a mesma ferramenta, esta vai sofrendo algum desgaste o que origina o aumento da força axial e conseqüentemente a ocorrência de delaminação [1]. Outros fatores também importantes na furação são, a velocidade de avanço, o diâmetro da ferramenta, assim como a espessura da peça [13].

A delaminação, sendo um dos danos mais relevantes, tem que ser considerada como uma prioridade, de forma a tentar sempre a sua minimização. Este defeito ocorre tanto na entrada como na saída da broca [1]. A broca ao iniciar o processo de furação causa o arrancamento das fibras na cama superior, puxando-as, e na camada inferior, a broca funcionará como um punção, arrancando desta forma as fibras na cama inferior, como se pode verificar na representação esquemática da Figura 2.4. Esta é responsável pelo enfraquecimento da ligação entre as camadas. Uma vez que este defeito ocorre no interior do material, não há sinal de desgaste aparente, o que torna impossível prever a sua ocorrência.

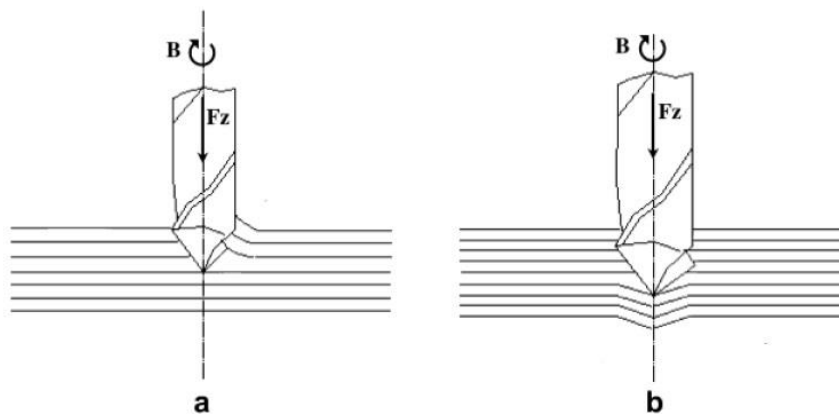


Figura 2.4 - Delaminação causada pela furação: a) à entrada (*peel-up*); b) à saída (*push-out*) [13]

2.3. Dano resultante do Processo de Furação

Os danos associados à furação têm vindo a ter maior relevância de estudo, principalmente o dano da delaminação, de forma a tentar a sua minimização. Segundo Chen [4], o fator de delaminação (F_d), que será designado fator clássico, é resultante do rácio entre o diâmetro máximo da zona danificada (D_{max}) e o diâmetro do furo (D), como mostra a equação (2.1) e representado esquematicamente na Figura 2.5.

$$F_d = \frac{D_{max}}{D} \quad (2.1)$$

Esta forma de cálculo pode nem sempre ser a mais indicada pois como mostra a Figura 2.6, onde se pode observar dois danos com geometrias bastante diferentes, no caso (a) tem-se um pequeno dano concentrado em dois pequenos pontos no sentido longitudinal, no caso (b) observa-se um dano muito regular em torno da periferia do furo. Contudo, apesar dos danos

serem geometricamente bastante diferentes, os valores do diâmetro máximo que envolve o dano (D_{max}) são iguais, obtendo-se assim o mesmo fator de delaminação [14].

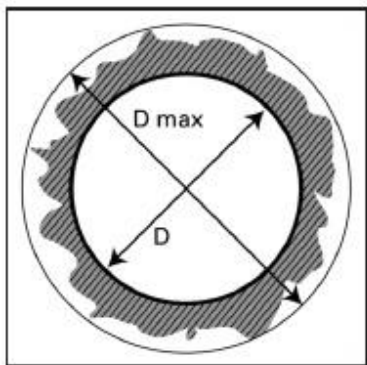


Figura 2.5 - Fator de delaminação clássico (F_d) [14]

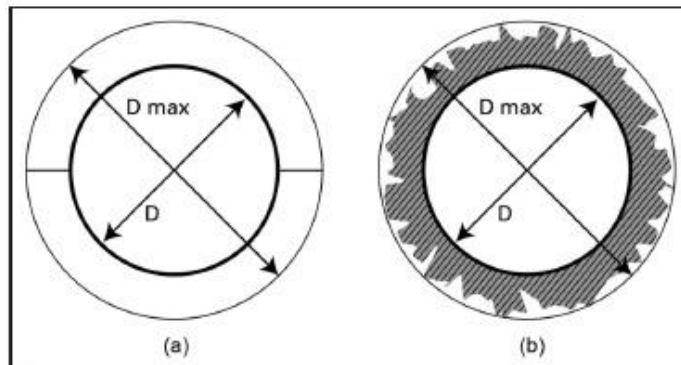


Figura 2.6 - Diagrama do defeito: (a) fenda fina e (b) zona muito danificada [14]

Khashaba *et al.* [15] concluíram que a dimensão do dano causado pela delaminação é a diferença entre o raio máximo do dano (R_{max}) e o raio do furo (R). Podemos ver esquematicamente na Figura 2.7. A dimensão da delaminação pode ser calculada através da equação (2.2).

$$\text{Dimensão da delaminação} = R_{max} - R \quad (2.2)$$

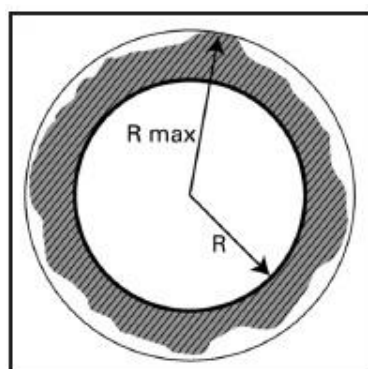


Figura 2.7 - Esquema da equação da dimensão do dano [14]

Também Faraz *et al.* [16] propuseram um fator de delaminação bidimensional F_a , em que A_d é a área do dano e A_{nom} é a área nominal do furo, como ilustra a Figura 2.8. Este fator pode não ser o mais viável, pois F_a pode ter o mesmo valor para dois valores de A_d muito díspares. A Figura 2.9 demonstra um exemplo onde isso pode ocorrer, (a) e (b) têm o mesmo valor de área de delaminação A_d , conseqüentemente, o mesmo valor de fator de delaminação bidimensional F_a , mas (b) tem fissuras muito mais acentuadas o que torna esta zona mais frágil. Este método contribuiu apenas para a delimitação da área do dano. Este valor de delaminação é obtido através da equação (2.3).

$$F_a = \left(\frac{A_d}{A_{nom}} \right) \% \quad (2.3)$$

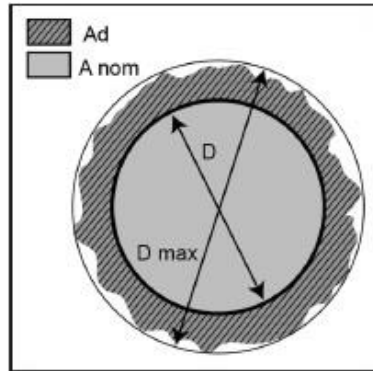


Figura 2.8 - Esquema da evolução do fator bidimensional [14]

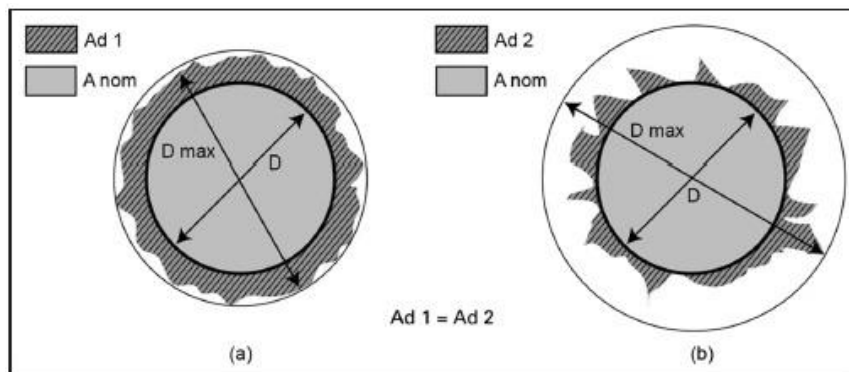


Figura 2.9 - Diagrama do dano delaminação: (a) dano uniforme e (b) dano irregular com grandes fendas [14]

Posteriormente, foram feitos mais estudos sobre o tema, como é o caso de Davim *et al.* [7] encontraram uma nova forma de cálculo do dano, o fator de delaminação ajustado (Figura 2.10). Estes autores defendem que o fator de delaminação convencional proposto por Chen é satisfatório para padrões de delaminação regulares, mas nem sempre isso ocorre. Desta forma, os autores propuseram o fator de delaminação ajustado (F_{da}) onde, não só relaciona o rácio dos diâmetros máximo da zona danificada e do furo, mas também quantifica a área do furo (A_0), a área correspondente ao diâmetro máximo da zona danificada (A_{max}) e a área onde ocorre o dano (A_d). Este fator pode ser calculado através da equação (2.4).

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d}{A_{max} - A_0} (F_d^2 - F_d) \quad (2.4)$$

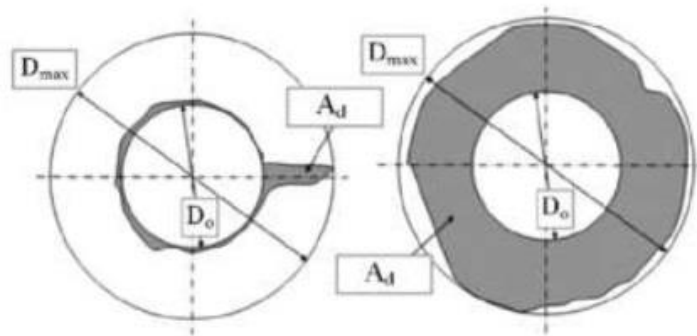


Figura 2.10 - Caracterização do dano segundo Davim [7]

Com base em estudos anteriores, apareceu a necessidade de estudar a influência do tipo de ferramenta e velocidade de furação. Desta forma, Machado [13] estudou a furação através de brocas helicoidais convencionais, a alta velocidade, tendo em conta a escolha da ferramenta, geometria de corte e o estado da ferramenta (nova e usada). Verificou-se desta forma, o bom desempenho da broca helicoidal comparativamente a ferramentas desenvolvidas especificamente para a furação de materiais compósitos e é possível obter baixos valores de delaminação utilizando valores elevados de velocidade de rotação e de avanço com geometrias helicoidais.

Noutras abordagens sobre este tema, temos a análise através do processamento de imagem segundo Durão *et al* [5]. Os autores realizaram um estudo de forma a comparar o desempenho de três ferramentas com diâmetros diferentes combinadas com três avanços distintos. As ferramentas utilizadas são brocas helicoidais, em dois materiais distintos, nomeadamente aço rápido (HSS - *High-speed steel*) e metal duro (WC - *Tungsten Carbide*). Verificou-se que quanto maior o avanço, maior a delaminação. Desta forma, para se evitar uma delaminação extensa em torno do dano, este deve de ser o mais conservativo possível. Com a ferramenta de aço rápido pôde observar-se uma maior circularidade na zona danificada, muito semelhante a um círculo. Por último, nas brocas de metal duro, observou-se que não existe influência da geometria do dano em relação à circularidade nem extensão do dano. Através de radiografia digital, foi feito o processamento de imagem computacional em cada imagem tendo sido avaliado o dano, medindo as suas áreas e diâmetros. Neste estudo relacionou-se também, o fator de delaminação com o fator de delaminação ajustado, mostrando desta forma que a geometria do dano também é relevante.

Outro caso de estudo, diz respeito a Silva *et al* [6] que também fez a análise à geometria do dano causado pelo processo de furação em materiais reforçados com fibra de carbono. As radiografias foram analisadas, tendo como base o *software* elaborado que quantifica a geometria do dano, através do processamento e tratamento de imagem. As imagens em estudo são obtidas através da subtração de radiografias antes e depois da furação. Com o processamento de imagem os autores verificaram que o *threshold* é a variável que mais relevância tem, pois pode sofrer variações dos fatores da delaminação. Desta forma, o *software* desenvolvido automatiza o cálculo

da variável *threshold*, de forma a não ser influenciada pelo utilizador. Os autores verificaram também que o centro do furo pode não ser coincidente com o centro do dano.

Num outro trabalho, Silva [8] propôs um novo fator de delaminação, o Fator de Delaminação mínimo ($F_{d_{min}}$), onde relaciona o Diâmetro do furo (D_0) e o Diâmetro que envolve o dano centrado no dano (D_{min}), como mostra a equação 2.5.

$$F_{d_{min}} = \frac{D_{min}}{D_0} \quad (2.5)$$

Desta forma, é possível quantificar o dano numa forma mais exata pois só será analisada a menor área que contém todo o dano resultante da furação. O centro da zona envolvente ao dano coincide com o centro da zona afetada, não sendo dependente do centro do furo (Figura 2.11).

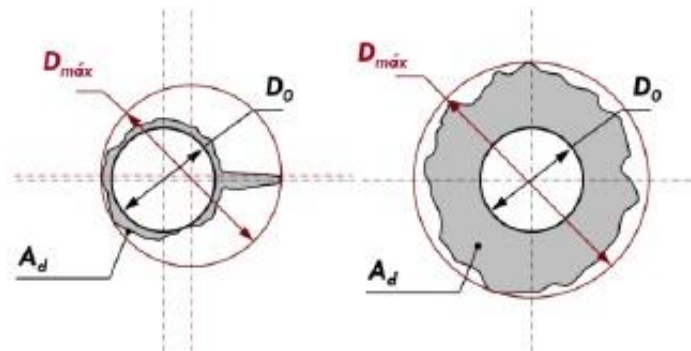


Figura 2.11 - Caracterização do dano segundo Silva [8]

Melo [17] também contribuiu para este tema, tendo feito a análise da influência das variáveis do processo de furação através do método de *Taguchi* com características dinâmicas. As variáveis em estudo foram os parâmetros de corte, velocidade de corte e avanço. Nos parâmetros de processo teve como referência a espessura do provete e o diâmetro da broca. Os valores de parâmetros de corte foram estabelecidos para condições de alta velocidade, tendo sido utilizados três níveis diferentes de velocidade de corte, nomeadamente, 200, 250 e 300 m/min e três níveis de avanço, 0.1, 0.15 e 0.2 mm/rev. Os fatores de sinal têm também três níveis tanto para a espessura como para o diâmetro da broca, sendo eles, 2, 4, 6 mm e 5, 7 e 9 mm, respetivamente. O autor pode comprovar que para os diferentes parâmetros de corte, espessuras e diâmetros, o fator de delaminação é menor quando utilizamos a broca helicoidal de diâmetro 9 mm e uma espessura de 4 mm. Para obter uma força axial menor, o autor utilizou valores da velocidade de corte e de avanço mais baixos, 200m/min e 0.1mm/rev, respetivamente. A resposta dinâmica do fator de delaminação relativamente à espessura indicou que a velocidade de corte ideal encontra-se nos níveis mais altos (300m/min). No caso do fator de sinal ser o diâmetro a velocidade de corte deve de manter valores mais baixos. Quanto ao método dinâmico de *Taguchi* revelou-se

inadequado pois os resultados globais obtidos não foram convincentes. Contudo, a análise clássica dos resultados dos ensaios realizados estavam de acordo com os valores esperados.

Lo Re *et al.* [18] desenvolveram um *software* que permite a segmentação de uma forma semiautomática, de imagens contendo poros de qualquer geometria, de forma a caracterizar a distribuição do tamanho do poro. Os poros em estudo são de ácido láctico, caracterizando desta forma, a sua geometria e porosidade. Recorrendo ao *software Matlab* foi utilizado um algoritmo de processamento de imagem, tendo em conta quatro passos. São eles:

- Pré-processamento da imagem;
- Procedimento assistido para a delaminação do *threshold*;
- Binarização e a análise morfológica,
- Verificação do procedimento.

De forma a simplificar a análise de dados, as matrizes de níveis de cinzento assumem valores entre zero (preto) e um (branco). Este programa permitiu o reconhecimento dos poros e tornou possível retirar a informação sobre o seu tamanho e a sua área. O algoritmo possibilitou também, a obtenção de mapas coloridos ilustrando as diferentes dimensões da estrutura dos poros, de forma a ser mais fácil a sua análise.

Baracinha [19] desenvolveu uma ferramenta computacional que permite a caracterização do dano, tanto em termos dimensionais como geométricos. Tendo como base os conceitos da teoria do princípio de inércia e através dos valores e vetores próprios da imagem binarizada, foi possível obter a direção preferencial do dano. A imagem binarizada é obtida após o processamento da imagem captada por radiografia digital, de forma a serem eliminados os pontos menos relevantes para a análise. Desta forma, a imagem obtida por binarização tem apenas pontos pretos e brancos, ficando mais nítido a zona danificada. A imagem uma vez binarizada, torna-se uma imagem a preto e branco, sendo depois convertida em matriz de 0 e 1, onde o número 0 corresponde ao pixels pretos e o número 1 corresponde aos pixels brancos da imagem. A deformação ocorre na zona onde se encontram os pontos brancos. Através da matriz binarizada foram calculados os momentos de inércia e polar de inércia. Após o cálculo deste valor, foi construída a matriz de inércia e foram calculados os valores e vetores próprios. A direção principal do dano foi extraída através do maior vetor próprio e do respetivo vetor. Esta direção indica a região onde a densidade de pixels brancos é superior, indicando desta forma, a zona mais crítica. A representação gráfica é feita depois de ser calculado o maior valor próprio e o seu respetivo valor, sendo esta representação a direção crítica.

Lissek *et al* [20] defendem que o fator de delaminação F_q pode ser calculado através de dois novos fatores, sendo estes dependentes da orientação das fibras. Este fator de delaminação é calculado através do rácio entre as áreas A_1 até A_4 , em que A_1 e A_2 são as áreas do dano localizadas nos quadrantes pares e A_3 e A_4 representam a área de dano localizada nos quadrantes ímpares. F_q pode ser então calculado através da equação 2.6. Os quadrantes têm um

ângulo de 45° com a orientação das fibras. Se $F_q > 1$, então a orientação principal da delaminação é a orientação da fibra. Se $F_q \approx 1$, a delaminação está distribuída em torno do furo. Por último, se $F_q < 1$ a orientação predominante da delaminação ocorre perpendicularmente à orientação das fibras.

$$F_q = \frac{A_1 + A_2}{A_3 + A_4} \quad (2.6)$$

O segundo fator sugerido depende do cálculo dos momentos de inércia. F_{Iq} é calculado através do rácio entre I_y e I_x (equações 2.7 e 2.8). F_q pode ser calculado através das seguintes equações,

$$I_y = \frac{\int_A z^2 dA}{A_{nom} R_{nom}^2} \quad (2.7)$$

$$I_z = \frac{\int_A y^2 dA}{A_{nom} R_{nom}^2} \quad (2.8)$$

Podemos calcular então F_{Iq} ,

$$F_{Iq} = \frac{I_y}{I_x} \quad (2.9)$$

A Figura 2.12 ilustra o cálculo destes dois fatores, o F_q e F_{Iq} ,

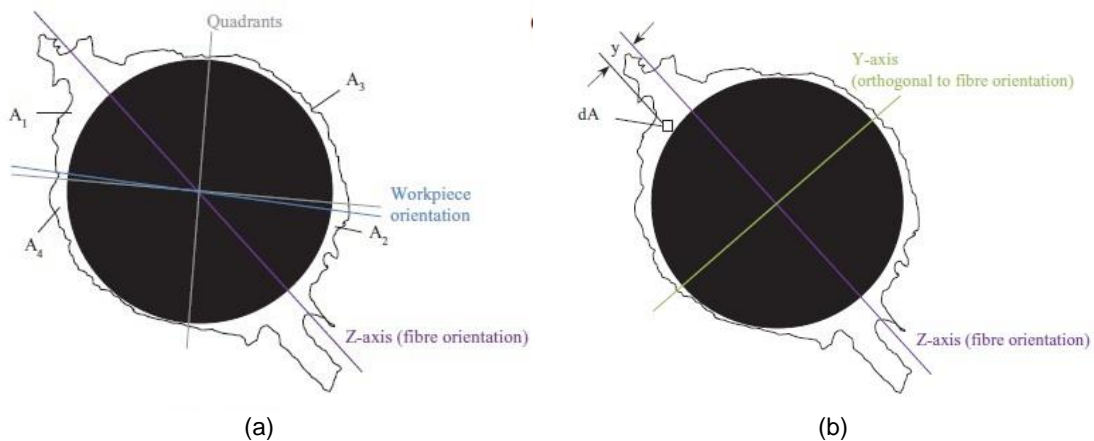


Figura 2.12 - Ilustração dos fatores: (a) F_q e (b) F_{Iq} (adaptado de [20])

Feito *et al.* [21] também deram o seu contributo para este tema, tendo estudado a influência no dano na furação com uma broca escalonada comparativamente a uma broca helicoidal convencional. O material utilizado foi polímero reforçado com fibra de carbono. Apesar da redução da força de impulso e do momento provocado ao usar a broca escalonada, os autores observou que a delaminação só é reduzida quando são utilizadas baixas rotações. Foi também desenvolvido um modelo numérico no *software ABAQUS* que foi validado com dados experimentais demonstrando a capacidade de prever forças de impulso e valores de delaminação para diferentes valores de velocidades de rotação e de corte. Os resultados obtidos através das simulações permitem o ajuste de um modelo mecânico que relaciona a velocidade de rotação, com a velocidade de corte e a geometria da broca escalonada. Com a comparação das duas brocas, pôde concluir-se que a broca helicoidal para valores baixos de força de impulso, teve valores mais baixos de delaminação.

Sorrentino *et al.* [22] apresentou um novo modelo de forma a reduzir o fator delaminação. O autor analisou os parâmetros de corte em dois tipos de laminados diferentes, polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP) e polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP). Os parâmetros de corte em estudo foram as forças de corte e de alimentação, tendo sido comparados aos fatores de delaminação “*push-up*” e “*push-out*”. O autor definiu um novo método capaz de reduzir a delaminação “*push-out*”, propondo a utilização de uma placa de suporte sob o laminado. Esta placa de suporte gera uma força de compensação à força de impulso na parte final da furação. A força de impulso aumentou tanto com a velocidade de corte, como com a taxa de alimentação, nos dois materiais em estudo. Este método não se tornou totalmente viável, pois nem sempre a parte inferior da furação é de fácil acesso, devido às diferentes geometrias do objeto a ser furado. Assim sendo, com base no estudo nas taxas de alimentação e da velocidade de corte, o autor verificou que ao variar a taxa de alimentação durante a furação, diminui o fator de delaminação à saída do furo. Para baixas taxas de alimentação, inferiores a 0,1mm/ver, o fator de delaminação não varia com a velocidade de corte. O mesmo já não se verifica para altas taxas de alimentação. O fator de delaminação na entrada teve sempre valores inferiores aos de saída, contudo, este foi possível diminuir usando uma taxa de alimentação variável. Na fase final de furação, a taxa de avanço foi diminuída, reduzindo desta forma a força de impulso e consequentemente, a delaminação à saída.

2.4. Ensaio não Destrutivos

Ensaio não destrutivo (END) consiste na utilização de técnicas não intrusivas com o objetivo de determinar a integridade de um dado componente ou material quanto à existência de defeitos. Estes tipos de ensaios são, normalmente utilizados para controlo de qualidade. Os ensaios podem ser efetuados tanto em peça acabadas, como em semiacabadas, sem que o material sofra alterações [23].

Existem variadas técnicas END, mas quando se trata da aplicação em materiais compósitos, estas necessitam de algumas adaptações prévias. A escolha da técnica mais adequada END, dependerá sempre das características do defeito, da acessibilidade ao mesmo, e das condições de inspeção. Nos compósitos, as técnicas mais usuais, vão desde a simples inspeção visual ao componente, passando pela Radiografia (RX), Xerografia, ou pela inspeção por Ultrassons.

Uma vez, que na sua maioria, os defeitos ocorrem nas camadas superficiais da peça, cama superior e inferior, pode realizar-se apenas uma inspeção visual. Contudo existem defeito que ocorrem ao longo das várias camadas e nesse caso a sua deteção revela-se difícil com a técnica de inspeção visual, daí o recurso a técnicas END mais apropriadas como é o caso da Radiografia ou Ultrassons. Estes dois métodos podem detetar com alta sensibilidade descontinuidades com poucos milímetros de extensão, podendo assim, ser mais fácil a verificação da qualidade da peça ou componente [24].

A Radiografia (Raio-X) é uma técnica usada para a inspeção não destrutiva que se baseia na absorção diferenciada da radiação penetrante pela peça. A diferença resultante poderá ser resultante de descontinuidades do material e/ou alteração de espessuras, provenientes de espaços vazios ou mudanças de espessura. Essa absorção da radiação é detetada através de um filme radiográfico, ou através de um tubo de imagem que posteriormente irá indicar a existência de uma falha interna ou defeito do material. O filme não permite a visualização imediata dos defeitos, sendo posteriormente processado. A utilização de sistemas digitais possibilita a visualização imediata do defeito. O Raio-X é a técnica mais utilizada para os materiais compósitos, pois não é tão dispendioso comparativamente a outras técnicas [24]. A Figura 2.13 mostra o esquema de funcionamento deste processo.

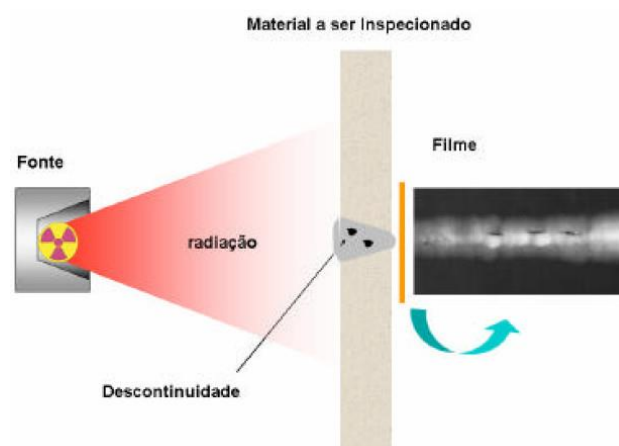


Figura 2.13 - Esquema de funcionamento da radiografia convencional [6]

Na análise dos defeitos, através da radiografia, é necessário a utilização dum líquido contrastante, pois nem todos os defeitos são visíveis à radiografia. O defeito de delaminação, que ocorre frequentemente, não é visível pois não sofre alterações na composição nem na quantidade do material que será atravessado pelo Raio-X. Os contrastantes mais frequentes são os

diodometano e o dibromometano, devido às suas características radiopacas. Tem de ter em atenção alguns parâmetros de forma a garantir que se obtém o resultado final pretendido, como por exemplo o tempo de exposição do material no líquido contrastante, o tempo e a exposição à radiação [13, 24, 25].

Para a maioria dos defeitos, o ensaio que mais se adequa é o ensaio por Ultrassons (C-Scan). Este tem sido cada vez mais utilizado para a avaliação em materiais compósitos. Em ensaios desta natureza, as ondas sonoras de alta frequência, são enviadas, através do material, sendo o feixe refletido para um sensor que deteta as discontinuidades do material. As modificações sofridas pelas ondas ultrassónicas revelam a existência de falhas, tendo como origem a reflexão e a atenuação. Este feixe refletido é detetado e analisado de forma a determinar e localizar as discontinuidades. A atenuação consiste na perda de energia das ondas ultrassónicas durante a sua propagação. Este efeito pode ter como origem espaços vazios, separação de lâminas, ou até mesmo a ligação fibra/matriz.

Uma das grandes vantagens desta técnica consiste na profundidade de penetração, sendo desta forma superior a outros métodos. Outra grande vantagem é a pormenorização do defeito, tanto quanto à sua localização, bem como a sua geometria e dimensão. O tipo de material a ser inspecionado é uma das condicionantes a este processo. No caso das fissuras dos materiais serem paralelas ao feixe das ondas, estas podem não ser detetadas. Outra desvantagem deste processo é a necessidade de fácil acesso às superfícies onde serão emitidos os ultrassons [26].

2.5. Momentos de inércia, vetores e valores próprios

O momento de inércia é uma grandeza física relacionada com a inércia de rotação. Pode ser definida como a resistência de um determinado corpo à mudança da sua velocidade de rotação. Quanto maior for o momento de inércia de um corpo, maior será a dificuldade de fazê-lo girar ou alterar a sua rotação. Para uma distância fixa de um ponto fixo, um corpo de massa m , podemos calcular os momentos de inércia através das equações 2.10 e 2.11.

$$I_{x'} = \int y^2 dm \quad (2.10)$$

$$I_{y'} = \int x^2 dm \quad (2.11)$$

O momento polar de inércia é definido como a resistência do corpo à rotação e pode ser calculado da seguinte forma:

$$J_0 = I_{x'} + I_{y'} \quad (2.13)$$

Depois de ser feita a binarização e a segmentação da imagem, é feita uma representação numérica da mesma, de forma a poder obter uma matriz A. A dimensão desta matriz é a mesma que a da imagem 800 x 800 pixels, onde cada pixel toma o valor de 0 ou 1, no caso de ser um pixel preto ou branco, respetivamente. Estes valores são substituídos em m_{ij} . O dano é representado pelos pontos brancos, tendo estes maior relevância. Aplicando as expressões anteriores ao nosso caso, obtém-se:

$$I_{x'} = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} y_{ij}^2 A_{ij} \quad (2.14)$$

$$I_{y'} = \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} x_{ij}^2 A_{ij} \quad (2.15)$$

onde i e j tomam valores entre 1 e 800 (N_x ou N_y), tal como a dimensão da imagem.

Podemos também calcular o produto de inércia, através da seguinte expressão:

$$P_{xy} = \sum_{ij} x_i x_j m_{ij} \quad (2.16)$$

A matriz de inércia pode ser calculada com base nas equações anteriores, pois estes têm valores não nulos na zona onde os defeitos estão representados:

$$I = \begin{bmatrix} I_x & -P_{xy} & 0 \\ -P_{xy} & I_y & 0 \\ 0 & 0 & J_0 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Os valores e vetores próprios podem ser calculados através do polinómio característico da matriz de inércia. Tendo estes valores, é possível determinar a direção do vetor e valor próprios, consequentemente, a zona onde ocorre uma maior concentração do dano.

$$|I - \lambda I_n| = 0 \quad (2.18)$$

O polinómio característico da matriz de inercia é dado pela expressão anterior, onde λ corresponde ao valor próprio e a matriz identidade é representada por I_n [27].

3. Procedimento Experimental

3.1. Equipamento utilizado e caracterização do material

A parte experimental deste trabalho foi realizada nos laboratórios de Tecnologia Industrial do DEMI na FCT-UNL. Para a realização dos furos foi utilizado o centro de maquinagem vertical LEADWELL VMC-15 apresentado na Figura 3.1. Para atingirmos a velocidade necessária que permita a realização deste estudo, pois a gama de trabalho encontra-se em valores elevados de velocidade, foi utilizada uma cabeça de alta velocidade Nikken BT30-NX5-153, sendo assim possível atingir uma velocidade máxima de 20 000 rev/min.



Figura 3.1 - Centro de maquinagem LEADWELL VMC-15

Na fixação dos provetes recorreu-se ao sistema desenvolvido por Tavares [11]. Este sistema de fixação é constituído por uma placa inferior, fixa ao equipamento de medição das forças, e uma placa superior ligada à inferior através duma ligação aparafusada e guiada por pinos. Em ambas as placas estão colocados casquilhos que contêm um furo central de diâmetro igual ao da ferramenta a ser utilizada, garantindo desta forma, que a tensão de contacto é uniforme na área circundante ao furo. A força de aperto utilizada foi de 4 kN, tendo sido considerada no trabalho em questão, com base em trabalhos anteriores, a ideal para minimizar o dano [25]. A monitorização e aquisição de dados relativos à força axial foram realizadas recorrendo a um dinamómetro Kistler 9257B. A conversão do sinal analógico em sinal digital foi efetuada num sistema de aquisição de dados (DAQ - NI). O sinal processado e os dados que correspondem aos valores medidos foram monitorizados através do *software* LabView.

Os provetes utilizados, cujas dimensões são de 250 x 25 mm, foram processados manualmente, empilhando-se 10 camadas unidireccionalmente de tecido pré-impregnado de fibra de carbono CC206 ET 445, com espessura de 0.2 mm até perfazer as espessuras necessárias de

2, 4 e 6 mm (Figura 3.2). Estes provetes foram submetidos a uma cura, em vácuo, durante 30 minutos a 125 °C Os compósitos de fibra de carbono foram produzidos no Centro de Formação Profissional de Setúbal (IEFP).

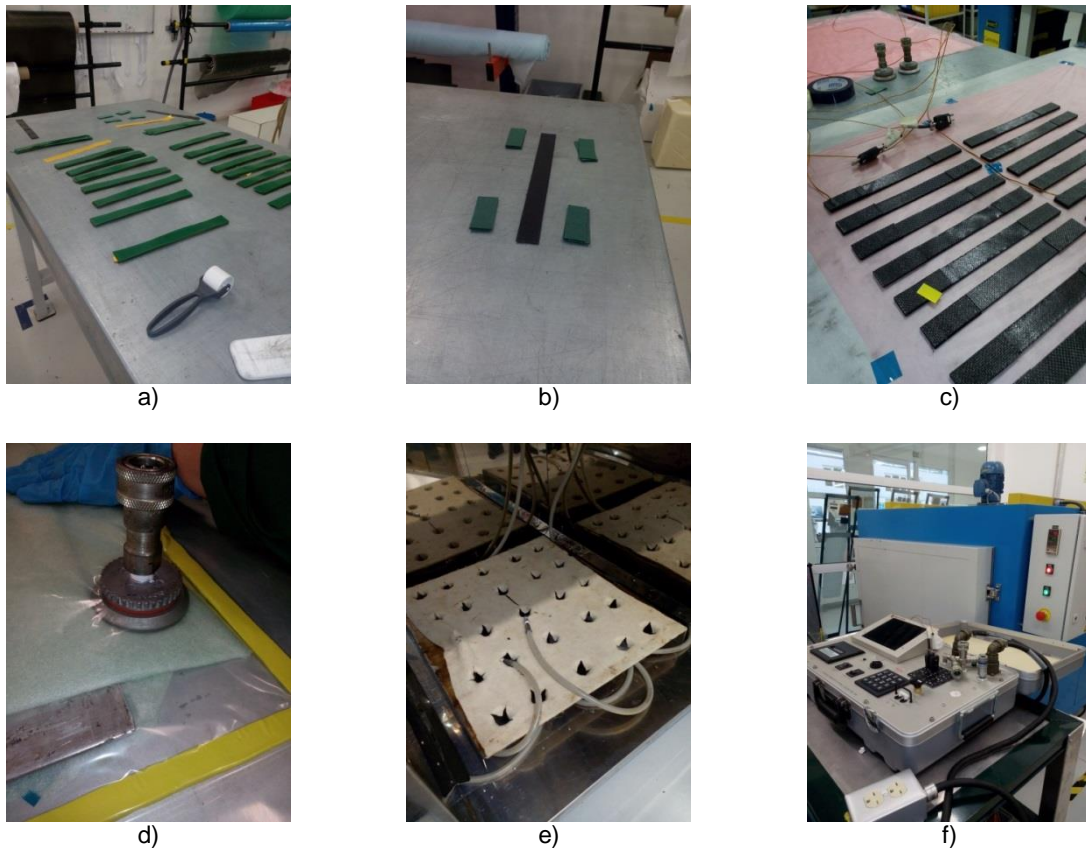


Figura 3.2 - Sequência de produção dos provetes de CFRP: **a)** corte e empilhamento, **b)** reforço das extremidades, **c)** colocação dos termopares; **d)** encasamento a vácuo; **e)** interior do forno de cura; **f)** forno de cura

Para o processo de furação foram utilizadas brocas de geometria helicoidal (Figura 3.3) de três diâmetros diferentes (5 mm, 7 mm e 9 mm) e com um ângulo de ponta de 120° em metal duro (K20), permitindo assim, a resistência à abrasão e ao desgaste provocados durante a furação em materiais compósitos de fibra de carbono. Esta geometria é a mais utilizada ao nível da indústria.



Figura 3.3 - Brocas helicoidais utilizadas (DIN 338 DORMER)

3.2. Aquisição e tratamento de imagem

A análise do dano de delaminação nas peças em estudo foi efetuada com base em ensaios não destrutivos, sendo eles a inspeção visual e radiografia digital (Figura 3.4). De forma a ser possível essa análise, o material a ser estudado foi sujeito a tratamento de imagem para ser obtido o fator de delaminação.



Figura 3.4 - Equipamento de análise radiográfica

Os provetes foram previamente imersos num líquido contrastante de diodometano. O tempo de imersão no contrastante foi de cerca de 5 minutos. Como as placas são pouco espessas, não é necessário que este tempo seja superior, verificando-se assim, o efeito de capilaridade. A análise radiográfica foi feita com recurso a um sistema de RX Kodak 2100, associado a um sistema digital de aquisição de imagem Kodak RVG 5100. Os provetes são radiografados perpendicularmente à fonte de radiação, sendo a energia máxima utilizada de 70 Kv, à frequência de 300 KHz e uma corrente de 7 mA. O tempo de exposição às radiações foi de 0.16 s e uma distância focal de 50 mm. Como medida de segurança foi utilizada uma caixa de chumbo, protegendo desta forma o utilizador.

O sistema de aquisição de imagem permitiu a obtenção de imagens que foram guardadas em formato TIFF (*Tagged Image File Format*) de alta resolução (1200 x 1600), de forma a serem posteriormente processadas.

3.3. Metodologia proposta

Neste capítulo vamos explicar sucintamente os vários passos da metodologia proposta e em que consiste cada um deles. Começamos por explicar na fase inicial, como é feita a aquisição das imagens e o tratamento que antecede o processamento do *software* computacional, seguidamente, da descrição de todos os passos a elaborados pelo programa desenvolvido em *Matlab*. A metodologia encontra-se representada na Figura 3.5.

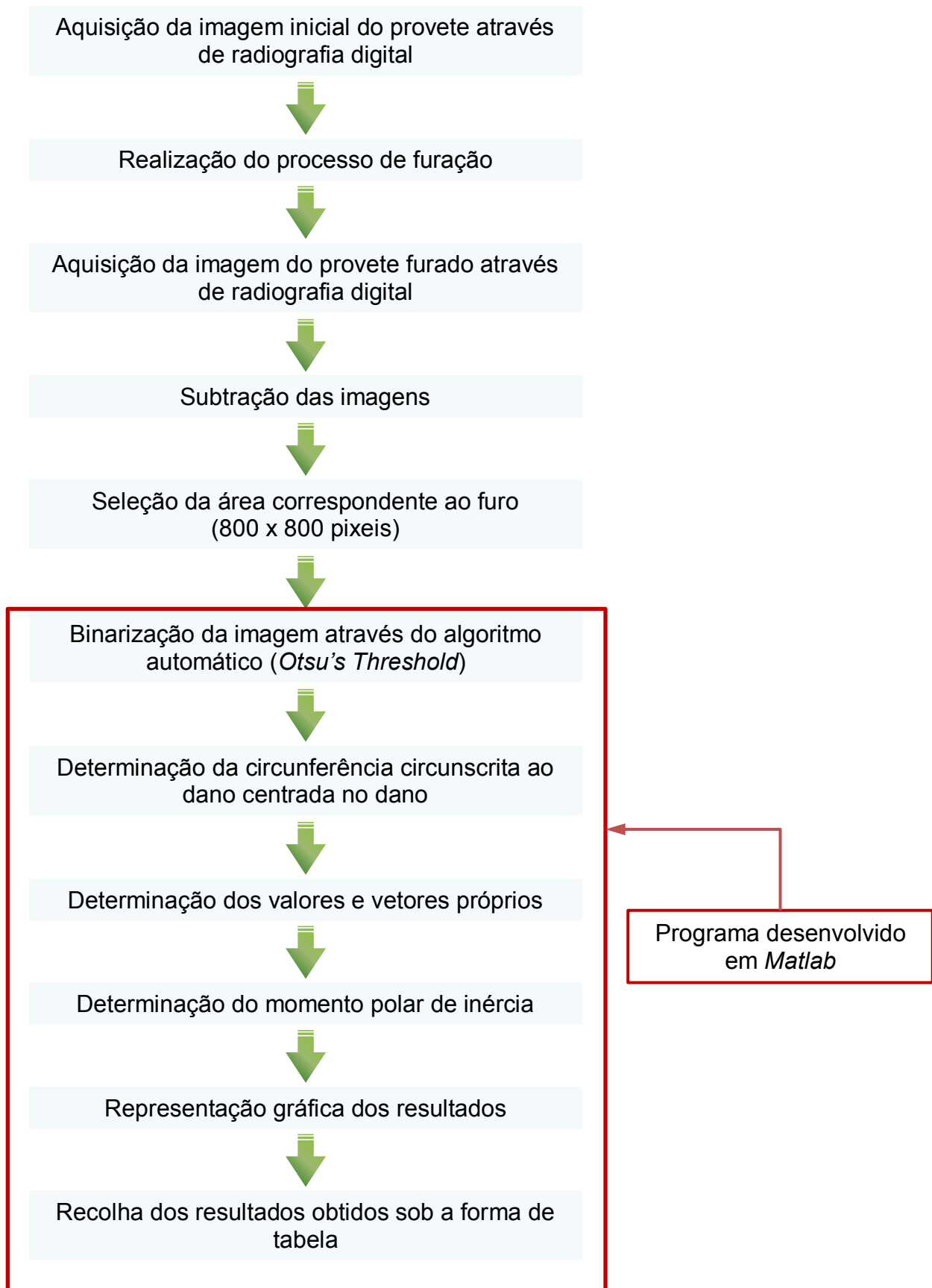


Figura 3.5 - Metodologia proposta

Primeiramente tem-se a aquisição da imagem inicial do provete através de radiografia digital, passando-se depois ao processo de furação para posteriormente se adquirir uma nova radiografia digital do provete, mas desta vez já com o furo. Procede-se então à subtração das imagens pré e pós furação de forma a serem eliminados os possíveis defeitos do provete, pois estes não são induzidos pelo processo de furação, sendo assim irrelevantes para este trabalho. Pode-se observar na Figura 3.6 um exemplo desta subtração de imagens e verificar-se que existe uma redução significativa de pontos brancos e ficando localizados os pontos brancos em torno do furo. Os pontos brancos são os pontos mais relevantes, pois representam a localização de dano. Seleciona-se então a área correspondente ao furo de 800x800 pixels.

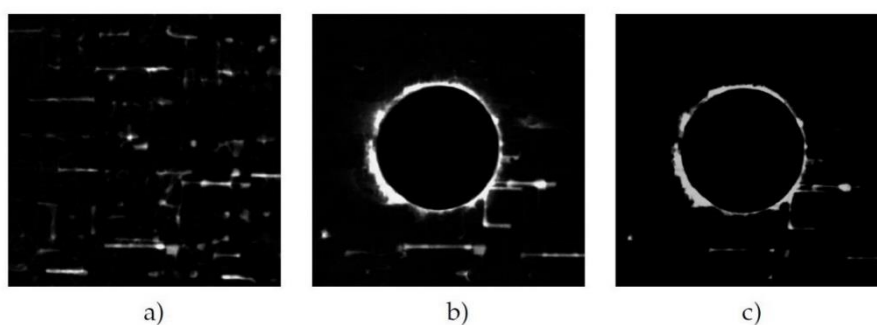


Figura 3.6 - Imagem de subtração do furo teste V01: a) Pré furo; b) Pós furo; c) Imagem subtraída

Após a aquisição das imagens subtraídas passa-se ao tratamento das imagens através do programa desenvolvido em *Matlab*. Começa por se fazer a binarização da imagem através do algoritmo automático (*Otsu's Threshold*) que consiste em transformar todos os pontos da imagem em pontos pretos e brancos, de forma a eliminar os pontos sem interesse da imagem. A Figura 3.7 mostra duas imagens antes e depois da binarização.

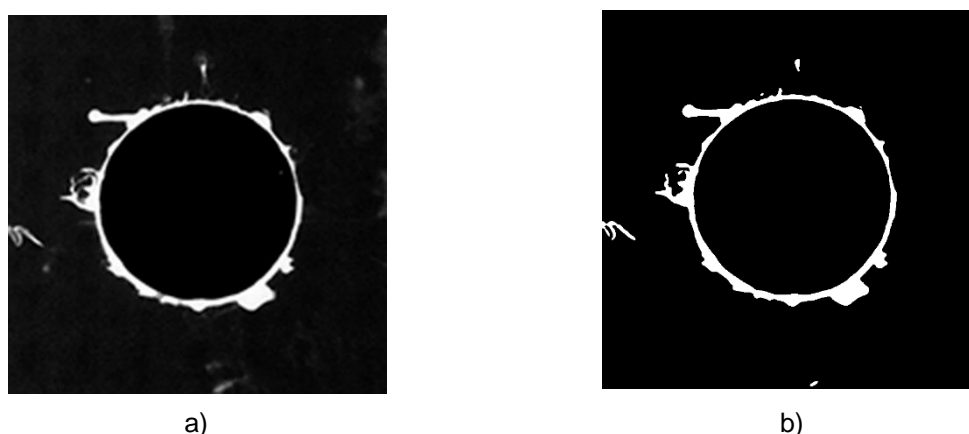


Figura 3.7 - Imagem do teste V04: a) Antes da binarização; b) Imagem binarizada

Através da imagem já binarizada procede-se à determinação da circunferência circunscrita ao dano no centro do dano. Esta circunferência ao estar centrada no centro do dano vai garantir que engloba todo o dano mínimo provocado pelo processo de furação, obtendo-se assim o fator

de delaminação mínimo. Na Figura 3.8 estão representados dois casos distintos, no caso a) pode observar-se que o fator de delaminação definido por Chen não é tão preciso como o fator de delaminação mínimo, obtendo-se assim um fator de delaminação superior ao valor calculado através do fator de delaminação mínimo. No caso b) pode observar-se que os fatores de delaminação clássico definido por Chen e o fator de delaminação mínimo definido por Silva são muito semelhantes pois o dano é pouco irregular.

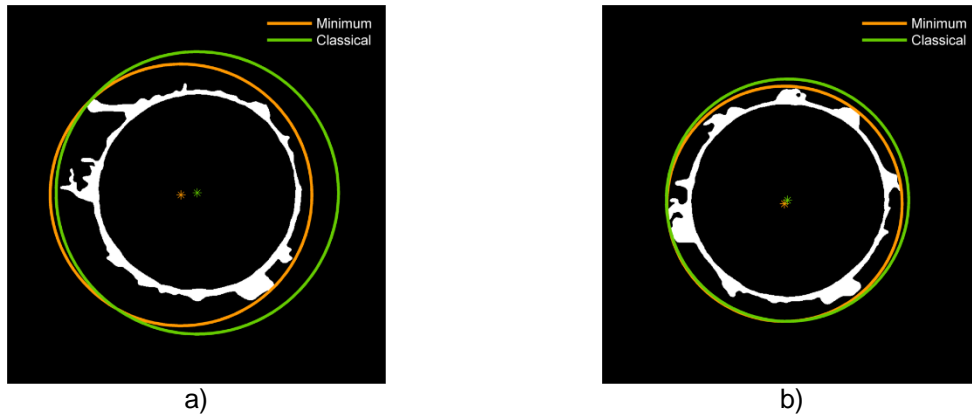


Figura 3.8 - Circunferências dos fatores de delaminação clássico e mínimo proposto por Silva: a) Dano muito irregular; b) Dano pouco irregular

Com a circunferência do dano mínimo já calculada, procede-se então à determinação dos valores e vetores próprios do dano provocado. O vetor próprio corresponde à direção preferencial do dano. O dano nem sempre é uniforme, podendo ter um dano superior numa determinada zona do furo e dessa forma ser mais frágil nessa direção. Posteriormente, procede-se à determinação do momento polar de inércia que corresponde ao valor real da extensão do dano. Desta forma consegue-se quantificar de uma forma menos inequívoca o valor real de dano. Na figura 3.9 pode-se ver a representação gráfica dos vetores próprios que estão representados a azul e a vermelho, esperando que estes sejam ortogonais entre si. O vetor que está representado a cinzento indica o ponto mais afastado da origem da circunferência centrada no dano.

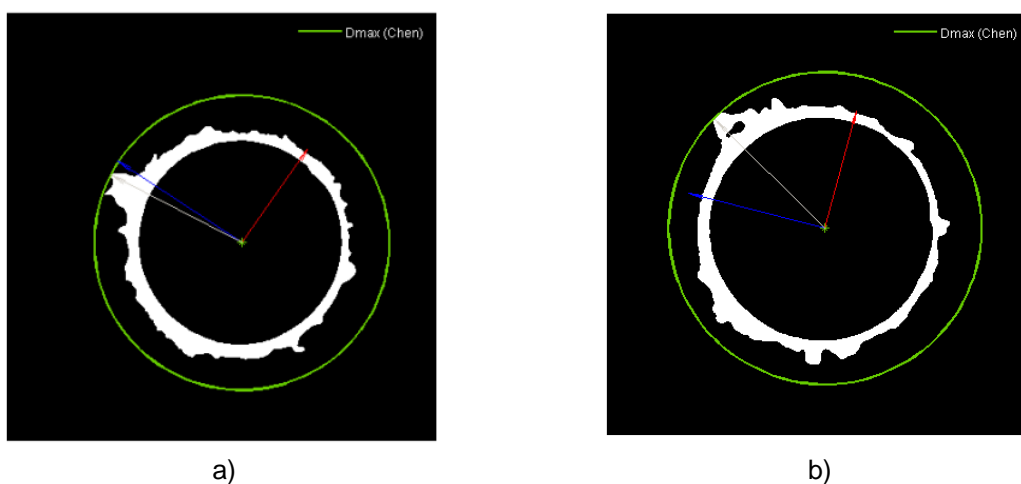


Figura 3.9 - Representação gráfica dos resultados

Todos os resultados adquiridos nas simulações são registrados e obtidos sob a forma de tabela (Figura 3.10). Os valores obtidos e apresentados na tabela são os parâmetros mencionados anteriormente, tais como, o valor otimizado do *threshold*, a área da circunferência circunscrita ao dano centrada no dano, os momentos de inércia e polares de inércia.

B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	
1	Test	Position	CoilRef_Tes	Cutting_Speed	Feed_Rate_m	Tool_Ra	Thickness	ref	threshold	drk_area	affected_area	enclosing_area	endring_area	endring_diameter	endring_diameter	id_cim	id_cim	id_war	id_war	id_war	id_war	id_war	id_war	id_war	id_war	id_war	id_war	id_war	id_war
2	A18	3	V3	300	0.15	5	2	JATA1_V3_BV_117.8F	117	19.63465	13.58519	76.58683	95.2973334	9.87466858	11.93354544	1.974977	2.2027091	-1.01339	2.8757626	2.421951	-0.126536	3.0687727	1.213	687.3313	926.49	448.88	482.01	465.58	1374.66
3	A19	6	V6	300	0.2	7	2	JATA1_V6_BV_105.8F	105	38.48451	6.88840	76.81962	81.05194887	10.1779698	11.5581778	4.51114	1.4511454	-1.3804	1.588617	1.33001	-1.024348	1.5790809	0.5265	496.1988	959.687	474.59	484.13	475.54	992.384
4	A17	9	V9	300	0.1	9	2	JATA1_V9_BV_105.8F	105	63.81725	6.88753	65.69362	67.69919586	9.46714430	9.24003230	1.81919	1.6570904	1.02027	-1.024642	1.1216109	0.2837	1.683004	0.74	629.336	974.939	336.91	336	336.01	698.077
5	A26	12	V12	300	0.15	5	2	JAZA2_V12_BV_89.8F	89	19.63465	3.04637	38.11290	42.86780884	6.96612170	7.387056802	1.930224	1.4775714	-0.7085	1.5709897	1.483466	-0.126489	1.8392084	0.5458	135.7691	222.031	115.11	112.61	110.23	271.538
6	A28	15	V15	300	0.2	7	2	JAZA2_V15_BV_74.8F	74	38.48451	3.38076	55.18538	60.4189868	8.227538233	8.77665219	1.176362	1.2297399	-0.1946	1.818343	1.222028	-0.899511	1.884201	0.3505	288.8745	438.473	211.62	217.99	212.48	561.148
7	A27	18	V18	300	0.1	9	2	JAZA2_V18_BV_50.8F	50	63.81725	5.97500	66.45142	72.31421245	9.45031809	9.59826432	1.044848	1.088218	-2.0043	1.1488206	1.058283	-1.669769	1.207812	0.2842	413.9787	731.135	385.15	385.88	385.15	827.953
8	A38	21	V21	300	0.15	5	2	JAZA3_V21_BV_101.8F	101	19.63465	4.65883	45.32220	51.9900274	7.98631198	8.136547072	1.518308	1.6273084	-0.8269	1.9787628	1.658204	-0.184842	1.6827335	0.682	203.9832	316.812	153.17	154.60	161.82	457.866
9	A39	24	V24	300	0.2	7	2	JAZA3_V24_BV_86.8F	86	38.48451	3.96120	58.47632	64.24319661	8.76516881	8.84166191	1.241868	1.290227	-0.7815	1.265451	1.00221	-0.391432	1.020831	0.4713	116.3283	525.822	281.86	282.62	282.62	631.037
10	A37	27	V27	300	0.1	9	2	JAZA3_V27_BV_101.8F	101	63.81725	6.28429	71.74827	76.41690348	9.95762981	9.96390885	1.081982	1.09599	-3.182	1.478442	1.112889	-3.03114	1.4319149	0.3003	440.1481	764.2	388.89	389.1	389.08	886.288
11	B18	30	V30	300	0.15	5	4	R18B_V30_BV_185.8F	185	19.63465	7.03640	47.45887	48.25371842	7.77211887	7.82874208	1.548442	1.6876549	-0.8381	1.968146	1.772818	-0.76811	1.4191371	0.8144	172.1988	331.466	165.67	165.73	165.73	344.396
12	B19	33	V33	300	0.2	7	4	R18B_V33_BV_77.8F	77	38.48451	8.14179	72.22298	74.7382285	9.58849839	9.78142583	1.389828	1.3829179	-1.721	1.5171039	1.482219	-1.44828	1.378128	0.4858	420.872	778.487	388.89	389.2	389.08	848.814
13	B17	36	V36	300	0.1	9	4	R18B_V36_BV_24.8F	24	63.81725	6.88772	74.32238	81.0232841	9.32812856	10.18128682	1.028993	1.1323821	-4.8444	1.908811	1.137958	-4.83793	1.696293	0.3268	496.1988	844.446	429.41	431.03	423.42	992.384
14	B28	39	V39	300	0.15	5	4	R28B_V39_BV_107.8F	107	19.63465	9.21371	55.62804	63.1741829	8.41577427	8.979081973	1.88135	1.7940124	-0.1783	2.085143	1.97718	-0.621891	1.96531	0.6446	385.2862	458.281	227.51	231.0	228.17	616.452
15	B29	42	V42	300	0.2	7	4	R28B_V42_BV_33.8F	33	38.48451	2.26811	44.37421	45.2389162	7.1688184	7.58814854	1.073797	1.0842306	-0.9697	1.148888	1.184185	-0.849186	1.2947602	0.2939	153.173	278.578	144.37	144.29	144.29	308.346
16	B27	45	V45	300	0.1	9	4	R28B_V45_BV_38.8F	38	63.81725	4.65883	66.82845	74.0388783	9.42919836	9.741983194	1.047888	1.0824804	-3.2196	1.1198877	1.084322	-3.621891	1.3701816	0.2629	426.9125	743.492	385.15	389.07	374.42	853.825
17	B36	48	V48	300	0.15	5	4	R36B_V48_BV_103.8F	103	19.63465	4.16275	45.29318	49.2282981	7.98648899	8.917484429	1.517283	1.8334839	-4.799	1.7764817	1.797089	-3.989191	1.4887022	0.8269	175.5343	389.289	193.17	198.12	193.17	351.889
18	B39	51	V51	300	0.2	7	4	R36B_V51_BV_28.8F	28	38.48451	4.97622	51.72981	52.3742677	8.16990957	8.16519471	1.059284	1.0544885	-3.5723	1.2284885	1.228226	-6.00779	1.6796987	0.3266	207.798	395.189	186.58	186.58	186.58	415.559
19	B37	54	V54	300	0.1	9	4	R36B_V54_BV_34.8F	34	63.81725	5.22936	70.24388	75.3742677	9.45711163	9.868457849	1.050791	1.0986894	-0.3088	1.15339	1.09315	-1.98185	1.483288	0.3876	460.8782	763.555	371	389.6	372.8	821.158
20	X038	87	V87	300	0.2	8	4	X18_V87_BV_128.8F	128	19.63465	11.42421	49.81381	53.30448961	9.9893796	9.32812856	1.967965	1.6474622	-3.3288	2.0057213	1.992028	-2.86938	1.6191854	0.8787	211.8182	345.241	172.2	172.88	172.88	423.037
21	V18	88	V88	300	0.15	7	2	V18_V88_BV_88.8F	88	38.48451	2.88749	46.89311	55.8407018	7.78002708	8.428297789	1.101143	1.2041828	-0.5988	1.2451149	1.1488	-0.489877	1.7146399	0.3625	235.739	330.395	182.48	185.88	184.35	471.58
22	Z428	81	V81	300	0.15	9	2	Z18_V81_BV_88.8F	88	63.81725	3.62656	58.81841	70.3588773	8.86800439	9.365164886	1.065112	1.0587884	-0.718	1.0589891	0.981163	-0.891168	1.0284284	0.2187	362.8283	523.588	265.65	265.13	265.13	795.846
23	1037	99	V99	300	0.1	5	6	P91_V99_BV_88.8F	88	19.63465	14.15284	48.78377	58.9117163	8.787891103	8.71055885	1.578918	1.7421118	-0.5388	2.2002126	2.18687	-0.252859	1.8522794	0.7887	237.4472	387.854	178.82	188	188	514.894
24	1038	106	V106	300	0.15	5	6	P91_V106_BV_88.8F	87	19.63465	14.76466	58.78211	68.9888189	8.92779194	8.785481333	1.788568	1.7897923	-0.2784	2.2002126	2.173728	-0.690344	1.8748387	0.7865	278.2502	478.919	235.19	239.91	235.66	551.058
25	2617	111	V111	300	0.1	7	6	P092_V111_BV_83.8F	83	38.48451	6.82846	70.88480	77.73181479	8.69016762	8.938271806	1.357168	1.4197931	-4.4083	1.6253838	1.489792	-4.25286	1.4891758	0.5539	448.8816	773.887	382.82	383.3	389.78	893.763
26	2619	128	V128	300	0.2	7	6	P092_V128_BV_88.8F	87	38.48451	5.76258	64.87840	66.28888583	10.34888889	10.2031821	1.478814	1.5154855	-3.4869	1.6228109	1.88779	-3.77982	1.8823816	0.5884	888.9548	168.53	518.54	524.8	533.77	1213.91
27	3217	129	V129	300	0.1	9	6	P092_V129_BV_76.8F	76	63.81725	13.52384	77.00627	93.91975552	9.901899149	10.88888833	1.18021	1.2891796	-8.8119	1.3255242	1.211652	-8.89482	1.6413882	0.3855	686.882	686.782	448.15	458.08	442.69	1381.36
28																													

Figura 3.10 - Tabela de *output* do programa desenvolvido

Melo [17] através do estudo das variáveis do processo tendo como fatores de entrada o diâmetro da broca, a espessura da placa, a velocidade de corte e a velocidade de avanço. Este foram parâmetros de corte selecionados de forma a cumprirem os requisitos estabelecidos para a condição de alta velocidade de acordo com valores utilizados em estudos efetuados anteriormente, que demonstram que para uma gama de valores de avanços e velocidades de rotação contribuem para a redução do dano [28]. Os parâmetros estudados estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1- Parâmetros estudados

	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Velocidade de corte- V (m/min)	200	250	300
Avanço- f (mm/rev)	0.1	0.15	0.2
Diâmetro da broca- d (mm)	5	7	9
Espessura da placa- t (mm)	2	4	6

4. Apresentação e Discussão de Resultados

Neste capítulo vamos apresentar e discutir os valores obtidos através da sua representação gráfica.

4.1. Fatores de delaminação

Após várias simulações efetuadas com as imagens obtidas dos provetes e nas quais posteriormente foi realizada a binarização seleciona-se um conjunto de imagens e os seus respetivos dados de forma a ser possível reunir-se todas as simulações que têm como fator comum a velocidade de avanço de 300 m/min. Com os valores obtidos pôde-se comparar os fatores de delaminação propostos por alguns autores, sendo eles o fator de delaminação clássico de *Chen*, a dimensão do dano proposto por Khashaba, o fator bidimensional de Faraz, o fator de delaminação ajustado de Davim e por último, o fator de delaminação mínimo proposto por Silva, cuja formulação serviu de base para este trabalho.

Na Figura 4.1 apresenta-se graficamente a comparação dos resultados obtidos através do cálculo do fator de delaminação proposto por Chen e o cálculo da dimensão do dano proposto por Khashaba. Pode-se observar que os valores obtidos por Khashaba são valores muito divergentes, comparativamente aos valores obtidos através do fator de delaminação clássico. Através das imagens obtidas por simulação verifica-se que os danos induzidos são muito semelhantes, não sendo razoável tanta discrepância de valores. Com efeito, a quantificação do dano por mera subtração dos valores do raio da máxima circunferência circunscrita ao dano e do raio nominal do furo é demasiado simplista uma vez que nada acrescenta ao fator de delaminação clássico, nomeadamente no que diz respeito à distribuição geométrica do dano.

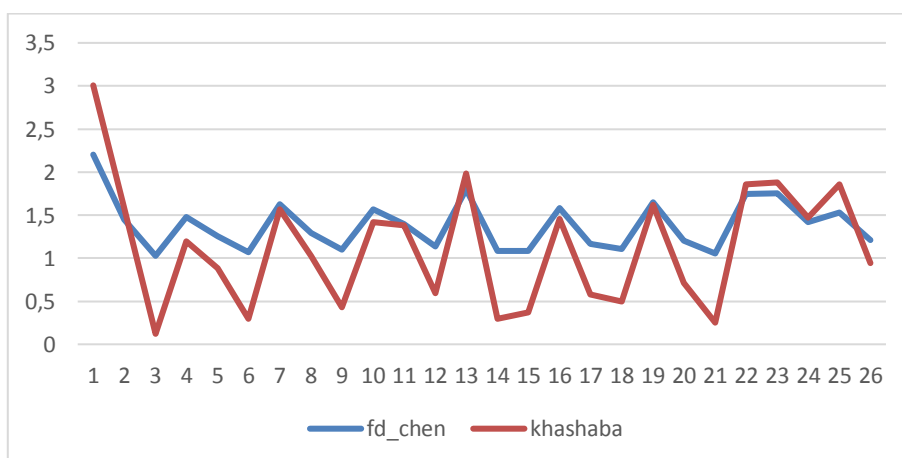


Figura 4.1 - Comparação do fator de delaminação de Chen com a dimensão do dano de Khashaba

No gráfico da Figura 4.2 tem-se a comparação entre o fator de delaminação de Chen e o fator bidimensional de Faraz. Como se pode observar, o fator bidimensional de Faraz é apenas uma réplica do fator de delaminação de Chen, pois em vez de relacionar diâmetros apenas relaciona áreas. A curva obtida através da ligação dos pontos do fator bidimensional é em tudo semelhante à curva dos pontos do fator de delaminação clássico, mas com uma variação em *offset*. Esta relação era expectável, uma vez que as áreas consideradas por Faraz consistem na área da circunferência circunscrita ao dano e na área nominal do furo. Como ambas são centradas no furo, uma vez mais esta proposta nada acrescenta à formulação de Chen.

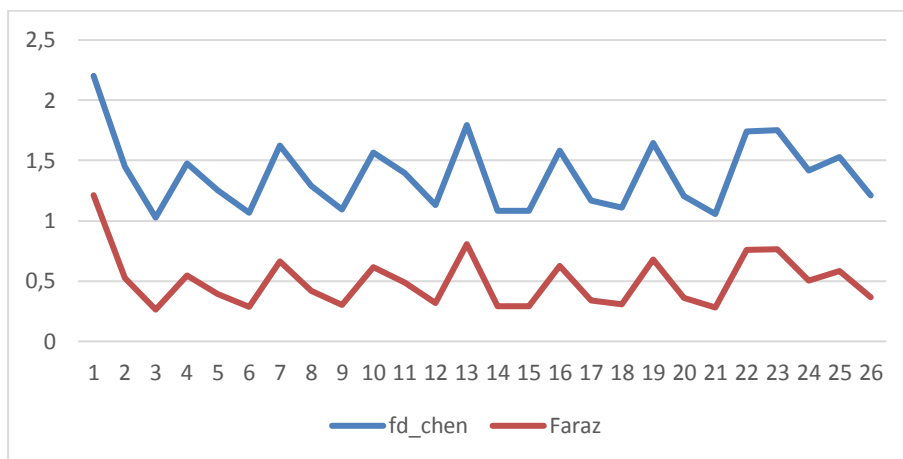


Figura 4.2 - Comparação do fator de delaminação de Chen com o factor bidimensional de Faraz

Comparando o fator de delaminação de Chen com o fator de delaminação ajustado de Davim (Figura 4.3), pode observar-se que o fator de delaminação de Davim consiste, em termos gerais, apenas num *offset* do fator clássico. Apesar destes autores defenderem que o fator de delaminação de Chen é satisfatório apenas para padrões de delaminação regulares e conseguirem ajustar a quantificação nos casos em que a distribuição do dano é irregular quantificando também a área do furo, a área correspondente ao diâmetro máximo da zona danificada e a área onde ocorre o dano, na realidade não se consegue antever uma padronização da efectiva quantificação do dano.

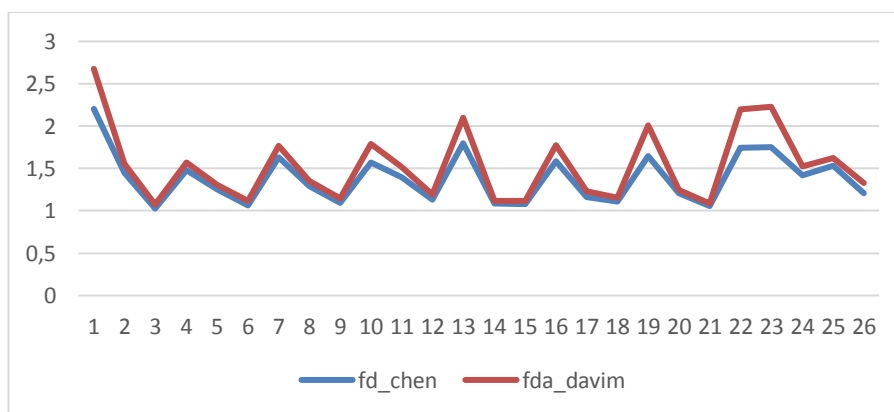


Figura 4.3 - Comparação do fator de delaminação de Chen com o fator de delaminação ajustado de Davim

O fator de delaminação proposto por Silva (fator de delaminação mínimo) consiste na formulação proposta por Chen, onde se quantifica o dano através da razão entre o diâmetro máximo do dano e o diâmetro nominal do furo. A novidade do trabalho de Silva quando comparado com os anteriores é o facto da circunferência que circunscreve o dano ser centrada no dano e não no furo. Desta forma garante-se que se encontra sempre o valor mínimo de diâmetro do dano, o que constitui por si só uma univocidade. Por outro lado, foi proposto um método de *threshold* automático, o que permite menor sensibilidade do operador. Por último, quando comparamos o fator de delaminação de Chen com o fator de delaminação mínimo (Figura 4.4), podemos concluir que o fator de delaminação mínimo tem valor inferior ao fator de delaminação do Chen tornando-se desta forma mais próximo do menor valor de dano. O mesmo acontece quando comparado ao fator de delaminação ajustado de Davim. Na Figura 4.5 podemos observar que o fator de delaminação mínimo é inferior, em todos os ensaios. Desta forma, podemos afirmar que o dano quantificado através do fator de delaminação mínimo é mais preciso, sendo este o valor mínimo possível de calcular.

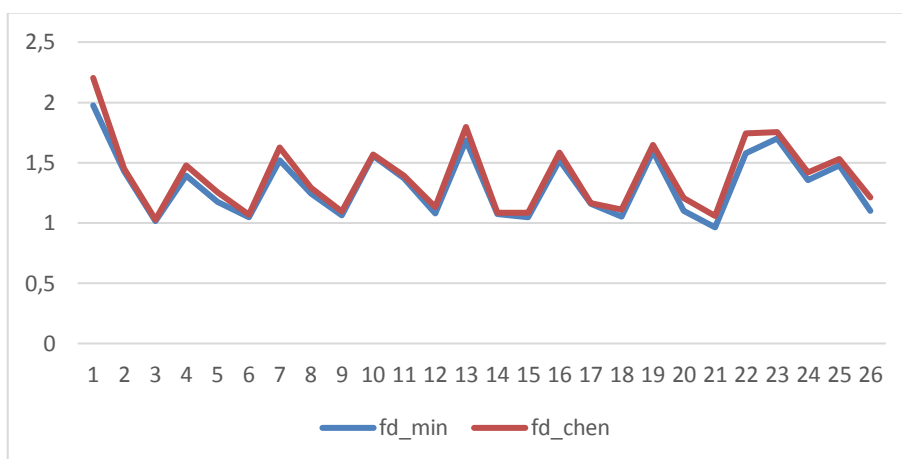


Figura 4.4 - Comparação do fator de delaminação de Chen com o fator de delaminação mínimo

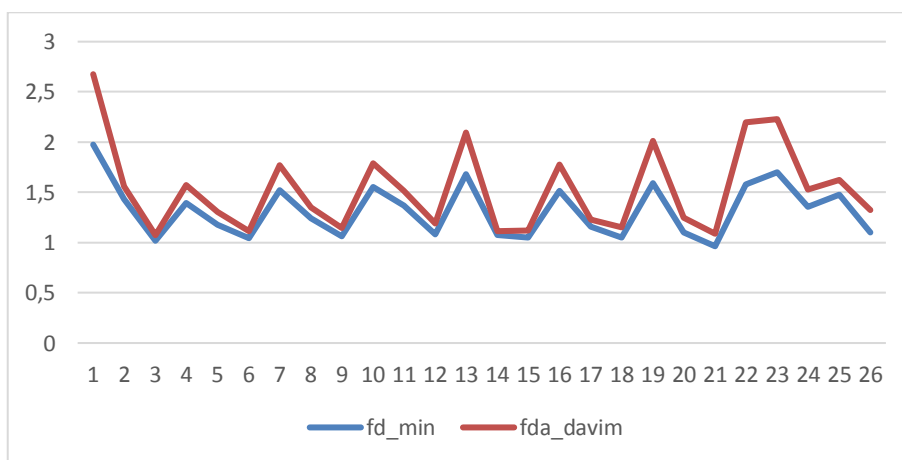


Figura 4.5 - Comparação do fator de delaminação de Davim com o fator de delaminação mínimo

4.2. Quantificação do dano proposta

Com o intuito de uniformizar a quantificação do dano, neste trabalho é proposto que o seu valor seja o obtido a partir do cálculo do momento polar de inércia da área correspondente ao dano. Esta quantificação provém dos momentos polares de inércia e é obtida através dos valores e vetores próprios da área do dano cuja origem é o centro geométrico da circunferência circunscrita ao dano, centrada no dano. Esta origem difere da de trabalhos anteriores uma vez que não é o centro geométrico do furo. Calcularam-se então estes valores e compararam-se com os valores assim obtidos para o dano centrado no furo, com o intuito de se mostrar a sua capacidade de utilização e o seu potencial de uniformização em termos quer científicos, quer industriais.

Para o cálculo dos momentos polares de inércia com origem no centro geométrico da circunferência que circunscribe o dano utilizou-se o Teorema dos Eixos Paralelos pelo facto de, na maioria dos casos, a circunferência com origem no dano não ser coincidente com a origem do furo. As equações (4.1) e (4.2) demonstram o método de cálculo onde temos I'_x e I'_y como sendo os momentos polares de inércia através do eixo paralelo, I_x e I_y são os momentos polares de inércia através do centróide da área, A é a medida de superfície da área e d_x e d_y são as distâncias x e y do eixo ao novo centróide da área.

$$I'_x = I_x + Ad_y^2 \quad (4.1)$$

$$I'_y = I_y + Ad_x^2 \quad (4.2)$$

A Figura 4.6 demonstra que existem diferenças entre o cálculo dos Momentos Polares de Inércia com origem no centro do furo, e com origem no centro do dano. Ao analisarmos o gráfico pode observar-se que o momento polar de inércia em alguns ensaios é muito semelhante, como por exemplo nos ensaios 10 e 14, mas depois tem-se outros ensaios onde os valores são muito divergentes, como acontece nos pontos 1, 21 e 26. O facto de os valores do momento polar em alguns pontos ser muito semelhante acontece porque nesses casos o dano tem uma geometria uniforme em redor do furo. Contudo, mesmo quando os valores calculados em alguns pontos são muito aproximados, o momento polar de inércia calculado com origem no centro do dano é sempre inferior ao calculado através da origem no centro do furo.

A Figura 4.7 ilustra os pontos 1 (a), 21 (b) e 26 (c) da Figura 4.6 onde existe uma maior discrepância dos valores do momento polar de inércia. Assim pode observar-se que o centro da circunferência com origem no furo é um pouco distante do centro da circunferência centrada no dano.

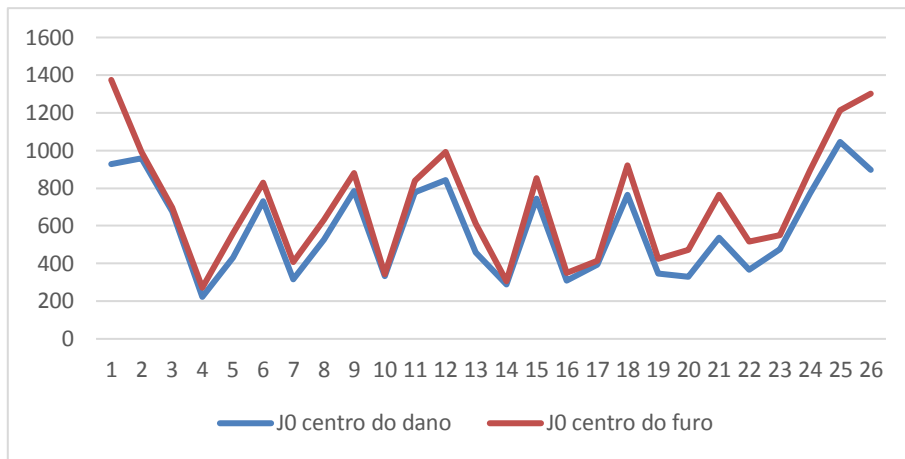


Figura 4.6 - Comparação do Momento Polar de Inércia com origem no centro do furo e Momento Polar de Inércia com origem no centro do dano

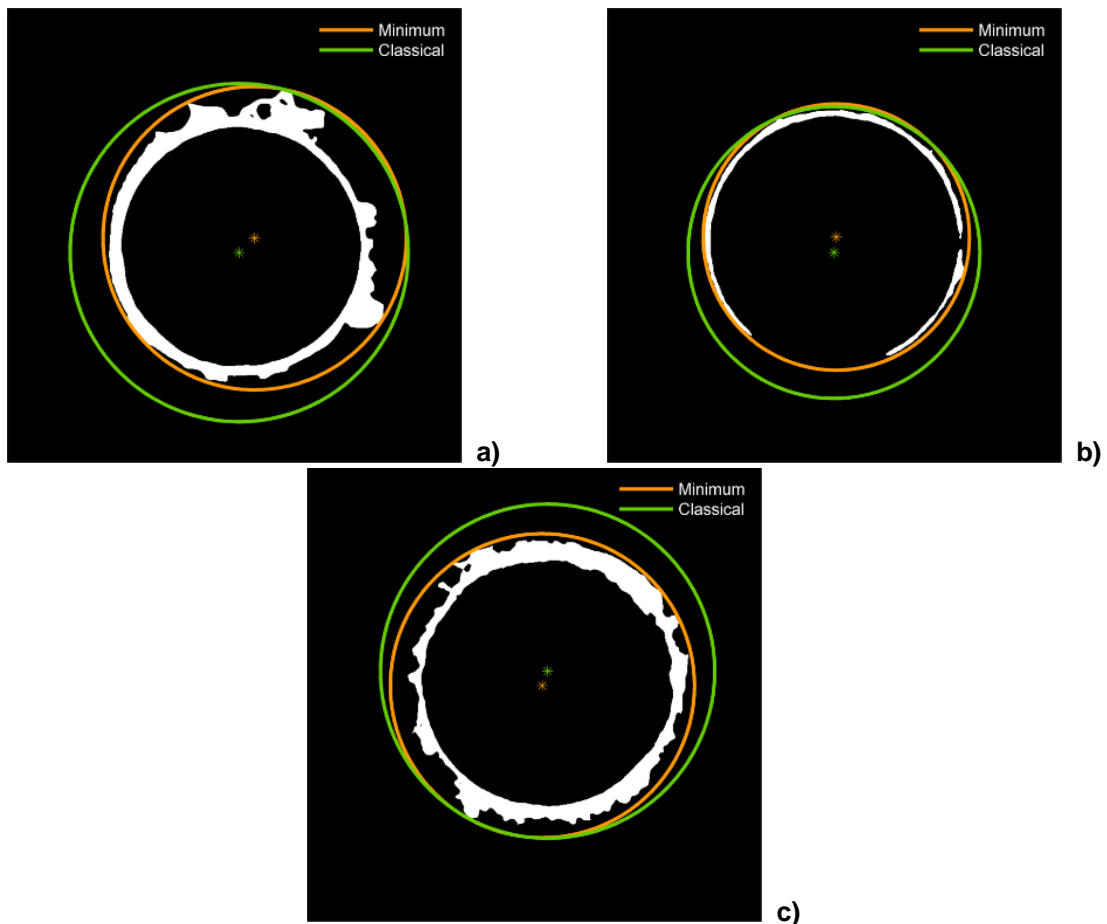


Figura 4.7 - Ilustração das circunferências centradas na origem do furo e centradas na origem do dano:
a) ponto 1; b) ponto 21 e c) ponto 26

Pode-se observar na Figura 4.8 o exemplo de três ensaios em que o dano é bastante disforme e tendencialmente orientado para uma direção, contrariamente ao que podemos ver anteriormente. Assim, consegue-se perceber a relevância do nosso método, pois como se pode analisar, para o mesmo furo e mesmo dano temos momentos de inércia bastantes díspares, sendo o momento polar de inercia calculado através da circunferência com origem no centro do dano

bastante inferior ao momento polar de inércia calculado através da circunferência com origem no centro do furo.

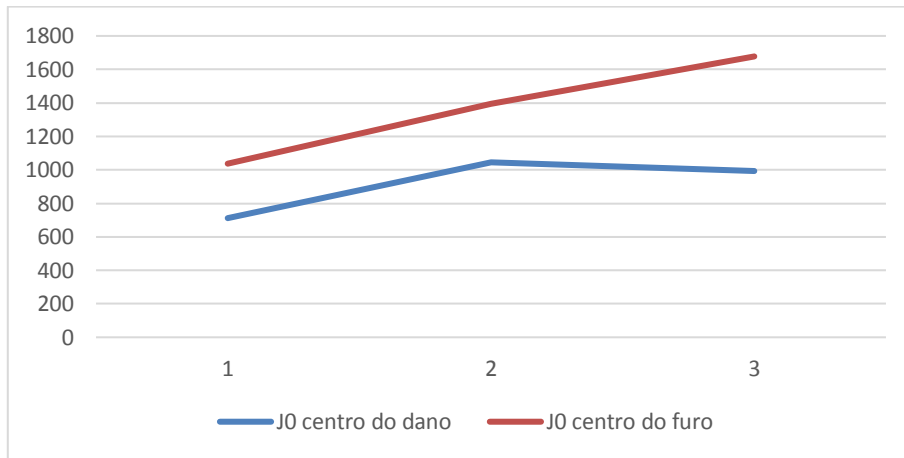


Figura 4.8 - Comparação do Momento Polar de Inércia com origem no centro do furo e Momento Polar de Inércia com origem no centro do dano

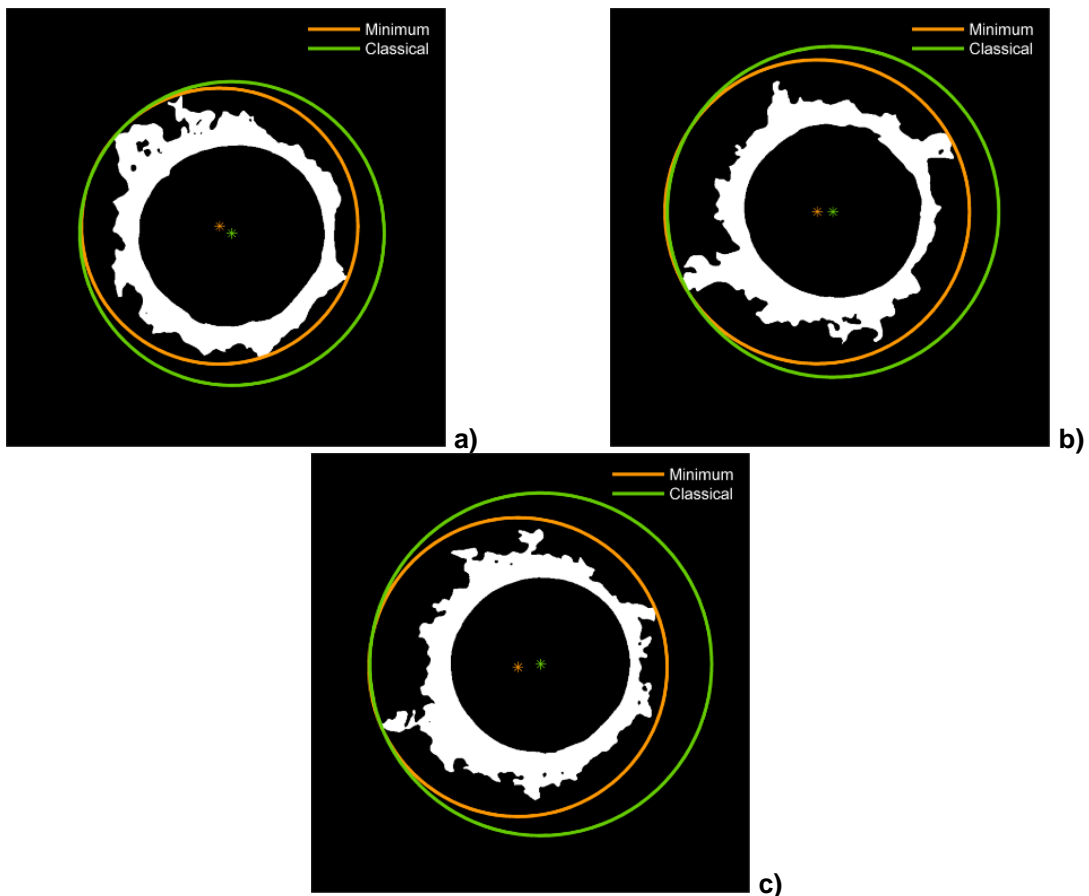


Figura 4.9- Ilustração das circunferências centradas na origem do furo e centradas na origem do dano em dano irregular: a) ponto 1; b) ponto 2 e c) ponto 3

Na Figura 4.9 tem-se a ilustração dos três casos em que o dano é bastante irregular e onde se pode observar que a circunferência centrada no dano é muito inferior à circunferência com origem no centro do furo, conseqüentemente os momentos polares de inércia também vão

ser bastante diferente, sendo o método proposto nesta dissertação o mais adequado pois representa sempre o mínimo valor de momento polar de inércia.

Na Tabela 4.1 apresentam-se os resultados obtidos, podendo verificar-se que com a utilização desta metodologia o valor obtido em cada caso é univocamente o menor possível.

Tabela 4.1- Valores do momento polar de inércia calculado com base no método proposto e no método clássico

Ensaio	Código ensaio	J₀ (proposto) [mm⁴]	J₀ (clássico) [mm⁴]
1	A18	928,87	1374,66
2	A19	959,78	992,39
3	A17	674,95	696,01
4	A28	222,86	271,54
5	A29	430,55	561,15
6	A27	731,14	827,95
7	A38	316,93	407,99
8	A39	525,85	631,06
9	A37	784,27	880,30
10	B18	331,47	344,40
11	B19	778,46	840,81
12	B17	844,49	992,39
13	B28	459,31	610,45
14	B29	288,58	306,35
15	B27	743,64	853,82
16	B38	309,32	351,07
17	B39	393,17	415,56
18	B37	763,79	921,16
19	X1D19	345,25	423,24
20	Y1E18	330,36	471,56
21	Z1F38	537,50	765,85
22	1D37	367,76	514,89
23	1C38	475,97	551,66
24	2E17	773,17	893,76
25	2C19	1045,62	1213,91
26	3C17	898,95	1301,36

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

5.1. Conclusões

Estando cada vez mais disseminada a utilização dos materiais compósitos em aplicações estruturais que exigem a furação dos componentes para efetuar a sua ligação, é urgente definir uma metodologia de análise do dano induzido pelo processo que garanta a sua caracterização de forma unívoca. Só assim se poderá efetivamente garantir a sua aplicação industrial generalizada, e será possível definir as especificações que garantam o bom desempenho destas estruturas.

Pela revisão bibliográfica realizada constatou-se não existirem padrões nem para a caracterização do dano induzido pelo processo de furação em materiais compósitos, nem das especificações relativas aos limites de dano que impliquem a rejeição dos componentes assim processados. Atualmente existem várias propostas de quantificação do dano, mas são todas demasiado sensíveis e dependentes de fatores humanos.

Neste trabalho de dissertação propôs-se uma nova metodologia que permite caracterizar geometricamente e quantificar de forma unívoca o dano que ocorre devido à furação a alta velocidade de materiais compósitos reforçados com fibra de carbono. Esta metodologia baseia-se no mínimo fator de delaminação, centrando a geometria do dano em si próprio e não no centro do furo como nos métodos atualmente utilizados. A outra diferença é o fato de a quantificação ser realizada através do cálculo do momento polar de inércia da área do dano. Desta forma conseguiu-se uniformizar a quantificação do dano porque se garante sempre o menor valor possível de delaminação.

Aplicou-se esta nova metodologia a um conjunto de ensaios, e foi possível concluir que se consegue padronizar o dano induzido, uma vez que o valor quantificado é sempre único, por ser o menor possível, e é independente da sensibilidade do operador por toda a análise ser realizada automaticamente, através de algoritmos de processamento de imagem.

5.2. Sugestões de Trabalhos Futuros

A principal sugestão para trabalhos futuros será validar esta metodologia com a aplicação a um conjunto mais vasto de materiais compósitos, nomeadamente materiais reforçados com fibras de vidro, também amplamente utilizados, fibras de aramida ou fibras de materiais funcionais, entre outros. Adicionalmente, e por via do desenvolvimento do processo de manufatura aditiva para a produção de componentes em materiais compósitos, a validação desta metodologia para este tipo de componentes seria também de grande interesse.

Referências Bibliográficas

- [1] M. F. S. F. Moura, A. B. Morais, e A. G. Magalhães, *Materiais Compósitos*, 2ª Edição. Publindústria.
- [2] G.-D. Wang, S. K. Melly, e N. Li, «Experimental studies on a two-step technique to reduce delamination damage during milling of large diameter holes in CFRP/Al stack», *Compos. Struct.*, vol. 188, pp. 330–339, Mar. 2018.
- [3] V. Schulze, C. Becke, K. Weidenmann, e S. Dietrich, «Machining strategies for hole making in composites with minimal workpiece damage by directing the process forces inwards», *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, n. 3, pp. 329–338, Mar. 2011.
- [4] W.-C. Chen, «Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates», *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 37, n. 8, pp. 1097–1108, Ago. 1997.
- [5] L. M. P. Durão, T. H. Panzera, F. Scarpa, S. L. M. R. Filho, e P. R. Oliveira, «Damage assessment of fibre reinforced laminates», *Compos. Struct.*, vol. 133, pp. 939–946, Dez. 2015.
- [6] Duarte Silva, J. P. Teixeira, e C.M.M Machado, «Methodology analysis for evaluation of drilling-induced damage in composites», 2014.
- [7] J. P. Davim, J. C. Rubio, e 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, n. 9, pp. 1939–1945, Jul. 2007.
- [8] Silva, Duarte, «Image processing methodology for assesment of drillig induced damage in CFRP», Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- [9] «Boeing: 787 Dreamliner», 23-Jan-2017. [Em linha]. Disponível em: <http://www.boeing.com/commercial/787/#/design-highlights/visionary-design/composites/advanced-composite-use/>. [Acedido: 23-Jan-2017].
- [10] «Technology | Airbus, a leading aircraft manufacturer», *airbus*, 23-Jan-2017. [Em linha]. Disponível em: <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a350xwbfamily/technology-and-innovation/>. [Acedido: 23-Jan-2017].
- [11] D. Liu, Y. Tang, e W. L. Cong, «A review of mechanical drilling for composite laminates», *Compos. Struct.*, vol. 94, n. 4, pp. 1265–1279, Mar. 2012.
- [12] D. Iliescu, D. Gehin, M. E. Gutierrez, e F. Girot, «Modeling and tool wear in drilling of CFRP», *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 50, n. 2, pp. 204–213, Fev. 2010.
- [13] C. M. . Machado, «Empirical Models for Quantification of Machining Damage in Composite Materials», Tese de Douturamento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

- [14] J. Babu, T. Sunny, N. A. Paul, K. P. Mohan, J. Philip, e J. P. Davim, «Assessment of delamination in composite materials: A review», *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 230, n. 11, pp. 1990–2003, Nov. 2016.
- [15] U. Khashaba, M. Seif, e M. Elhamid, «Drilling analysis of chopped composites», *Compos Part Appl Sci Manuf*, vol. vol. 38, n. no. 1, pp. 61–70, 2007.
- [16] A. Faraz, D. Biermann, e K. Weinert, «Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates», *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 49, n. 15, pp. 1185–1196, Dez. 2009.
- [17] Melo, Ricardo Albuquerque, «Análise da influência das variáveis do processo de furação de materiais compósitos sobre o dano através do método de Taguchi com características dinâmicas», Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2014.
- [18] G. Lo Re, F. Lopresti, G. Petrucci, e R. Scaffaro, «A facile method to determine pore size distribution in porous scaffold by using image processing», *Micron*, vol. 76, pp. 37–45, Set. 2015.
- [19] Baracinha, Joana Nobre Soares, «Caracterização da geometria do dano induzido na furação de compósitos reforçados com fibra de carbono», Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2016.
- [20] F. Lissek, J. Tegas, e M. Kaufeld, «Damage Quantification for the Machining of CFRP: An Introduction about Characteristic Values Considering Shape and Orientation of Drilling-induced Delamination», *Procedia Eng.*, vol. 149, pp. 2–16, Jan. 2016.
- [21] N. Feito, J. Díaz-Álvarez, J. López-Puente, e M. H. Miguelez, «Experimental and numerical analysis of step drill bit performance when drilling woven CFRPs», *Compos. Struct.*, vol. 184, pp. 1147–1155, Jan. 2018.
- [22] L. Sorrentino, S. Turchetta, e C. Bellini, «A new method to reduce delaminations during drilling of FRP laminates by feed rate control», *Compos. Struct.*, vol. 186, pp. 154–164, Fev. 2018.
- [23] Trombini e Dytz, «Imagens em Radiologia Industrial: Fatores que alteram a Qualidade de Imagem», 2013. [Em linha]. Disponível em: <https://www.seer.furg.br/vetor/article/viewFile/3797/2448>. [Acedido: 25-Jan-2017].
- [24] Ricardo Andreucci, *A Radiologia Industrial*. 2006.
- [25] C. Tavares, «Influência da Força de Aperto na Minimização do Dano em Furação a Alta Velocidade em Materiais Compósitos», Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.
- [26] Guimarães, Ludgero dos Santos, «Compressão de placas compósitas após submetidas a impacto a baixa velocidade», Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2010.
- [27] F. P. Beer and E. R. Johnston, *Mecânica Vetorial para Engenheiros: Estática*, 6ª Edição. Portugal: McGraw-Hill, 1998.

- [28] V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, J. C. Rubio, A. E. Correia, A. M. Abrão, e 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, n. 1–3, pp. 431–438, Jul. 2008.

Resultados calculados através do *software* desenvolvido. Dos vários ensaios efetuados reunimos dados obtidos dos ensaios realizados com velocidade de avanço de 300 m/min, para efeitos de comparação.

Tabela A5.1- Valores do fator mínimo de delaminação proposto por *Silva* e do fator clássico de *Chen*

Ensaio	Código ensaio	Fd_min	Fd_Chen
1	A18	1,975	2,203
2	A19	1,431	1,451
3	A17	1,016	1,027
4	A28	1,393	1,478
5	A29	1,175	1,253
6	A27	1,045	1,066
7	A38	1,519	1,627
8	A39	1,243	1,292
9	A37	1,062	1,096
10	B18	1,555	1,568
11	B19	1,370	1,394
12	B17	1,081	1,132
13	B28	1,683	1,132
14	B29	1,074	1,084
15	B27	1,048	1,082
16	B38	1,517	1,583
17	B39	1,159	1,165
18	B37	1,051	1,110
19	X1D19	1,593	1,648
20	Y1E18	1,101	1,204
21	Z1F38	0,963	1,056
22	1D37	1,576	1,742
23	1C38	1,701	1,751
24	2E17	1,357	1,420
25	2C19	1,478	1,532
26	3C17	1,100	1,209

Tabela A5.2- Valores do fator de delaminação ajustado de *Davim* e fator clássico de *Chen*

Ensaio	Código ensaio	Fda_Davim	Fd_Chen
1	A18	2,676	2,203
2	A19	1,559	1,451
3	A17	1,074	1,027
4	A28	1,570	1,478
5	A29	1,302	1,253
6	A27	1,115	1,066
7	A38	1,768	1,627
8	A39	1,350	1,292
9	A37	1,148	1,096
10	B18	1,787	1,568
11	B19	1,517	1,394
12	B17	1,191	1,132
13	B28	2,095	1,132
14	B29	1,115	1,084
15	B27	1,120	1,082
16	B38	1,776	1,583
17	B39	1,229	1,165
18	B37	1,153	1,110
19	X1D19	2,010	1,648
20	Y1E18	1,245	1,204
21	Z1F38	1,085	1,056
22	1D37	2,200	1,742
23	1C38	2,229	1,751
24	2E17	1,525	1,420
25	2C19	1,623	1,532
26	3C17	1,326	1,209

Tabela A5.3- Valores da Dimensão do dano de *Khshaba* e fator clássico de *Chen*

Ensaio	Código ensaio	Fd_Khshaba	Fd_Chen
1	A18	3,007	2,203
2	A19	1,579	1,451
3	A17	0,122	1,027
4	A28	1,194	1,478
5	A29	0,885	1,253
6	A27	0,298	1,066
7	A38	1,568	1,627
8	A39	1,022	1,292
9	A37	0,432	1,096
10	B18	1,419	1,568
11	B19	1,379	1,394
12	B17	0,596	1,132
13	B28	1,985	1,132
14	B29	0,295	1,084
15	B27	0,371	1,082
16	B38	1,459	1,583
17	B39	0,579	1,165
18	B37	0,493	1,110
19	X1D19	1,619	1,648
20	Y1E18	0,715	1,204
21	Z1F38	0,251	1,056
22	1D37	1,855	1,742
23	1C38	1,877	1,751
24	2E17	1,469	1,420
25	2C19	1,860	1,532
26	3C17	0,941	1,209

Tabela A5.4- Valores do fator de delaminação bidimensional e fator clássico de *Chen*

Ensaio	Código ensaio	Fd_Faraz	Fd_Chen
1	A18	1,213	2,203
2	A19	0,526	1,451
3	A17	0,264	1,027
4	A28	0,546	1,478
5	A29	0,392	1,253
6	A27	0,284	1,066
7	A38	0,662	1,627
8	A39	0,417	1,292
9	A37	0,300	1,096
10	B18	0,614	1,568
11	B19	0,486	1,394
12	B17	0,321	1,132
13	B28	0,805	1,132
14	B29	0,294	1,084
15	B27	0,293	1,082
16	B38	0,627	1,583
17	B39	0,340	1,165
18	B37	0,308	1,110
19	X1D19	0,679	1,648
20	Y1E18	0,363	1,204
21	Z1F38	0,279	1,056
22	1D37	0,759	1,742
23	1C38	0,766	1,751
24	2E17	0,504	1,420
25	2C19	0,586	1,532
26	3C17	0,366	1,209