

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Avaliação de Ferramentas e Condições de Corte
na Furação de Laminados Compósitos**

Daniel Joaquim Silva Gonçalves

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica
Produção, Desenvolvimento e Engenharia Automóvel

Orientador: Prof. Dr. António Monteiro Baptista
Co-orientador: Prof. Dr. Luís Miguel Pereira Durão

Julho de 2010

Resumo

Face à crescente utilização que se tem verificado nos mais variados domínios, os materiais compósitos constituem actualmente um dos mais interessantes grupos de materiais na nossa sociedade tecnológica.

As suas propriedades tais como; o baixo peso e a elevada resistência específica tornam os materiais compósitos uma excelente escolha para aplicações que exijam elevadas rigidez e resistência específica. As peças em compósitos são normalmente produzidas na forma final, contudo devido à necessidade da posterior montagem de componentes é necessário recorrer a operações de furação. Durante o processo de furação ocorrem danos que afectam as propriedades mecânicas do material e põem em risco a fiabilidade dos componentes.

Desta forma, o desenvolvimento de ferramentas de corte torna-se um desafio à indústria de materiais compósitos, na obtenção de furos de elevada qualidade, minimizando o dano.

Este trabalho visa analisar a influência de vários parâmetros, tais como; avanço, velocidade de corte e geometria de ferramenta, nas forças desenvolvidas durante a furação, na extensão do dano e na rugosidade da superfície do furo.

Neste trabalho apresenta-se um estudo comparativo de geometrias de ferramentas com o objectivo de reduzir o dano associado à furação, que permitirá determinar qual a melhor selecção de parâmetros de furação, atendendo às diferentes geometrias e materiais de ferramenta.

É apresentado um modelo de elementos finitos para a simulação do processo de furação em laminados compósitos.

Abstract

Given the increased use that has been observed in several fields, composite materials currently represent one of the most interesting groups of materials in our technological society.

Their properties such as low weight and high specific strength turn them into an excellent choice for applications requiring high specific stiffness and strength. The composite parts are usually produced to net shape. However, as subsequent assembly is required, drilling operations are needed. During drilling process, damage occurs affecting the mechanical properties of materials and undermining the reliability of components.

Thus, the development of cutting tools becomes a challenge to the industry of composite materials to obtain high quality holes, minimizing damage.

This work aims to examine the influence of various parameters such as: feed rate, cutting speed and tool geometry, on thrust forces developed during drilling operations, on the extent of damage and on surface roughness of hole.

In this work, a comparative study of tool geometry with the aim of reducing the associated damage during drilling process is presented. It will determine the best selection of drilling parameters, given the different geometries and tool materials.

A finite elements model to simulate the drilling process in composite laminates is presented.

Agradecimentos

A realização deste trabalho, envolveu a colaboração de várias pessoas e Instituições sem as quais a concretização deste não seria possível. A todos expresso a mais elevada consideração e os mais sinceros agradecimentos:

Em primeiro lugar, ao Prof.Dr. Luís Durão, expresso a maior gratidão pela constante dedicação, empenho e partilha de conhecimentos que teve no acompanhamento do projecto. A incansável motivação e intensa disponibilidade que sempre manifestou, foram elementos cruciais para a concretização deste projecto.

Ao Prof.Dr. Monteiro Baptista pelo seu completo apoio, disponibilidade e partilha de conhecimentos na orientação deste projecto.

Ao Prof.Dr. João Tavares e Prof. Victor Albuquerque pela importante colaboração na aplicação das Técnicas de Visão Computacional.

Ao Prof.Dr Marcelo Moura cuja colaboração foi determinante no desenvolvimento do modelo de Elementos Finitos apresentado.

Ao Prof.Dr Raul Campilho pela partilha de conhecimentos prestados e pela sua intensa disponibilidade ao longo do projecto.

Ao Avelino Machado, Vitor Ribeiro e João Guimarães pela colaboração na realização da parte experimental deste projecto.

Às Instituições FEUP, ISEP e INEGI pelo acolhimento e disponibilização dos meios sempre que estes foram necessários.

À FCT- Fundação para a Ciência e Tecnologia, pelo apoio no âmbito do projecto PTDC/EME-TME/66207/2006.

À empresa FREZITE pela colaboração no projecto, na partilha de conhecimentos e no fornecimento de ferramentas.

À Joana Silva, por toda a motivação e apoio que manifestou desde o primeiro dia deste projecto.

À minha família e amigos que sempre me apoiaram em todos os momentos.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1 - Introdução aos materiais compósitos	2
1.2 - Definição de material compósito	3
1.3 - Materiais compósitos reforçados com fibras (FRPs)	3
1.4 - Limitações na maquinagem dos compósitos	4
1.5 - Propriedades mecânicas (Fibra/Resina)	5
1.6 - Orientação das Fibras	7
1.7 - Fibras	7
1.7.1. Fibras de vidro.....	7
1.7.2. Fibras de carbono	8
1.7.3. Fibras aramídicas	9
1.7.4. Fibras de boro	9
1.8 - Matriz	10
1.9 - Formas de apresentação dos reforços	10
1.9.1. Roving	10
1.9.2. Mantas	11
1.9.3. Tecidos 2D.....	11
1.9.3.1. <i>Woven Fabrics</i>	12
1.9.3.2. Malhas	12
1.9.4. Tecidos 3D.....	12
1.9.5. Pré-formas	13
1.10 - Processos de fabrico	13
1.10.1. Moldação por contacto	13
1.10.1.1. Moldação manual.....	13
1.10.1.2. Moldação por projecção	14
1.10.2. Enrolamento Filamentar.....	14

1.10.3. RTM (moldação por transferência de resina).....	15
1.10.4. Autoclave	16
1.10.5. Pultrusão.....	16
1.11 - Aplicações dos materiais compósitos	17
2. Processo de furação	23
2.1 Definição de furação de materiais compósitos	23
1.1 Referencias científicas	23
2.2 Geometria de ferramenta	24
2.3 Materiais de ferramentas	25
2.4 Desgaste de ferramentas	27
2.4.1 Desgaste das ferramentas-referências científicas	28
2.5 Furação não convencional	29
2.5.1 Corte por jacto de água	29
2.5.2 Corte por laser	30
2.5.2.1 Laser Nd/YAG	31
2.5.2.2 Laser de CO ₂	31
2.6 Dano	32
2.6.1 Métodos de análise do Dano	33
2.6.2 Factor de delaminação e Rácio de dano.....	33
2.6.2.1 Delaminação à entrada.....	33
2.6.2.2 Delaminação à saída	33
2.6.3 Modelo analítico da força critica para o inicio da delaminação.....	34
2.6.4 Critérios de Avaliação do Dano.....	34
3. Procedimento experimental e análise de resultados	39
3.1 Fabrico de placas CFRP	39
3.2 Furação - (controlo numérico computadorizado)	40
3.3 Monitorização da força axial	41
3.4 Medição da rugosidade na parede do furo	43
3.4.1 Caracterização dos parâmetros de Rugosidade	44
3.4.2 Parâmetros de avaliação de rugosidade	45
3.5 Avaliação do factor delaminação e rácio dano	46
3.6 Metodologia de análise de dados (Método de Taguchi)	47

4.	Monitorização da força axial exercida durante a furação.....	49
4.1	Monitorização de força axial em CFRP.....	49
4.1.1	Monitorização de força axial com ferramentas WC.....	49
4.1.1.1	Ferramentas em estudo	49
4.1.1.2	Comparação de diferentes geometrias	50
4.1.1.2.1	Brad, bidiametrais e helicoidais.....	50
4.1.1.2.2	Broca bidiametral H e bidiametral D	51
4.1.1.2.3	Brocas helicoidais	52
4.1.1.2.3.1	Brocas helicoidais 85 e 120	52
4.1.1.2.3.2	Brocas helicoidais 85 com e sem pré-furo.....	53
4.1.1.2.3.3	Brocas helicoidais 120 com e sem pré-furo	53
4.1.1.2.3.4	Brocas helicoidais 85 e 120 com recurso à pré-furação.....	54
4.1.1.3	Comparação de estratégias de furação.....	55
4.1.1.4	Influência da velocidade da broca bidiametral	56
4.1.1.5	Influência da pré-furação	57
4.1.1.6	Comparação das ferramentas de 2 e 4 cortantes	58
4.1.2	Monitorização de força axial com ferramentas PCD	60
4.1.2.1	Comparação de avanços.....	60
4.1.2.2	Longa série de furação	61
4.1.2.3	Alteração geometria PCD	62
4.1.2.3.1	Comparação entre PCD original e PCD alterada	62
4.1.3	Influência de outros parâmetros	63
4.2	Monitorização de força axial em GFRP	64
4.2.1	Furação em diferentes tipos de placas.....	65
4.2.2.	Análise da influência da velocidade de corte.....	66
4.2.3	Análise da influência do avanço da ferramenta	68
5.	Estudo da rugosidade.....	70
5.1	Influência da geometria de ferramenta na avaliação da rugosidade.....	71
5.2	Influência dos parâmetros avanço, geometria e velocidade na avaliação da rugosidade	73
5.3	Influência do material de ferramenta PCD na avaliação da rugosidade	74
6	Estudo da extensão do dano	75
6.1	Estudo do factor de delaminação.....	75
6.2	Estudo do factor de delaminação para diferentes geometrias de ferramenta	76
6.3	Factor de delaminação em função do parâmetro avanço	76

6.4 Influência dos parâmetros avanço, geometria e velocidade na avaliação da delaminação	77
7. Simulação numérica	79
7.1 Utilização do MEF	79
7.2 Aplicação do MEF ao modelo em estudo	80
7.3 Imagens da simulação do modelo	81
7.4 Resultados das simulações numéricas	81
Artigos científicos publicados	84
Conclusão	85
Bibliografia	87
Anexos.....	95

Lista de figuras

Figura 1 Comparação entre a resistência mecânica específica de alguns metais estruturais e FRPs	3
Figura 2 Curvas de tensão vs deslocamento para fibra e matriz	5
Figura 3 Curvas de tensão vs deslocamento para combinação entre fibra e matriz	6
Figura 4 Curvas de tensão vs deslocamento para diferentes tipos de fibras [2].....	6
Figura 5 Curvas de tensão vs deslocamento para diferentes tipos de matrizes [2].....	6
Figura 6 Variação de propriedades com a orientação das fibras para uma liga de Titânio reforçada com fibras de Boro [3].....	7
Figura 7 Bobines de Roving [6]	11
Figura 8 CSM (<i>Chopped Strand Mat</i>) [6]	11
Figura 9 Manta de superfícies [6]	11
Figura 10 Vários tipos de Woven 2D [6]	11
Figura 11 Exemplo de uma malha [6].	11
Figura 12 Representação do processo de deposição manual	14
Figura 13 Processo de enrolamento filamental	15
Figura 14 Moldação por transferência de resina com vácuo	15
Figura 15 Autoclave de grandes dimensões para cura de componentes em FRP.	16
Figura 16 Esquema do processo de pultrusão	17
Figura 17 Botija de gás Pluma fabricada por enrolamento filamental.	17
Figura 18 Tubagem de grandes dimensões em GFRP produzida por enrolamento filamental .	18
Figura 19 Painéis laterais do Metro do Porto produzidos por RTM	18
Figura 20 Poste de electricidade em GFRP fabricados por enrolamento filamental.	18
Figura 21 Atrelado de veículo pesado fabricado em GFRP	19

Figura 22 Hélices de torres eólicas fabricadas em GFRP por moldação por transferência por resina.	19
Figura 23 Processo de fabrico para hélices de torres eólicas por moldação por transferência por resina	19
Figura 24 Construção da fuselagem do Airbus A380 em GLARE	20
Figura 25 Pannel da fuselagem do Airbus A380 em GLARE.	20
Figura 26 Telescópio espacial com partes da estrutura em CFRP.	21
Figura 27 Super-desportivo Mosler MT900 com estrutura monocoque integral em CFRP.	21
Figura 28 Geometria típica de broca helicoidal “twist drill” [35]	25
Figura 29 Curva de vida de ferramenta [37].....	27
Figura 30 Esquema dos efeitos do desgaste de ferramenta na sua geometria e nas forças de corte na broca helicoidal [38]	28
Figura 31 Exemplo de aplicação de Laser Nd/YAG	31
Figura 32 Lente de concentração de energia.....	32
Figura 33 Delaminação à entrada “peel-up”.....	33
Figura 34 Delaminação à saída “push-down”.....	34
Figura 35 Exemplo da extensão do dano que ocorre devido à furação	35
Figura 36 Caso crítico, em que ocorre fissura (fig. esquerda) e área de dano uniforme (fig. direita).....	36
Figura 37 Constituição do laminado compósito em estudo [72].....	39
Figura 38 Centro de Maquinagem CNC utilizada nos ensaios de furação.	41
Figura 39 Dinamómetro KISTLER utilizado na monitorização das forças axiais.....	41
Figura 40 Placa após ser maquinada sobre o suporte e o dinamómetro.	42
Figura 41 Esquema do set-up experimental [38].....	42
Figura 42 Rugosímetro utilizado nas medições [73]	44
Figura 43 Perfil de rugosidade de uma medição da superfície maquinada do furo.....	44
Figura 44 Percurso de medição de rugosidade [74]	45
Figura 45 Representação do parâmetro de rugosidade R_a [74].....	45
Figura 46 Profundidade média de rugosidade (R_z) [74].	46
Figura 47 Metodologia aplicada para a avaliação do dano	47
Figura 48 Geometrias de ferramentas em estudo	50
Figura 49 Geometria de ferramenta de 2 cortantes (2Z).....	59

Figura 50 Geometria de ferramenta de 4 cortantes (4Z)	59
Figura 51 Alteração realizada na ferramenta em PCD	51
Figura 52 Placa em GFRP após furação	66
Figura 53 Broca brad durante o processo de furação.....	66
Figura 54 Pormenor do levantamento da apara.	66
Figura 55 Dano em furos realizados com broca Helicoidal 120 com diferentes avanços.....	75
Figura 56 Várias etapas da simulação do processo de furação à entrada do furo.....	81
Figura 57 Várias etapas da simulação do processo de furação à saída do furo	81

Lista de tabelas

Tabela 1 Propriedades de alguns tipos de fibras de vidro [4].....	8
Tabela 2 Propriedades de alguns tipos de fibras de carbono [4].	9
Tabela 3 Propriedades de alguns tipos de fibras aramídicas [4].	9
Tabela 4 Propriedades de alguns tipos de fibras de boro [4]	10
Tabela 5 Condições do ensaio 4.1.1.4.....	56
Tabela 6 Condições de ensaio 4.1.1.5.	57
Tabela 7 Condições de ensaio 4.1.1.6.....	59
Tabela 8 Condições de ensaio 4.1.2.1.....	60
Tabela 9 Condições de ensaio 4.1.2.3.1.	62
Tabela 10 Condições de ensaio 4.1.3.....	63
Tabela 11 Condições de ensaio 4.2.1.....	65
Tabela 12 Condições de ensaio 4.2.2.....	67
Tabela 13 Condições de ensaio 4.2.3.....	68
Tabela 14 Condições de ensaio 5.2	73
Tabela 15 Condições de ensaio 5.3	74
Tabela 16 Condições de ensaio 7.4.	77
Tabela 17 Comparação de resultados de força máxima durante a furação.	82

Lista de gráficos

Gráfico 1 Ciclo de cura das placas	40
Gráfico 2 Curva Força vs Deslocamento registrada para um determinado furo.	43
Gráfico 3 Influência do avanço nas forças axiais de furação nas 5 geometrias de ferramenta	50
Gráfico 4 Comparação das forças axiais exercidas entre as brocas bidiametrais.	51
Gráfico 5 Comparação das forças axiais exercidas entre as brocas helicoidais.....	52
Gráfico 6 Comparação das forças axiais exercidas entre as brocas helicoidais 85 com e sem pré-furo	53
Gráfico 7 Comparação das forças axiais exercidas entre as brocas helicoidais 120 com e sem pré-furo	53
Gráfico 8 Comparação das forças axiais exercidas entre as brocas helicoidais com pré-furo .	54
Gráfico 9 Comparação das forças axiais exercidas entre as ferramentas de 2 diâmetros	55
Gráfico 10 Relação entre força axial de furação e avanço.	56
Gráfico 11 Influencia do parâmetro velocidade na furação	57
Gráfico 12 Influência do diâmetro do pré-furo na força axial de furação.	58
Gráfico 13 Contribuição do avanço, geometria e velocidade de corte na força axial de furação	59
Gráfico 14 Forças desenvolvidas durante a furação para diferentes avanços com ferramentas em PCD	60
Gráfico 15 Relação entre força axial de furação e avanço para ferramentas em PCD	61
Gráfico 16 Forças axiais desenvolvidas na furação para longas séries de furação	61
Gráfico 17 Efeito da alteração de geometria da ferramenta nas forças axiais.	63

Gráfico 18 Contribuição dos parâmetros avanço, diâmetro e material da ferramenta na força axial de furação.....	64
Gráfico 19 Influencia do processo de fabrico da placa na força axial exercida pela broca brad	65
Gráfico 20 Influencia da velocidade de corte na força axial de furação	67
Gráfico 21 Influencia do avanço da ferramenta na força axial de furação	68
Gráfico 22 Influência da geometria da ferramenta na avaliação de rugosidade	71
Gráfico 23 Rugosidade da parede do furo para diferentes geometrias de ferramenta	72
Gráfico 24 Influência do avanço no parâmetro de rugosidade R_z	72
Gráfico 25 Contribuição do avanço, geometria e velocidade de corte na rugosidade da parede do furo.	73
Gráfico 26 Influência do avanço em na avaliação da rugosidade	74
Gráfico 27 Influência do avanço no factor delaminação nas 5 geometrias de ferramenta.....	76
Gráfico 28 Relação entre avanço e factor delaminação.....	77
Gráfico 29 Contribuição dos parâmetros avanço, geometria e velocidade no factor de delaminação.	78
Gráfico 30 Comparação das curvas força/deslocamento entre os resultados experimentais e o modelo numérico.....	82

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

Bidiametral D	Broca Bidiametral de Dentes Direitos
Bidiametral H	Broca Bidiametral Helicoidal
CFRP	Polímero Reforçado a Fibras de Carbono
CNC	Controlo numérico Computorizado
CRM	Continuous Random Mat
CROSS-PLY	Placas com orientação das camadas 0/90°.
CSM	Choped Strand Mat
FRP	Materiais compósitos reforçados a fibras
GFRP	Polímero Reforçado a Fibras de Vidro
GLARE	Alumínio reforçado com fibra de vidro
H 120	Helicoidal com ângulo de ponta de 120 graus
H 85	Helicoidal com ângulo de ponta de 85 graus
HSS	Aço rápido
KEVLAR	Marca Comercial de Compósitos reforçados a aramida
KFRP	Polímero reforçado a fibra aramida da marca Kevlar
Material F	Material de Ferramenta
MEF	Método dos Elementos Finitos
MM	Moldação Manual
Nd	Neodymium
PAN	Poliacrilonitrilo
PCD	Diamante Policristalino
PCD alterada	Ferramenta com modificação na “alma”
pf	Pré-furo
PPREG	Pré-Impregnado
RPM	Rotações por minuto

RTM	Moldação por transferência de Resina
SEAL	Empresa fabricante do pré-impregnado
TF	Teor de fibras
VARTM	Moldação por transferência de resina assistido por vácuo.
WC	Carboneto de Tungsténio
YAG	Yttrium Aluminium Garnet

Lista de símbolos

A_0	Área nominal do furo
A_D	Área delaminada
$A_{máx}$	Área correspondente ao diâmetro máximo
D_0	Diâmetro nominal do furo
$D_{máx}$	Diâmetro máximo da área delaminada
D_{RAT}	Rácio Dano
E	Módulo de elasticidade do material
f	Número de factores
F_{crit}	Força crítica para a ocorrência de delaminação
F_D	Factor de delaminação
F_{DA}	Factor de Delaminação adaptado
G_{IC}	Taxa crítica de libertação de energia em modo I puro
L_C	Comprimento de amostragem
L_m	Último comprimento de palpagem
L_t	Comprimento de palpagem
L_v	Primeiro comprimento de palpagem
n	Número de níveis
n^f	Nº total de ensaios
R_a	Rugosidade média aritmética
$R_{máx}$	Valor máximo da profundidade individual da rugosidade
R_z	Profundidade média de Rugosidade
v_t	Velocidade de medição
Z	Cortante
ν	Coefficiente de Poisson

1. Introdução

O estudo da furação de materiais compósitos assume actualmente uma importância fundamental devido ao elevado número de furos que são realizados nas mais diversas áreas. Como exemplo destaca-se a construção de um pequeno avião em que são realizados cerca de 100 000 furos, enquanto para maiores aviões de transporte são necessários alguns milhões de furos.

Esta crescente utilização de materiais compósitos nos mais variados domínios, tem como consequência o aumento das operações de maquinagem necessárias nos seus componentes. Durante a operação de furação ocorrem danos que afectam as propriedades mecânicas do material e que põe em risco a fiabilidade dos componentes.

Nesse sentido torna-se fundamental o conhecimento aprofundado do comportamento das ferramentas de corte durante o processo de furação, com o objectivo da obtenção de furos de elevada qualidade, com minimização do dano.

Este é, portanto, um desafio que se coloca à indústria dos compósitos.

Da necessidade de responder a este desafio, surgem os objectivos desta tese:

- Comparação de diferentes geometrias de ferramentas durante a furação.
- Caracterização dos tipos de danos que ocorrem na furação.
- Caracterização da rugosidade nas paredes dos furos.
- Estudo da influência das condições de corte nos tópicos acima descritos.
- Simulação numérica do processo de furação de laminados compósitos.

O capítulo 1 relata uma breve descrição sobre os materiais compósitos. Para além das suas propriedades mecânicas, são também apresentados alguns exemplos das suas aplicações assim como são explicados alguns dos seus diferentes processos de fabrico.

O processo de furação é descrito no capítulo 2. São apresentadas as especificações da geometria de ferramenta e de que forma estas influenciam a força axial durante a furação. O desgaste da ferramenta e a sua influência no tempo de vida da ferramenta para diferentes materiais são abordados. O recurso a técnicas não convencionais de furação, tais como, corte por laser e por jacto de água são descritos neste capítulo. O método de análise do dano e os seus critérios são detalhadamente explicados, assim como os seus modelos analíticos para determinação da força crítica para o início da delaminação.

No capítulo 3 são descritos todos os procedimentos experimentais dos capítulos 4, 5 e 6 assim como a descrição do fabrico das placas em laminados carbono/epóxico e a metodologia de Taguchi aplicada para o tratamento de dados.

No capítulo 4 são apresentados os resultados relativos à monitorização das forças axiais durante a furação. Este capítulo tem como objectivo comparar as forças axiais exercidas durante a furação sujeita a diferentes condições de furação. É alvo de estudo a influência dos parâmetros, tais como: geometria de ferramenta, avanço, velocidade, diâmetro de ferramenta na força axial exercida durante a furação. São testados também diferentes materiais de ferramentas. Embora o material a ser maquinado, seja principalmente carbono/epóxico, também foram realizados ensaios de furação em vidro/epóxico.

O capítulo 5 aborda o estudo da rugosidade na superfície maquinada do furo. São realizadas medições de rugosidade em furos sujeitos a diferentes avanços e geometrias de ferramenta. Desta forma, o objectivo deste capítulo consiste na determinação da relação entre a rugosidade na superfície maquinada e os parâmetros descritos.

O capítulo 6 diz respeito ao estudo da extensão do dano provocado pela operação de furação. As medições são realizadas em furos que foram sujeitos a diferentes avanços e geometrias de ferramenta. O objectivo desta medição do dano causado na furação consiste em determinar uma relação entre o dano causado e os parâmetros utilizados.

No capítulo 7, é apresentado um processo de simulação da furação de laminados carbono/epóxico, utilizando um modelo de elementos finitos tridimensional. As placas são modeladas com várias sequências de empilhamento quasi-isotrópica e a ferramenta de corte é modelada como um corpo “rígido”. São comparados os resultados da força necessária para o início da delaminação com os resultados obtidos experimentalmente assim como a sua sensibilidade à variação do parâmetro avanço de ferramenta.

1.1 - Introdução aos materiais compósitos

Os materiais compósitos são materiais constituídos por dois ou mais constituintes com propriedades físicas e/ou químicas significativamente diferentes, com o objectivo de ultrapassar as suas limitações quando usados individualmente e combinar as suas características competitivas, e que permanecem insolúveis a nível macroscópico.

O exemplo mais antigo da utilização de materiais compósitos refere-se ao fabrico de tijolos de lama reforçados com palha vegetal para construção de casas, permitindo desta forma um aumento da resistência à tracção de um material que isoladamente apenas tinha boa resistência à compressão.

O metal duro é um exemplo de um compósito de matriz metálica e é utilizado em ferramentas de corte de alto rendimento na indústria metalomecânica. Este compósito de alta rigidez é constituído por partículas de carboneto de tungsténio que forma o agregado e pela sua matriz de cobalto.

Em geral, os materiais compósitos são usados em aplicações que necessitem de elevados índices de resistência e rigidez específicas, possibilitando assim uma redução significativa do peso de componentes e estrutura relativamente aos materiais tradicionais.

Os FRPs (materiais compósitos reforçados a fibras), incluem os GFRP (Polímero Reforçado a Fibras de Vidro), o CFRP (Polímero Reforçado a Fibras de Carbono) ou compósitos reforçados a aramida (Kevlar®), entre outros.

A resistência mecânica específica é comparada (Figura 1) com alguns metais estruturais e materiais compósitos reforçados com fibras.

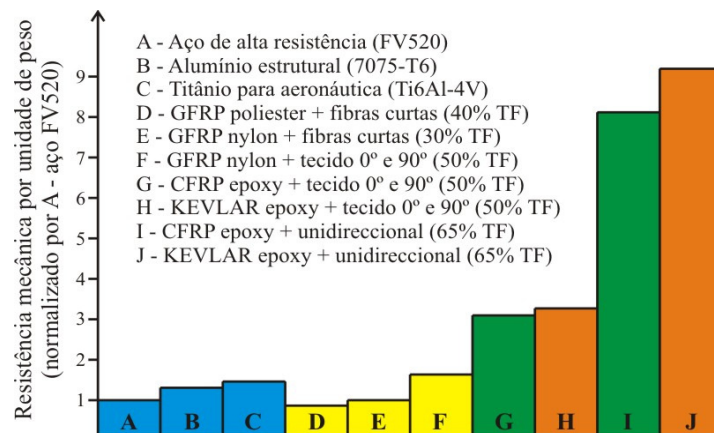


Figura 1 Comparação entre a resistência mecânica específica de alguns metais estruturais e FRPs

A percentagem de volume de fibras no material é representada pelo seu teor de fibras (TF).

Os compósitos D,E e F (GFRP) permitem com um baixo custo de matéria-prima e de fabrico, igualar a resistência específica de metais estruturais de alta resistência.

O limite de aplicabilidade destes materiais consiste no seu custo (CFRP e Kevlar), que aumenta significativamente com o aumento das suas características mecânicas.

No final, é o balanço entre o custo, desempenho e importância da vantagem competitiva destes materiais que permite optar sobre a escolha por estes materiais em substituição de materiais convencionais como o aço ou ligas de alumínio.

1.2 - Definição de material compósito

Como já foi referido, os materiais compósitos resultam da combinação de dois ou mais materiais com propriedades físicas distintas que constitui um novo material com características homogêneas, quando analisado macroscopicamente.

O objectivo do material compósito consiste na obtenção de um material que, combine as características dos seus componentes de uma forma adequada, que permita obter um desempenho estrutural melhor do que estes, quando actuam isoladamente.

O material compósito tem como vantagens, melhor características mecânicas, tais como, aumento da resistência mecânica, rigidez, baixo peso, bom comportamento à fadiga, entre outros.

1.3 - Materiais compósitos reforçados com fibras (FRPs)

De uma forma geral em termos de aplicações dos FRPs estes dividem-se em dois grandes grupos, os de alto desempenho e os de uso em geral.

Os FRPs utilizados em aplicações de alto desempenho são os CFRP ou KFRP (indústria aeronáutica, desportos de competição), enquanto os utilizados em aplicações mais gerais consistem essencialmente no GFRP e CFRP.

Relativamente ao fabrico dos FRPs existem diversas formas de os realizar. Tendo em conta as direcções de solicitação a que o componente estará sujeito, será escolhida a melhor sequência de empilhamento (orientação das camadas sobrepostas), que permitirá obter as suas características desejadas.

É possível obter um FRP muito resistente numa dada direcção pelo alinhamento das fibras nessa mesma direcção, e nas direcções em que as solicitações sejam menores, a resistência seja menor.

Desta forma é possível alcançar características (a nível de propriedades) que são previamente especificadas, através de uma selecção cuidada da matriz, do reforço, do seu processo de fabrico e da sequência de empilhamento.

Através da aplicação de aditivos ou revestimentos é também possível melhorar outras características tais como a resistência a produtos químicos, desgaste, tenacidade, humidade, temperaturas elevadas.

Os FRPs têm como principal vantagem o facto de permitirem ser projectados para possuírem propriedades específicas. Outra grande vantagem destes materiais consiste na flexibilidade, pois estes podem ser moldados em várias formas complexas.

1.4 - Limitações na maquinagem dos compósitos

Os materiais compósitos apresentam algumas limitações em função da sua natureza/características que são independentes do processo de fabrico que foram sujeitos.

Algumas características e suas consequências são aqui descritas:

- O comportamento do material compósito ao corte é condicionado pela orientação das fibras assim como a criação de descontinuidades das fibras afecta o desempenho do componente
- Não é possível obter a mesma qualidade do que a obtida na maquinagem dos materiais metálicos, devido à heterogeneidade e anisotropia dos materiais compósitos. São necessárias adaptações nos métodos tradicionais de modo a reduzir os danos causados por factores térmicos e mecânicos.
- As fibras ficam expostas á humidade e ao ataque por agentes químicos.
- Devido à natureza abrasiva dos compósitos a vida de ferramenta reduz-se e por esta razão as ferramentas são normalmente revestidas a carboneto de tungsténio, nitreto de titânio ou são diamantadas.
- Nos materiais compósitos, as superfícies suaves e com bom acabamento são difíceis de obter.
- Durante o processo de maquinagem dos materiais compósitos, junto às superfícies de corte origina-se a delaminação. Este fenómeno depende da orientação e sequência de empilhamento das camadas do compósito.

- A diferença de coeficientes de expansão térmica entre as fibras e a matriz dificulta o rigor dimensional e como consequência (no caso da furação) o diâmetro do furo obtido é menor do que o diâmetro da ferramenta.
- Durante a maquinagem de compósitos de matriz termoplástica devem-se evitar temperaturas próximas das de fusão enquanto para resinas termoendurecíveis não devem exceder as temperaturas de cura. [1]

1.5 - Propriedades mecânicas (Fibra/Resina)

Num compósito identificam-se dois constituintes: uma matriz e um reforço, sendo neste caso dos materiais compósitos reforçados com fibras de matriz polimérica (FRPs), as matrizes mais comuns as resinas polimérica, epóxida, o poliéster e o viniléster e como reforços as fibras de vidro, carbono ou aramida.

A matriz confere ductilidade e tenacidade ao componente e mediante a sua forma pretendida (estabilidade dimensional), esta proporciona a fixação e agregação da posição das fibras de reforço. Uma outra função da matriz consiste na protecção das fibras relativamente a danos que possam ocorrer durante o seu manuseamento, ocorrência de corrosão assim como protecção do desgaste (a matriz protege essencialmente dos agentes externos).

O reforço tem como função assegurar a estrutura interna do compósito assim como garantir as suas propriedades mecânicas, tais como elevada resistência quer à tracção, quer à compressão.

O reforço possui um elevado módulo de elasticidade, elevadas tensões de ruptura e um comportamento frágil enquanto a matriz caracteriza-se pelo seu baixo módulo, comportamento dúctil e baixa tensão de ruptura (Figura 2).

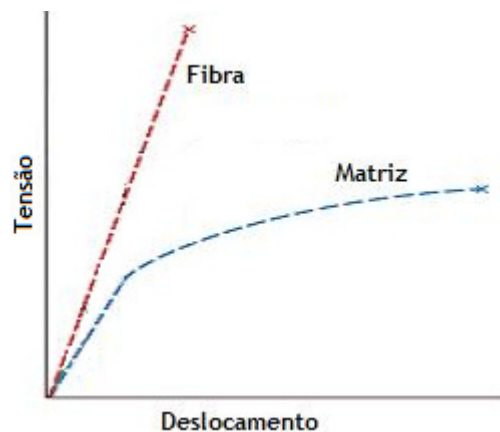


Figura 2 Curvas de tensão vs deslocamento para fibra e matriz

A combinação destes dois constituintes (matriz e reforço), permite obter propriedades bastante superiores às obtidas por cada constituinte individualmente (Figura 3).

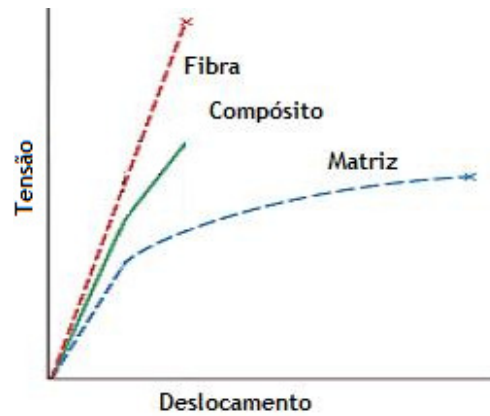


Figura 3 Curvas de tensão vs deslocamento para combinação entre fibra e matriz

Nas figuras seguintes apresentam-se mais detalhadamente o comportamento de vários reforços (Figura 4) e matrizes (Figura 5).

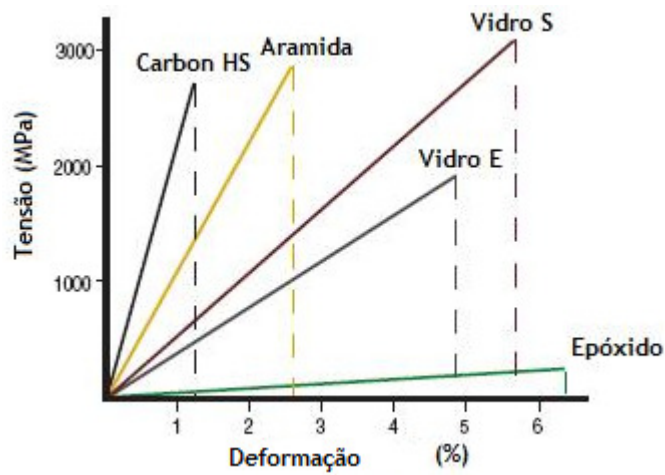


Figura 4 Curvas de tensão vs deslocamento para diferentes tipos de fibras [2].

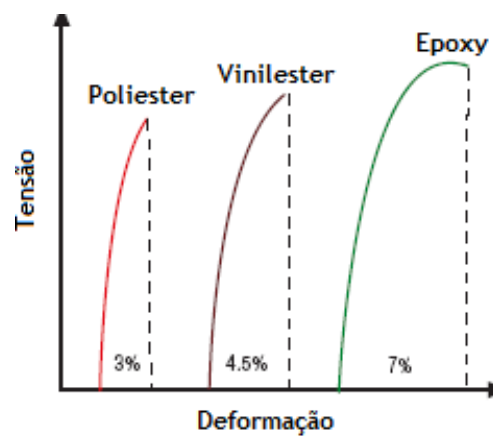


Figura 5 Curvas de tensão vs deslocamento para diferentes tipos de matrizes [2].

1.6 - Orientação das Fibras

Através da sequência de empilhamento e sua orientação das fibras é possível obter maior resistência na direcção de a que a componente estará sujeita a maiores solicitações.

Desta forma a resistência será máxima quando as fibras estiverem orientadas com o esforço, sendo mínima na direcção perpendicular (Figura 6).

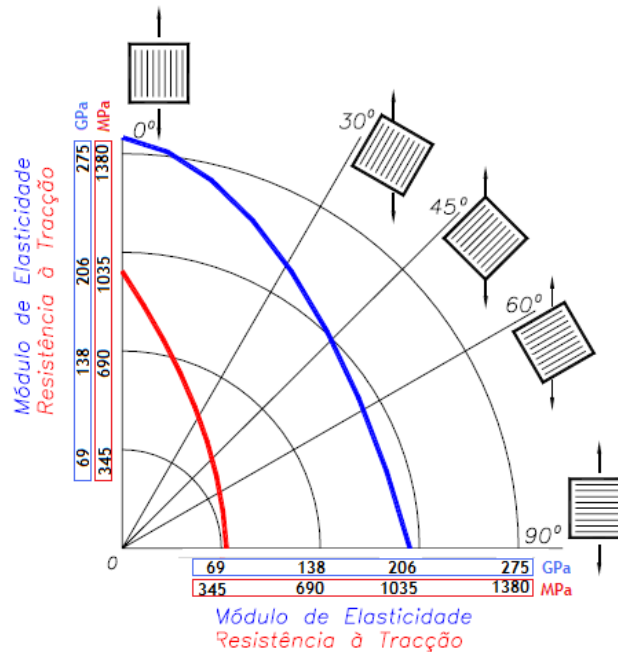


Figura 6 Variação de propriedades com a orientação das fibras para uma liga de Titânio reforçada com fibras de Boro [3]

1.7 - Fibras

1.7.1. Fibras de vidro

As fibras de vidro actualmente são o reforço mais utilizado nas aplicações mais comuns. O processo mais comum para produzir fibra de vidro consiste no estiramento de vidro através de uma fieira em liga de platina-ródio. A temperatura de fusão é de cerca de 1260°C, sendo este valor variável em função da composição do vidro. O diâmetro dos cordões de fibra pode variar entre 10 e 100 µm.

Consoante a finalidade a que as fibras se destinam, estas são sujeitas a determinados tratamentos superficiais à saída da fieira. Os revestimentos podem então ser: Têxtil (aplicado com o objectivo de evitar a danificação da fibra), ou plástico (com a função de compatibilização entre fibras e matrizes orgânicas).

As fibras de vidro caracterizam-se por apresentarem boa resistência à tracção e flexibilidade e podem ser aplicadas como reforço sob a forma de fibras curtas, longas assim como em tecido ou fio de várias fibras.

As fibras são classificadas segundo diferentes tipos, E, S e R. As fibras de vidro do tipo E (mais comum) apresentam boas propriedades eléctricas, mecânicas e químicas.

As fibras S e R são obtidas a partir do vidro de alta resistência o que lhes confere uma elevada resistência mecânica, daí serem aplicados na indústria aeronáutica e terem elevados custos.

Tabela 1 Propriedades de alguns tipos de fibras de vidro [4].

<i>Propriedade</i>	<i>Vidro E</i>	<i>Vidro S</i>	<i>Vidro R</i>
Densidade g/cm ³	2,6	2,49	2,55
Módulo de Young	73	85,5	86
Tensão de ruptura [MPa]	3400	4580	4400
Deformação na rotura	4,4	5,3	5,2
Coeficiente de expansão térmica [10 ⁻⁶ /°C]	5,0	2,9	4,0

1.7.2. Fibras de carbono

Este tipo de fibras divide-se essencialmente em 2 grupos: fibra de carbono, com percentagens entre 80% e 95% de carbono e as fibras de grafite com percentagens até 99%.

A produção das fibras de carbono consiste na decomposição térmica de vários precursores orgânicos. Existem três tipos de precursores; celulose, alcatrão e o poliacrilonitrilo (PAN), que é o precursor mais utilizado.

As fibras de carbono são produzidas a partir de fibras orgânicas sendo submetidas às várias fases: oxidação, carbonização, grafitização e tratamento superficial. Na fase de oxidação as fibras são aquecidas até 300°C em atmosfera rica em oxigénio. Em seguida na carbonização a cadeia molecular é aquecida até 1100°C, em atmosfera neutra. No final desta fase do processo as fibras apresentam boas propriedades mecânicas. A grafitização consiste no processo de pirólise das fibras realizada em atmosfera neutra que permite obter fibras de elevado módulo de elasticidade. Na fase do tratamento superficial o objectivo é atingir elevados níveis de adesão entre as fibras e as resinas. A classificação das fibras de carbono é efectuada com base na sua resistência mecânica da seguinte forma: Alta rigidez, Alta resistência, Ultra rigidez e Ultra resistência, com o custo a aumentar pela ordem indicada. As fibras de carbono apresentam espessuras inferiores a 10 µm e em termos de aplicações estas podem ser usadas como fibras soltas ou em tecido (camada de pré-impregnado).

Tabela 2 Propriedades de alguns tipos de fibras de carbono [4].

<i>Propriedade</i>	<i>PAN</i>	<i>Alcatrão "Pitch"</i>	<i>"Rayon fibers"</i>
Densidade g/cm ³	1,8	2,0	1,7
Módulo de Young	200-400	300-700	415-680
Tensão de ruptura [MPa]	2480-5600	1900-2200	2070-2760
Deformação na ruptura	0,6-1,2	1-1,5	0,5-0,6
Coeficiente de expansão térmica [10 ⁻⁶ /°C]	-0,7 a -0,5	-1,6 a -0,9	-

1.7.3. Fibras aramídicas

As fibras aramídicas são produzidas a partir das poliamidas aromáticas, e segundo este processo a cadeia molecular é alinhada conseguindo-se obter uma melhoria nas propriedades mecânicas. Estas fibras apresentam excelente resistência química, mecânica, elevada resistência a solventes orgânicos boa resistência ao impacto e fadiga. Contudo, estas fibras têm como desvantagem uma elevada sensibilidade ao corte interlaminar assim como uma baixa resistência à compressão e à flexão.

Tabela 3 Propriedades de alguns tipos de fibras aramídicas [4].

<i>Propriedade</i>	<i>Kevlar® 29</i>	<i>Kevlar® 49</i>	<i>Twaron®</i>
Densidade g/cm ³	1,44	1,45	1,44
Módulo de Young	60	129	60
Tensão de ruptura [MPa]	3000	3000	2600
Deformação na ruptura	3,6	1,9	3
Coeficiente de expansão térmica [10 ⁻⁶ /°C]	-2,0	-2,0	-

1.7.4. Fibras de boro

As fibras de boro são produzidas por deposição de boro em fase de vapor sobre um fio de tungstênio ou carbono, que actua como substrato [5]. O diâmetro da fibra de boro pode atingir 200 µm. O módulo de elasticidade das fibras de Boro são cerca de 5 vezes maiores do que as fibras de vidro. Este tipo de fibras é utilizado normalmente na forma de fitas pré-impregnadas em resina de epóxico, fenólica ou poliamida. Os compósitos de Boro são normalmente aplicados na indústria aeronáutica, devido ao seu elevado custo.

Tabela 4 Propriedades de alguns tipos de fibras de boro [4].

<i>Propriedade</i>	<i>100 μm</i>	<i>140 μm</i>	<i>200 μm</i>
Densidade g/cm ³	2,61	2,47	2,39
Módulo de Young	400	400	400
Tensão de ruptura [Mpa]	3450	3450	3450
Deformação na ruptura	0,7 a 0,9	0,7 a 0,9	0,7 a 0,9
Coeficiente de expansão térmica [10 ⁻⁶ /°C]	4,9	4,9	4,9

1.8 - Matriz

As matrizes termoendurecíveis são as referenciadas neste estudo. São abordadas as resinas poliéster, vinilester e époxada.

A resina de poliéster é a resina mais utilizada e de menor custo, facilidade de processamento e bom compromisso entre as propriedades mecânicas, eléctricas e químicas. Os FRPs que são constituídos por resina poliéster são normalmente revestidos pois estas têm como limitações alta sensibilidade aos raios ultra-violeta e a degradação com o tempo.

A resina vinilester apresentam elevada tensão de ruptura, baixa viscosidade, elevada resistência química e um processo de cura rápido. Apresentam elevada contracção geométrica (10%) o que se torna uma desvantagem. Comparando com a resina poliéster, apresenta menor viscosidade, é também mais flexível e é mais resistente à degradação ambiental.

A resina epóxida tem excelentes propriedades mecânicas tais como; elevada resistência mecânica, resistência à abrasão, resistência química, elevadas temperaturas de funcionamento (entre 100 e 220°C), boas propriedades de adesão à fibra, processo de cura sem libertação de voláteis, baixa absorção de água e baixa contracção (2 a 3%) o que proporciona boa estabilidade dimensional. Estas características tornam esta resina de eleição na indústria aeroespacial.

1.9 - Formas de apresentação dos reforços

1.9.1. Roving

Consiste num cordão de filamentos contínuos enrolados helicoidalmente em bobines. Quanto ao processamento destas fibras, estas podem ser destinadas à produção de fibras curtas e tecidos ou entrançados, mantas, malhas ou híbrido (Figura 7).



Figura 7 Bobines de Roving [6]

1.9.2. Mantas

São constituídas por fibras distribuídas de uma forma aleatória e agregadas com um ligante que lhes confere estabilidade e lhe permite ser solúvel na impregnação. As mantas apresentam bom acabamento superficial e elevada resistência química. As mantas podem ser CSM (*Chopped Strand Mat*), CRM (*Continuous Random Mat*) que são pela mesma ordem, mantas de filamentos cortados e filamentos contínuos. Outra forma que a manta pode ter é a manta de superfície que são constituídas por fibras curtas pré-impregnadas e são extremamente leves (20 a 30g/m²)



Figura 8 CSM (*Chopped Strand Mat*) [6]



Figura 9 Manta de superfícies [6]

1.9.3. Tecidos 2D

Os tecidos 2D consistem em ligações entre feixes de fibras longas. Podem ser aplicadas fibras de vidro, carbono, aramídica ou até combinações destas. Estes podem ter diferentes orientações e resistências mecânicas, larguras e espessuras, mas devem ser suficientemente

estáveis para garantir capacidade de conformação à forma do molde quando são cortados e manuseados.

1.9.3.1. *Woven Fabrics*

São produzidos pelo entrelaçamento de fibras segundo direcções perpendiculares. Estes podem ter diversos padrões (Figura 10)



Figura 10 Vários tipos de *Woven* 2D [6]

1.9.3.2. Malhas

São produzidos pela ligação sucessivas de camadas de fibra alinhadas, que são cozidas com o objectivo de facilitar a distribuição das cargas pelas fibras e desta forma melhorar as propriedades do material (elevados módulos em tracção e flexão), assim como boa conformabilidade e resistência interlaminar.

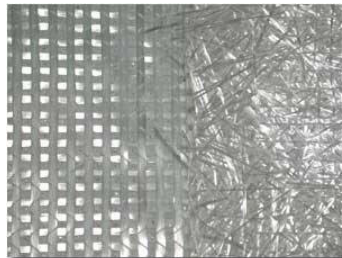


Figura 11 Exemplo de uma malha [6].

1.9.4. Tecidos 3D

Os tecidos 3D são constituídos por ligações múltiplas de fibras com diferentes orientações. Como estes tecidos possuem fibras orientadas na direcção da espessura, estes têm melhor resistência interlaminar ao compósito relativamente aos tecidos 2D, contudo estes necessitam de boa impregnação pela resina, que limita o teor de fibras e afecta as propriedades mecânicas.

1.9.5. Pré-formas

Podem ser 2D ou 3D e constituídas por fibras curtas ou contínuas.

As pré-formas de fibras curtas podem resultar da projecção de fibras e de um ligante sobre uma armação perfurada ou através da sobreposição manual de mantas.

No caso das pré-formas de fibras contínuas estas resultam de união de camadas bidimensionais de tecidos com diferentes orientações (sendo possível variar a espessura), que lhes confere uma melhor resistência interlaminar relativamente às pré-formas de fibra curta.

As pré-formas depois de colocadas na cavidade do molde, são sujeitas à injeção da resina. Caracterizam-se pela sua forma estável e pela excelente relação resistência-peso. Por estes motivos as pré-formas são utilizadas para o fabrico de produtos de geometria complexa.

1.10 - Processos de fabrico

Nesta secção são abordados diferentes processos de fabrico dos materiais compósitos de matriz polimérica.

No processamento dos materiais compósitos estes apresentam uma grande vantagem relativamente aos materiais tradicionais pois a utilização dos componentes compósitos permite uma grande flexibilidade na sua concepção. De uma forma geral os processos de fabrico dos compósitos de matriz polimérica caracterizam-se por reduzir o número de peças necessárias para integrar no conjunto final. Desta forma o processo de montagem torna-se mais simples e rápido, o que reduz substancialmente os custos de mão-de-obra. Recorrendo a este tipo de materiais e processos de fabrico, para além de se evitar montagens também se podem evitar processos de ligação que seriam necessários em construção metálica.

- Moldação por contacto
 - Moldação manual
 - Moldação por projecção.
- Enrolamento filamentar
- RTM (*Resin Transfer Moulding*)
- Autoclave
- Pultrusão

1.10.1. Moldação por contacto

A moldação por contacto é bastante utilizada para compósitos de fibra de vidro, sendo o método mais comum e mais económico. A moldação por contacto pode ser manual ou por projecção.

1.10.1.1. Moldação manual

Neste processo são empilhadas e impregnadas várias camadas de reforço (manta, tecido). O empilhamento e impregnação são realizados manualmente e em molde aberto. Este tipo de moldação caracteriza-se por permitir um bom acabamento superficial que é devido a uma

aplicação prévia sobre o molde de “gel coat” (resina poliéster). Normalmente as peças fabricadas por este processo apresentam um teor de fibra de cerca de 25%. A moldação manual é aplicada no fabrico de pequenas séries de produção. As vantagens deste método são: simples execução, poucas restrições à geometria e investimento inicial reduzido. As principais desvantagens são: emissões de estireno, baixa produtividade, necessidade de rebarbagem para acabamento, bom acabamento superficial só numa face, heterogeneidade no teor de fibra, bastante mão-de-obra necessária.

A mão-de-obra neste processo é não qualificada o que se torna numa mais-valia em termos de custo de produção.

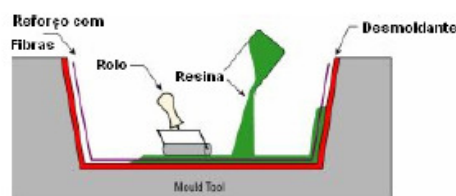


Figura 12 Representação do processo de deposição manual

1.10.1.2. Moldação por projecção

Este processo consiste na projecção de fibra e resina simultaneamente sobre o molde. A fibra encontra-se sob a forma de roving e é cortada com o comprimento pretendido e projectado juntamente com o jacto de resina.

A moldação por projecção permite apenas o fabrico de pequenas séries. A percentagem do teor em fibras obtido com este processo é de 15% (significativamente inferior aos 25% da moldação manual) o que provoca nas peças obtidas piores características mecânicas.

1.10.2. Enrolamento Filamentar

Consiste na deposição de fibras de resina em forma de roving previamente impregnado em resina sobre um mandril em rotação. O reforço é desenrolado sob condições controladas sujeito a um guiamento, enquanto é impregnado em resina. O reforço é enrolado em várias camadas enquanto o mandril permanece em rotação. Durante este processo de movimento do mandril, este é controlado pela translação do carro e rotação com a finalidade de orientação das fibras em função da solicitação a que a peça estará sujeita. Terminado o enrolamento filamentar (Figura 13) ocorre a polimerização em forno.

De uma forma geral as principais vantagens deste método são:

- Elevados teores de fibra (60 a 75%), o que significa boas propriedades mecânicas
- Orientação do reforço consoante as solicitações a que a peça estará sujeita
- Fabrico de peças de grandes dimensões
- Automatização

Como principais desvantagens:

- Forma da peça sujeita a restrições
- Necessidade de maquinagem/acabamentos
- Necessidade de operador qualificado para a manutenção do processo
- Ângulos baixos (0 a 15 graus) na orientação das fibras são difíceis de executar.

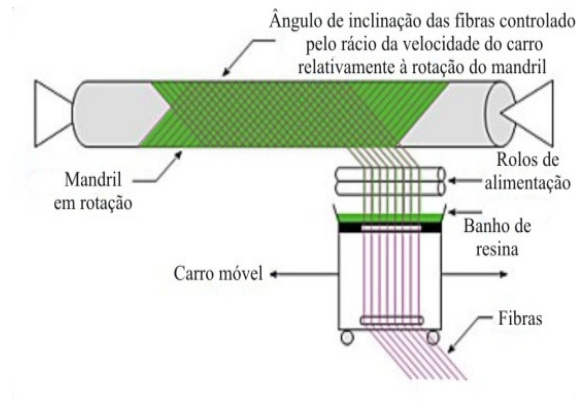


Figura 13 Processo de enrolamento filamental

1.10.3. RTM (moldação por transferência de resina)

Na parte interior do molde é colocado o reforço. Procede-se ao fecho do molde e é injectada resina sob pressão dentro da cavidade de moldação. Desta forma, a resina impregna o reforço e cura.

Este processo tem vindo a ser desenvolvido nos últimos anos recorrendo à utilização de pré-formas produzidas automaticamente recorrendo a métodos de corte CNC (*Computer Numerically Controlled*) e ao uso de resinas com sistemas de cura por ultravioletas. Esta evolução permitiu ao processo que inicialmente era limitado a pequenas cadências de produção e constituído por baixo teor de fibras, elevar a sua cadência de produção assim como aumentar o seu teor de fibras.

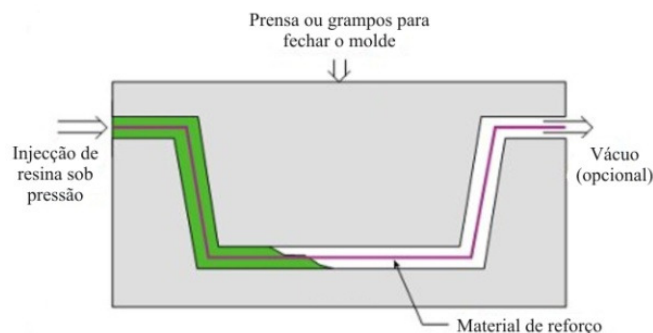


Figura 14 Moldação por transferência de resina com vácuo.

O VARTM (*Vacuum Assisted Resin Transfer Molding*), é uma variante do RTM que recorre à utilização do vácuo após a injeção da resina. Este processo alternativo permite uma

facilidade maior na impregnação do reforço, aumentando os teores de fibra até 70% e reduz a formação de porosidades.

1.10.4. Autoclave

Este processo consiste na consolidação de um componente pré-formado através da aplicação de temperatura, pressão e vácuo em simultâneo. O controlo e ajuste de cada parâmetro depende do material a moldar. Após aplicação de vácuo no molde ocorre a cura e consolidação da peça, na qual as pressões assumem uma grande importância. A moldação em Autoclave permite produzir peças de grande dimensão e geometria complexa. As peças obtidas apresentam excelentes propriedades mecânicas e qualidade, pois o teor do reforço é superior a 60 %. As desvantagens são elevado tempo de ciclo assim como grande investimento inicial, razão pela qual este processo na prática é usado para pequenas series.



Figura 15 Autoclave de grandes dimensões para cura de componentes em FRP.

1.10.5. Pultrusão

Este processo é contínuo e permite realizar todo tipo de perfis de secção constante (de varias formas, ocos ou maciços). As fibras são aplicadas sobre a forma de roving, manta ou tecido e podem ser; fibra de vidro, fibra de carbono e fibra aramídica. O processo inicia-se com a tracção do reforço (este orientado longitudinalmente) e é conduzido para um recipiente com resina (geralmente poliéster) no estado líquido. Nesse momento ocorre a impregnação das fibras e seguidamente é conduzido através de uma fieira de aço pré-aquecida. Essa fieira confere a forma do perfil e polimeriza o reforço impregnado. Os passos seguintes consistem no processo de cura e finalmente no corte do perfil com a dimensão pretendida. A velocidade de pultrusão depende da complexidade do perfil, da resina e da espessura sendo que varia normalmente entre 0,50 a 2 m/min.

Existe uma variante do processo de pultrusão designada por “pulforming” que se caracteriza por permitir realizar perfis curvos de secção constante, em que o processo de fabrico é similar à pultrusão com a excepção de curvar a peça antes de terminar a cura.

As vantagens do processo de pultrusão são:

- Produção contínua e automática
- Excelentes propriedades mecânicas na direcção longitudinal
- Permite realizar diferentes formas de perfil
- Elevadas percentagens de fibra (30 a 70%)

As principais desvantagens são:

- Processo limitado a fabrico de peças de secção constante
- Quando se utiliza resinas termoplásticas (possuem maior viscosidade), o processo torna-se mais complexo pois são necessárias maiores forças de arrasto.
- Baixo rigor dimensional
- Reforço apenas possível na direcção longitudinal

Na Figura 16 está representado o processo de pultrusão.

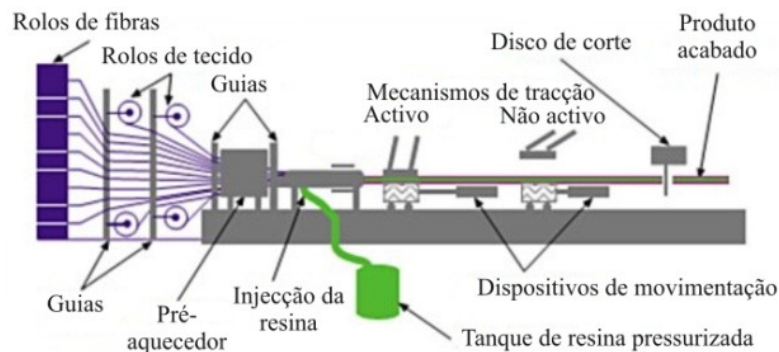


Figura 16 Esquema do processo de pultrusão

1.11 - Aplicações dos materiais compósitos

As aplicações dos FRPs dividem-se em dois grupos: o grupo que inclui os artigos de lazer e construção (GFRP) e o grupo da indústria aeroespacial e de desporto de competição (CFRP).

São apresentados alguns exemplos de aplicações em FRPs assim como a referência do seu processo de fabrico:

A botija de gás Pluma da “GALP”, (Figura 17) é um exemplo da utilização de materiais compósitos com o objectivo de redução de peso, mantendo os requisitos mínimos exigidos pelas especificações do produto. O seu processo de fabrico é o enrolamento filamental, o reservatório é fabricado em aço reforçado por GFRP com matriz de polipropileno e a estrutura exterior da botija em polietileno de alta densidade e fibra de vidro. A resistência desta nova botija é 3 vezes superior à anterior e o peso total da botija reduziu-se para metade (7,5 kg contra 15 kg). Para além de ser uma botija mais ergonómica e visualmente atractiva é totalmente reciclável.



Figura 17 Botija de gás Pluma fabricada por enrolamento filamental.

O enrolamento filamental é aplicado ao fabrico de tubagens e condutas para transporte de gases ou líquidos a alta pressão (Figura 18) e reservatórios de alta pressão.



Figura 18 Tubagem de grandes dimensões em GFRP produzida por enrolamento filamental

Os painéis exteriores das carruagens do metro do Porto são produzidos por RTM (Figura 19). O piso do metro é revestido com painéis em "ninho de abelha" o que lhe confere uma enorme resistência e capacidade de isolamento.

Os materiais empregues no interior do metro são essencialmente fibra, poliéster e alumínio, resistentes ao fumo e ao fogo.



Figura 19 Painéis laterais do metro do Porto produzidos por RTM

Os postes de electricidade (Figura 20) são produzidos por pultrusão ou enrolamento filamental, pois o GFRP possui baixa condutividade eléctrica, tem peso reduzido (facilidade de transporte e montagem) e resiste à corrosão.



Figura 20 Poste de electricidade em GFRP fabricados por enrolamento filamental.

Outros exemplos, tais como: banheiras, piscinas, pára-choques, painéis exteriores de veículos e artigos de lazer diversos, são aplicações fabricadas por moldação manual com fibras curtas ou longas, ou moldação por transferência de resina (fibras longas ou tecido).

O atrelado do veículo pesado (Figura 21) é construído quase totalmente em GFRP e é fabricado por processos de moldação tipicamente manuais ou por spray.



Figura 21 Atrelado de veículo pesado fabricado em GFRP

As hélices das torres eólicas (Figura 22) são produzidas por processos de infusão de filme de resina ou moldação por transferência de resina assistida por vácuo. A utilização de materiais compósitos para o fabrico destas componentes (Figura 23) permitiu o aumento da capacidade de produção de energia eléctrica, pois houve um aumento considerável do tamanho das hélices devido à redução do seu peso.



Figura 22 Hélices de torres eólicas fabricadas em GFRP por moldação por transferência por resina.



Figura 23 Processo de fabrico para hélices de torres eólicas por moldação por transferência por resina

O avião comercial Airbus A380 usa FRPs na sua fuselagem, cauda e asas. Algumas partes da sua fuselagem são produzidas em GLARE (alumínio reforçado com fibra de vidro); Figura 24 e Figura 25. Este material recente é composto por diversas camadas finas de alumínio intercaladas com camadas unidireccionais de pré-impregnado de GFRP, ligadas por uma matriz de epóxido.



Figura 24 Construção da fuselagem do Airbus A380 em GLARE



Figura 25 PAINEL da fuselagem do Airbus A380 em GLARE.

Em telescópios espaciais (Figura 26), são utilizados CFRPs, devido à sua expansão térmica reduzida, característica esta, que se adequa a este equipamento pois o telescópio espacial exige o posicionamento relativo muito preciso das lentes de focagem para temperaturas muito variáveis.

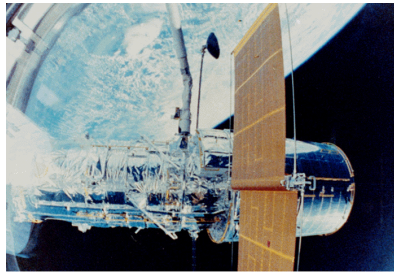


Figura 26 Telescópio espacial com partes da estrutura em CFRP.

A aplicação de CFRP nos carros desportivos pode reduzir o seu peso até 75-80% dos componentes quando comparados com o aço. Como exemplo, existe o super desportivo Mosler MT900 (Figura 27), com monocoque integral em CFRP. O seu processo de fabrico consiste no empilhamento de pré-impregnado, através da deposição de camadas de CFRP sob um molde, seguido de cura em autoclave.



Figura 27 Super-desportivo Mosler MT900 com estrutura monocoque integral em CFRP.

2. Processo de furação

2.1. Definição de furação de materiais compósitos

Entre os vários processos de maquinagem, a furação assume uma posição relevante, devido à grande necessidade do estabelecimento de ligações ou reparações estruturais. A furação é realizada sobre peças, que lhes permitirá posteriormente a sua ligação mecânica a outras peças da mesma estrutura com parafusos ou rebites. Contudo a operação de furação pode causar vários defeitos nas peças, que comprometem a fiabilidade do componente. A furação geralmente consiste num processo final (montagem de componentes), por isso qualquer defeito durante essa etapa conduz à rejeição do componente. Por essa razão na indústria aeronáutica, a delaminação durante a furação é responsável por 60% de rejeição de peças. Por este motivo o impacto económico associado é bastante significativo [7].

2.1.1. Referências científicas

A operação de furação tem sido alvo de estudo de alguns investigadores. Segundo, [8-17] aplicando a mecânica da fractura linear elástica, estudaram que na furação de materiais poliméricos a força axial, é considerada como a causa de delaminação. Dharan e Won [18] realizaram um sistema capaz de monitorizar a força de avanço e binário, recorrendo ao comando numérico da ferramenta com o objectivo de alterar as condições de furação e evitar desta forma os danos na peça maquinada. Danos que são causados na entrada e saída da ferramenta na peça, caracterizados principalmente pelo arrancamento de fibra/matriz, delaminação ou ainda descolamento das fibras da matriz.

O estudo do mecanismo de delaminação recorrendo à furação com e sem suporte de apoio para a peça maquinada foi estudado por Capello [19]. Davim e Reis [20] estudaram a relação entre velocidades de corte e avanço sobre a delaminação em placas de material compósito.

A delaminação, assim como o efeito da concentração de tensões e microfissuras (resultantes do processo de furação) na redução significativa do desempenho dos compósitos foi estudado por Park, Choi, Lee [21-22]. Tsao e Hocheng [23] compararam diferentes geometrias de ferramenta com diferentes parâmetros de corte, concluindo que a maior importância do avanço e do diâmetro da ferramenta na delaminação. A importância do avanço foi também estudada por Davim e Reis [24]. Os autores Hocheng e Tsao [25]

dedicaram-se a um resumo dos principais passos a considerar na eliminação da delaminação na furação de peças em compósitos. A influência dos parâmetros, velocidade de corte, avanço, diâmetro do furo e fracção volúmica de fibra na força crítica, binário e rugosidade na superfície foi estudado por El-Sonbaty et al [26]

A furação de GFRP com brocas de aço rápido [27] permitiu concluir que o avanço é o principal parâmetro responsável pela intensidade e natureza dos danos causados à peça maquinada. O desempenho dos componentes e a sua maquinabilidade dependem das diferentes propriedades físicas da fibra e da matriz e da sua combinação com a orientação das fibras [28]. A aplicação de um geometria específica de broca em carboneto de tungsténio com um pequeno ângulo de saída - 6° - com a consequente redução da largura da ponta da broca, assim como aumento do número de arestas cortantes para três a seis e um ângulo de ponta de 118° foi sugerido por Piquet et al [29]. Sistemas designados como ‘inteligentes’ podem ser aplicados para evitar a delaminação. Nestes sistemas o avanço é regulado em função da fase da furação, sendo mais lento nos momentos de entrada e de saída da broca (camadas superiores e inferiores do laminado), Dharan & Won [30]. A implementação de um sistema de controlo baseado numa rede neural para o controlo da força axial durante a furação foi sugerida por Stone & Krishnamurthy [31]. Durão & Gonçalves [32], com o objectivo de estabelecer uma correlação entre as forças desenvolvidas durante o processo de furação e a extensão da zona delaminada em redor do furo, realizaram ensaios mecânicos. O objectivo consistiu na avaliação da importância da escolha adequada da geometria de ferramenta na diminuição do dano e na melhoria das características mecânicas das peças.

A monitorização de forças desenvolvidas por 5 diferentes geometrias de ferramentas foram efectuadas assim como a medição da rugosidade nas superfícies dos furos. [33]

2.2. Geometria de Ferramenta

Durante o processo de furação são relevantes 2 tipos de força que ocorrem; força axial e binário [34].

A força axial consiste na força necessária para manter o avanço constante. O binário consiste na força de torção que é necessária para manter a velocidade de rotação constante.

Embora existam diversos tipos de geometria de ferramentas, na Figura 28 são apresentadas as especificações da broca mais universal, a helicoidal. O corte ocorre nas arestas cortantes da ferramenta e na aresta não cortante da alma da broca, “chisel edge”. Os canais de escoamento conduzem a saída da apra. A espessura do lábio representa a distância horizontal entre as arestas cortantes da ferramenta e têm como função proteger a ponta da ferramenta e garantir rigidez. O processo de corte na aresta não cortante da alma, “chisel edge”, ocorre no seu raio externo pois o seu movimento consiste na extrusão (comportamento quasi-estacionário). O “chisel edge” é desta forma, o grande responsável pela força axial, embora pouco influencie o binário.

Na Figura 28 é possível verificar os parâmetros geométricos para o exemplo de geometria de ferramenta mais comumente utilizada (helicoidal), tais como; ângulo de ponta, ângulo de hélice, diâmetro da ferramenta e ângulo de folga que afecta o comportamento da ferramenta.

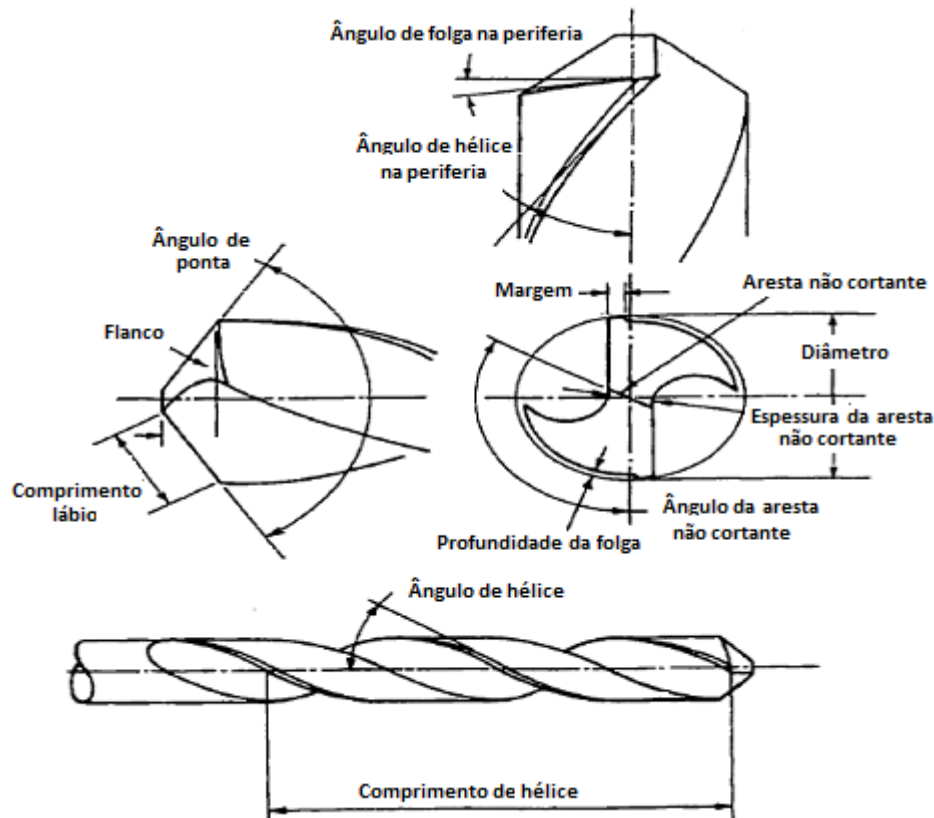


Figura 28 Geometria típica de broca helicoidal “twist drill” [35]

2.3. Materiais das ferramentas

O sucesso do fabrico de uma ferramenta para maquinagem só é conseguido após uma adequada selecção de materiais para uma determinada aplicação.

Durante o processo de furação, as ferramentas estão sujeitas a: elevadas temperaturas, elevadas pressões de contacto e atrito com a apara e com a superfície já maquinada da peça (neste estudo, área da parede do furo).

Por estas razões mencionadas, a ferramenta deve apresentar propriedades, tais como: dureza, resistência ao desgaste, tenacidade e estabilidade química.

- Dureza: é um factor bastante importante, principalmente em temperaturas elevadas para garantir resistência ao desgaste e resistência mecânica nas temperaturas de trabalho.
- Tenacidade: a ferramenta deve resistir a impactos comuns nas operações de furação.
- Resistência ao desgaste: para garantir uma durabilidade compatível com o processo de furação.
- Estabilidade química: não deve reagir com o material da peça a ser furada ou contamina-lo.

Os principais materiais utilizados em ferramentas de furação neste estudo são; Aços rápidos (HSS), Metal duro (WC) e diamante policristalino (PCD).

As ferramentas em aço rápido, apresentam boa resistência ao desgaste e o seu custo é relativamente baixo. Os HSS podem ser de 2 tipos: ao molibdênio (série M) e ao tungstênio (série T). A série M contém como elementos de liga, até 10% de molibdênio e mais cromo, vanádio, tungstênio e cobalto [36].

A série T contém entre 12% a 18% de tungstênio, com cromo, vanádio e cobalto como elementos de liga. A maior parte das ferramentas em aço rápido (95%) são fabricadas em aço rápido da série M, pois esta apresenta uma boa resistência a abrasão, menor distorção em tratamento térmico e é menos dispendioso. Para melhorar o seu desempenho, as ferramentas de aço rápido podem também ser revestidas ou tratadas superficialmente por tratamento térmico. A velocidade de corte nas ferramentas de aço rápido é uma limitação quando comparadas com as ferramentas em metal duro.

As ferramentas em metal duro possuem dois grupos básicos de carbonetos utilizados em ferramentas de metal duro que são o tungstênio e o titânio.

O carboneto de tungstênio (WC) é composto por partículas de carboneto de tungstênio agrupadas numa matriz de cobalto sendo as ferramentas deste material fabricadas através da sinterização. A quantidade de cobalto afecta as propriedades da ferramenta, pois com o aumento do teor de cobalto a resistência, dureza e resistência ao desgaste diminuem enquanto que a tenacidade aumenta. É possível aumentar a resistência ao desgaste da ferramenta, recorrendo à utilização de pastilhas de metal duro com cobertura de carboneto de titânio, óxido de alumínio, nitreto de titânio e carbonitreto de titânio. Desta forma torna-se possível combinar uma pastilha tenaz com uma superfície com elevada dureza.

As ferramentas em PCD (Diamante Policristalino), consistem em ferramentas que têm um revestimento de diamantes artificiais. A camada de diamante sintético policristalino (PCD) é constituída por partículas finas de diamante sinterizadas com cobalto, que são aplicadas por brasagem.

A desvantagem deste material consiste na difícil lapidação devido a anisotropia assim como reacção química (difusão) com materiais ferrosos em temperaturas moderadas. Por estas razões o diamante não é utilizado para maquinar metais ferrosos, mas sim em não ferrosos tais como ligas de alumínio, cobre, plásticos, resinas reforçadas e materiais cerâmicos.

2.4. Desgaste das ferramentas

As ferramentas de corte durante a maquinagem, estão sujeitas as seguintes solicitações: elevadas tensões localizadas; elevadas temperaturas, escoamento da apra ao longo da superfície de saída e atrito entre a ferramenta e a superfície maquinada.

Como consequência destas solicitações ocorre o desgaste da ferramenta, ou seja, a vida útil da ferramenta diminui, sendo também prejudicada a qualidade da superfície maquinada e a precisão dimensional. Por estas razões a vida útil da ferramenta é bastante importante em termos de rentabilidade económica.

A velocidade de desgaste da ferramenta, depende da geometria de ferramenta, dos materiais da peça, materiais da ferramenta (Figura 29), fluidos de corte, parâmetros de processo (velocidade de corte, avanço) e das características da máquina ferramenta.

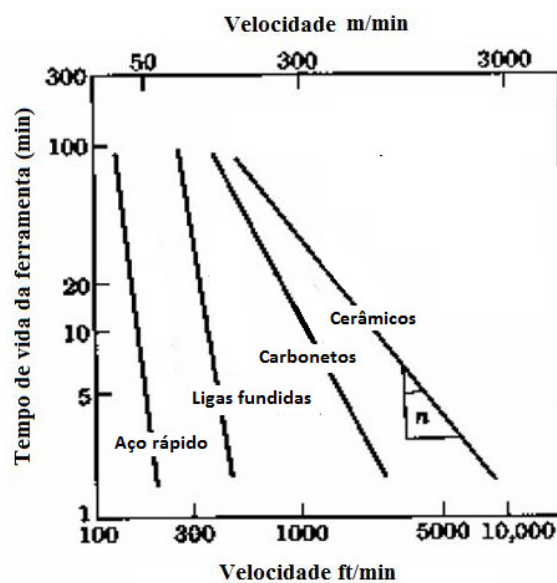


Figura 29 Curva de vida de ferramenta [37]

Como é demonstrado na Figura 29 para o mesmo tempo de vida de uma ferramenta, a velocidade de corte da ferramenta varia em função do material.

A Figura 30 representa os efeitos do desgaste da ferramenta na geometria helicoidal assim como nas forças de corte. Esta figura é da autoria de S.C. Lin et al [38] que estudou a força exercida durante a furação, o binário, o desgaste de ferramenta e a qualidade do furo (relativamente à delaminação), para as ferramentas; multifacetada e helicoidal.

Deste estudo concluiu-se então, que em furação a alta velocidade, o desgaste da ferramenta é o principal responsável pela delaminação em CFRP. Devido ao rápido desenvolvimento do desgaste da ferramenta, a geometria desta altera-se rapidamente (degrada-se) e as forças exercidas durante a furação aumentam drasticamente com o aumento da velocidade de corte.

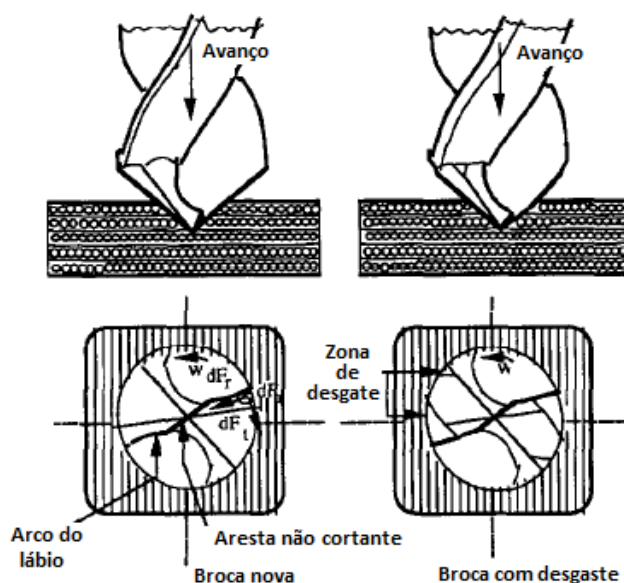


Figura 30 Esquema dos efeitos do desgaste de ferramenta na sua geometria e nas forças de corte na broca helicoidal [38]

2.4.1. Desgaste das ferramentas-referências científicas

Tendo em conta a necessidade de diminuição dos tempos de ciclo de maquinagem (furação) é necessário otimizar a furação a alta velocidade, pois é uma área bastante importante em termos de impacto económico. Às grandes velocidades de corte está inevitavelmente associado o desgaste das ferramentas. Alguns estudos têm sido dedicados relativamente a este assunto [39-43].

Segundo Sanjay Raw [44], o desgaste das ferramentas é bastante importante pois o seu efeito resulta num aumento de delaminação no laminado. Segundo Rao [45] à medida que o tempo de maquinagem aumenta, as arestas cortantes tornam-se progressivamente desgastadas e a afectam a qualidade do furo. Recorrendo a altas velocidades de corte (10000 e 15000 rpm), em placas CFRP [46] estudou os vários tipos de desgaste das ferramentas em carboneto e a sua influência na qualidade do furo. Lin and Chen [46] observaram que o aumento de desgaste da ferramenta está associado ao aumento das forças tangenciais. Estudaram o comportamento da broca helicoidal e a broca multifacetada com alta velocidade de furação ($> 38\,000$ rpm) em CFRP e concluíram que um desgaste agressivo é o maior problema para essa gama de velocidades. Velayudham et al [47] avaliaram o comportamento de ferramentas de carboneto na furação de GFRP com teor de fibra elevado. A influência do desgaste da ferramenta no dano interno em furos de pequenos diâmetros em GFRP foi abordada por Inoue et al [48]. A avaliação do efeito da geometria de ferramenta e das condições de furação na vida útil da ferramenta e na qualidade do furo, foi objecto de estudo de Shyha et al [49], tendo se verificado que a geometria de ferramenta e o avanço assumem a maior influência.

2.5. Furação não convencional

A furação não convencional é um assunto que tem sido alvo de um grande desenvolvimento nos últimos anos. É feita uma descrição do processo de furação não convencional por jacto de água e por laser assim como as suas vantagens e desvantagens associadas.

2.5.1. Corte por jacto de água

O corte por jacto de água é uma tecnologia recente que em diversas situações pode ser vantajoso relativamente aos métodos convencionais de furação e mesmo ao laser. O corte por jacto de Água pode ser dividido em dois processos: jacto de água não abrasivo (designado por corte por jacto de água) e corte por jacto de água abrasivo

No corte por jacto de água abrasivo, esta é expelida com alta pressão por um bocal em direcção ao material a cortar. Acoplado ao bocal, existe uma câmara que contém o material abrasivo em pó. Quando a água passa pelo bocal arrasta o material abrasivo que confere ao jacto uma potência de corte maior.

O jacto com alta pressão é expelido pelo bocal em direcção do material a cortar.

O corte ocorre quando a força do jacto supera a resistência à compressão do material.

As pressões a que o jacto está sujeito são superiores a 410MPa, o jacto é filtrado a 0.5 µm e é bombeado normalmente entre 4 a 8 L/min. O fluido é expelido a alta pressão por um orifício de safira (no bocal) com diâmetro a variar entre 0.8 e 7.6 mm. O jacto de água é projectado a uma velocidade de aproximadamente 850 m/s [50].

O corte por jacto de água abrasivo é condicionado por diferentes variáveis tais como: pressão, caudal, diâmetro do jacto, abrasivo, distância e velocidade de corte.

A pressão representa o nível de energia das moléculas de água, desta forma ao aumentarmos a pressão, mais facilmente se consegue cortar o material (vencer a força de coesão do material a cortar). A quantidade de remoção do material está condicionada pelo caudal (é possível o seu aumento através do aumento da pressão de água ou através do aumento do orifício da safira). O diâmetro do jacto para sistemas de corte com abrasivo normalmente situa-se em torno dos 0.5 mm.

Os abrasivos normalmente utilizados são; óxido de alumínio, sílica, metal duro granulado e nitrato de silício.

Com o aumento do tamanho da granulação do abrasivo, a velocidade de corte também aumenta. Contudo a superfície de acabamento da peça é superior quando são utilizados pequenos grãos de abrasivo. Quanto mais duro for o abrasivo e quanto maior for o caudal, maior será o desgaste do bocal assim como maiores serão os custos associados ao processo.

A distância que é mantida entre o bocal e a superfície de corte têm que ser normalmente 1,5 mm pois o jacto tem tendência a aumentar a sua abertura, principalmente quando se recorre a abrasivos.

O corte por jacto de água abrasivo pode ser aplicado na maior parte dos materiais, sendo normalmente aplicado em materiais metálicos, densos e casos de elevadas espessuras.

O corte por jacto de água não abrasivo segue o mesmo princípio de funcionamento com abrasivo (à excepção da introdução do material abrasivo no jacto e da sua câmara que o contém em pó). Este corte normalmente é aplicado em materiais não metálicos.

As vantagens e desvantagens dos dois tipos de corte por jacto de água são apresentadas:

Vantagens do corte por jacto de água:

- O corte pode ser iniciado em qualquer ponto da peça.
- Durante o corte não há o calor gerado, o que significa que a zona afectada pelo corte tem menor dano, apresentando assim a peça melhores propriedades mecânicas.
- Não produz poeiras ou partículas em que a sua inalação possa ser perigosa.
- Não requer troca de ferramentas como a furação tradicional quando corta outros materiais.
- A largura de corte em corte de jacto de água é muito pequena, e muito pouco material é desperdiçado.

Desvantagens do corte por jacto de água:

- Elevados níveis de ruído.
- Podem ser cortados uma panóplia de materiais, contudo é apenas económico para um número restrito de materiais, pois a taxa de corte por vezes é muito reduzida e o tempo de corte da peça torna-se longo.
- A precisão dimensional do corte é afectada em casos em que a espessura da peça seja elevada.
- O fluido de corte tem de ser previamente filtrado para reduzir o desgaste causado no orifício de saída.
- No caso de materiais compósitos, se houver pouca adição de abrasivo ou velocidade insuficiente no fluido de corte, ocorre delaminação.

Em termos de aplicações o corte por jacto de água é aplicado a materiais cuja tensão de cedência é igual ou inferior a 80 MPa estando também condicionado à espessura do material a cortar [50]

2.5.2. Corte por laser

O laser "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", que significa, "Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação", consiste num feixe de luz de alta potência e coerência transversal, focalizado e posicionado precisamente com velocidade de varredura controlada.

O corte por laser é considerado um processo térmico pois, de toda a luz emitida pelo laser que incide sobre uma superfície, uma parte dela é absorvida e a energia associada a esta fracção aumenta a temperatura do material. Quando é atingida a luz concentrada suficiente no material a cortar, a temperatura aumenta que causará fusão, vaporização e decomposição [51]. O corte por laser quando é aplicado aos materiais compósitos, resulta no dano térmico na matriz que é causado devido ao calor conduzido através das fibras.

Os lasers estão a ganhar projecção no seu desenvolvimento e aplicações devido a duas principais razões:

Permitem obter no seu feixe de luz, elevadas potências.

Produzem o seu feixe de luz em feixes paralelos que permitem focar em pequenos pontos.

Os lasers mais frequentemente utilizados são YAG/Nd e o CO₂.

2.5.2.1. Laser Nd/YAG

O laser Nd/YAG (Figura 31) utiliza um cristal sólido de Yttrium Aluminium Garnet (YAG) que contem uma pequena quantidade de Neodymium (Nd). Este cristal iônico é impulsionado opticamente, através de uma ou várias lâmpadas, ou com fontes contínuas de luz. Quando os fótons da lâmpada excitadora atingem o cristal iônico, transferem a sua energia e ocorre então a emissão de novos fótons.

O feixe de luz é emitido com um comprimento de onda de $1,06 \times 10^3$ nm. Estes lasers para corte emitem pulsado de luz a frequências de aproximadamente 200 Hz. A potência de pico de cada pulsado pode ser de vários kW, contudo o seu valor médio de potência não ultrapassa 500 W [51].

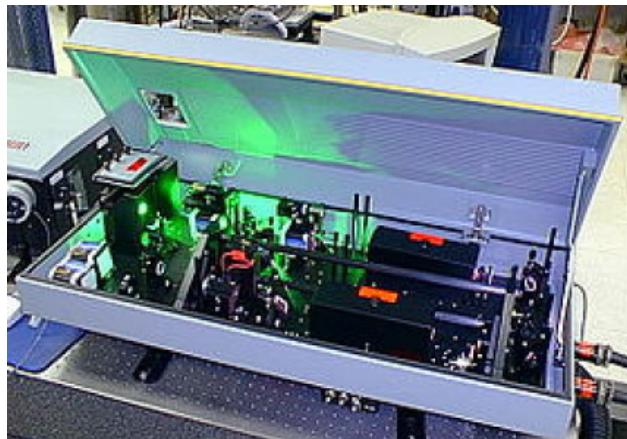


Figura 31 Exemplo de aplicação de Laser Nd/YAG

2.5.2.2. Laser de CO₂

O laser de CO₂ actua através de uma excitação eléctrica de moléculas de gás de CO₂ que emite luz de infravermelhos de $1,06 \times 10^4$ nm. O laser de CO₂ com um output de 1500 W, emite um feixe de 20 mm (desfocado) que permite atingir uma densidade de potência de 4×10^7 W/m². Nestas condições ocorre a decomposição da maior parte dos materiais orgânicos, contudo esta densidade de potência pode não ser suficiente para cortar completamente alguns materiais. Por essa razão usam-se lentes (Figura 32) ou espelhos para concentrar melhor a energia em determinado ponto. Desta forma consegue-se para o mesmo output de 1500 W focar num ponto de 0.15 mm de diâmetro e alcançar uma potência de densidade de 1.0×10^{11} W/m² que irá fundir metais em micro segundos e vaporizar qualquer material orgânico.

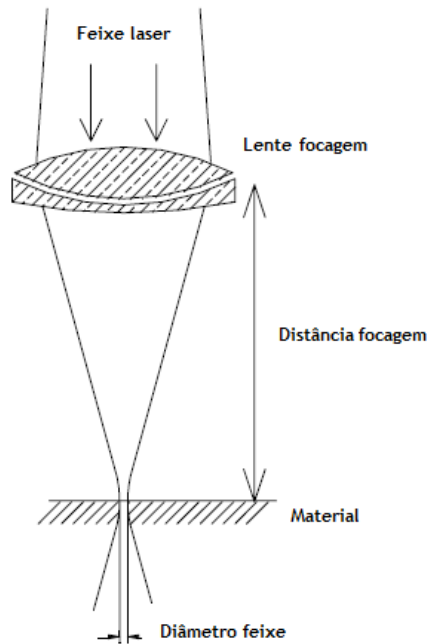


Figura 32 Lente de concentração de energia

Quando comparado com a furação convencional, o corte por laser apresenta a vantagem de não haver contacto físico, o que significa ausência de forças aplicadas pela ferramenta sobre o material e menor dano devido a essa força aplicada.

2.6. Dano

A natureza não-homogênea dos materiais compósitos e sua anisotropia levantam algumas dificuldades durante a operação de furação, sendo frequente a existência de uma orla de dano à volta da periferia do furo.

Durante a furação, os defeitos mais frequentes são, delaminação, arrancamento de fibras (causado pela perda de afiamento da aresta cortante da ferramenta usada) danos térmicos, estudado por Wern et al, [52] e descolamento fibra/matriz. Estes defeitos implicam correcções (quando possíveis) e consequente aumento do custo final.

A delaminação é considerada o defeito mais negativo, devido ao seu enorme impacto prejudicial na vida útil do material, nas suas propriedades mecânicas e como consequência o seu desempenho fica comprometido.

O objectivo principal consiste na redução da força de corte, e consequentemente a redução da delaminação através de uma correcta selecção de parâmetros de corte, nomeadamente o avanço, do material e da geometria da ferramenta de corte. [29,31,53-56]

2.6.1. Métodos de análise do Dano

A avaliação do dano será realizada através da medição do factor de delaminação proposto por Chen [57] e do rácio de dano, proposto por Mehta et al [58].

A delaminação, pode ser um defeito que ocorre não só nas últimas camadas da peça mas também nas camadas interiores o que dificulta a sua detecção por simples inspecção visual. É então necessário recorrer a métodos de ensaio não destrutivo para a avaliação do dano (exames de radiografia das peças e aplicação de algoritmos de processamento e análise de imagem nas imagens adquiridas).

2.6.2. Factor de delaminação e rácio de dano

A ocorrência de delaminação depende essencialmente do efeito de indentação causado pela ponta da broca e das propriedades do laminado (natureza das fibras e resina). Existem dois tipos de delaminação: à entrada (peel-up) e à saída (push-down) do laminado.

2.6.2.1. Delaminação à entrada

A delaminação à entrada (Figura 33) é causada pela acção de abrasão que ocorre no momento do contacto entre a broca e a peça.

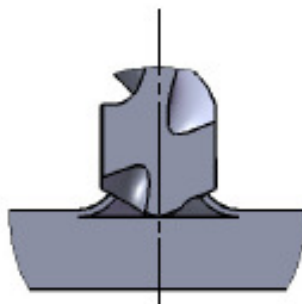


Figura 33 Delaminação à entrada “peel-up”.

Devido à influência do avanço da ferramenta durante a furação, o material em vez de ser cortado, tende naturalmente a ser puxado para cima ao longo das espiras da broca. Como consequência desta elevação das camadas superiores do material, estas separam-se do resto da placa.

2.6.2.2. Delaminação à saída

A delaminação à saída (Figura 34) resulta do efeito compressivo exercido pela extremidade da broca - quasi-estacionária - sobre as camadas não cortadas do laminado. Devido a esta força compressiva, as camadas tendem a ser empurradas para o lado oposto da placa provocando a separação entre camadas adjacentes (ligações interlaminares fracturam-

se), Stuart [59]. Se esta força exercida pela broca exceder a resistência interlaminar da placa ocorre delaminação.

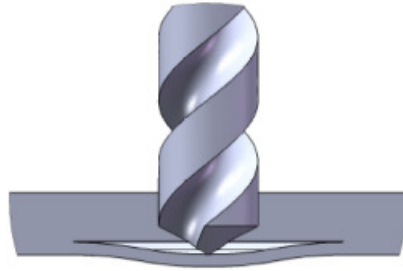


Figura 34 Delaminação à saída “push-down”.

A delaminação “peel-up” é possível evitar recorrendo um avanço baixo a moderado, contudo a delaminação à saída, “push-down” é mais difícil evitar, justificando os diferentes estudos já abordados neste caso [24,29, 60-65].

2.6.3. Modelo analítico da força crítica para o início da delaminação

Alguns modelos analíticos foram desenvolvidos para determinar a força crítica para o início da delaminação [66-69].

O modelo mais conhecido é o que é representado uma redução de Hocheng-Dharan [66] que relaciona a força crítica para o início da delaminação com propriedades mecânicas do laminado e a espessura não cortada do material (h), equação (1). Os mesmos autores, consideraram bastante importante a escolha da geometria de broca assim como selecção de parâmetros de corte adequados para reduzir a probabilidade de ocorrência da delaminação.

$$F_{crit} = \pi \left[\frac{8G_{Ic} E_1 h^3}{3(1 - \nu_{12}^2)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

Na equação (1), a F_{crit} é a força crítica para a ocorrência de delaminação, E_1 o módulo de elasticidade, G_{Ic} a taxa crítica de libertação de energia em modo I puro e ν_{12} o coeficiente de Poisson de uma placa unidireccional do material.

2.6.4. Critérios de avaliação do dano

Nesta secção são descritos alguns critérios de avaliação do dano. O factor de delaminação F_D , proposto por Chen [57] é definido como um quociente entre o máximo diâmetro delaminado, D_{max} e o diâmetro nominal do furo efectuado D_0 .

$$F_D = \frac{D_{m\acute{a}x}}{D_0} \quad (2)$$

$D_{m\acute{a}x}$ - Diâmetro máximo da área delaminada

D_0 - Diâmetro da área delaminada

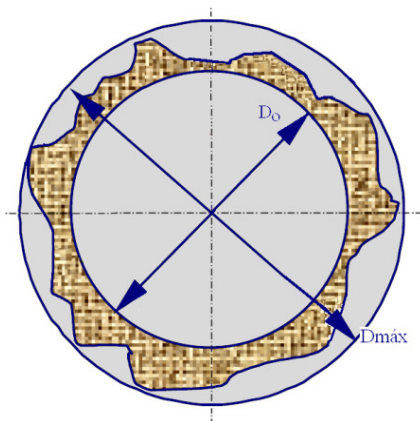


Figura 35 Exemplo da extensão do dano que ocorre devido à furação

O rácio do dano consiste no quociente entre a área delaminada e a área nominal do furo.

$$D_{RAT} = \frac{A_{m\acute{a}x}}{A_0} \quad (3)$$

Segundo, Davim et al [70], a utilização do factor de delaminação ou da área delaminada (quando avaliados isoladamente) não representa de forma adequada a extensão do dano induzido no material pelo processo de furação. Esta conclusão foi determinada pois verificaram que existe um aumento do dano (delaminação) à medida que os parâmetros de corte (mais claro no avanço) são aumentados, e que em alguns casos para um mesmo factor de delaminação (igual $D_{m\acute{a}x}$), a imagem apresentava uma maior área delaminada que se traduzia numa menor vida útil da ferramenta. Na Figura 36 estão representados os dois casos distintos, em que no primeiro ocorre uma fissura bastante significativa com área delaminada muito reduzida e no segundo caso não existe fissura mas sim uma grande área delaminada. Esta situação comprova o que foi anteriormente descrito pois o factor de delaminação embora seja o mesmo, as áreas são muito diferentes.

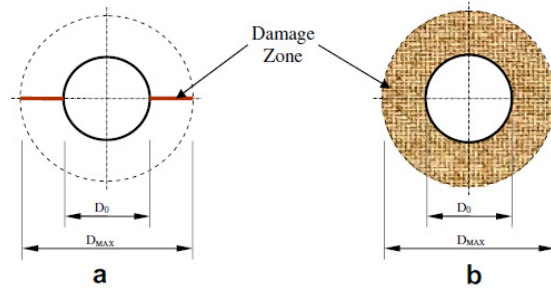


Figura 36 Caso crítico, em que ocorre fissura (fig. esquerda) e área de dano uniforme (fig. direita).

Surgiu então a necessidade da aplicação de um factor de dano que têm em consideração o tamanho da delaminação ($D_{máx}$) e a área delaminada [71]. Este designa-se então por factor delaminação adaptada e permite uma melhor caracterização do nível do dano assim como permite uma melhor visualização da tendência de aumento ou diminuição do dano em função dos parâmetros de corte. Durante a furação a delaminação apresenta um aspecto irregular afectado por fissuras na entrada e saída do furo que não podem ser caracterizado pelo factor de delaminação convencional pois a dimensão da fissura não é convenientemente representada em termos de dano.

É então apresentado um F_{DA} (factor de delaminação adaptado) calculado pela seguinte equação:

$$F_{DA} = \alpha \frac{D_{máx}}{D_0} + \beta \frac{A_{máx}}{A_0} \quad (4)$$

A primeira parte da equação representa a contribuição do tamanho da fissura (Factor de delaminação convencional) e a segunda parte representa a contribuição da área delaminada.

$$\beta = \frac{A_D}{A_{máx} - A_0} \quad (5)$$

β é definido como o rácio entre a área delaminada (A_D) e a área correspondente ao diâmetro máximo ($A_{máx}$) menos a área nominal do furo (A_0).

Sendo $\alpha = 1 - \beta$

Com a substituição dos factores α e β na equação (6) :

$$F_{DA} = F_D + \frac{A_D}{A_{máx} - A_0} (F_D^2 - F_D) \quad (6)$$

O estudo da furação dos materiais compósitos tem sido alvo de estudo por parte de vários investigadores com o objectivo de reduzir os danos associado ao processo de furação.

Os parâmetros geométricos da ferramenta mais universal (helicoidal) são demonstrados.

A selecção do material de ferramenta deve ter em conta a aplicação à qual estará sujeita.

O estudo do desgaste das ferramentas também é assunto de elevado interesse, na medida em que este, tem como consequência a diminuição da vida útil da ferramenta que prejudicará a qualidade da superfície do furo. A furação não convencional (laser e corte por jacto de água) apresenta-se como um campo em desenvolvimento. A caracterização do Dano, os seus defeitos associados e as suas consequências são apresentados neste capítulo. A correcta selecção de parâmetros de corte têm como objectivo a redução da força axial e consequentemente redução da delaminação. Os métodos de análise de Dano, o modelo analítico da força crítica para o início da delaminação e os critérios de avaliação do Dano são descritos.

As abordagens feitas neste capítulo, serão aplicadas no trabalho experimental realizado nesta tese.

3. Procedimento experimental e análise de resultados

Neste capítulo são descritos os procedimentos experimentais dos capítulos seguintes assim como a descrição do fabrico das placas CFRP.

3.1. Fabrico de placas CFRP

Na realização deste trabalho foram utilizadas placas em resina epóxida reforçada com fibra de carbono. Os pré-impregnados, foram adquiridos a partir do pré-impregnado CC160 de SEAL. A constituição do pré-impregnado está apresentada na Figura 37.

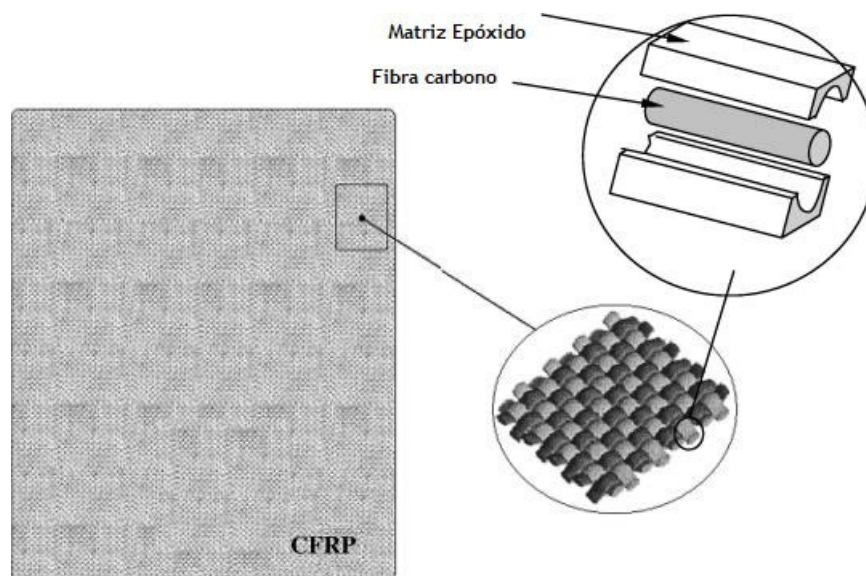


Figura 37 Constituição do laminado compósito em estudo [72].

As placas fabricadas são do tipo cross-ply, ou seja, são constituídas por várias camadas empilhadas, sendo que cada uma é orientada a 90 relativamente à anterior. O empilhamento do pré-impregnado é constituído por 24 camadas.

Após o empilhamento o laminado foi sujeito a um ciclo de cura numa prensa de pratos quentes a uma pressão de 300 kPa e uma temperatura de 140 °C durante uma hora, seguido de arrefecimento ao ar. A espessura final das placas é de 4 mm. O ciclo de cura das placas encontra-se representado no Gráfico 1.

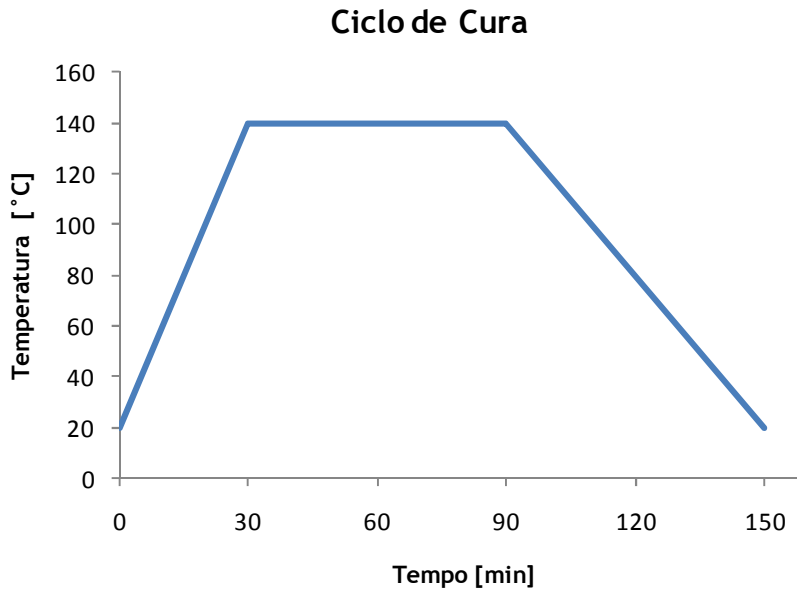


Gráfico 1 Ciclo de cura das placas

Após o fabrico das placas estas foram cortadas numa máquina equipada com disco diamantado e refrigeração por circulação de fluido.

As dimensões finais das placas cortadas são 165x96 mm².

3.2. Furação - (controlo numérico computadorizado)

Para realizar os ensaios de furação foi utilizado em centro de maquinagem DENFORD TRIAC CENTRE (Figura 38) de 3.7 kW, com uma velocidade de rotação máxima de 7500 rpm e que permite operar com avanços entre 0,001 a 2m/min sendo o aperto pneumático (cone BT-30). A utilização da máquina CNC (*Computer Numerical Controller*) permitiu uma enorme versatilidade na selecção dos parâmetros (avanço e velocidade da ferramenta), assim como um bom aperto da ferramenta (aperto pneumático) e uma boa excentricidade.

Durante a realização da furação, quando ocorria a mudança de ferramenta ou de alguma condição experimental, a excentricidade do corpo da broca foi verificada, tendo sido obtido resultados nunca superiores a 0,01 mm para o cone e 0,02mm para a broca.



Figura 38 Centro de Maquinagem CNC utilizada nos ensaios de furação.

3.3. Monitorização da força axial

Durante o processo de furação, as forças axiais foram monitorizadas através de um dinamómetro KISTLER 9257B (Figura 39) associado a um computador que fez a recolha dos dados para posterior tratamento.

A furação foi realizada sem recorrer a placas sacrificiais.



Figura 39 Dinamómetro KISTLER utilizado na monitorização das forças axiais

Para recolha das forças axiais desenvolvidas durante a furação foi desenvolvido um suporte para colocar sobre o dinamómetro. A base de suporte é constituído por vários canais adequados ao planeamento de furação de modo a otimizar o espaço da placa e garantir o máximo de furos possível.

A placa a ser maquinada foi colocada sobre o suporte e o dinamómetro (Figura 40).

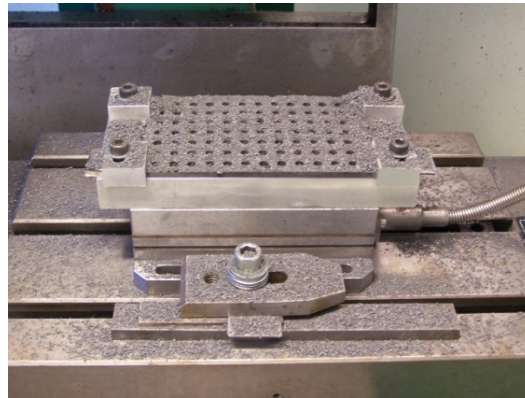


Figura 40 Placa após ser maquinada sobre o suporte e o dinamômetro.

Após monitorização de forças ocorre a amplificação do sinal e recolha de dados, como está demonstrado na Figura 41.

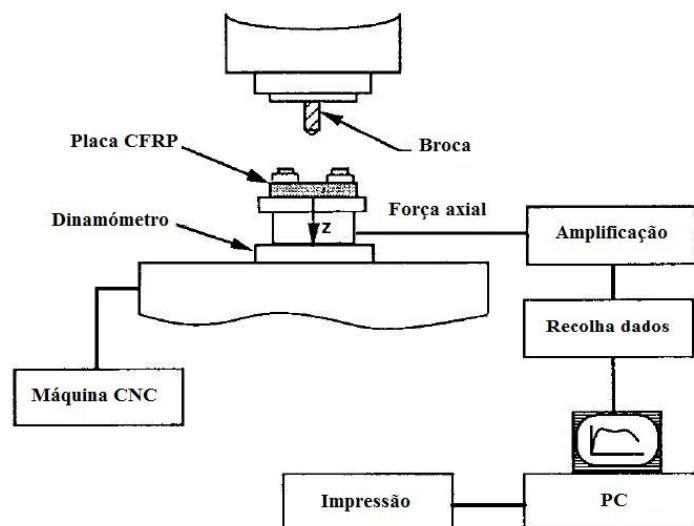


Figura 41 Esquema do set-up experimental [38]

Após recolha da força axial exercida durante a furação, os dados são tratados e é obtida a curva força/deslocamento (Gráfico 2).

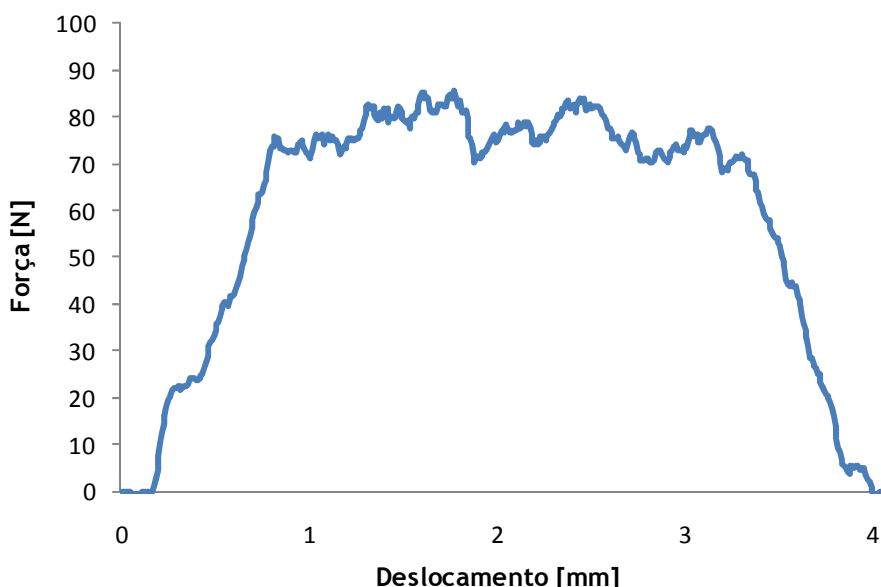


Gráfico 2 Curva Força vs Deslocamento registada para um determinado furo.

No Gráfico 2 encontra-se representado a curva Força vs Deslocamento desenvolvida durante o processo de furação. Devido à oscilação (natural) das forças ao longo de uma rotação de broca, o valor da força que é considerado a cada momento é o resultado do cálculo da média ao longo de uma rotação da broca.

Conforme já foi dito, o início de delaminação encontra-se associado à força exercida pela ferramenta, desta forma o maior valor de força verificado na curva é o considerado neste estudo pois apresenta-se como um bom indicador da ocorrência de delaminação. Durante a parte experimental serão comparados comportamentos de várias geometrias de ferramentas assim como a influência do avanço e da velocidade da ferramenta.

3.4. Medição da rugosidade na parede do furo

Quando observamos em detalhe as superfícies das peças, estas apresentam rugosidades provocadas pelo contacto entre a ferramenta que actuou sobre a superfície da peça.

Neste estudo, é realizada a medição da rugosidade na superfície maquinada do furo. As medições foram realizadas recorrendo ao rugosímetro Hommelwerke LV-50 (Figura 42). Na parede de cada furo foram realizadas 3 medições, sendo considerada a sua média aritmética como resultado final. Dos resultados obtidos os parâmetros em estudo são R_a , R_z e $R_{máx}$. O parâmetro R_a corresponde à rugosidade média aritmética, R_z , media das cinco maiores diferenças pico-vale e $R_{máx}$ diz respeito à máxima diferença pico-vale.

Os parâmetros do rugosímetro aplicados nas medições deste estudo, foram os seguintes: $L_t=1,5$ mm (comprimento de palpagem), $L_c=0,25$ mm (comprimento de amostragem) e $v_t=0,15$ mm/s (velocidade de medição).

O facto de $L_c=0,25$ mm, (valor relativamente baixo comparativamente ao comprimento da parede do furo), pode ter sido responsável pela dispersão de valores verificada nos resultados obtidos nesta tese.

O tratamento dos dados recolhidos foi efectuado utilizando o software Hommelwerke Turbo Wave V.7.20.

Na Figura 43 exemplifica-se um perfil de rugosidade.



Figura 42 Rugosímetro utilizado nas medições [73]

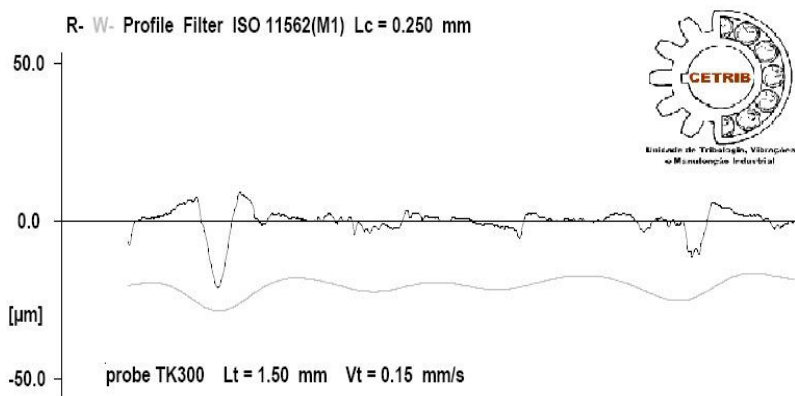


Figura 43 Perfil de rugosidade de uma medição da superfície maquinada do furo

3.4.1. Caracterização dos parâmetros de rugosidade

O método aplicado consiste na avaliação de várias grandezas tendo como referência uma linha média. A linha média encontra-se disposta paralelamente à direcção geral do perfil dentro do percurso de medição, de tal forma que a soma das áreas superiores com as inferiores relativamente à linha média tem que ser zero.

Durante o processo de medição da rugosidade, o apalpador percorre determinado percurso e comprimentos. Como se pode verificar na Figura 44.

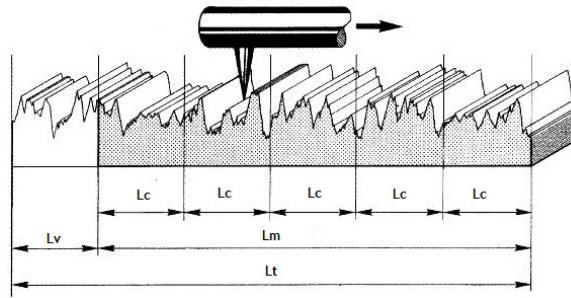


Figura 44 Percurso de medição de rugosidade [74]

Na Figura 44, estão representados os comprimentos L_v , L_t , L_m e L_c .

- L_c (comprimento de amostragem) representa um quinto do percurso de medição. Este comprimento de amostragem tem que ter todos os elementos representativos de rugosidade.
- L_v , (percurso inicial) diz respeito à primeira parte do percurso do apalpador e a sua função é amortecer as oscilações mecânicas e eléctricas iniciais do sistema de medição assim como centrar o perfil de rugosidade.
- L_m (percurso de medição) representa a extensão útil do perfil de rugosidades que é utilizado na avaliação.
- L_t (percurso de apalpamento) consiste no percurso total que o sistema de medição percorre. Este percurso é a soma dos percursos inicial e de medição.

3.4.2. Parâmetros de avaliação de rugosidade

Os parâmetros de avaliação de rugosidade, R_a e R_z são aqui descritos.

Rugosidade média [R_a] é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos afastamentos dos pontos do perfil de rugosidade, relativamente à linha média. Esta medição é efectuada ao longo do percurso de medição L_m .

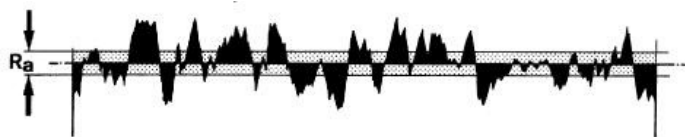


Figura 45 Representação do parâmetro de rugosidade R_a [74]

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y \quad (7)$$

Rugosidade Média (R_z): consiste na média aritmética dos 5 valores da rugosidade parcial Z_i . A soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maiores afastamentos (acima e abaixo da linha média) existentes dentro de um comprimento de amostragem l_m define a rugosidade parcial Z_i .

$$R_z = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5}{5} \quad (8)$$

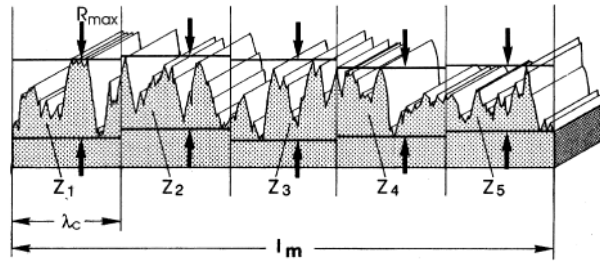


Figura 46 Profundidade média de rugosidade (R_z) [74].

3.5. Avaliação do factor delaminação e rácio dano

Devido ao facto de as placas serem opacas, impossibilitam a análise do dano recorrendo ao microscópio óptico. Dada esta limitação e ao facto da análise ter que necessariamente ser não destrutiva, a análise da área delaminada é então realizada com recurso a radiografia e aplicação de algoritmos computacionais de processamento e de análise de imagem. Para tal, é utilizada uma plataforma de processamento e análise de imagem previamente desenvolvida para ambientes Microsoft Windows (Tavares [75]; Tavares et al [76] que permite quantificar a área delaminada e o máximo diâmetro delaminado recorrendo à aplicação de algoritmos de filtragem, binarização, segmentação e análise de regiões (Awcock & Thomas [77] ; Jain, [78]; Schalkoff [79]).

A aplicação dos referidos algoritmos de processamento e de análise de imagem revela-se bastante adequada pois permite quantificar eficientemente o dano e como consequência avaliar a resistência mecânica das peças.

Na primeira fase do processo as peças foram mergulhadas em di-iodometano (líquido contrastante) durante 90 minutos e mantidos em câmara escura. Posteriormente estas foram radiografadas.

O passo seguinte consistiu na digitalização das películas para aplicação dos algoritmos de processamento e análise de Imagem. Depois das imagens digitalizadas é seleccionada a zona de interesse (zona do furo) para aplicação das etapas subsequentes. Foi aplicado um filtro de suavização (filtro de média com uma máscara de 3x3 pixéis), de forma a reduzir o ruído presente no processo de aquisição das imagens originais. Após este processo de suavização, foi aplicada uma técnica de binarização automática baseada em limiares adaptativos [75,76],

para segmentar as áreas com interesse. As imagens obtidas são constituídas por 3 regiões (fundo de imagem, área do furo e zona delaminada).

Finalmente, foi aplicado um algoritmo de análise de regiões [75,76] que permite destacar cada uma das áreas presentes na imagem segmentada e calcular as medidas associadas (áreas e comprimentos). É exemplificado na Figura 47 as várias etapas descritas anteriormente.

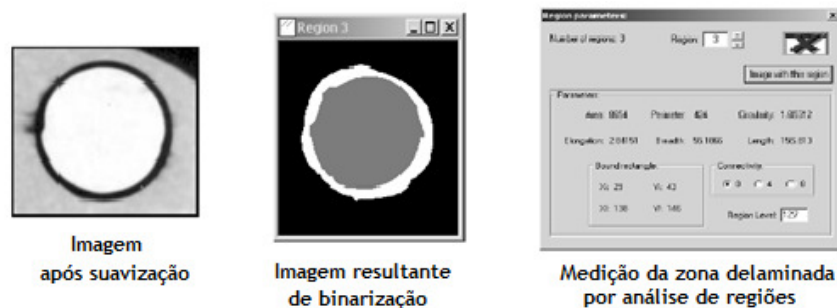


Figura 47 Metodologia aplicada para a avaliação do dano

3.6. Metodologia de análise de dados (Método de Taguchi)

Na década de quarenta do século passado, o Dr. Genichi Taguchi criou um método mundialmente conhecido como método de Taguchi que surgiu da necessidade de melhorar a qualidade dos telefones Japoneses. Com a implementação do seu método, Taguchi não só melhorou a qualidade dos telefones, mas também reduziu os custos de engenharia associados às experiências na fase de testes.

O método de Taguchi é principalmente aplicado na área de processos de fabrico [80-84], tendo também aplicação em outras áreas tais como engenharia de materiais [85-86], medicina [87].

O objectivo do método Taguchi, é reduzir ao máximo a variabilidade do processo, e direccionar os seus parâmetros para maximizar o objectivo pretendido.

Taguchi propôs a utilização de matrizes compostas por vectores ortogonais para definir quais os testes a realizar. Para isso é usado no seu método o desenho de experiências em que são realizadas alterações nas variáveis de entrada de factoriais fraccionados (é apenas usada uma fracção do número total de combinações das variáveis de entrada), [88]. Após análise dos resultados da série de testes realizados (com as alterações de parâmetros de entrada), são identificadas as razões para as alterações das variáveis de saída [89].

O seu método desenvolveu novos métodos na optimização dos processos de engenharia, e destaca-se não só pela sua formulação matemática dos desenhos de experiências, mas principalmente pela filosofia de qualidade que ele envolve. Este método teve sucesso pois enquanto as outras práticas tradicionais realizavam a inspecção final do produto/processo, o método Taguchi consistiu no desenho e parametrização da qualidade do produto/processo

com base no planeamento de experiências. Algumas definições importantes relativas a esta metodologia, tais como, experiência, factor e nível são aqui apresentadas neste estudo:

- Experiência: Um conjunto planeado de operações com o objectivo de determinar novos resultados e confirmar ou negar resultados de investigações anteriores.
- Factor: é uma das variáveis controladas, ou não que exerce influência sobre a resposta que está a ser objecto de estudo. Este pode ser quantitativo (tais como, rotação em rpm) ou qualitativo (tais como, ferramenta A ou ferramenta B).
- Nível: está associado a determinado factor e consiste nos valores da experiência em causa.

A metodologia Taguchi permite nos então determinar quais os factores que estão a influenciar o desempenho de um produto/processo. Existem 2 tipos de situações para análise dos arranjos ortogonais de Taguchi: Factorial Saturado e Factorial Fraccionado.

No caso do Factorial Completo, todas as combinações dos factores de controlo são analisadas, assim como as suas interacções. O número total de ensaios é igual a n^f (sendo n , o numero de níveis e f , o numero total de factores). Este tipo de factorial é aceitável quando são aplicados poucos factores, pois para além de organizar as experiências, fornece o melhor resultado possível entre os factores (interacções), pois todas as combinações de factores são consideradas.

No caso do factorial fraccionado, Taguchi não analisa todas as combinações possíveis entre os factores, para ter mais factores independentes em simultâneo o que significa que não são analisadas todas as combinações entre factores como no caso anterior. As experiências realizadas segundo essa matriz designam-se factoriais fraccionários.

O factorial fraccionado é portanto, considerado eficiente, pois através da realização de poucos ensaios é possível adquirir uma grande quantidade de informações.

A aplicação do factorial fraccionado, têm como desvantagem o facto da selecção das experiências depender do critério de quem aplica o método.

Numa fase inicial de selecção dos factores mais influentes nas experiências em estudo, o factorial fraccionário é o método mais aconselhado pois permite a sua identificação para posteriormente aplicação de um factorial completo ao número de factores mais reduzido.

Nesta tese, foi aplicado em vários ensaios directamente o factorial completo L8, (sem recorrer previamente ao factorial fraccionado) pois o número de factores intervenientes não era significativo para determinar quais os mais influentes.

Os factores mais utilizados nas experiências foram, avanço, geometria de ferramenta e velocidade de corte.

4. Monitorização da força axial exercida durante a furação

O objectivo deste capítulo consiste na monitorização da força axial exercida durante o processo de furação. São apresentados os resultados experimentais da força axial exercida recorrendo a diferentes geometrias de ferramenta, em placas CFRP e GFRP com ferramentas em WC e PCD. A influência do avanço e velocidade de corte das ferramentas também são estudadas.

4.1. Monitorização de força axial em CFRP

Os ensaios que se seguem foram realizados em placas CFRP (placas apresentadas na secção 3.1)

4.1.1. Monitorização de força axial com ferramentas WC

Os resultados dos ensaios desta secção consistem na comparação de diferentes geometrias de ferramentas e condições de corte recorrendo a ferramentas em WC.

4.1.1.1. Ferramentas em estudo

As geometrias de ferramenta (Figura 48) em estudo são as seguintes: brad, helicoidal com ângulo de 85 e 120 graus (designadas por helicoidal 85 e helicoidal 120 respectivamente) e as bidiametrais dentado direito e helicoidal, (designadas bidiametral D e bidiametral H). Também foram ensaiadas brocas helicoidais 85 e 120 com recurso a pré-furação.

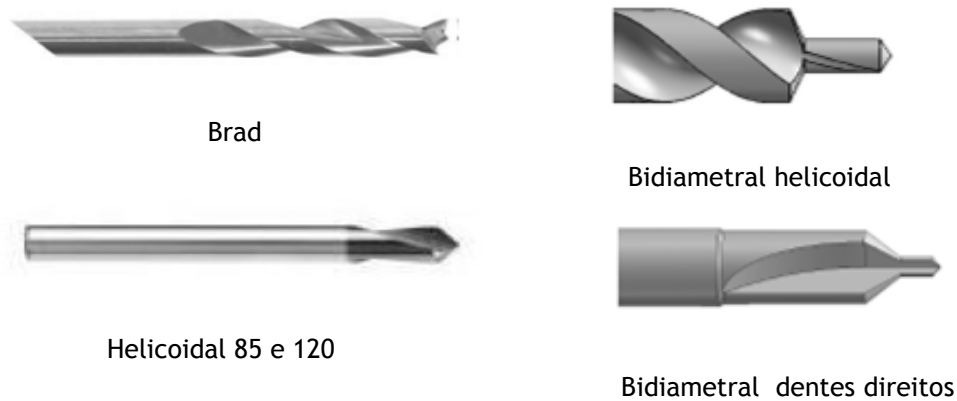


Figura 48 Geometrias de ferramentas em estudo

4.1.1.2. Comparação de diferentes geometrias

Foram realizados no total 7 ensaios, entre os quais 5 são respectivos a diferentes geometrias de broca e 2 relativos à aplicação de pré-furação. Cada geometria de ferramenta foi testada recorrendo a três avanços (0,02, 0,06 e 0,12 mm/rot) a uma velocidade constante de 2800 rpm (53 m/min).

Várias comparações e discussões apresentam-se nos próximos subcapítulos.

4.1.1.2.1. Brad, Bidiametraís e Helicoidais

Para cada geometria de ferramenta e avanço foram realizados 12 furos e considerada a média aritmética para cada condição de corte. Nesta subsecção serão abordadas e discutidas as 5 geometrias de ferramenta. No Gráfico 3 encontra-se a representação gráfica da força axial exercida durante a furação em função do avanço.

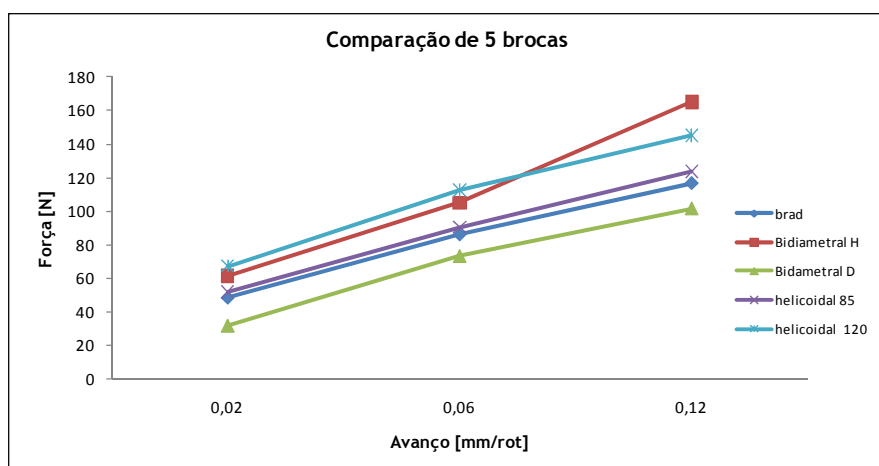


Gráfico 3 Influência do avanço nas forças axiais de furação nas 5 geometrias de ferramenta

É possível verificar que à medida que o avanço aumenta a força axial exercida pela broca também aumenta.

A broca bidiametral D apresenta o menor valor de força axial para todos os avanços.

As brocas bidiametral H e Helicoidal 120, apresentam os valores mais elevados de força axial (bastante idênticos entre si o para os avanços 0,02 e 0,06 mas para maior avanço a bidiametral H destaca-se). Em termos gerais existe uma tendência crescente que se mantém constante entre as brocas.

4.1.1.2.2. Broca bidiametral H e bidiametral D

Nestes ensaios são testadas e comparadas as brocas que recorrem ao processo de furação em 2 etapas (primeira etapa com pré-furo de 1,5 mm de diâmetro e segunda fase com diâmetro de 6 mm). Os resultados da força axial obtidos com estas geometrias de ferramentas estão apresentados no Gráfico 4.

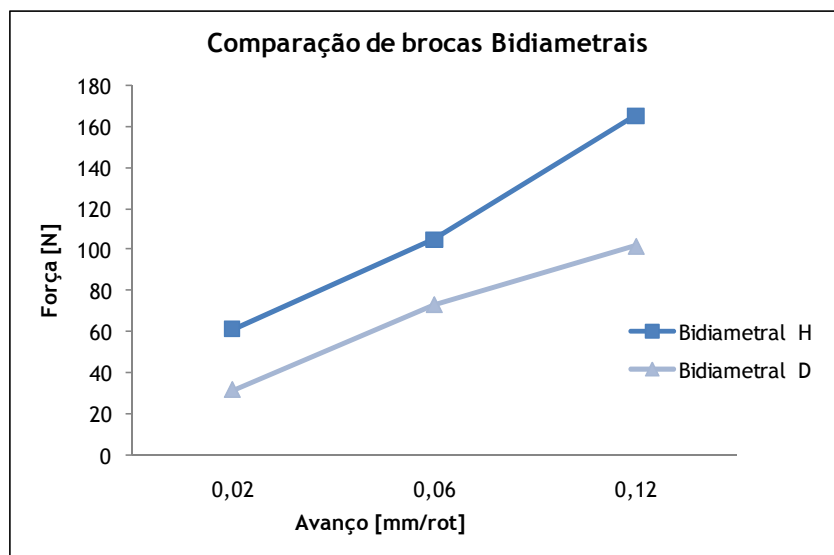


Gráfico 4 Comparação das forças axiais exercidas entre as brocas bidiametraes.

A broca bidiametral D apresenta melhor desempenho comparativamente à broca bidiametral H pois apresenta para todos avanços menor valores de força axial. Verifica-se uma diferença praticamente constante entre para os avanços baixo e intermédio, o que já não acontece para o avanço mais elevado em que a diferença aumenta bastante.

A diferença de valores das forças axiais entre as duas geometrias de brocas é devida ao facto do ângulo de ponta da broca Bidiametral H ser maior do que o ângulo de ponta da broca Bidiametral D. Este ângulo de ponta superior é o responsável pelo aumento das forças axiais para todos os avanços.

4.1.1.2.3. Brocas Helicoidais

Estes ensaios comparam as forças axiais exercidas pelas brocas helicoidais 85 e 120 e as mesmas com recurso à pré-furação.

4.1.1.2.3.1. Brocas Helicoidais 85 e 120

A geometria helicoidal foi testada com 2 ângulos de ponta diferentes, 85° e 120°. Os resultados, mostram então a influência do ângulo de ponta da ferramenta durante a furação.

O resultado está representado no Gráfico 5.

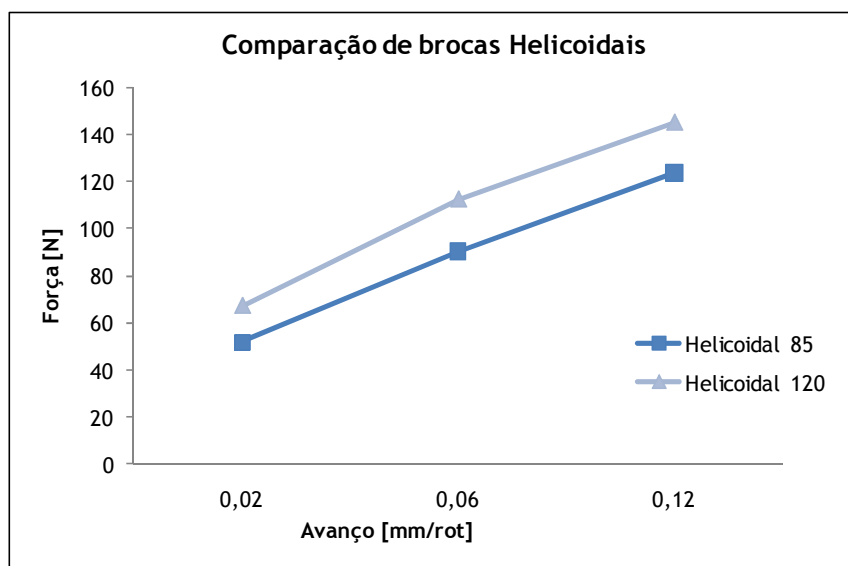


Gráfico 5 Comparação das forças axiais exercidas entre as brocas helicoidais

É possível verificar que para além do aumento da força com o avanço, a diferença permanece praticamente constante em todos os avanços. Estes resultados mostram que um menor ângulo de ponta da broca é favorável à redução da força axial exercida durante o processo de furação.

4.1.1.2.3.2. Brocas helicoidais 85 com e sem pré-furo

Com o objectivo de analisar a influência do pré-furo no processo de furação, são comparados os resultados da furação com e sem recurso à pré-furação.

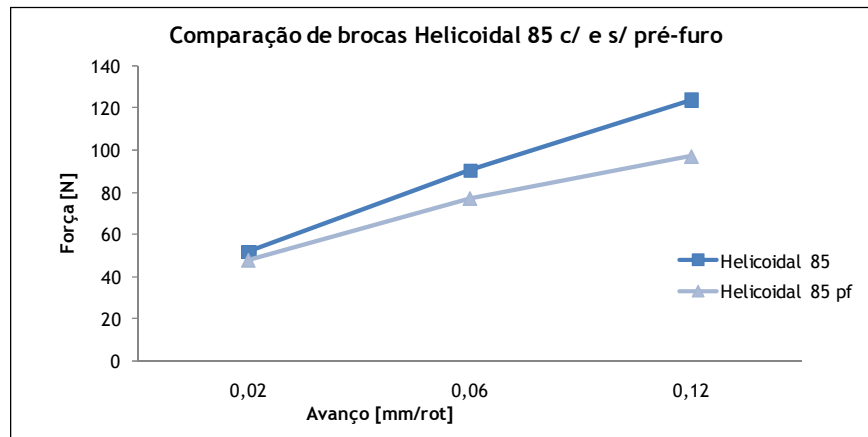


Gráfico 6 Comparação das forças axiais exercidas entre as brocas helicoidais 85 com e sem pré-furo

Comparando a broca helicoidal 85 com a furação recorrendo ao pré-furo, este último desenvolve forças inferiores. Isto acontece pois o processo de furação é separado por duas fases em que na primeira ocorre furação com um furo de 1.5 mm designado pré-furo que provocará uma redução da força exercida na segunda fase pois a área de contacto entre a broca e a placa é menor.

4.1.1.2.3.3. Brocas Helicoidais 120 com e sem pré-furo

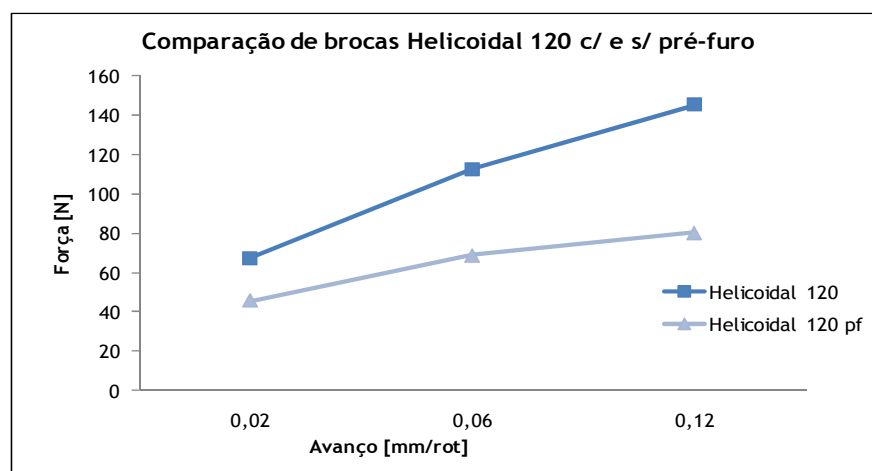


Gráfico 7 Comparação das forças axiais exercidas entre as brocas helicoidais 120 com e sem pré-furo

No caso das brocas helicoidais 120 o comportamento é semelhante ao caso anterior (brocas helicoidais 85), destacando-se neste caso uma maior diferença entre as 2 forças desenvolvidas para todos os avanços. Verifica-se também um aumento gradual bastante significativo na diferença de forças com o aumento do avanço.

Após análise das comparações entre as brocas helicoidais com e sem pré-furo, verifica-se que no caso da ferramenta helicoidal 120 as diferenças entre a ferramenta com e sem pré-furo são bastante superiores às diferenças verificadas no caso da ferramenta helicoidal 85. É importante referir que a maior diferença verificada entre as ferramentas helicoidais 85 acontecem para o maior avanço e são da mesma grandeza que a menor diferença verificada no caso das ferramentas helicoidais 120 que acontece para o avanço mais baixo.

4.1.1.2.3.4. Brocas helicoidais 85 e 120 com recurso à pré-furação

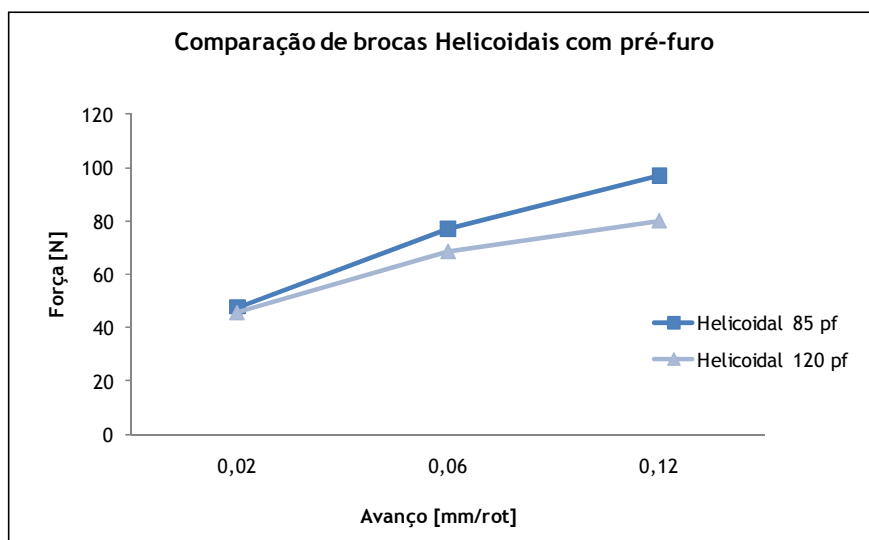


Gráfico 8 Comparação das forças axiais exercidas entre as brocas helicoidais com pré-furo

Comparando os resultados das ferramentas helicoidais 85 e 120 com recurso à pré-furação, é possível verificar que para avanços mais baixos o comportamento das 2 ferramentas é semelhante mas à medida que o avanço aumenta, as diferenças entre eles tornam-se cada vez mais significativas. Este estudo apresenta um resultado inverso relativamente ao comportamento das mesmas quando não estão sujeitas à pré-furação, pois os resultados demonstram que agora a ferramenta com menor ângulo de ponta, apresenta maiores valores de força axial.

Mediante os resultados obtidos, levam-nos a concluir que com o pré-furo, o efeito do ângulo de ponta diminui a sua influência no desenvolvimento de forças axiais.

4.1.1.3. Comparação de estratégias de furação

Com o objectivo de comparar o comportamento das brocas durante a furação nos dois casos em que a furação é realizada por 2 etapas (furação bidiametral e helicoidal com recurso a pré-furo), estão apresentados no Gráfico 9 os melhores resultados obtidos nos ensaios anteriores para cada tipo de furação.

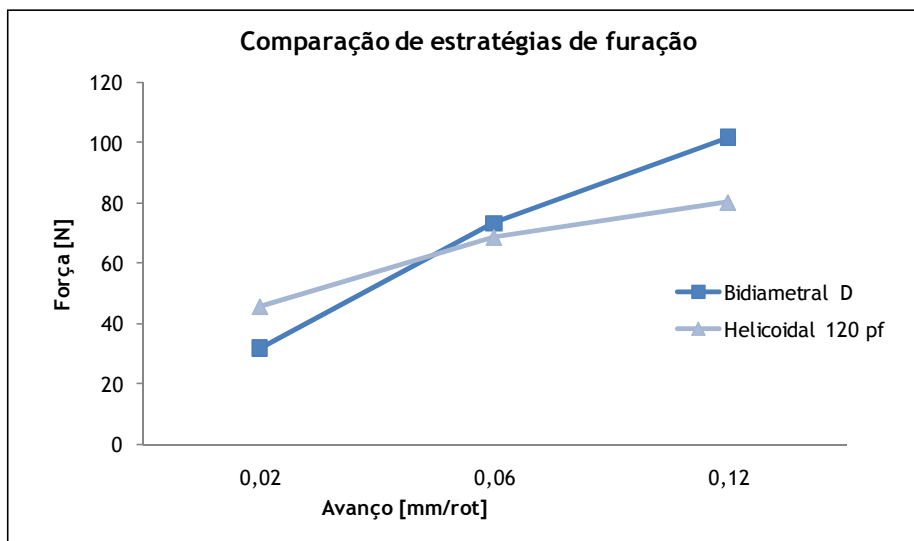


Gráfico 9 Comparação das forças axiais exercidas entre as ferramentas de 2 diâmetros

Comparando o melhor resultado da broca bidiametral (bidiametral D) e da broca com pré-furação (helicoidal 120) é possível concluir que para avanços baixos a bidiametral D apresenta valores de força mais baixos, para avanços intermédios os resultados são bastante aproximados (helicoidal 120 pf com valor ligeiramente inferior) e para avanços elevados acontece o inverso do avanço lento, pois neste caso a broca bidiametral D apresenta força bastante superior à broca helicoidal 120 pf.

A pré-furação apresenta a desvantagem de ser realizada em duas etapas. Desta forma, os tempos de montagem que estão associados à montagem das brocas são um factor prejudicial à produtividade na furação.

Nestas condições ensaiadas, a furação recorrendo à geometria bidiametral D apresenta-se como a solução mais vantajosa.

Tendo em conta os resultados da monitorização da força axial para vários avanços com diferentes geometrias de ferramentas, foi considerada entre estas a sua média relativamente a cada um dos 3 avanços (Gráfico 10)

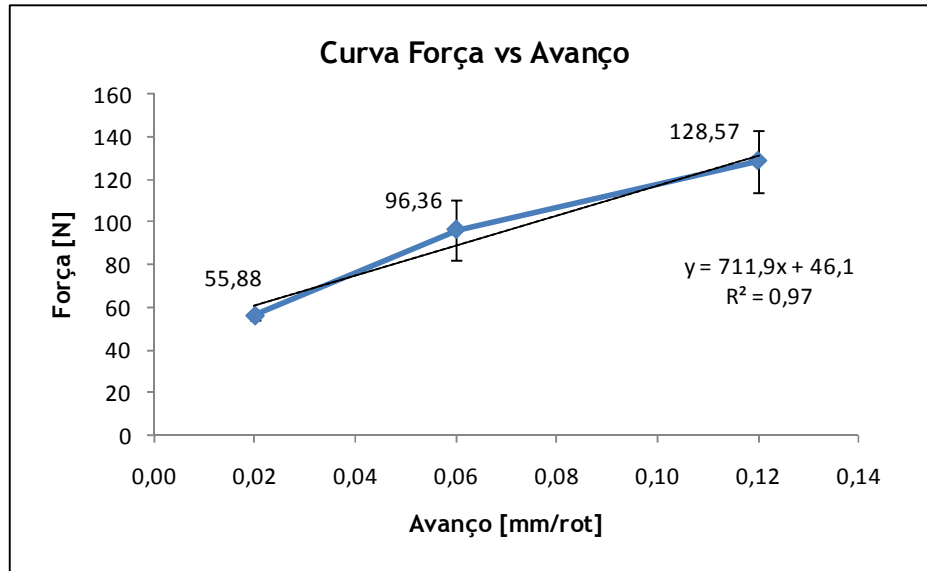


Gráfico 10 Relação entre força axial de furação e avanço.

A equação, $y=711,9x+46,1$ dá-nos a relação entre a força axial de furação (y) e o respectivo avanço (x) para as ferramentas de WC quando estão sujeitas a uma velocidade constante de 2800 rpm e avanços a variar entre 0,02 e 0,12 mm/rot.

4.1.1.4. Influência da velocidade da broca bidiametral

Os ensaios de variação de velocidade de corte foram realizados de acordo com as condições descritas na Tabela 5. A broca utilizada foi a bidiametral D e para cada condição ensaiada foram realizados 6 ensaios sendo o resultado final a sua média.

Tabela 5 Condições do ensaio 4.1.1.4

<i>Condições de ensaio</i>			
Velocidade		Avanço	Broca
[rpm]	[m/min]	[mm/rot]	
2800	53	0,02 e 0,04	Bidiametral D
4244	80		
5305	100		

No Gráfico 11 encontra-se a representação das três velocidades ensaiadas para dois avanços para a broca bidiametral D.

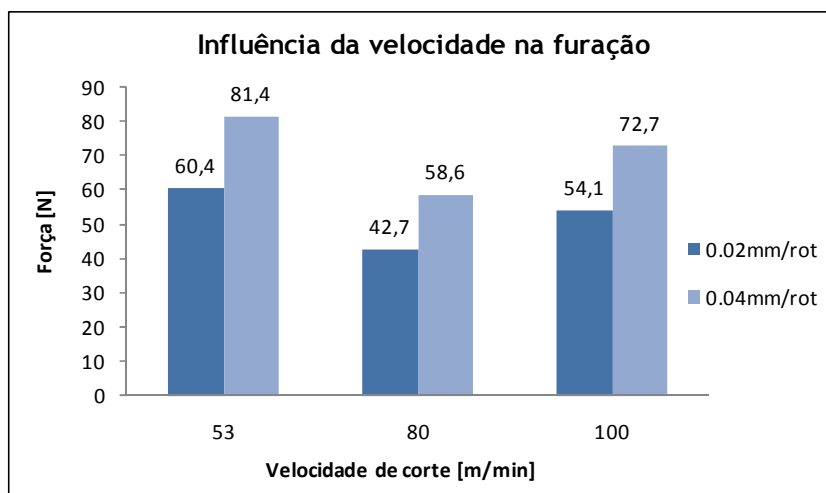


Gráfico 11 Influencia do parâmetro velocidade na furação

Dos resultados obtidos, verifica-se um menor valor de força axial para o avanço mais baixo independentemente da velocidade aplicada.

Os melhores resultados (valores de força mais baixos) correspondem à velocidade intermédia (80 m/min) para os 2 avanços em estudo, o que leva a concluir que um aumento de velocidade é favorável à redução da força exercida sobre o material, até um certo limite (80 m/min), neste caso. A partir desta velocidade a força axial volta a aumentar.

4.1.1.5. Influência da pré-furação

Para analisar a influência da pré-furação na força axial exercida durante a furação, foram realizados ensaios de acordo com as condições experimentais descritas na Tabela 6

Tabela 6 Condições de ensaio 4.1.1.5.

Pré-furo				Furo Final			
Velocidade [rpm]	Avanço [mm / rot] [mm / min]		Diâmetro [mm]	Velocidade [rpm]	Avanço [mm / rot] [mm / min]		Diâmetro [mm]
2400	0.05	120	1.3	3200	0.04	128	6
			1.4				
			1.5				
			1.6				
			1.7				
			1.9				
			2.0				
			2.1				
			2.2				
			2.3				
			2.4				
			2.5				
			2.7				

Para cada condição experimental foram realizados 6 ensaios, dos quais foram registados os valores de forças exercidas, quer durante a primeira etapa (pré-furo), quer durante a segunda etapa (furo final). Para realizar a segunda etapa de furação foi utilizada a broca helicoidal 120. O resultado final consiste na média dos 6 furos.

Os resultados do pré-furo e do furo final estão representados no Gráfico 12.

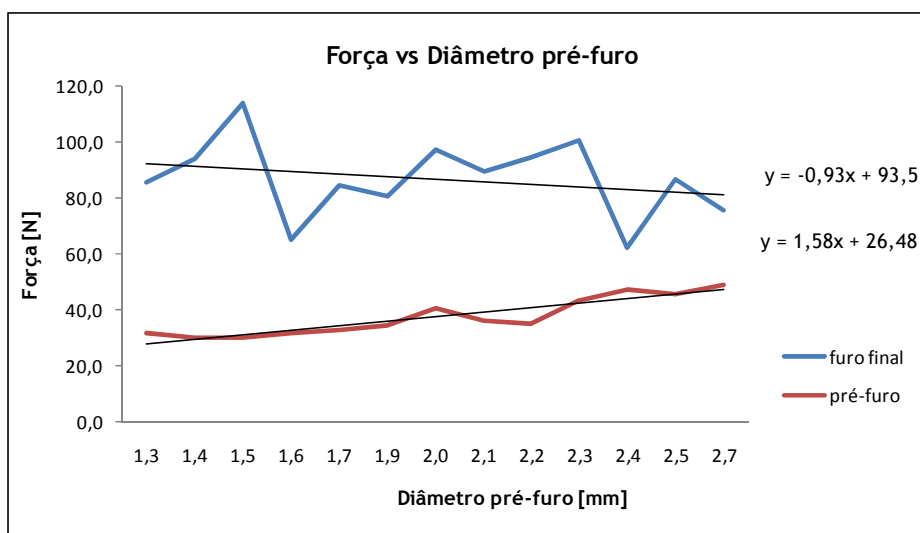


Gráfico 12 Influência do diâmetro do pré-furo na força axial de furação.

É possível verificar um aumento da força axial à medida que aumentamos o diâmetro do pré-furo, isto acontece pois a área em contacto com a ferramenta aumenta. Sendo assim, esta maior dificuldade em penetrar o material traduz-se num aumento da força axial.

Por outro lado verifica-se uma tendência de diminuição da força exercida na segunda etapa de furação com o aumento do pré-furo. Tal acontece pois à medida que o pré-furo aumenta, a área (e volume) restante necessária para completar o furo diminui, o que exige uma menor força sobre o material a ser furado.

4.1.1.6. Comparação das ferramentas de 2 e 4 cortantes

Estes ensaios têm como objectivo analisar a contribuição de diferentes factores durante o processo de furação.

Para análise dos resultados obtidos relativamente à influência dos factores “avanço”, “geometria” e “velocidade” foi utilizado o método de Taguchi, nomeadamente, o arranjo ortogonal L8, factorial completo que nos permite também determinar as interações entre os factores em estudo. A furação foi realizada em CFRP, o material da ferramenta de corte é carboneto de tungsténio (WC) e as condições de furação estão apresentadas na Tabela 7.

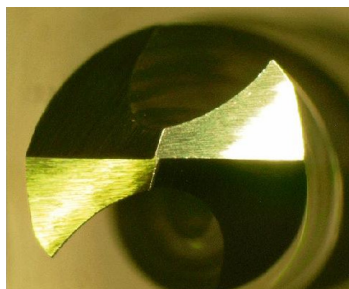


Figura 49 Geometria de ferramenta de 2 cortantes (2Z)

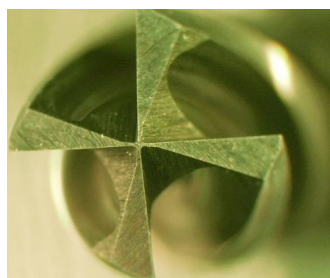


Figura 50 Geometria de ferramenta de 4 cortantes (4Z)

Tabela 7 Condições de ensaio 4.1.1.6

	Condições de ensaio	
	0,06	0,12
Avanço [mm/rot]		
Geometria	2 cortantes	4 cortantes
Vel. Corte [rpm]	3200	6000

Os resultados de aplicação do método de Taguchi são apresentados no Anexo 1.
A contribuição dos parâmetros em estudo nas forças axiais está representada no Gráfico 13.

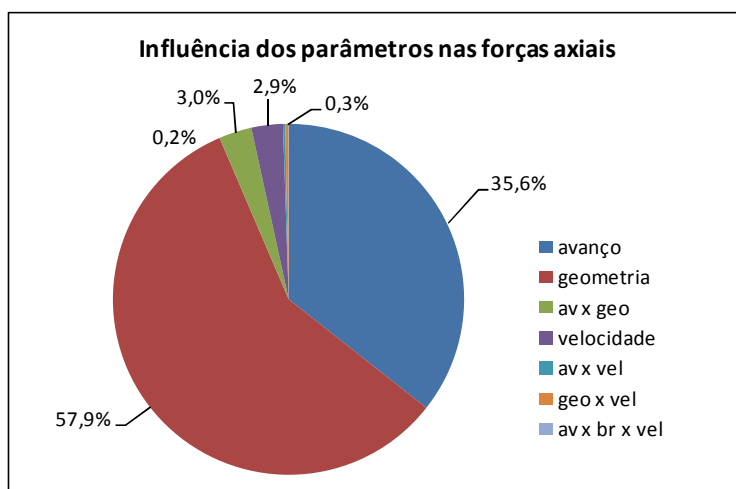


Gráfico 13 Contribuição do avanço, geometria e velocidade de corte na força axial de furação

Os resultados mostram como factor com maior influência (58%) a geometria de ferramenta, seguido do factor avanço (36%) e com menor influência a interacção Avanço/Ferramenta (3%) e velocidade (2.9%). Estes resultados mostram influência do nº de cortantes da geometria de ferramenta (Anexo1), sendo a selecção óptima dos parâmetros; geometria de ferramenta 2Z, avanço 0,06 (mm/rot) e velocidade 3200 (rpm).

4.1.2. Monitorização de força axial com ferramentas PCD

Os ensaios de furação recorrendo a ferramentas em PCD (Diamante Policristalino) foram realizados em placas de CFRP.

4.1.2.1. Comparação de avanços

Os ensaios realizados têm como objectivo a comparação de avanços de ferramentas em PCD. Estes foram realizados de acordo com as condições descritas na Tabela 8.

Tabela 8 Condições de ensaio 4.1.2.1

	Condições de ensaio
Material Broca	PCD
Diâmetro [mm]	6
Vel. Corte [m/min]	80 [4240 rpm]
Avanço [mm/rot]	0,02 - 0,04 - 0,06 - 0,12

No Gráfico 14 estão representadas a força axial exercida para os 4 avanços testados ao longo da série de 24 furos.

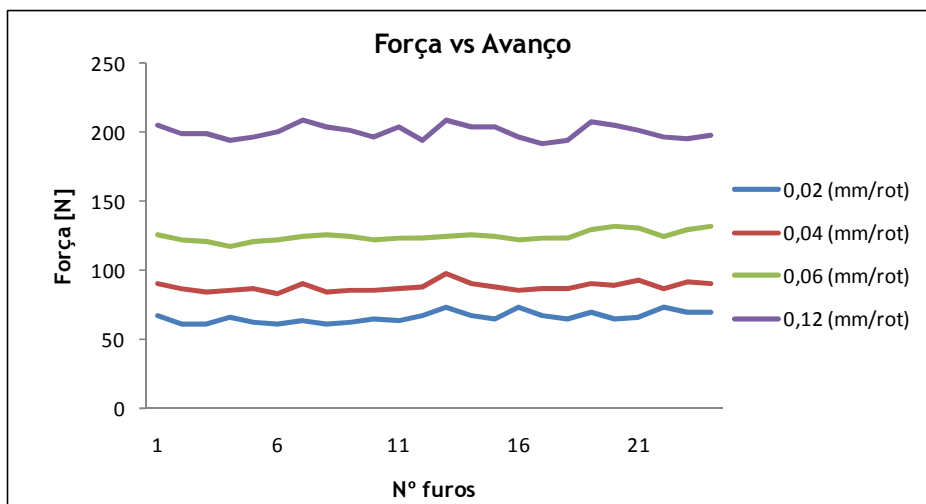


Gráfico 14 Forças desenvolvidas durante a furação para diferentes avanços com ferramentas em PCD

É possível verificar um aumento da força à medida que o avanço também aumenta, assim como também é possível verificar que o aumento é proporcional à variação do avanço.

Visto não haver variações consideráveis entre o 1º e o 24º furo devido à elevada resistência ao desgaste do material PCD, é considerado no Gráfico 15 a média da série de 24 furos para cada um dos 4 avanços.

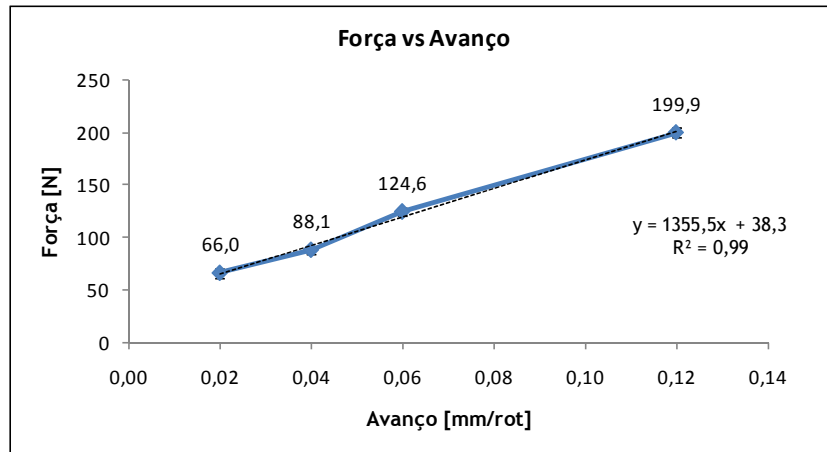


Gráfico 15 Relação entre força axial de furação e avanço para ferramentas em PCD

A equação $Y = 1355,5x + 38,34$ representa a força axial exercida pela broca (Y) em N, em função do avanço (X) em mm/rot.

4.1.2.2. Longa série de furação

Os ensaios de grandes séries de furação consistem na realização de 500 furos e posterior análise do desenvolvimento das forças exercidas ao longo da serie.

As condições de furação são as seguintes: velocidade de corte 6000 (rpm), avanço 0,2 (mm/rot).

Os resultados estão representados graficamente no Gráfico 16.

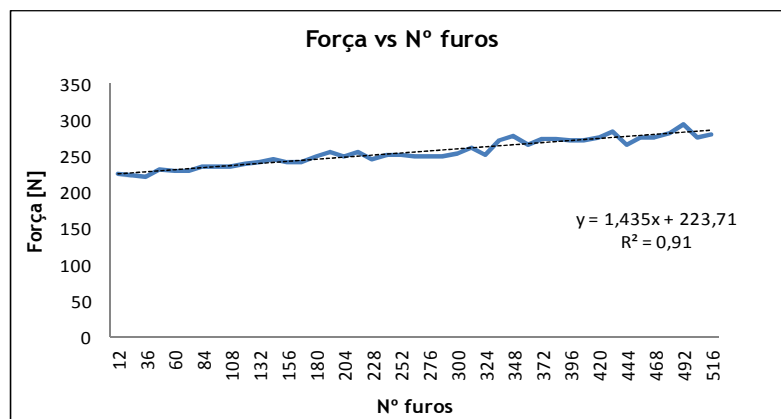


Gráfico 16 Forças axiais desenvolvidas na furação para longas séries de furação

No Gráfico 16 é possível verificar o aumento gradual da força exercida na furação à medida que aumenta o número de furos realizados pela ferramenta.

A equação que relaciona a força exercida (Y) em função do número de furos (X) é a seguinte: $Y = 1,435 \cdot X + 223,7$.

4.1.2.3. Alteração geometria PCD

Estes ensaios consistem numa modificação na “alma” da ferramenta (PCD alterada) com o objectivo de reduzir as forças axiais exercidas durante a furação.

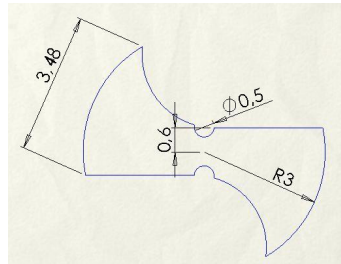


Figura 51 Alteração realizada na ferramenta em PCD

4.1.2.3.1. Comparação entre PCD original e PCD alterada

O objectivo destes ensaios consiste na comparação das forças axiais desenvolvidas na furação entre a ferramenta denominada original e PCD alterada.

As condições de corte estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 Condições de ensaio 4.1.2.3.1.

	Condições de ensaio
Material Broca	PCD
Geometria	Original e Alterada
Diâmetro [mm]	6
Vel. Corte [m/min]	80 [4240 rpm]
Avanço [mm/rot]	0,02 - 0,04 - 0,06 - 0,12

Foram realizados 24 furos para cada condição e considerada a sua média.

Os resultados obtidos e sua comparação com a broca PCD original estão representados no Gráfico 17.

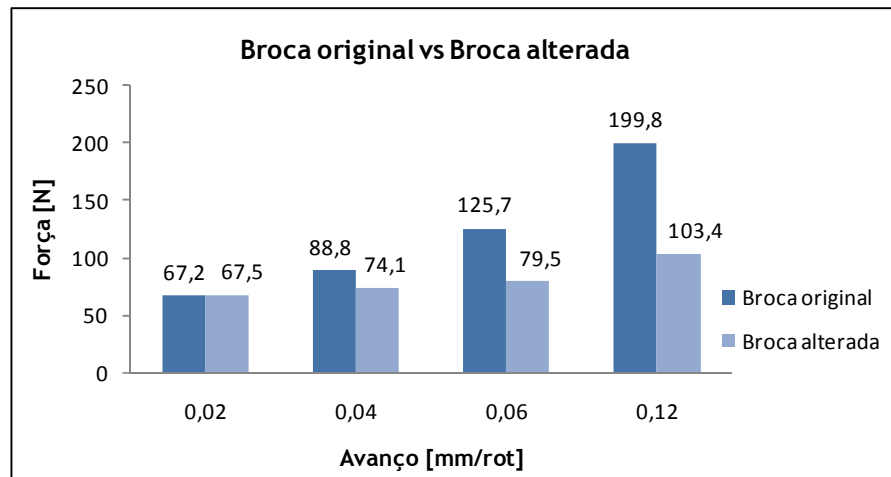


Gráfico 17 Efeito da alteração de geometria da ferramenta nas forças axiais.

É possível verificar que com o aumento do avanço a diferença entre as duas brocas aumenta significativamente. O único caso em que os resultados não apresentam diferenças é o avanço de 0,02 mm/rot.

Esta grande diferença de forças axiais é devida à redução do efeito de indentação que se encontra associado à alteração feita na “alma” da broca. O fenómeno de indentação, consiste no efeito quasi-estacionário que a ponta da broca exerce sobre o laminado durante o processo de furação e é o principal responsável pela delaminação.

Com os resultados obtidos destes ensaios é possível verificar que à medida que o avanço aumenta, as diferenças entre forças axiais tornam-se cada vez mais significativas.

4.1.3. Influência de outros parâmetros

Para além dos parâmetros estudados, existem outros tais como: diâmetro e material da ferramenta que também tem influencia na força axial desenvolvida na furação.

Para análise da influência destes factores foi aplicado um arranjo ortogonal L8 com factorial saturado (ver anexo 2).

Foram realizados 12 furos (12 ensaios por experiência), sendo considerada a média para cada uma das oito experiências. As condições experimentais estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 Condições de ensaio 4.1.3.

	Condições de ensaio	
	0,02	0,12
Avanço [mm/rot]	0,02	0,12
Material F	HSS	WC
Diâmetro [mm]	6	10

Os resultados de aplicação do método de Taguchi são apresentados no anexo 2.

A contribuição dos parâmetros em estudo nas forças axiais está representada no Gráfico 18.

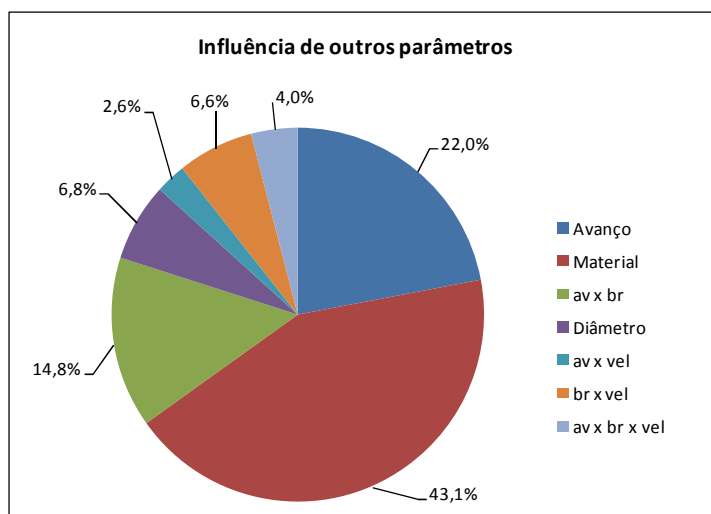


Gráfico 18 Contribuição dos parâmetros avanço, diâmetro e material da ferramenta na força axial de furação

O material de ferramenta apresenta-se como o factor mais influente (43%) neste estudo, seguido do avanço (22%) e da interacção Avanço/Broca (15%). O factor diâmetro apenas influência (7%). A maior influência do material de ferramenta já seria de se esperar pois no momento da furação verificava-se o efeito do desgaste excessivo da ferramenta de HSS através do aumento progressivo da força axial ao longo da série de 12 furos enquanto no caso das ferramentas em WC o mesmo não se verificava.

A solução óptima apresentada para este estudo consiste num avanço (0,02mm/rot), material (WC) e diâmetro (6 mm).

4.2. Monitorização de força axial em GFRP

Estes ensaios de furação foram realizados com ferramentas de carboneto de tungsténio (WC) em placas de GFRP de 4 mm de espessura e a sua estrutura está dividida em 3 fases:

- Analisar os resultados da monitorização da força axial da geometria brad, sujeitas a vários avanços em placas fabricadas por diferentes processos de fabrico.
- Analisar a influência do parâmetro velocidade de corte na força axial exercida pela ferramenta durante a furação.
- Analisar a influência do parâmetro avanço na força axial exercida pela ferramenta durante a furação.

Este secção tem como objectivo determinar quais as melhores condições de selecção dos parâmetros (velocidade e avanço) com o objectivo de minimizar a força axial exercida durante a furação.

4.2.1. Furação em diferentes tipos de placas

Foram então realizados ensaios em 3 tipos de placas GFRP, diferindo cada uma no seu método de fabrico. As placas usadas foram feitas por RTM, Moldação Manual [MM], Pré-Impregnado [PPREG].

Diferentes avanços de ferramenta foram testados para analisar a sua influência conforme são apresentados na Tabela 11 e os seus resultados no Gráfico 19.

Tabela 11 Condições de ensaio 4.2.1

Condições de ensaio			
Broca	Processo de fabrico	Avanço [mm/rot]	Velocidade [rpm]
Brad	Moldação Manual [MM]	0,02 e 0,04	2800
	Pré-Impregnado [PP]		
	Moldação Transferência de Resina [RTM]		

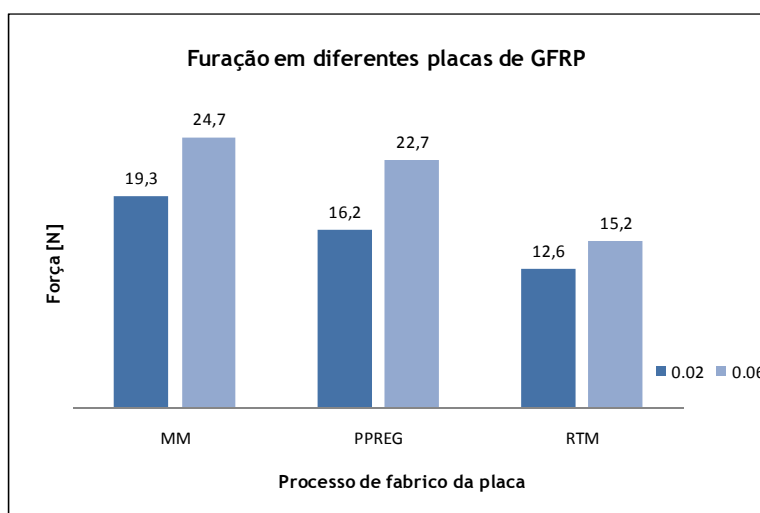


Gráfico 19 Influencia do processo de fabrico da placa na força axial exercida pela broca brad

No Gráfico 19 são apresentados os resultados da furação recorrendo a 2 avanços e 3 tipos de placas (MM, PPREG, RTM) realizados para a ferramenta brad.

Em todos os casos verifica-se que com um aumento do avanço de ferramenta a força axial de furação aumenta independentemente do tipo de placa.

A placa fabricada por RTM é constituída por baixo teor em fibra (quando comparada com outros tipos de placas), o que provoca uma grande redução da força axial durante a furação. A moldação manual [MM] apresenta as maiores forças axiais exercidas devido à maior rigidez deste tipo de placas. Algumas imagens da parte experimental de furação de GFRP são referenciadas nas seguintes imagens.



Figura 52 Placa em GFRP após furação



Figura 53 Broca brad durante o processo de furação

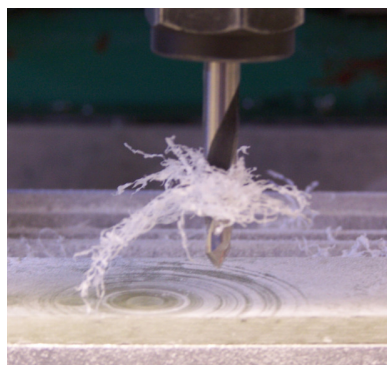


Figura 54 Pormenor do levantamento da apara.

4.2.2. Análise da influência da velocidade de corte

Estes ensaios têm como objectivo analisar a influência da velocidade de corte da ferramenta no desenvolvimento de forças axiais durante a furação de placas em GFRP.

Diferentes velocidades (tabela 12) foram aplicadas à broca helicoidal 120, recorrendo a um avanço constante de 0,04 (mm/rot).

Tabela 12 Condições de ensaio 4.2.2

Condições de ensaio		
Velocidade		Avanço
[rpm]	[m/min]	[mm/rot]
700	13,2	0,04
1400	26,4	
2100	39,6	
2800	52,8	
3500	66,0	
4300	81,1	
4900	92,4	
5600	105,6	
6300	118,8	
7000	131,9	

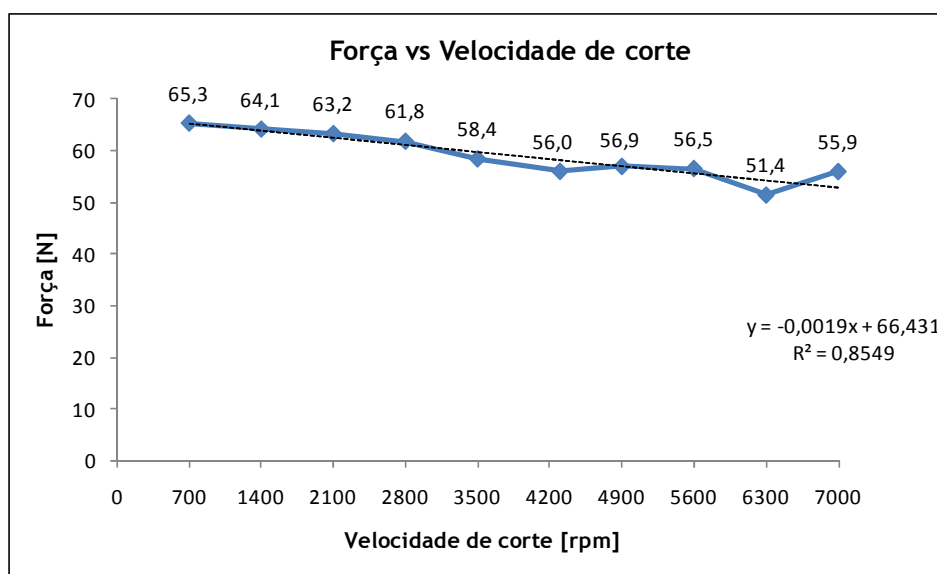


Gráfico 20 Influencia da velocidade de corte na força axial de furação

Dos resultados obtidos, é possível, verificar que à medida que, a velocidade de rotação da ferramenta aumenta, menor é a força axial exercida durante a furação.

4.2.3. Análise da influência do avanço da ferramenta

Estes ensaios têm como objectivo analisar a influência do avanço da ferramenta no desenvolvimento de forças axiais durante a furação de placas em GFRP.

As condições de ensaio são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 Condições de ensaio 4.2.3

Condições de ensaio		
Velocidade [rpm]	Avanço	
	[mm/rot]	[mm/min]
2800	0,02	56
	0,04	112
	0,06	168
	0,09	252
	0,12	336
	0,16	448
	0,2	560

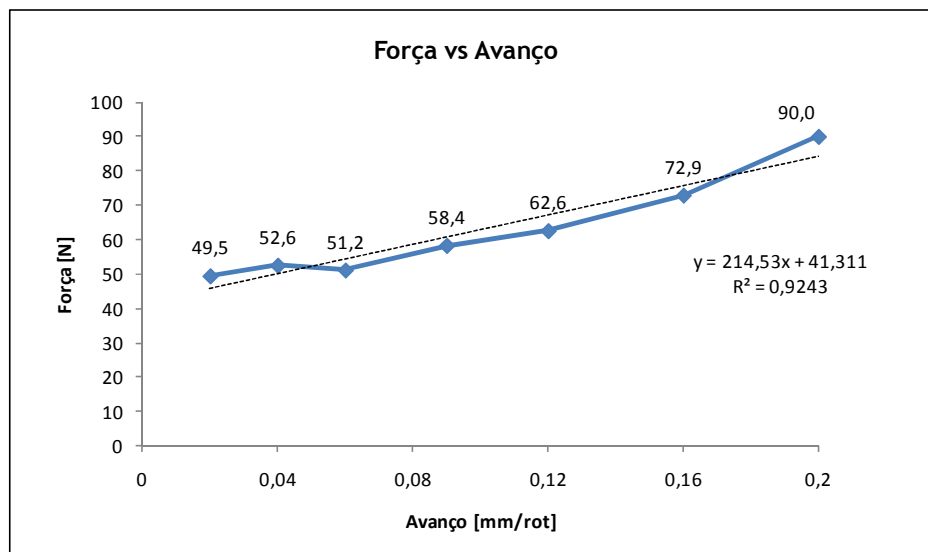


Gráfico 21 Influencia do avanço da ferramenta na força axial de furação

O resultado deste estudo da influência do avanço permite-nos concluir que à medida que aumentamos o avanço, a força axial aumenta e que poderá a aumentar o dano que lhe é associado.

Nos avanços mais baixos este aumento da força axial é pouco significativo, contudo para avanços superiores o aumento desta tende a ser cada vez maior.

O objectivo deste estudo, consiste na determinação das melhores condições de selecção dos parâmetros (velocidade e avanço) com o objectivo de minimizar a força axial e consequentemente os danos lhe poderão estar associados.

Após analisar a influência da velocidade de rotação e do avanço na força axial exercida durante a furação, é possível verificar que, a força axial aumenta com baixas velocidades assim como quando está sujeita a avanços elevados, por outro lado, diminui com velocidades elevadas assim como quando está sujeita a avanços baixos.

Após os resultados verificados, conclui-se que as condições ideais de furação são a aplicação de avanços baixos associados a velocidades elevadas.

No entanto, na prática, uma selecção de parâmetros não se trata de um processo trivial e deverá ser bem equacionada para cada caso em estudo, dependendo do material a cortar, da espessura da placa e da geometria de ferramenta.

Velocidades de corte elevadas minimizam a força axial exercida, contudo se esta velocidade for excessiva irá originar um sobreaquecimento no material a ser maquinado e irá originar danos térmicos.

Relativamente à influência do avanço, os resultados obtidos indicam que os avanços mais baixos são favoráveis à diminuição da força axial exercida durante a furação. Contudo, estes avanços significam tempos de ciclo elevados que originarão o desgaste na ferramenta e como consequência má qualidade no furo.

5. Estudo da rugosidade

A medição da rugosidade nas paredes dos furos tem como objectivo determinar a relação entre a rugosidade na superfície maquinada e os parâmetros; avanços, geometria de ferramenta, velocidade de corte e material de ferramenta. Todas as medições de rugosidade deste capítulo foram realizadas em placas de CFRP.

5.1. Influência da geometria de ferramenta na avaliação da rugosidade

No estudo da rugosidade medida na parede do furo os parâmetros em estudo são Ra, Rz e R_{máx}.

As ferramentas em estudo são Brad, Bidiametral D, Helicoidal 85 e 120. Os resultados dos 3 tipos de rugosidades são apresentados no Gráfico 22.

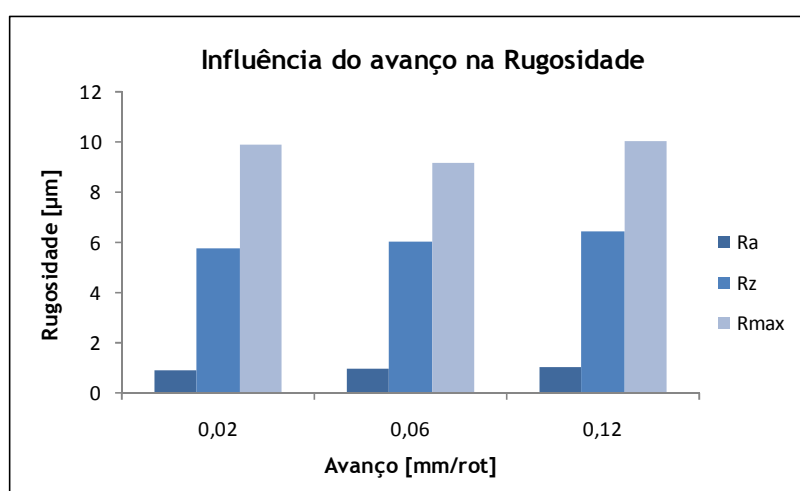


Gráfico 22 Influência da geometria da ferramenta na avaliação de rugosidade

Como é possível verificar existe uma relação entre os parâmetros R_a , R_z e $R_{máx}$ de modo que nos próximos resultados em análise será abordado o parâmetro R_z , que representa a média aritmética dos 5 valores da rugosidade (Gráfico 23).

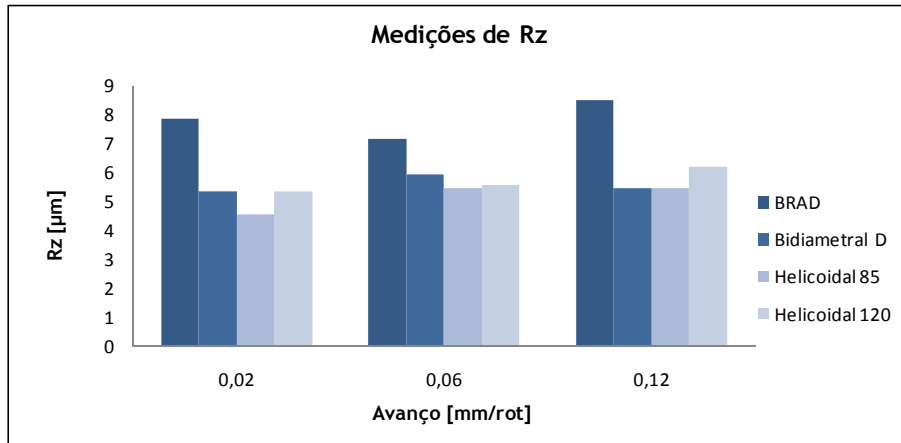


Gráfico 23 Rugosidade da parede do furo para diferentes geometrias de ferramenta

Estes resultados permitem verificar que existe um aumento significativo do parâmetro R_z com o aumento do avanço. A broca brad apresenta o valor mais elevado de rugosidade para todos os avanços testados.

Realizando a média dos valores R_z entre os 4 tipos de ferramenta ensaiados, é possível chegar a uma relação entre o parâmetro R_z e o avanço da ferramenta, conforme está representado no Gráfico 24.

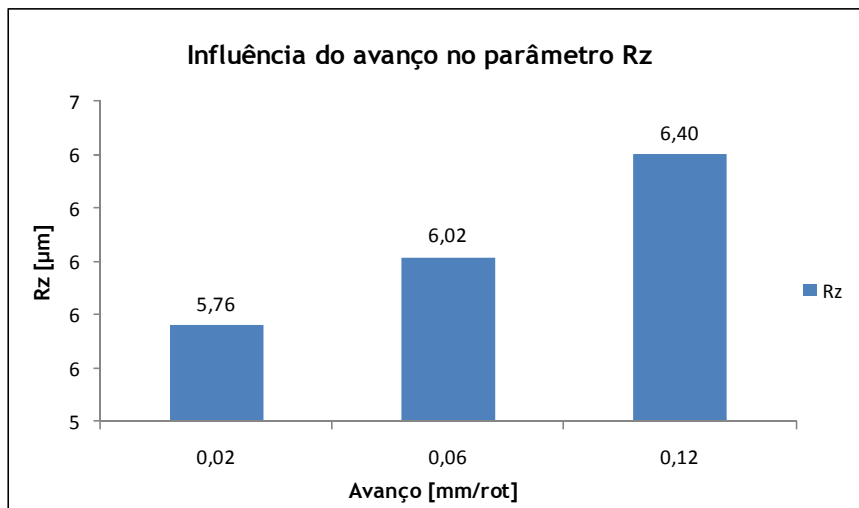


Gráfico 24 Influência do avanço no parâmetro de rugosidade R_z

A equação $Y = 6,39 X + 5,63$ que relaciona o valor de R_z em função do avanço aplicado.

5.2. Influência dos parâmetros avanço, geometria e velocidade na avaliação da rugosidade

Estes ensaios consistem na medição da rugosidade superficial na parede do furo recorrendo aos factores; geometria da ferramenta, avanço e velocidade. Para análise da influência destes factores foi seguida a mesma metodologia aplicada aos ensaios de monitorização das forças (arranjo ortogonal L8).

O ensaio foi realizado de acordo com as condições descritas na Tabela 14.

Tabela 14 Condições de ensaio 5.2

	Condições de ensaio	
Avanço [mm/rot]	0.06	0.12
Geometria	2 cortantes	4 cortantes
Vel. Corte [rpm]	3200	6000

Os resultados da aplicação do método de Taguchi são apresentados no Anexo 3.

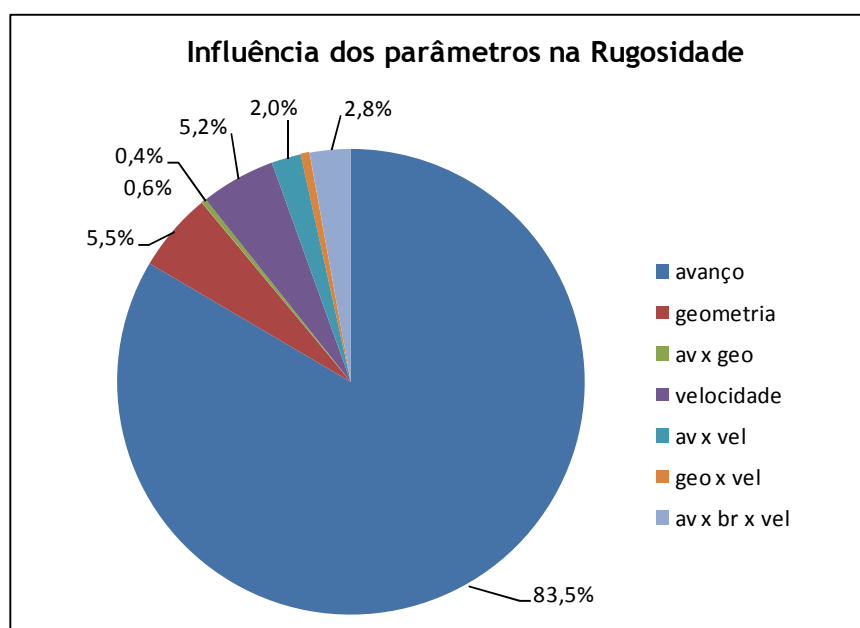


Gráfico 25 Contribuição do avanço, geometria e velocidade de corte na rugosidade da parede do furo.

Após análise dos resultados obtidos, verifica-se que o avanço (83%) é o principal efeito na rugosidade. Embora a geometria e a velocidade tenham pouca influência superam todas as interações, o que revela que no fenómeno rugosidade a superfície da parede do furo durante a furação, os factores de entrada são independentes.

5.3. Influência do material de ferramenta PCD na avaliação da rugosidade

Este estudo consiste na medição de rugosidade das superfícies da parede dos furos realizados por uma ferramenta em PCD para diferentes avanços de ferramenta. As condições experimentais estão apresentadas na Tabela 15, e os resultados apresentados no Gráfico 26 referem-se ao parâmetro Rz e consiste na média de 3 medições realizadas em cada furo.

Tabela 15 Condições de ensaio 5.3

	Condições de ensaio
Material Broca	PCD
Diâmetro [mm]	6
Vel. Corte [m/min]	80 [4240 rpm]
Avanço [mm/rot]	0,02 - 0,04 - 0,06 - 0,12

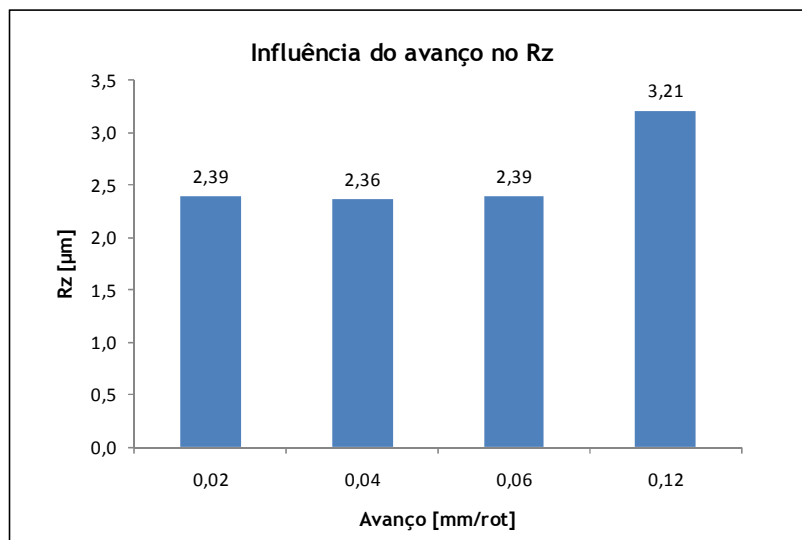


Gráfico 26 Influência do avanço em na avaliação da rugosidade

Os resultados apresentados demonstram que para o avanço mais elevado (0,12 mm/rot), os valores de Rz aumentam significativamente relativamente aos 3 avanços inferiores que apresentam um valor praticamente constante.

A resistência que o PCD confere à ferramenta e ao seu baixo desgaste associado, tem como consequência a possibilidade de realizar elevadas series de furos, sem influenciar a rugosidade na parede do furo.

6. Estudo da extensão do dano

O estudo do efeito das forças axiais que ocorrem durante a furação no dano de placas em CFRP, tem como objectivo determinar a relação existente entre o dano e os parâmetros utilizados na furação. Os parâmetros em estudo são: avanço e geometria de ferramenta.

As medições foram realizadas em furos sujeitos a diferentes avanços e geometrias de ferramenta.

6.1. Estudo do factor de delaminação

O Estudo do factor de delaminação foi realizado em 4 geometrias de ferramentas diferentes, nomeadamente; Brad, Bidiometral D, Helicoidal 85 e 120. Foram analisados para cada condição experimental (4 geometrias e 3 avanços), 4 furos e após o cálculo do seu factor de delaminação foi considerada a sua média aritmética. Na Figura 55 estão representados como exemplo de uma das geometrias em estudo, o dano dos 3 avanços (0,02, 0,06 e 0,12 mm/rot).

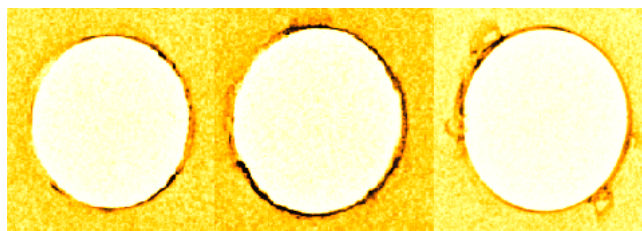


Figura 55 Dano em furos realizados com broca Helicoidal 120 com diferentes avanços.

6.2. Estudo do factor de delaminação para diferentes geometrias de ferramenta

A comparação entre os comportamentos das diferentes geometrias em função do parâmetro avanço está representada no Gráfico 27.

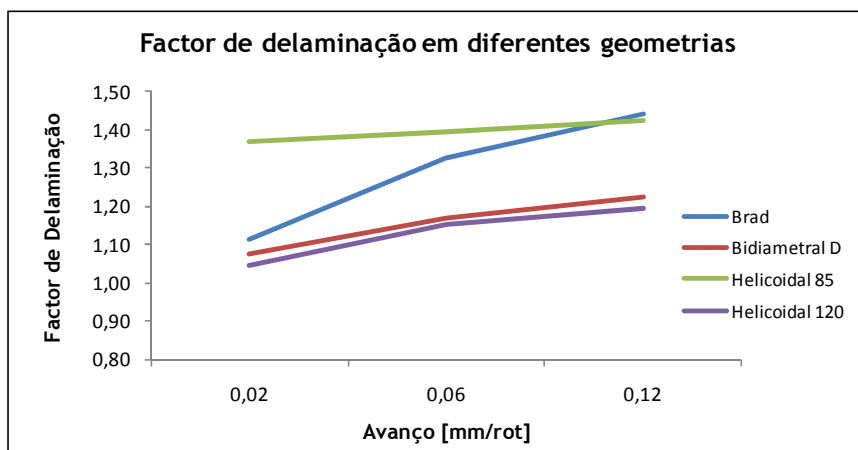


Gráfico 27 Influência do avanço no factor delaminação nas 5 geometrias de ferramenta

Através da análise destes resultados verifica-se a existência de um aumento do dano (factor de delaminação), à medida que aumenta o avanço. Esta relação do avanço com ao dano vai de acordo com Davim et al [70] que refere que o factor de delaminação aumenta quando os parâmetros de corte são aumentados, sendo isto mais claro quando se trata do aumento do avanço.

Embora em todas as geometrias o dano associado aumente com o avanço, estas apresentam comportamentos diferentes entre si. A broca helicoidal 85 apresenta os piores resultados (valores do factor de delaminação mais altos), enquanto os melhores resultados são da broca helicoidal 120, seguidos da bidiametral D. A broca brad apresenta entre todas o comportamento mais diferente pois sofre maiores variações. A broca brad para avanços baixos aproxima-se aos melhores resultados (helicoidal 120 e bidiametral D) e para avanços altos aproxima-se aos valores de maior factor de delaminação (helicoidal 85).

6.3. Factor de delaminação em função do parâmetro avanço

Tendo em conta os resultados do factor de delaminação para vários avanços com diferentes geometrias de ferramentas, foi considerada entre estas a sua média relativamente a cada um dos 3 avanços (Gráfico 28)

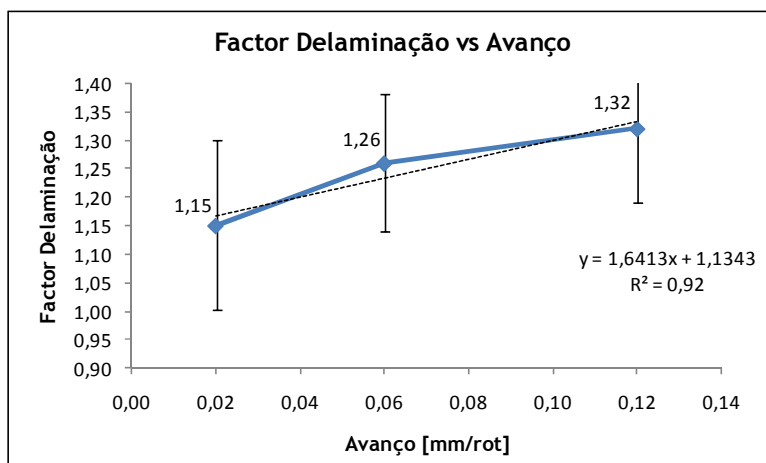


Gráfico 28 Relação entre avanço e factor de delaminação

Os resultados apresentados mostram um aumento do factor de delaminação com o aumento do avanço. A equação $Y=1,64X+1,13$ dá-nos o valor do factor de delaminação (y) em função do avanço (x).

6.4. Influência dos parâmetros avanço, geometria e velocidade na avaliação da delaminação.

Estes ensaios consistem na medição do factor de delaminação, recorrendo aos factores; avanço, geometria da ferramenta e velocidade de corte.

As condições experimentais do ensaio estão apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16 Condições de ensaio 6.4.

	Condições de ensaio	
	0,06	0,12
Avanço [mm/rot]	0,06	0,12
Geometria	2 cortantes	4 cortantes
Vel. Corte [rpm]	3200	6000

Os resultados da aplicação do método de Taguchi são apresentados no anexo 4.

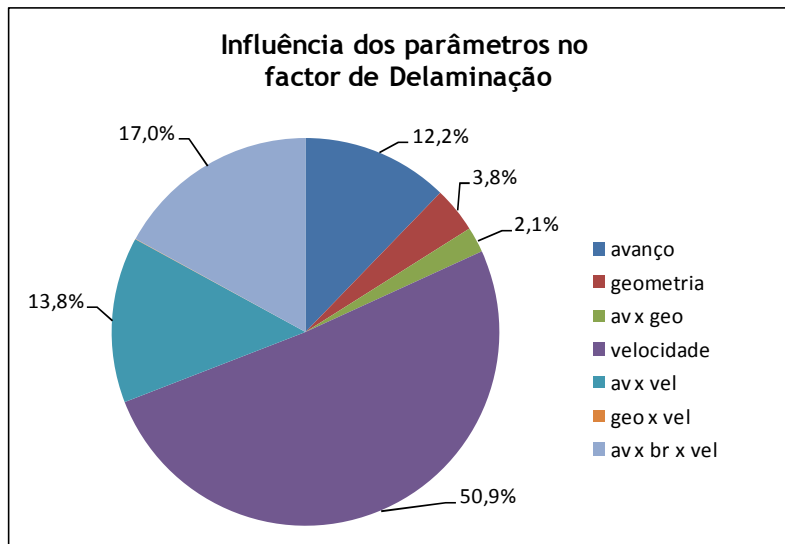


Gráfico 29 Contribuição dos parâmetros avanço, geometria e velocidade no factor de delaminação.

Dos resultados obtidos verifica-se que a velocidade é o factor mais influente (51%) no factor de delaminação. A distribuição restante consiste essencialmente nas interações entre avanço/broca/velocidade (17%) e avanço/velocidade (14%) o que prova que os factores não são independentes.

O factor geometria de ferramenta não apresenta uma influência significativa, pois os dois níveis desse factor apenas variavam no número de arestas cortantes (que representa apenas uma ligeira alteração da condição de geometria).

O avanço de ferramenta também é influenciado pelo número de arestas cortantes, nomeadamente pelo avanço/dente e que resulta numa interacção excessiva de factores que podem prejudicar a avaliação da contribuição do parâmetro avanço.

7. Simulação numérica

7.1. Utilização do MEF

O recurso à aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF) em estudos sobre maquinagem de materiais compósitos tem vindo a ser cada vez mais aplicado, devido às importantes vantagens que lhe estão associadas, tais como a redução de tempo e custos no estudo dos fenómenos de dano e fractura.

Inicialmente em modelação numérica utilizava-se a modelação do corte ortogonal [90]. A remoção de material é outro aspecto que tem merecido interesse tais como os modelos de corte, ortogonal ou oblíquo, ou o mecanismo de formação e separação da aparas [91,92]. Budan e Vijayarangan [93] estudaram a influência da velocidade de corte, avanço e conteúdo em fibras da peça no acabamento superficial, variações dimensionais e forças axiais de corte que podem causar a delaminação. A simulação da formação da aparas para laminados unidireccionais de grafite/epóxico considerando o mecanismo de corte ortogonal foi desenvolvido, considerando diferentes casos de orientação das fibras relativamente à aresta de corte, segundo Arola [90].

Langella et al. [95] apresentou um modelo que representa o mecanismo de previsão da força axial e binário e suas tendências durante a furação de laminados compósitos. Este estudo concentrou a atenção na influência do avanço e ângulo de ponta da ferramenta na força axial e binário, distinguindo as respectivas contribuições das arestas cortantes e da ponta da broca.

Durão et al. [92,96] estudou um modelo tridimensional considerando o uso de elementos de interface que incorporam um modelo de dano de modo misto, permite simular o início e propagação da delaminação.

7.2. Aplicação do MEF ao modelo em estudo

Neste estudo, é desenvolvido um modelo numérico capaz de simular o processo de furação de placas de compósitos laminados. Foi utilizado nas simulações o software ABAQUS®/Explicit com elementos sólidos.

O modelo utiliza elementos prismáticos com 8 nós disponíveis na biblioteca do ABAQUS®.

Para o processo de simulação de furação, é necessário um corpo para actuar como broca, sendo então usada a opção “corpo rígido” disponível no ABAQUS®,

Um corpo rígido é um conjunto de nós, elementos, e/ou superfícies cujo movimento é governado por um único nó, denominado de nó de referencia do corpo rígido que se encontra localizado na sua ponta. As posições relativas dos nós e elementos que fazem parte do corpo rígido permanecem constantes durante toda a simulação. Como tal, os elementos constitutivos não se deformam.

A broca (corpo rígido) actua na espessura não cortada da placa modelada (corpo deformável), tal como os modelos de dano analíticos.

Foi utilizado o ABAQUS/Explicit para as simulações pretendidas, na medida em que a broca adquire um movimento cuja velocidade corresponde à velocidade de avanço da ferramenta.

A modelação do dano é realizada recorrendo a múltiplos mecanismos que influenciam a perda de resistência mecânica. Baseado na mecânica do dano, este modelo permite simular a degradação e separação do material por funções já disponíveis no ABAQUS® como, “Damage initiation”, “Damage evolution” e “Element deletion”,

A iniciação e a propagação do dano pode ser simulada por dois critérios.

O primeiro critério define a condição que deve ser satisfeita para que ocorra a iniciação da degradação progressiva do material. O segundo critério baseia-se na perda progressiva da rigidez do material até à sua completa rotura. Ao ser atingida a ruptura completa do material, a sua remoção é efectuada através da instrução “Element deletion”. Destas duas opções disponíveis no programa ABAQUS®, para a perda de rigidez que conduz à rotura, foi seleccionada a opção baseada na acumulação da energia, critério que se revelou mais próximo do mecanismo real do que a baseada em deslocamentos.

O modelo em estudo considera uma forma quadrangular de dimensões 100 x 100 mm². Os elementos estão distribuídos num total de 14 camadas numa sequência de empilhamento equivalente a um laminado cross-ply.

7.3. Imagens da simulação do modelo

Na Figura 56 está representada a sequência do processo de furação à entrada do furo.

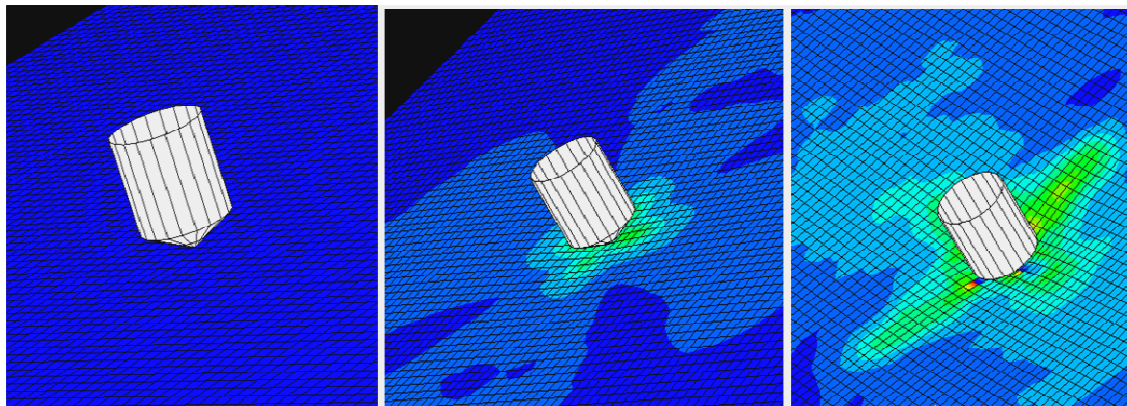


Figura 56 Várias etapas da simulação do processo de furação à entrada do furo

Na Figura 57 está representada a sequência do processo de furação à saída do furo.

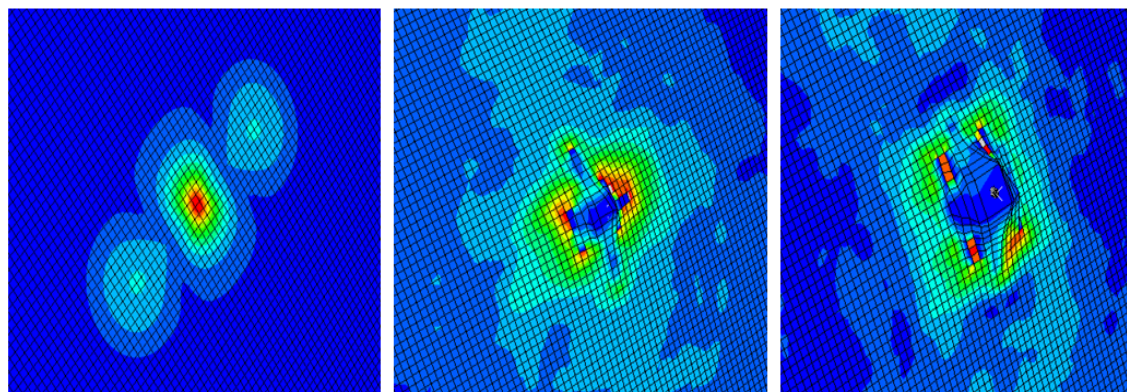


Figura 57 Várias etapas da simulação do processo de furação à saída do furo

7.4. Resultados das simulações numéricas

Das simulações numéricas realizadas, foram retirados os dados relativos à força máxima exercida durante a furação assim como a curva força/deslocamento.

Experimentalmente foram realizados ensaios de monitorização de forças axiais para dois avanços diferentes e estes foram comparados com os resultados obtidos através da modelação da furação de laminados por elementos finitos.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 Comparação de resultados de força máxima durante a furação.

Avanço [mm/rot]	Experimental [N]	MEF [N]	Variação [N]
0,06	105	136	31
0,12	165	145	-20

Os resultados demonstram que nas duas situações em estudo se verifica um aumento da força axial à medida que o avanço aumenta, embora os valores da simulação numérica ainda se encontrem um pouco afastados dos valores reais.

A melhor aproximação entre o resultado experimental e a simulação numérica acontecem para o avanço mais alto (0,12 mm/rot)

O modelo numérico fornece resultados coerentes em termos de progressão das forças em função do avanço.

A curva força/deslocamento obtida na furação experimental e a curva resultante da aplicação do método de elementos finitos para o caso do avanço mais baixo, (0,06 mm/rot), são comparadas no Gráfico 30-

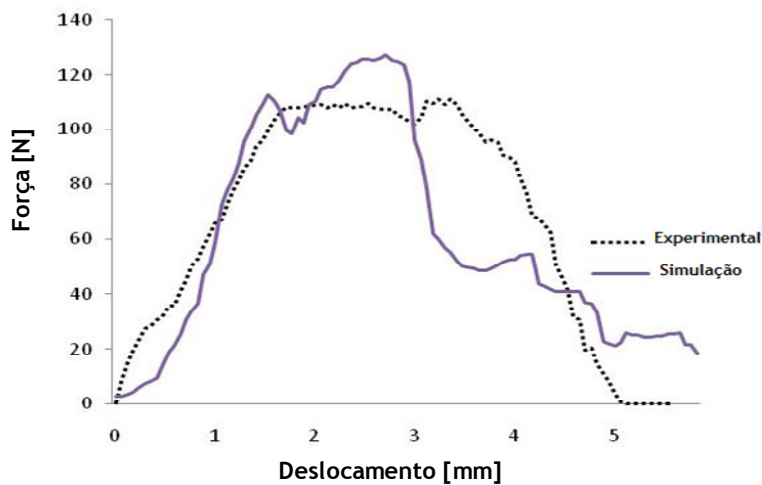


Gráfico 30 Comparação das curvas força/deslocamento entre os resultados experimentais e o modelo numérico

Da análise dos resultados, verifica-se uma concordância entre a forma da curva experimental e a curva obtida pelo modelo numérico. Uma vez que o comportamento do modelo de simulação inclui o contacto ferramenta/peça, não é permitida a remoção total do material, daí a existência de uma força positiva no fim da simulação.

Os resultados obtidos permitem-nos obter várias conclusões.

O efeito da variação do tempo para o percurso definido para a broca (velocidade de avanço) tem uma consequência semelhante à esperada e verificada experimentalmente;

A forma da curva força/deslocamento obtida na simulação numérica é idêntica às curvas obtidas nos ensaios experimentais.

Os valores fornecidos pelo modelo aqui apresentados, da força axial máxima durante a furação para os avanços mais elevados, estão próximos dos valores experimentais.

O modelo numérico permite simular a furação de placas carbono/epóxico com propriedades quasi-isotrópicas.

Contudo, este modelo numérico está numa fase inicial de desenvolvimento.

Artigos científicos publicados

No âmbito deste trabalho foram publicados e apresentados em conferências alguns artigos científicos:

“Avaliação de ferramentas para a furação de laminados”

D. J. S. Gonçalves, L. M. P. Durão, V.H.C. de Albuquerque, J.M.R.S. Tavares

8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, Guimarães, 21-23 de Abril, 2010

“Modelação da furação de laminados por elementos finitos”

L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, M.F.S. F. de Moura, A.T. Marques

8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, Guimarães, 21-23 de Abril, 2010

“Drilling process of composite laminates - a tool based analysis”

L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, J. M. R. S. Tavares, V. H. C. Albuquerque, A. T. Marques

14th European Conference on Composite Materials, 7-10 June 2010, Budapest

“Avaliação da delaminação após furação em compósitos laminados”

L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, V. H. C. Albuquerque, J. M. R. S. Tavares.

ENMEC2010, 6-8 de Setembro de 2010, FEUP, Porto, Portugal

“Modelação por elementos finitos do processo de furação em laminados de carbono/epóxico”

L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, M. F. S. F. de Moura e A. T. Marques

ENMEC2010, 6-8 de Setembro de 2010, FEUP, Porto, Portugal

Conclusão

Este estudo consistiu na avaliação da influência de vários parâmetros, tais como; avanço, velocidade de corte, geometria de ferramentas, nas forças desenvolvidas durante a furação, na extensão do dano e na rugosidade da superfície do furo.

No capítulo 5 foram realizados ensaios de monitorização de forças axiais em placas de CFRP, recorrendo a ferramentas de WC e de PCD. Também foram realizados ensaios em placas GFRP com ferramentas em WC.

Os resultados experimentais da monitorização de forças axiais desenvolvidos durante a furação utilizando diferentes geometrias de ferramenta de WC, apresentaram a broca Bidiametral D, com o melhor comportamento (menores valores de forças axiais para todos os avanços) entre todas as geometrias ensaiadas.

Os ensaios de rugosidade (capítulo 6) na superfície maquinada apresentam resultados bastante semelhantes entre geometrias, à excepção da broca brad que apresentou os valores de rugosidades mais altos.

Relativamente à extensão do dano (Capítulo 7), neste grupo de ferramentas as que apresentaram os valores de delaminação mais baixos foram a Helicoidal 120 e a Bidiametral D.

Devido ao bom comportamento em termos de forças axiais e delaminação, podemos concluir que a ferramenta Bidiametral D apresenta-se como uma geometria de eleição para as condições ensaiadas.

Embora os resultados de força axial e delaminação admitam uma relação coerente para esta geometria, o mesmo não se verificou para as outras geometrias de ferramenta. Os resultados da delaminação obtidos não correspondem na mesma ordem, ao comportamento das forças axiais das ferramentas durante a furação. Este facto, permite concluir que a geometria de ferramenta é um factor que influencia a delaminação.

Aplicando a metodologia de Taguchi na análise de contribuição dos parâmetros que influenciam os fenómenos em estudo, é possível concluir:

- A geometria de ferramenta (58%) é o parâmetro mais influente no desenvolvimento das forças axiais durante a furação.
- O avanço de ferramenta (84%) é o parâmetro mais influente na rugosidade da parede do furo.
- A velocidade de corte (51%) é o parâmetro mais influente na extensão do dano, avaliada através do factor de delaminação.

Os ensaios realizados com as ferramentas PCD permitem concluir que estas apresentam um excelente comportamento (baixa evolução das forças desenvolvidas durante a furação) para longas series de furação em laminados carbono/epóxico.

Nestas ferramentas designadas PCD original, foi feita uma alteração na sua geometria, que resultou numa redução de forças axiais bastante significativa para os avanços mais elevados.

Estes resultados assumem uma importância fundamental a nível Industrial pois o uso de ferramentas em PCD devido ao seu elevado preço, só se torna vantajoso perante duas condições (elevada vida útil de ferramenta e tempos de ciclo reduzidos) que neste estudo são verificadas.

A alteração realizada na ferramenta, ao reduzir a força axial da furação, para além de poder reduzir o dano no furo, permite um menor desgaste da ferramenta que tem como consequência um aumento da sua vida útil. Este aumento de vida útil significa, uma diminuição do rácio, preço da ferramenta sobre o número de peças que vai realizar, que se traduz naturalmente numa rentabilidade económica a nível industrial.

Os tempos de ciclo reduzidos (avanços elevados) são outro factor de relevância na melhoria da produtividade, pois permitem um maior número de furos realizados num determinado período de tempo. Como a alteração da ferramenta aqui em estudo apresenta melhores resultados para avanços elevados, o conceito de melhor produtividade também aqui se verifica.

Foram realizados ensaios de furação com ferramentas em WC em placas de GFRP, com o objectivo de estudar a influência de um vasto intervalo de avanços e velocidades nas forças axiais desenvolvidas. Os resultados revelam que as condições ideais, são velocidades de corte elevadas e avanços baixos. Contudo a escolha dos parâmetros não é trivial pois existem danos associados a esta selecção.

Um modelo de elementos finitos foi desenvolvido para simular o processo de furação de laminados compósitos carbono/epóxico. Nas simulações realizadas foi possível verificar o efeito da variação do tempo no modelo (velocidade de avanço), com comportamento semelhante ao verificado experimentalmente para além da curva de força/deslocamento verificada pelo modelo ser semelhante à curva obtida em ensaios experimentais.

Bibliografia

- 1] Marcelo F.S.F de Moura, Alfredo B. de Moraes, António G. de Magalhães “Materiais Compósitos, Materiais Fabrico e Comportamento Mecânico”, pág. 59-60
- 2] http://in3.dem.ist.utl.pt/mscdesign/02ed/01materiais/pres7_1.pps
- 3] https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/53756/1/Compositos_0.pdf
- 4] Marcelo F.S.F de Moura, Alfredo B. de Moraes, António G. de Magalhães “Materiais Compósitos, Materiais Fabrico e Comportamento Mecânico” pág. 10-14.
- 5] <http://www.uab.edu/engineering>
- 6] <http://www.sbcomposite.com/Glass.h>
- 7] Khashaba, U.A. “Delamination in Drilling GFRThermoset Composites”. Composite Structures: 2004: 63;313-327.
- 8] Stone R, Krishnamurthy K. “A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite-epoxy laminates”. J Mach Tools Manufact 1996;36(9):985
- 9] Park KY, Choi JH, Lee DG. “Delamination-free and highefficiency drilling of carbon fiber reinforced plastics”. J Compos Mater 1995;29 (15):1988-2002.
- 10] Ho-Cheng H, Dharan CKH. “Delamination during drilling in composite laminates”. J Eng Ind, ASME 1990;112:236-9.
- 11] Zhang LB, Wang LJ, Liu HW, Zhao HW, Wang X, Luo HY. “Mechanical model for predicting thrust and torque in vibrationdrilling fiber-reinforced composite materials”. J Mach Tools Manufact 2001;41:641-57.
- 12] Piquet R, Ferret B, Lachaud F, Swider P. “Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills”. Composites, Part A 2000;31:1107-15.
- 13] Nobe H, Aoyama E, Inoue H, Hirogaki T, Kitahara Y, Katayama T, et al. “Study on cause of internal damage of drilled GFRP”. Key Eng Mater 1998;137:123-30.

- 14] Capello E, Tagliaferri V. "Drilling damage of GFRP and residual mechanical behavior"-Part II: Static and cyclic bearing loads. J Compos Technol 2001;23(2):131-7.
- 15] Jain S, Yang DCH. "Effects of feed rate and chisel edge on delamination in composite drilling". J Eng Ind, ASME 1993;115:398-405.
- 16] Jain S, Yang DCH. "Delamination-free drilling of composite laminates". J Eng Ind, ASME 1994;116:475-81.
- 17] Sadat AB. "Prediction of delamination load in drilling of graphite/ epoxy composites". PD-Vol.75. Eng Syst Design Anal, ASME 1996;3:1-27
- 18] Dharan C.K.H.; Won M.S. "Machining Parameters foran Intelligent Machining System for Composite Laminates".International Journal of Machine Tools & Manufacture.2000: 40; 415-426
- 19] Capello, E. "Workpiece Damping and its Effects on Delamination Damage in Drilling thin Composite Laminates". Journal of Materials Processing Tecnology.2004: 148; 186-195
- 20] Davim, J.P.; Reis, P. "Study of Delamination in Drilling Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) Using Design Experiments", Composite Structures. 2003: 59; 481-487.
- 21] Park KY, Choi JH, Lee DG. "Delamination-free and highefficiency drilling of carbon fiber reinforced plastics". J Compos Mater 1995;29(15):1988-2002, -
- 22] Andrews SD, Ochoa OO, Owens SD. "The effect of fastener hole defects". J Compos Mater 1993;27(1):3-20.
- 23] Tsao, C. C., Hocheng, H. (2004). "Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits indrilling of composite material". Int. J. of Machine Tools and Manufacture, 44, 1085-1090
- 24] Davim, J. P., Reis, P. (2003). "Furação de laminados epóxidos reforçados a fibras de carbono (CFRP)". VI Congr. Ibero-Americano de Engenharia Mecânica, Coimbra, 1079-1084.
- 25] Hocheng, H., Tsao, C. C. (2005). "The path towards delamination-free drilling of composite materials". J. of Materials Processing Technology, 167, 251-264.
- 26] El-Sonbaty, U.A. Khashaba , T. Machaly "Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites". Composite Structures 63 (2004) 329-338.
- 27] Caprino G.; Tagliaferri V. "Damage Development in Drilling Glass Fiber Reinforced Plastics". International Journal of Machine Tools and Manufacture.1995: 35 (6); 817-829
- 28] Konig W, Graß P. "Quality definition and assessment in drilling of fiber reinforced thermosets". CIRP 1989;38/1:119-24

- 29] Piquet, R. Ferret, B. Lachaud, F. Swider, P.” Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills”. *Composites A*, 31, 1107-1115
- 30] Dharan, C. H. K., Won, M. S. (2000). “Machining parameters for an intelligent machining system for composite laminates”. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 39, 415-426
- 31] Stone, R., Krishnamurthy, K. (1996). “A Neural Network Thrust Force Controller to Minimize Delamination During Drilling of Graphite-Epoxy Composites”. *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, 36, 985-1003
- 32] L. M. P. Durão, D. J. S. Gonçalves, V.H.C. de Albuquerque, J.M.R.S. Tavares (2010), “Avaliação de ferramentas para a furação de laminados”, 8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental Guimarães, 21-23 de Abril, 2010
- 23] Daniel J. S. Gonçalves^{1a}, Luís Miguel P. Durão and João Manuel R. S.Tavares, Victor Hugo Costa Albuquerque, A. Torres Marques “Evaluation of Tools and Cutting Conditions on Carbon Fibre Reinforced Laminates”. *Materials Science Forum Vols. 638-642* (2010) pp 944-949.
- 34] Dae.Wook Kim, “Machining and drilling of hybrid composite materials” Dissertation, University of Washington, 2002 , págs 6 e 7]
- 35] Stephenson, D. A. And Agapiou, J. S. “Metal Cutting Theory and Practice”, Marcel Dekker, Inc.1997
- 36] McGraw-Hill Machining Metalworking Handbook, tabela 7.85 pág 449.
- 37] Kalpakjian,2001 “Manufacturing Engineering and Technology”
- 38] S.C. Lin, I.K. Chen, “Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed,Wear” 194 (1996) 156-162
- 39] Koren Y, Usloy AG, Danai K. “Tool wear and breakage detection using a process model”. *Annals of CIRP* 1986;35(1):283-8.
- 40] Choudhury SK, Ramesh S. “On-line tool wear sensing and compensation in turning.” *Journal of Materials Processing Technology* 1995;49(3-4):247-54.
- 41] Rao SB. “Tool wear monitoring through dynamics of stable turning”. *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry* 1986;108:183-90
- 42] Akgerman N, Frisch J. “The use of cutting force spectrum for tool wear compensation during turning” In: *Proceeding of 12th international machine tool design research conference, UMIST, Manchester* 1991. pp. 517-26.
- 43] Danai K, Usloy AG. “A dynamic state model for on-line tool wear estimation in turning.” *Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry* 1987;109:396-9.
- 44] Sanjay Raw “Wear mechanisms and tool life management of WC-Co drills during dry high speed drilling of woven carbon fibre composites” at Helmi Attia.

- 45] Rao SB. "Tool wear monitoring through dynamics of stable turning". Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry 1986;108:183-90.
- 46] S.C. Lin, I.K. Chen, "Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed", Wear 194 (1996) 156-162
- 47] R. Velayudham, T. Krishnamurthy, Soundarapandian, "Evaluation of drilling characteristics of high volume fraction fibre glass reinforced polymeric composite", International Journal of Machine Tools and Manufacture 45 (2005) 399-406
- 48] H. Inoue, E. Aoyama, T. Hirogaski, K. Ogawa, H. Matushita, Y. Kitahara, T. Katayama, "Influence of tool wear on internal damage in small diameter drilling in GFRP", Composite Structures 39 (1) (1997) 55-62
- 49] I.S. Shyha a, D.K.Aspinwall a, S.L.Soo a, S.Bradley, "Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP"
- 50] "Water Jet and Abrasive Water Jet Cutting", Jim Korican, Sundstrans Corporation - pag. 672-676
- 51] "Laser cutting ", Leonard R.Migliore, Spectra-Physics pag 676.
- 52] Wern, C.W.; Ramulu, M. et al. "Investigation of stresses in the orthogonal cutting of fiber-reinforced plastics". Experimental Mechanics, p. 33 - 41, 1994
- 53] Park, K.Y.; Choi, J.H. et al. "Delamination-free and high efficiency drilling of carbon fibre reinforced plastics", J. Composite Materials, v. 29, p. 1988-2002, 1995
- 54] Davim, J.P.; Reis, P. "Drilling carbon fibre reinforced plastics manufactured by autoclave - experimental and statistical study", Materials and design, v. 24, p. 315-324, 2003.
- 55] Hocheng, H.; Tsao, C.C. "Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials", Int. J. Machine Tools & Manufacture, v. 46, p. 1403-1416, 2006;
- 56] Tsao, C.C.; Hocheng, H. "Parametric study on thrust force of core drill", J. Materials Processing Technology, v. 192-193, p. 37-40, 2007
- 57] W.C.Chen, Int.J.Machine Tools & Manufacture:Vol .37 (1997), p.1097
- 58] M.Mehta, T.J.Reinhart, A.H. Soni, "Proc. of the Machining Composite Materials Symposium", ASM Materials Week, (1992), p113
- 59] Stuart, M.L. International Encyclopaedia of Composites, v. 2, p. 297, 1991.
- 60] Persson, E.; Eriksson, I. et al. "Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates", Composites A, v. 28, p. 141-151, 1997
- 61] Dharan, C. H. K.; Won, M. S. "Machining parameters for an intelligent machining system for composite laminates", Int. J. of Machine Tools and Manufacture, v. 39, p. 415-426, 2000.

- 62] Hocheng, H.; Tsao, C.C. “The path towards delamination-free drilling of composite materials”, J. of Materials Processing Technology v. 167, p. 251-264, 2005
- 63] Won, M. S.; Dharan, C. H. K., “Drilling of aramid and carbon fibre polymer composites”, Trans. of ASME J. of Manufacturing Science and Engineering, v. 124, p. 778-783, 2002.
- 64] Tsao, C.C.; Hocheng, H. “Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill”, Int. J. Machine Tools & Manufacture, v. 45, p. 1261-1270, 2005.
- 65] Durão, L. M. P ; Tavares, J. M. R. S. et al , “Damage analysis of carbon/epoxy plates after drilling”, Int. Journal of Materials and Product Technology, v. 32, p. 226-242, 2008.
- 66] Hocheng, H.; Dharan, C. K. H., “Delamination during drilling in composite laminates”, Journal of Engineering for Industry, v. 112, p. 236-239, 1990
- 67] Lachaud, F.; Piquet, R. et al. “Drilling of composite structures”, Composite Structures, v. 52, p. 511-516, 2001
- 68] Zhang, L-B; Wang, L.J et al. “A mechanical model for predicting critical thrust forces in drilling composite laminates”, Proc Instn Mech Engrs, V. 215 B, p. 135-146, 2001.
- 69] Won, M. S.; Dharan, C. H. K., “Drilling of aramid and carbon fibre polymer composites”, Trans. of ASME J. of Manufacturing Science and Engineering, v. 124, p. 778-783, 2002.
- 70] Juan C. Campos Rubio, Alexandre M. Abrão, Paulo E. Faria, J. Paulo Davim “Análise digital de dano na furação de materiais compósitos laminados”
- 71] Davim, J.P.; Campos Rubio, J.C.; Abrão, A. “A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates”. Composite Science Technology. 2007.
- 72] S.R. Karnik a, V.N. Gaitonde b, J. Campos Rubio c, A. Esteves Correia d, A.M. Abrão c, J. Paulo Davim, “Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model”
- 73] <http://www.ptb.de/en/org/5/51/515/bilder/web-t8000.jpg>
- 74] Imagem do catálogo do equipamento ”Hommelwerke-Surface TextureAnalysis The Handbook”, Leigh Mummery”, pág 26
- 75] Tavares, J. M. R. S. (2000), Tese de Doutoramento: Análise de Movimento de Corpos Deformáveis usando Visão Computacional, FEUP, Porto.
- 76] Tavares, J. M. R. S., Barbosa, J. G., Padilha, A. J. (2002), “Apresentação de um Banco de Desenvolvimento e Ensaio para Objectos Deformáveis”. RESI - Revista Electrónica de Sistemas de Informação, vol. 1.

- 77] Awcock, G. W., Thomas, R. (1995). Applied image processing, McGRAW-HILL International Editions, New York
- 78] Jain, R., Kasturi, R., Schunck, B. G. (1995), Machine Vision, McGRAW-HILL International Editions, New York.
- 79] Schalkoff, R. J. (1989), "Digital image processing and computer vision", John Willey & Sons, Inc
- 80] Lee, S.H.; Lee, S-H "Optimisation of cutting parameters for burr minimization in facemilling operations", Int. j. prod. res., 2003, vol. 41, no. 3, 497-511.
- 81] Muzammil, M.; Singh, P.P., Talib, F. "Optimization of gear blank casting process by using Taguchi's robust design technique", Quality Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 351 -359, 2003
- 82] Gros, P.; Kureková, E. "Advanced experiments design for the three -torch plasma cutter testing", Measurement Science Review, Volume 5, Section 3, 2005
- 83] Nalbant, M.; Gökkaya, H.; Sur, G. "Application of Taguchi Method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning", Turkey, July 2005.
- 84] Kopac, J.; Krajnik, P. "Robust design of flank milling parameters based on grey Taguchi method", Slovenia, Journal of Materials Processing Technology, 2007.
- 85] Turkmen, I. et al "Determination by the Taguchi Method of the optimum conditions for mechanical properties of high strength concrete with admixtures of silica fume and blast furnace slag", Turkey. July 2002.
- 86] Mason, P. W.; Prevéy, P.S. "Iterative Taguchi analysis: Optimizing the austenite content and hardness in 52100 Steel", Lambda Research.
- 87] Kondur, B. A.; Ucisik, A. H. "Application of Taguchi Method on the improvement of haemodialysis quality", Istanbul, 1998.
- 88] Aguiar, R. M. F. Projecto robusto, Material de Apoio do curso no âmbito dos consultores em engenharia do valor.
- 89] Montgomery, D. C. "Design and Analysis of experiments, John Wiley & Sons Inc, 3ª Edição", 1991
- 90] Arola, D., Sultan, M. B., Ramulu, M. 2002 "Finite element modelling of edge trimming fiber reinforced plastics", J. of Manufacturing Science and Engineering, v. 124, p. 32-41.
- 91] Durão, L. M. P., de Moura, M. F. S. F., Marques, A.T. 2006 "Numerical simulation of the drilling process on carbon/epoxy composite laminates", Composites A, v. 37, p. 1325-1333.
- 92] Durão, L.M.P., de Moura, M.F.S.F., Marques, A.T. 2008 "Numerical prediction of delamination onset in carbon/epoxy composites drilling" Engineering Fracture Mechanics, v. 75, p. 2767-2778.

- 93] Budan D, Vijayarangan S. “Quality assessment and delamination force evaluation in drilling glass fibre-reinforced plastic laminates - a finite element analysis and linear elastic fracture mechanics approach”. *Proc Ins Mech Eng B* 2002;216:173-82.
- 94] Sicot, Gong, X. L., Cherouat, A., Lu, J. 2003, “Determination of residual stress in composite laminates using the incremental hole-drilling method”, *J. of Composite Materials*, v. 37, p.831-844.
- 95] Langella A, Nele L, Maio A, “A torque and thrust prediction model for drilling of composite materials”. *Composites A* 2005;36:83-93
- 96] Durão, L. M. P., de Moura, M. F. S. F., Marques, A.T. 2006, “Numerical simulation of the drilling process on carbon/epoxy composite laminates”, *Composites A*, v. 37, p. 1325-1333.

Anexos

1. Anexo 1

	Avanço	Geometria	Vel.Corte
nível 1	180,2	171,9	201,9
nível 2	240,6	248,9	219,0
SOL.OPT	0,06	2Z	3200

	SQ	gl	Variancia	P (%)
Avanço	7288,1	1	7288,1	35,63
Geometria	11850,7	1	11850,7	57,93
Avanço x Geometria	622,0	1	622,0	3,04
Velocidade	591,7	1	591,7	2,89
Avanço x Velocidade	38,9	1	38,9	0,19
Geometria x Velocidade	61,5	1	61,5	0,30
Avanço x Geometria x Velocidade	3,9	1	3,9	0,02
TOTAL	20456	7		100

SQ - Soma dos quadrados

gl - Graus de liberdade

P - Percentagem de contribuição

2. Anexo 2

	Avanço	Material F	Diâmetro
nível 1	167,1	526,7	233,8
nível 2	466,8	107,3	400,1
SOL.OPT	0,02	WC	6

	SQ	gl	Variancia	P (%)
Avanço	179630,3	1	179630,3	22,0
Material F	351828,0	1	351828,0	43,1
Avanço x Material F	121175,7	1	121175,7	14,8
Diâmetro	55319,4	1	55319,4	6,8
Avanço x Diâmetro	21526,9	1	21526,9	2,6
Material F x Diâmetro	53943,6	1	53943,6	6,6
Avanço x Material F x Diâmetro	32888,9	1	32888,9	4,0
TOTAL	816313	7		100

3. Anexo 3

	Avanço	Geometria	Vel.Corte
nível 1	10,1	7,2	7,2
nível 2	5,5	8,4	8,4
SOL.OPT	0,12	2Z	3200

	SQ	gl	Variancia	P (%)
Avanço	43,2	1	43,2	83,5
Geometria	2,8	1	2,8	5,5
Avanço x Geometria	0,2	1	0,2	0,4
Velocidade	2,7	1	2,7	5,2
Avanço x Velocidade	1,1	1	1,1	2,0
Geometria x Velocidade	0,3	1	0,3	0,6
Avanço x Geometria x Velocidade	1,5	1	1,5	2,8
TOTAL	51,8	7		100

4.

	Avanço	Geometria	Vel.Corte
nível 1	1,15	1,16	1,12
nível 2	1,20	1,19	1,22
SOL.OPT	0,06	2Z	3200

	SQ	gl	Variancia	P (%)
Avanço	0,005	1	0,005	12,2
Geometria	0,002	1	0,002	3,8
Avanço x Geometria	0,001	1	0,001	2,1
Velocidade	0,021	1	0,021	50,9
Avanço x Velocidade	0,006	1	0,006	13,8
Geometria x Velocidade	0,000	1	0,000	0,0
Avanço x Geometria x Velocidade	0,007	1	0,007	17,0
TOTAL	0,042	7		100