



AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA FURAÇÃO EM LAMINADOS CARBONO EPÓXI COM EMPILHAMENTO CRUZADO (CROSS-PLY)

LUÍS FILIPE DA SILVA DEVESA

outubro de 2020

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA FURAÇÃO EM LAMINADOS CARBONO EPÓXI COM EMPILHAMENTO CRUZADO (CROSS-PLY)

Luís Filipe da Silva Devesa
1130133

2019/2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS EFEITOS DA FURAÇÃO EM LAMINADOS CARBONO EPÓXI COM EMPILHAMENTO CRUZADO (CROSS-PLY)

Luís Filipe da Silva Devesa
1130133

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

2019/2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

JÚRI

Presidente

Prof. Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho
Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Dr. Luís Miguel Pereira Durão
Professor Adjunto, ISEP

Co-orientador

Dr. João Emílio Raimundo Carrilho Matos
Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Prof. José Luis Soares Esteves
Professor Auxiliar, FEUP

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível com a ajuda e suporte de muita gente.

Gostaria assim de agradecer ao Prof. Dr. Luís Miguel Durão, orientador nesta dissertação, por todo o apoio, orientação e conhecimento que forneceu durante toda a execução do trabalho.

Gostaria de agradecer ao Prof. Dr. João Matos pelos conhecimentos e contribuição que prestou ao longo do trabalho.

Ao Eng. José Manuel Fecheira e ao Eng. Vítor Sousa pelo apoio prestado na oficina e durante o processo de maquinagem.

Gostaria de dar um agradecimento especial à minha namorada Daniela Silva por todo o apoio prestado e energia fornecida nos momentos de menor rendimento.

Não esquecendo também o apoio de toda a minha família, amigos, colegas e todos os docentes que me acompanharam durante todos estes anos que levaram a este momento.

Gostaria de agradecer também a toda a equipa ISEP por ter permitido a execução deste trabalho num ambiente seguro apesar dos momentos de incerteza pelo qual estamos todos a passar.

PALAVRAS CHAVE

Materiais Compósitos, Polímero Reforçado com Fibras de Carbono, Furação de Compósito, Forças de Furação, Delaminação, Ensaio não Destrutivos, Radiografia, Processamento de Imagem, Ensaio Destrutivos, Ensaio Bearing, Ensaio Pin-Bearing, Tração

RESUMO

Nas últimas décadas, os materiais compósitos têm vindo a ganhar predominância nas nossas vidas, devidos às suas características, tornando a sua aplicação desejável nas mais diversas áreas.

Devido ao seu processo de fabrico, as peças produzidas a partir destes materiais têm uma geometria quase final ou mesmo terminada, não sendo necessário aplicar tão extensivamente os processos de maquinagem como na produção de peças em materiais convencionais.

Um dos processos de maquinagem mais utilizados é a furação. Este processo permite a utilização de ligações mecânicas de forma a unir peças de modo mais seguro, podendo estas ligações serem permanentes ou não, ao contrário, das ligações adesivas que são ligações permanentes.

Assim, surge a necessidade de uma avaliação extensiva sobre o dano que a furação provoca sobre o material.

Esta avaliação é efetuada sobre a área afetada, que pode variar com os parâmetros do processo de maquinagem.

Esta dissertação irá apresentar um estudo efetuado a 42 placas de laminado do tipo carbono/epóxi, às quais foram efetuados furos utilizando 2 parâmetros diferentes, 2 avanços mas a mesma rotação da ferramenta, e 3 geometrias de brocas distintas. Posteriormente, os provetes foram submetidos a ensaios não destrutivos (radiografia com contraste) e destrutivos (ensaio de tração, bearing e pin-bearing). Os resultados foram analisados e comparados. Durante o procedimento de maquinagem foram registadas as forças e binários exercidos pelas ferramentas.

Quando analisados os resultados verificou-se que os parâmetros de maquinagem e as brocas escolhidas não afetaram de forma significativa a resistência do material, apesar de ter afetado a força axial durante o processo de maquinagem, bem como a área danificada e os fatores de dano.

KEYWORDS

Composite materials, Carbon fiber reinforced polymer, Composite drilling, Drilling forces, Delamination, Non destructive testing, Radiography, Image Processing, Destructive testing, Bearing Test, Pin-Bearing Test, Tensile Testing

ABSTRACT

In the last decades, composite materials have been gaining predominance in our lives, due to their characteristics, making their application desirable in the most diverse areas.

Due to their manufacturing process, parts produced from these materials have an almost final or even finished geometry and it is not necessary to apply the machining processes as extensively as in conventional materials.

Despite this, one of the most used processes is drilling, to be able to use these parts in conjunction with mechanical connection, this allows a more secure connection and can either be permanent or not, contrary to adhesive connection that are permanent. Thus, the need arises for an extensive assessment of the damage that drilling causes to the material.

This assessment is carried out on the affected area, which can vary with the parameters of the machining process.

This dissertation will present a study carried out on 42 laminated plates of carbon/epoxy, to which holes were drilled using 2 different parameters, 2 feed rates and a single rotating speed, and 3 different drill geometries, afterwards the test pieces were tested in non-destructive (enhanced radiography) and destructive (bearing, pin-bearing and tensile) tests. The results were analysed and compared. During the machining procedure, the forces and torques exerted by the tools were recorded.

When the results were analysed, it was found that the machining parameters and the drills chosen did not significantly affect the material resistance, despite having affected the axial force during the machining process as well as the damaged area and the damage factors.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

A.C	Antes de Cristo
CBN	Boro cubico
CO ₂	Dióxido de carbono
CSM	<i>Chopped Strand mat</i>
D.C	Depois de Cristo
DGEBA	Diglicidil éter de Bisfenol A
DGEBF	Bisphenol F
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
HDT	<i>Heat distortion temperature</i>
HSS	<i>High speed steel</i>
ISO	<i>International Standards Organisation</i>
NbC	Carboneto de Nióbio
PCD	Diamante sintético policristalino
PRFC	Polímero reforçado por fibra de carbono
RGB	<i>Red, Green, Blue</i>
TaC	Carboneto de Tântalo
TC	Temperatura de cura
TiAlN	Nitreto de alumínio e Titânio
TiC	Carboneto de Titânio
TiCN	Carbureto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
V ₄ C ₃	Carboneto de Vanádio
WC	Carboneto de Tungstênio

Lista de Unidades

°C	Graus Celsius
μm	Micrómetros
g/cm ³	Gramas por centímetro cubico
g/m ²	Gramas por metro quadrado
GPa	Giga Pascal
h	Horas
HV	Dureza de Vickers
Kg	Quilograma
khz	Kilohertz
kV	Kilovolt
m/min	Metros por minuto

mA	Miliamperes
Mhz	Megahertz
min	Minutos
mm	Milímetros
mm/min	Milímetros por minuto
mm/rot	Milímetros por rotação
mm ²	Milímetros quadrados
MPa	Mega Pascal
N	Newtons
N/mm ²	Newtons por milímetro quadrado
Nm	Newtons metro
rot/min	Rotação por minuto
Rpm	Rotações por minuto
s	Segundos
W/m ² k	Watts por metro kelvin

Lista de Símbolos

A_0	Área nominal do furo
A_d	Área de delaminação à volta do Furo
D	Diâmetro nominal do furo
D_0	Diâmetro nominal do furo
D_1	Diâmetro da ferramenta
D_e	Diâmetro equivalente
D_{max}	Diâmetro máximo da zona afetada
D_{rat}	Rácio do dano
E	Modulo de Elasticidade
e_{rot}	Deformação de rotura
F_b	Valor do azul
F_e	Fator de delaminação
F_{ed}	Fator de delaminação equivalente
F_g	Valor do verde
F_r	Valor do vermelho
F_z	Força axial
I_{RGB}	Identificação de cor
n	Número de rotações da ferramenta
R_m	Tensão de rotura
V_c	Velocidade de Corte
γ	<i>Gamma</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 TIJOLO DE ARGILA E PALHA E ARCO MONGOL (57) (58)	31
FIGURA 2 BARCO EM COMPÓSITO REFORÇADO COM FIBRA DE VIDRO DOS ANOS 50'S (59)	32
FIGURA 3 MONOCOQUE DE CARRO DE FORMULA 1 (10)	33
FIGURA 4 MOTOR DO A380 CRIADO PELA ROLLS ROYCE (60)	34
FIGURA 5 BOEING 777X (61)	35
FIGURA 6 PRÓTESE DE UMA PERNA (11)	35
FIGURA 7 A) PARTÍCULAS EM SUSPENSÃO NUMA MATRIZ B) FIBRAS CURTAS EM SUSPENSÃO NUMA MATRIZ C) MATERIAL COMPÓSITO FIBROSO D) MATERIAL COMPÓSITO LAMINADO (13)	37
FIGURA 8 RESINA EPÓXI DISPONÍVEL COMERCIALMENTE (62)	40
FIGURA 9 A) FIBRAS DE CARBONO SOB A FORMA DE BOBINAS (<i>ROVING</i>) B) FIBRAS DE VIDRO SOB A FORMA DE MANTA C) TECIDOS DE FIBRAS DE CARBONO E FIBRAS DE VIDRO ADAPTADO (63) (64) (65)	43
FIGURA 10 DIFERENTES TIPOS DE TECELAGENS PELA QUAL OS TECIDOS SÃO FORNECIDOS (15)	44
FIGURA 11 ESQUEMA DE MAQUINAGEM POR ULTRASSONS (75)	46
FIGURA 12 BROCA HELICOIDAL (21)	49
FIGURA 13 VARIAÇÃO DO ÂNGULO DA HELICOIDAL DISPONÍVEIS PARA AS BROCAS HELICOIDAIS PELA BOSH (56)	49
FIGURA 14 ILUSTRAÇÃO DE VÁRIOS TIPOS BROCAS ADAPTADO DE (26)	50
FIGURA 15 DIFERENTES TIPOS DE PONTAS PARA BROCAS HELICOIDAIS PARA PLÁSTICOS E METAIS DISPONÍVEIS PELA BOSH (56)	50
FIGURA 16 DIFERENTES TIPOS DE PONTAS PARA BROCAS HELICOIDAIS PARA MADEIRA E ALVENARIA DISPONÍVEIS PELA BOSH (56)	51
FIGURA 17 A) BROCA HELICOIDAL TRADICIONAL B) BROCA <i>STEP</i> C) BROCA <i>BRAD</i> ADAPTADO (66)	52
FIGURA 18 ALGUNS DOS DIFERENTES TIPOS DE REVESTIMENTOS POSSÍVEIS ADAPTADO (67)	55
FIGURA 19 A) MECANISMO DE DELAMINAÇÃO <i>PEEL-UP</i> B) MECANISMO DE DELAMINAÇÃO <i>PUSH-DOWN</i> (22)	56
FIGURA 20 UTILIZAÇÃO DE SUPORTE SACRIFICAL PARA A FURAÇÃO (66)	57
FIGURA 21 ÁREAS DE DANO DIFERENTES PARA O MESMO FATOR DE DANO (34)	58
FIGURA 22 CONCEITO BÁSICO DO ENSAIO DE <i>PULSE ECHO</i> (68)	60
FIGURA 23 CONCEITO BÁSICO DO ENSAIO <i>THROUGH TRANSMISSION</i> (68)	60
FIGURA 24 A) CONCEITO BÁSICO DE UM ENSAIO DE TERMOGRAFIA (69) B) EXEMPLO DE RESULTADOS OBTIDOS POR TERMOGRAFIA (70)	61
FIGURA 25 DIAGRAMA DE CONCEITO DE UM ENSAIO DE <i>SHEAROGRAFY</i> (72)	62
FIGURA 26 EXEMPLO DE RADIOGRAFIA TIRADA COM CONTRASTE DE UM FURO	64
FIGURA 27 DIAGRAMA DE CONCEITO DE ENSAIO DE RADIOGRAFIA (74)	64
FIGURA 28 ESQUEMA DO CONCEITO DE ENSAIO DE TRAÇÃO (71)	65
FIGURA 29 ESQUEMA DA DESCRIÇÃO DO PROVETE PARA ENSAIO DE <i>BEARING</i> PROCEDIMENTO A (41)	67
FIGURA 30 ESQUEMA DE ENSAIO DE <i>BEARING</i> PROCEDIMENTO A (41)	67
FIGURA 31 DIAGRAMA DO CONCEITO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO (73)	68

FIGURA 32 ESQUEMA DE PROVETE PARA ENSAIO DE <i>PIN BEARING</i> (42)	69
FIGURA 33 ESQUEMA DE ENSAIO DE <i>PIN BEARING</i> (42)	69
FIGURA 34 PROVETE DE EPÓXI REFORÇADO POR FIBRAS DE CARBONO, VISTA FRONTAL	74
FIGURA 35 PROVETE DE EPÓXI REFORÇADO POR FIBRAS DE CARBONO, VISTA LATERAL	75
FIGURA 36 TIPOS DE BROCAS UTILIZADAS	77
FIGURA 37 DESENHO DO PROVETE	78
FIGURA 38 SETUP DA MAQUINAGEM DO PROVETE	81
FIGURA 39 PROVETE IMEDIATAMENTE A SEGUIR À FURAÇÃO	81
FIGURA 40 PROVETES MAQUINADOS	82
FIGURA 41 MÁQUINA DE RADIOGRAFIA KODAK 2100	83
FIGURA 42 SENSOR DE RAIOS X KODAK RVG 5100	83
FIGURA 43 EXEMPLO DE IMAGENS OBTIDAS A PARTIR DA RADIOGRAFIA	84
FIGURA 44 EXEMPLO DE RADIOGRAFIA A) MATERIAL B) FURO C) ZONA DELAMINADA	86
FIGURA 45 PASSOS PARA EXECUÇÃO DO PROGRAMA EM MATLAB® A) ESCOLHA DE IMAGEM B) SELEÇÃO DA ZONA RELEVANTE C) IMAGEM BINÁRIA DA ÁREA DELAMINADA D) ÁREA DO FURO MAIS DANO E) ÁREA DO FURO	87
FIGURA 46 DIFERENÇA DE IMAGEM ENTRE DIFERENTES VALORES DE <i>TRESHOLD</i> A) 0.08 B) 0.2 C) 0.38431 D) 0.8	87
FIGURA 47 ESQUEMA PARA CORTE DOS PROVETES	88
FIGURA 48 <i>SETUP</i> DO PROVETE PARA O CORTE	89
FIGURA 49 PROVETE DEPOIS DE CORTADO	89
FIGURA 50 SETUP DO ENSAIO DE <i>PIN BEARING</i>	90
FIGURA 51 SUPORTE UTILIZADO PARA O ENSAIO <i>BEARING</i>	91
FIGURA 52 <i>SETUP</i> DO ENSAIO DE <i>BEARING</i>	92
FIGURA 54 PROVETES DURANTE A CURA COM OS DOIS TIPOS DE INSERTOS	92
FIGURA 53 SUPERFÍCIES PREPARADAS PARA APLICAÇÃO DE ADESIVO	92
FIGURA 55 A) PROVETE PARA MAQUINAGEM B) PROVETE PARA TRAÇÃO	93
FIGURA 56 PROVETES PREPARADOS PARA ENSAIO DE TRAÇÃO	94
FIGURA 57 SETUP DE ENSAIO DE TRAÇÃO COM EXTENSÓMETRO	95
FIGURA 58 FORÇA AXIAL DURANTE MAQUINAGEM <i>STEP</i> LENTO	96
FIGURA 59 LINHA DE TENDÊNCIA DO PROCESSO DE FURAÇÃO	97
FIGURA 60 VALORES CENTRADOS EM ZERO	97
FIGURA 61 COMPARAÇÃO DAS AMOSTRAS DE MAQUINAGEM <i>BRAD</i> RÁPIDO	98
FIGURA 62 COMPARAÇÃO DA MÉDIA DA MAQUINAGEM COM VELOCIDADE DE AVANÇO 0.15 MM/ROT	98
FIGURA 63 COMPARAÇÃO DA MÉDIA DA MAQUINAGEM COM VELOCIDADE DE AVANÇO 0.05 MM/ROT	99
FIGURA 64 VARIAÇÃO DO BINÁRIO DURANTE A MAQUINAGEM <i>BRAD</i> COM VELOCIDADE DE AVANÇO 0.05 MM/ROT	99
FIGURA 65 VARIAÇÃO DO BINÁRIO DURANTE A MAQUINAGEM HELICOIDAL COM VELOCIDADE DE AVANÇO 0.05 MM/ROT	100
FIGURA 66 VARIAÇÃO DO BINÁRIO DURANTE A MAQUINAGEM <i>STEP</i> COM VELOCIDADE DE AVANÇO 0.05 MM/ROT	100

FIGURA 67 EXEMPLO DE GRÁFICO FORÇA-DESLOCAMENTO DE RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO PIN BEARING	106
FIGURA 68 EXEMPLO DE GRÁFICO TENSÃO-DESLOCAMENTO DE ENSAIO DE PIN BEARING	107
FIGURA 69 ESTADO DO PROVETE DEPOIS DO ENSAIO DE <i>PIN BEARING</i>	109
FIGURA 70 GRÁFICO EXEMPLO FORÇA-DESLOCAMENTO DE ENSAIO BEARING	111
FIGURA 71 GRÁFICO EXEMPLO DE TENSÃO-DESLOCAMENTO DE ENSAIO BEARING	111
FIGURA 72 ESTADO DO PROVETE DEPOIS DO ENSAIO DE <i>BEARING</i>	112
FIGURA 73 GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO ENSAIO DE TRAÇÃO	113
FIGURA 74 GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO COM EXTENSÓMETRO	113
FIGURA 75 COMPARAÇÃO ENTRE PARÂMETROS E BROCAS	117
FIGURA 76 COMPARAÇÃO DA MÉDIA DA MAQUINAGEM DE AVANÇO RÁPIDO	118
FIGURA 77 COMPARAÇÃO DA MÉDIA DA MAQUINAGEM DE AVANÇO LENTO	118
FIGURA 78 ESQUEMA DA CONCENTRAÇÃO DE FORÇAS A) BROCA HELICOIDAL B) BROCA <i>BRAD</i> C) BROCA <i>STEP (47)</i>	119
FIGURA 79 GRÁFICO COMPARAÇÃO FE	121
FIGURA 80 GRÁFICO COMPARAÇÃO FED	121
FIGURA 81 GRÁFICO COMPARAÇÃO DRAT	122
FIGURA 82 COMPARAÇÃO DA TENSÃO MÉDIA DO ENSAIO DE PIN BEARING	124
FIGURA 83 COMPARAÇÃO DA TENSÃO MÉDIA DO ENSAIO DE BEARING	125
FIGURA 84 EXEMPLO DE UMA IMAGEM EM QUE A RADIAÇÃO NÃO OCORREU DE FORMA IGUAL POR TODA A SUPERFÍCIE	127

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 PROPRIEDADES DE RESINAS TERMOENDURECÍVEIS (3)	38
TABELA 2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS FIBRAS (12)	42
TABELA 3 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS ULTRA DUROS (29)	54
TABELA 4 CLASSIFICAÇÃO RELATIVA DOS CONTRASTES ORGÂNICOS ADAPTADO (37)	63
TABELA 5 CLASSIFICAÇÃO RELATIVA DOS CONTRASTES INORGÂNICOS ADAPTADO (37)	63
TABELA 6 PROPRIEDADES DO MATERIAL DEPOIS DE CURADO 2 HORAS A 135°C (43)	74
TABELA 7 CARACTERÍSTICAS DAS BROCAS UTILIZADAS (ANEXOS 2, 3 E 4)	75
TABELA 8 PARÂMETRO DE MAQUINAGEM PARA CADA PROVETE	79
TABELA 9 DIMENSÕES DOS PROVETES DE TRAÇÃO	93
TABELA 10 RESULTADO DA ANÁLISE DAS RADIOGRAFIAS. RAIOS CIRC. ENV.-RAIO DO CÍRCULO ENVOLVENTE	101
TABELA 11 VALORES DOS CRITÉRIOS DE DANO OBTIDOS	103
TABELA 12 MÉDIAS DA ANÁLISE DAS RADIOGRAFIAS	105
TABELA 13 MÉDIA DOS CRITÉRIOS DE DANO	105
TABELA 14 DESVIO PADRÃO DOS CRITÉRIOS DE DANO	106
TABELA 15 DADOS OBTIDOS DO ENSAIO DE PIN BEARING	108
TABELA 16 MÉDIA DOS RESULTADOS OBTIDOS DE <i>PIN BEARING</i>	109
TABELA 17 DADOS OBTIDOS DO ENSAIO <i>BEARING</i>	110
TABELA 18 MÉDIA DOS RESULTADOS OBTIDOS DO ENSAIO DE <i>BEARING</i>	112
TABELA 19 RESULTADOS OBTIDOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO	114
TABELA 20 CLASSIFICAÇÃO RELATIVA DOS PARÂMETROS	122
TABELA 21 CLASSIFICAÇÃO RELATIVA DOS PARÂMETROS TENDO EM CONTA A ÁREA REAL DO FURO	123

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Contextualização	27
1.2	Objetivo	28
2	MATERIAIS COMPÓSITOS.....	31
2.1	Introdução.....	31
2.1.1	Características e Classificações	36
2.2	Matriz	37
2.2.1	Poliéster.....	38
2.2.2	Epóxis	39
2.2.3	Vinilester	40
2.2.4	Resinas Fenólicas.....	40
2.2.5	Poliimidas Termoendurecíveis	41
2.3	Reforços	41
2.3.1	Forma das Fibras	42
2.4	Aditivos.....	45
2.5	Furação.....	45
2.5.1	Velocidade de Corte	47
2.5.2	Avanço.....	47
2.5.3	Fluido de Trabalho.....	47
2.5.4	Broca.....	48
2.5.4.1	Geometria da Broca	49
2.5.4.2	Materiais	52
2.5.5	Defeitos	55
2.5.5.1	Delaminação	55
2.5.5.2	Quantificação dos Danos da Furação.....	57
2.6	Ensaio não destrutivos	59
2.7	Ensaio destrutivos.....	64
2.7.1	Ensaio de Tração	65
2.7.2	Ensaio de compressão.....	68

3	DESENVOLVIMENTO	73
3.1	Materiais	73
3.1.1	Provete	73
3.1.2	Brocas	75
3.1.3	Contraste	77
3.2	Maquinagem	77
3.3	Ensaio não destrutivos	82
3.3.1	Radiografia	82
3.3.2	Análise de imagem	84
3.4	Ensaio destrutivos	88
3.4.1	Ensaio Pin Bearing	88
3.4.2	Ensaio Bearing	90
3.4.3	Ensaio Tração	93
3.5	Análise de dados	95
3.5.1	Resultados da célula de Carga	95
3.5.2	Análise de imagem	101
3.5.3	Pin Bearing	106
3.5.4	Bearing	109
3.5.5	Tração.....	113
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	117
4.1	Análise de Resultados	117
4.1.1	Análise dos resultados da Furação	117
4.1.2	Análise de radiografia	120
4.1.3	Análise resultados Pin Bearing	123
4.1.4	Análise dos resultados do ensaio de Bearing	124
4.1.5	Análise dos resultados do ensaio de Tração	126
4.2	Propostas de Trabalhos Futuros	127
4.3	Conclusão	128
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	133
6	ANEXOS	141
6.1	Ficha Técnica Carbono-Epóxi T700	141
6.2	Ficha técnica broca Helicoidal	142

6.3	Ficha técnica broca Step	143
6.4	Ficha técnica broca Brad	144
6.5	Ficha técnica do contraste da radiografia	145
6.6	Ficha técnica da célula de carga Kistler 9171A	146
6.7	Ficha técnica da máquina de radiografia Kodak 2100	147
6.8	Ficha técnica do sensor de radiografia Kodak 5100.....	148
6.9	Ficha técnica da máquina CNC HAAS VF-2	149

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

1.2 Objetivo

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Num mundo em que a eficiência tem um valor cada vez mais importante, materiais, flexíveis, com excelentes características mecânicas, tais como, baixa densidade, rigidez, resistência mecânica e ao impacto são cada vez mais procurados. (1) Devido a estas boas características, estes tipos de materiais, como, é o caso dos materiais compósitos, têm sido cada vez mais utilizados nas mais diversas áreas e aplicações, como a indústria aeronáutica, indústria automóvel, construção civil e indústria médica. (2) (3) (4) (5) (6)

De acordo com a Rolls-Royce, a utilização de materiais compósitos, especialmente Polímeros Reforçados por Fibras de Carbono (PRFC), juntamente com um novo design, consegue reduzir o consumo de combustível e de emissões de CO₂ em pelo menos 25%, uma vez que, a utilização deste material nas lâminas e no corpo das turbinas faz com que seja possível poupar cerca de 700kg por avião, o equivalente a 7 passageiros e respetiva bagagem. Este investimento de 29.5 milhões de euros numa nova fábrica focada no desenvolvimento de peças e novos métodos de fabrico bem como na produção de peças em PRFC é um dos exemplos que comprova a grande potencialidade deste material e consequentemente do grande interesse da indústria em materiais compósitos. (2)

Uma das vantagens deste tipo de materiais é de não ser necessário muito esforço para obter excelentes acabamentos superficiais bem como a possibilidade de as peças acabadas poderem ter a geometria final, evitando assim a necessidade de grande esforço de maquinagem.

No entanto, os processos de maquinagem mais utilizados para este tipo de materiais são o corte e a furação. Nesta dissertação iremos nos focar na furação.

A furação é o processo de maquinagem mais utilizado devido à sua utilidade na ligação a outras peças estruturais, utilizando fixações mecânicas (rebites e parafusos), porque, muitas vezes, as juntas adesivas por si só não são suficientemente resistentes sendo por isso necessário uma junta mecânica ou mesmo as duas. (3)

Apesar da existência de vários estudos sobre os danos causados na furação há ainda necessidade de estudar mais aprofundadamente, de modo a melhorar o dimensionamento na utilização deste tipo de materiais, reduzindo assim o desperdício e aumentando a eficiência da produção sem pôr em risco a segurança.

Assim com o objetivo de quantificar e qualificar os danos que a furação provoca será necessário analisar o furo com ensaios não destrutivos e destrutivos, de forma a obter as áreas afetadas pelo dano, bem como, as diferentes propriedades dos materiais depois de maquinados, tentando assim determinar quais os parâmetros que afetam a qualidade do furo negativamente.

1.2 Objetivo

Esta dissertação tem como objetivos principais analisar e quantificar os danos provocados durante a furação de um laminado de carbono epóxi (CIT HS160 T700 ER450 UD); e posteriormente avaliar as características do material depois de maquinado através de ensaios destrutivos.

O objetivo secundário desta tese é analisar a variação de forças e binário durante a furação, para as diferentes ferramentas utilizadas durante o processo de maquinação.

Para a execução dos objetivos principais e secundário irá ser necessário preparar e planejar os provetes para os ensaios não destrutivos e destrutivos, bem como utilizar *softwares* adequados para tratar as imagens, obtidas pela radiografia, e os dados obtidos pelos ensaios destrutivos e durante o processo de maquinação.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Introdução
- 2.2 Matriz
- 2.3 Reforços
- 2.4 Aditivos
- 2.5 Furação
- 2.6 Ensaios não destrutivos
- 2.7 Ensaios destrutivos

2 Materiais Compósitos

2.1 Introdução

Materiais compósitos são, por definição, materiais obtidos através da combinação de dois ou mais materiais distintos à macro escala. A escolha dos materiais tem como objetivo aproveitar as características desejáveis dos materiais individuais de modo a possuir características superiores aos mesmos. (3)

Um material compósito, normalmente, é constituído por matriz e reforço, esta combinação terá de ser feita à macro escala sendo os diferentes componentes, matriz e reforço, identificáveis a olho nu. (7)

Um dos primeiros materiais compósitos a ser utilizados foram tijolos de argila reforçados com fibras de palha, no Egito e Mesopotâmia em 1500 A.C. (Fig.1) . Outra utilização de compósitos aconteceu em 1200 D.C., quando na Mongólia se usava madeira, ossos e um adesivo na construção de arcos (Fig.1). A combinação destes materiais tornava os arcos mais resistentes. Esta tecnologia ajudou Genghis Khan nas suas conquistas, uma vez que, até à invenção da pólvora era considerada a arma mais poderosa do mundo. (8)



Figura 1 Tijolo de argila e palha e arco Mongol (57) (58)

Os materiais compósitos de base polimérica, como conhecemos atualmente, aparecem quase imediatamente com a introdução de polímeros artificiais no início do século XX. Apesar, destes polímeros artificiais possuírem melhores características que as resinas naturais, continuavam a não ser adequados para aplicações estruturais. Em 1935, Owens Corning introduziu as primeiras fibras de vidro no mercado. A combinação destas fibras com polímeros resultou num material com uma estrutura resistente e leve,

iniciando assim, a indústria dos materiais compósitos como a conhecemos atualmente. (8)

Com o início da Segunda Guerra Mundial, a investigação de materiais compósitos acelerou, aparecendo várias investigações de polímeros com as mais diversas fibras. Uma das primeiras aplicações envolvendo compósitos foi a utilização de polímeros reforçados com fibras para proteção do equipamento de radar, uma vez que são transparentes às ondas rádio. (9) (8)

Depois da Segunda Guerra Mundial, o desenvolvimento de polímeros e de materiais compósitos continuou, estes tipos de materiais tornaram-se disponíveis comercialmente e diversas indústrias começaram a utilizar ou expandiram o uso destes novos materiais. Em 1946, apareceram os primeiros barcos com cascos em compósitos (Fig.2), ao mesmo tempo, novos processos de fabrico apareceram, em especial Brandt Goldsworthy foi considerado o autor de numerosos desenvolvimentos, tais como a criação da primeira prancha de surf em compósitos e a invenção da pultrusão. (8)

Também na década de 50's do século XX a indústria aeronáutica aumentou a utilização de compósitos motivada por três princípios: a potencialidade teórica dos materiais, a elevada rigidez das estruturas e a baixa densidade. Os compósitos de matriz metálica também foram desenvolvidos durante esta década principalmente pela indústria militar, sendo estes componentes capazes de sustentar as altas temperaturas nos mísseis balísticos. (9)

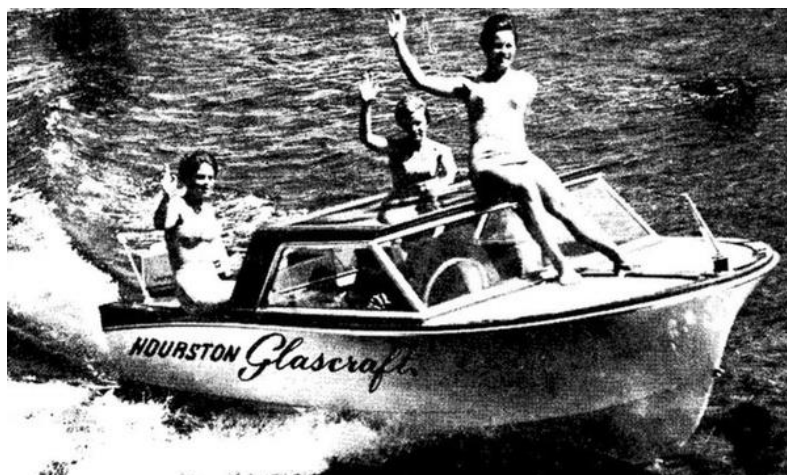


Figura 2 Barco em Compósito reforçado com fibra de vidro dos anos 50's (59)

Atualmente, estes materiais são utilizados em diversas indústrias e aplicações, tais como betão reforçado com varas de aço (betão armado) a compósitos de alto desempenho utilizado em indústrias altamente competitivas como a aeronáutica ou a Fórmula 1 (PRFC) (Fig.3). (3)



Figura 3 Monocoque de carro de Formula 1 (10)

Como referido na contextualização, a procura por este tipo de materiais é cada vez maior. Esta procura é verificada pelos investimentos feitos nesta área, por exemplo 29.5 milhões de euros feito pela Rolls-Royce (2) (Fig.4), outro exemplo é a intenção da Teijin estabelecer um centro de desenvolvimento, design, prototipagem e de estudo de peças em compósitos para automóveis, uma vez que, se espera que o mercado de venda destas peças seja aproximadamente 1.7 mil milhões de Euros até 2030. (6)



Figura 4 Motor do A380 criado pela Rolls Royce (60)

Com a investigação e desenvolvimento de compósitos, começa-se a abrir o caminho para novas utilizações destes materiais. Uma das aplicações é a produção de peças em compósito para utilização em reatores de fusão. Estas peças necessitam de aguentar temperaturas elevadas (superiores a 600°C), enquanto que as peças de aço utilizadas, atualmente, possuem um limite de 500°C . Espera-se que estas peças sejam produzidas num compósito cerâmico de carboneto de silício utilizando uma técnica de impressão 3D. (5)

Outro exemplo de utilização de materiais compósitos de forma inovadora, é no Boeing 777X (Fig.5), neste caso a Hexcel fornece à Boeing um núcleo alveolado para utilização no interior, superfícies de controlo entre outras estruturas. Outros núcleos e superfícies foram também desenvolvidos para utilização nesta aeronave. (4)



Figura 5 Boeing 777X (61)

Uma das indústrias que utiliza de forma proeminente estes materiais é a indústria médica. Estes tipos de materiais são utilizados nas mais variadas áreas tais como dentária, ortopedia, cardiologia entre outras. (11)

Nesta área os materiais compósitos têm de ser biocompatíveis, isto é não devem ser rejeitados pelo corpo. (11)

Estes materiais são utilizados muitas vezes como implantes, para o osso, articulações, ligamentos, válvulas de coração, excertos vasculares, dentes, em tecido ou órgãos danificados, para melhorar ou acelerar a recuperação. Os materiais compósitos são também utilizados para o fabrico de próteses (Fig.6) e instrumentos médicos tais como *pacemakers*. (11)



Figura 6 Prótese de uma perna (11)

É esperado que os materiais escolhidos possuam características semelhantes ao material que substitui no corpo, por exemplo, pH e resistência mecânica. Por exemplo, o osso é submetido a cerca de 4 MPa e os ligamentos de tendões entre 40 e 80 MPa. Além disso, os materiais têm de sustentar ciclos de stress constantes, por exemplo uma prótese da anca necessita aguentar cerca de 1×10^6 ciclos antes de ser substituída. (11)

A indústria dos biomateriais está avaliada em cerca de 12 mil milhões de dólares por ano e espera-se que esse valor aumente com o passar dos anos. (11)

Podemos assim verificar que os materiais compósitos são utilizados nas mais variadas e abrangentes indústrias e aplicações sendo impossível enumerar todas nesta dissertação.

2.1.1 Características e Classificações

Como dito anteriormente, os materiais compósitos têm como objetivo procurar características superiores às características dos materiais que os compõem. Algumas dessas características que podem ser melhoradas são: (7)

- Rigidez;
- Resistência à corrosão;
- Resistência ao desgaste;
- Densidade;
- Resistência à fadiga;
- Melhores comportamentos mecânicos;
- Melhores acabamentos superficiais;
- Isolamento acústico;
- Isolamento térmico.

Apesar de os materiais compósitos conseguirem ter características mecânicas excelentes, possuem também limitações, sendo a principal a dificuldade de dimensionar e otimizar as estruturas devido às características heterogéneas e anisotrópicas, uma vez que, a característica do material varia com a direção em que a carga está a ser aplicada, outra limitação é o custo destes materiais, principalmente das matérias primas, resinas e fibras, que limita o alcance das aplicações. (12)

Uma das designações mais comuns para a classificação de materiais compósitos são: (7)

1. Materiais Compósitos Fibrosos, que consiste em Fibra longas ou fibras curtas em suspensão aleatória na matriz;
2. Laminados, que consiste em camadas de vários materiais, diferentes ou não;
3. Partículas em suspensão numa matriz;
4. Combinações dos vários tipos.

Na Figura 7, está demonstrado algumas das formas como a fibra pode ser disposta na matriz.

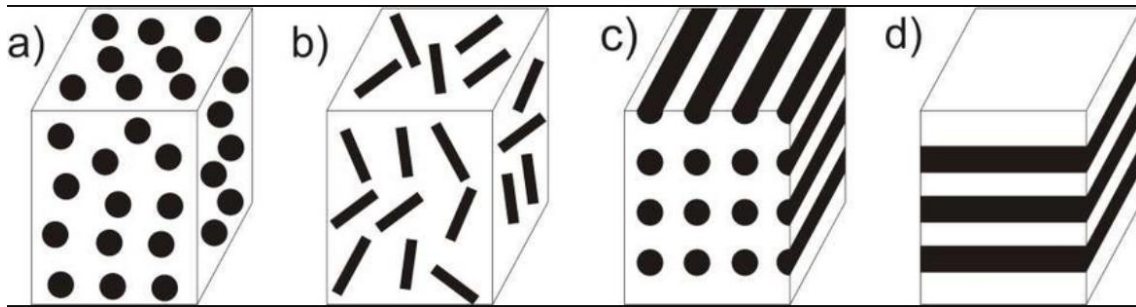


Figura 7 a) Partículas em suspensão numa matriz b) Fibras curtas em suspensão numa matriz c) material compósito fibroso d) material compósito laminado (13)

2.2 Matriz

A matriz tem como função dar estabilidade dimensional ao compósito, garantir uma distribuição eficiente da carga pelo reforço e proteger a superfície das fibras. Normalmente, a matriz possui características mecânicas piores que as do reforço, mas também possui, tipicamente uma densidade inferior. Isto leva que a combinação das duas tenha boas características mecânicas com baixa densidade. (3) (7)

Uma das classificações que se pode efetuar aos materiais compósitos é pelo tipo de matriz: (3)

- Matriz polimérica;
- Metálica;
- Cerâmica;
- Cimentosa.

Nesta dissertação iremos nos focar nas matrizes Poliméricas.

As matrizes poliméricas normalmente são categorizadas em termoplásticos e termoendurecíveis. Os polímeros termoendurecíveis são os polímeros mais utilizados para o fabrico de compósitos. Este tipo de polímeros sofrem o processo de polimerização durante a cura, e necessita da ajuda de um catalisador, e por vezes de temperatura e pressão, tornando-se permanentemente rígidos uma vez curados. Uma das características destes polímeros é não fundirem quando é aplicado calor, apesar de se decomporem, apesar disso estes plásticos suportam temperaturas mais elevadas que os termoplásticos. (14) (3) (12)

Os polímeros termoendurecíveis mais utilizados são:

- Poliéster insaturados;
- Resinas epóxis;
- Poliimidas termoendurecíveis;
- Resinas de vinilester;
- Resinas fenólicas.

Na Tabela 1, é possível verificar as propriedades de algumas resinas termoendurecíveis.

Tabela 1 Propriedades de resinas termoendurecíveis (3)

Resinas		HDT (°C)	E (GPa)	R _m (MPa)	ε _{rot} (%)
Poliéster	Ortoftálica	66	3.6	55	2.2
	Ortoftálica	95	3.3	70	3.5
	Isoftálica	93	4.1	65	2.5
	Isoftálica	125	3.7	55	1.5
Fenólicas	Ressol	250	2.0	32	1.8
Vinilester	Bisfenol A	102	3.5	82	6.0
	Novolac	150	3.5	68	3.5
Epóxidas	Tc=20°C	62	3.2	62	2.0
DGEBA	Tc=120°C	121	3.0	90	8.0
Epóxidas	Tc=120°C	101	4.1	125	5.0
DGEBF					

2.2.1 Poliéster

Existem duas classificações para as resinas de poliéster, saturados e insaturados. Os poliésteres saturados são termoplásticos, e é possível obtê-los comercialmente sobre a forma de filmes, fibras e resinas. Estes poliésteres não são normalmente utilizados para o fabrico de compósitos. (3)

Os poliésteres insaturados são dos mais utilizados no fabrico de materiais compósitos devido ao seu baixo custo e bom compromisso entre as suas diversas características e facilidade de processamento. (1)

O poliéster é muitas vezes utilizado com reforços de fibras de vidro, devido ao seu baixo preço. Devido às suas boas características é utilizado em diversas indústrias, tais como tanques de armazenamento, automóveis, barcos entre muitas outras. (12)

Estes tipos de resinas são sensíveis a temperaturas elevadas. (12)

2.2.2 Epóxis

Estas são uma das resinas mais utilizadas em aplicações mais técnicas devido a apresentar uma grande variedade de formulações químicas, a maior parte tem como base o diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA). Esta resina, normalmente possui melhores características que o poliéster e podem ser formuladas numa grande variedade de rigidez (Fig.8). (12) (3) Estas resinas apresentam custos elevados (4x poliéster e 2x vinilester). (3)

As resinas epóxis apresentam excelentes características mecânicas, tais como a resistência mecânica, resistência química, grande estabilidade dimensional e resistência à abrasão. A temperatura de funcionamento destas resinas varia entre os 100°C e os 200°C. (3)

A cura do epóxi pode ser feita entre o 120°C e os 175°C. As resinas curadas a temperaturas mais baixas são utilizadas normalmente em aplicações em que são expostas a temperaturas inferiores, por exemplo artigos desportivos, as que são curadas a elevada temperatura são utilizadas em aplicações mais exigentes, como por exemplo a indústria aeronáutica. (12)



Figura 8 Resina epóxi disponível comercialmente (62)

2.2.3 Vinilester

Este tipo de resinas possuem uma elevada resistência química e à corrosão, sendo bastante utilizadas nas indústrias química e marítima, utilizam-se para a produção de tubos e tanques. Além da resistência química e mecânica, também possui boas propriedades mecânicas, como baixa viscosidade e processos de cura rápidos. (3) (12)

2.2.4 Resinas Fenólicas

As resinas fenólicas possuem um bom comportamento ao fogo, com reduzida produção de fumos, em contrapartida há liberação de voláteis durante o processo de cura. Estas resinas apresentam-se em duas formas líquidas (resóis) ou sólidas (*novolacs*). As resinas líquidas são usadas principalmente em pré-impregnados e, não necessitam de mais nenhum material. (3)

As sólidas normalmente são formuladas já com cargas ou outros aditivos, e a sua reticulação é feita através de um agente endurecedor ou com calor. Estas resinas são adequadas para moldação por compressão e transferência. (3)

2.2.5 *Poliimidas Termoendurecíveis*

As resinas poliimidas termoendurecíveis são utilizadas quando elevada estabilidade dimensional a altas temperaturas é necessária, possuem elevada resistência mecânica, resistência ao impacto, baixo coeficiente de atrito e boa capacidade de adesão. Estas resinas tem um custo elevado assim como elevada absorção de água. (3)

2.3 Reforços

Os reforços podem ser utilizados sob diferentes formas, incluindo, partículas, fibras curtas, fibras longas, fibras contínuas, tecidos entre outras. O mesmo material pode estar disponível também em diferentes formas. As características do compósito são amplamente afetadas pela forma do reforço e pela direção das fibras devido às características anisotrópicas dos materiais compósitos. (12)

Cada uma das formas tem características específicas que iremos abordar mais à frente e estão exemplificadas na Figura 9.

Existem vários materiais, que podem ser utilizados como reforços, nos compósitos de matriz polimérica: (3) (12)

- Fibras de Vidro (são as mais utilizadas);
- Fibras de Aramida;
- Fibras de Boro;
- Fibras de Carbono;
- Fibras de Grafite;
- Fibras Cerâmicas.

Na Tabela 2, pode-se verificar as vantagens e desvantagens das diversas fibras.

Tabela 2 Vantagens e Desvantagens das Fibras (12)

Fibras	Vantagens	Desvantagens
Vidro-E, Vidro-S	Elevada resistência mecânica Baixo custo	Baixa rigidez Baixa resistência à fadiga Sensível à temperatura
Aramida (<i>Kevlar</i>)	Elevada resistência à tração Baixa densidade	Baixa resistência à compressão Elevada absorção da humidade Custo elevado
Boro	Elevada rigidez Elevada resistência à compressão	Custo elevado
Carbono	Elevada resistência mecânica Elevada rigidez	Custo moderadamente elevado
Grafite	Rigidez muito elevada	Baixa resistência mecânica Custo elevado
Cerâmicos	Elevada rigidez Uso em elevada temperatura	Baixa resistência mecânica Custo elevado

2.3.1 Forma das Fibras

Como referido anteriormente, as fibras podem ser apresentadas sob diferentes formas, sendo as mais comuns: *Roving*, Mantas e Tecidos. (3)

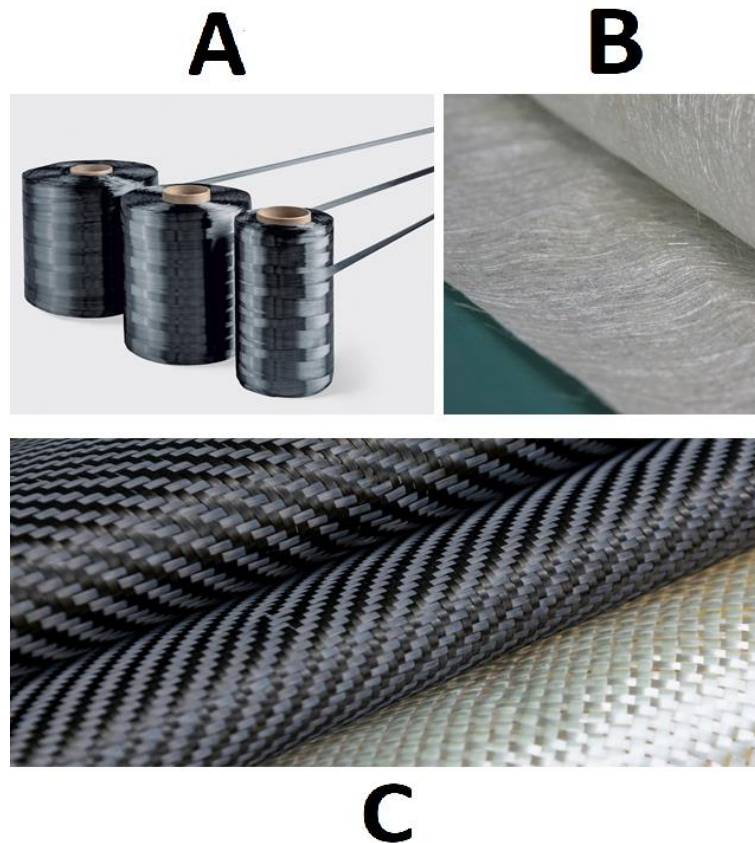


Figura 9 A) Fibras de Carbono sob a forma de bobinas (*Roving*) B) Fibras de vidro sob a forma de manta C) Tecidos de fibras de carbono e fibras de vidro Adaptado (63) (64) (65)

Roving consiste num cordão de filamentos contínuos e são fornecidos na forma de bobinas (Fig.9A). O *Roving* pode ser utilizado diretamente nos processos de enrolamento, pultrusão e entrelaçamento. Também pode ser processado para ser transformado em fibras curtas para ser utilizados em moldação por projeção, por injeção ou por moldação por centrifugação. Para além de fibras curtas, também é utilizado para fazer tecidos e mantas. (3)

Os tecidos são compostos por fibras longas entrelaçadas, o padrão pela qual são entrelaçadas depende das propriedades desejadas para esse tecido (Fig.9C). (3)

Os tecidos podem ser definidos como unidirecionais, onde as fibras estão quase todas dispostas na mesma direção, de forma a garantir que a resistência máxima numa só direção, em detrimento das outras, evitando assim a utilização de material desnecessário. A disposição das fibras pode ser, como dito anteriormente, virtualmente numa só direção ou serem distribuídas em duas direções até perfazer uma distribuição equitativa. (3)

O tipo de tecido varia de acordo com a tecelagem com que é fabricado, a tecelagem mais simples (*plain weave*) consiste em filamentos dispostos num padrão alternado cima-baixo. (15)

A tecelagem *Basket Weave* é semelhante ao *Plain* mas difere no padrão sendo este 2 por cima 2 por baixo. Este tecido possui uma estrutura menos estável pelo que se torna mais maleável, e, é também mais resistente que um tecido *Plain* equivalente. (15)

Os tecidos *long shaft satin weave* ou *Harness Weave* são muito utilizados na indústria aeronáutica e é recomendado o uso de vácuo no processo de fabrico destes tecidos. (15)

Na Figura 10, é possível visualizar uma representação dos diferentes tipos de tecelagem.

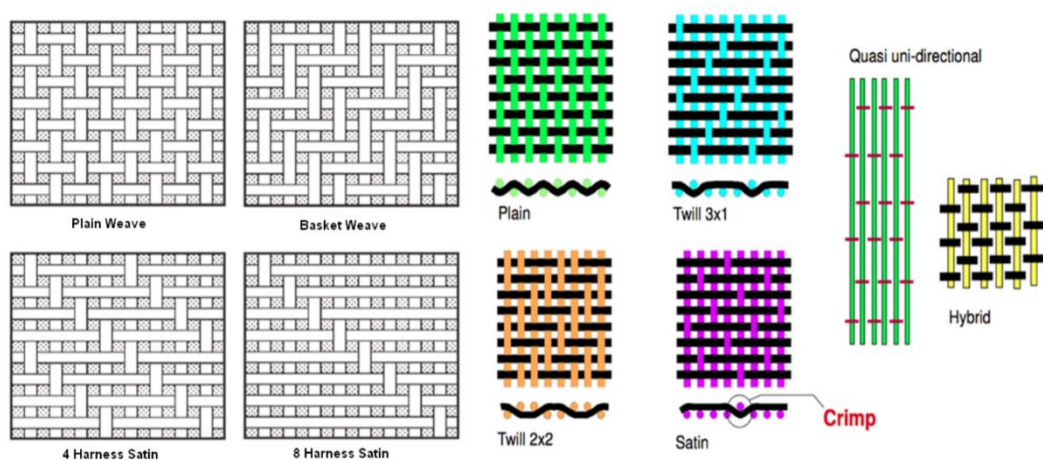


Figura 10 Diferentes tipos de tecelagens pela qual os tecidos são fornecidos (15)

Para além de tecidos com diferentes taxas de distribuição, é possível também encontrar tecidos que combinam fibras diferentes, por exemplo fibras de vidro e fibras de carbono. Estes tipos de tecidos são conhecidos como tecidos híbridos e tem como objetivo combinar características de diferentes fibras. (3)

As mantas são fibras distribuídas de forma aleatória e podem ser constituídos por filamentos cortados, CSM (*Chopped strand mat*), filamentos contínuos, ou podem ser mantas de superfície. As fibras são agregadas por um ligante que deve ser solúvel durante a impregnação (Fig.9B). (3)

As mantas CSM possuem fibras com um comprimento normalmente inferior a 50 mm e possuem propriedades mecânicas mais baixas. As mantas de filamentos contínuos possuem propriedades mecânicas melhores que as CSM e melhor conformidade para se moldar às peças. Estes tipos de mantas possuem gramagens entre os 300 e 500 g/m². As mantas de superfície normalmente são pré-impregnadas e são utilizados devido ao bom acabamento que conseguem apresentar e à boa resistência química. E são mantas

com gramagens mais baixas, 20 a 30 g/m². Assim sendo, apresentam resistência mecânica baixa, sendo muitas vezes necessário utilizar em conjunto com outras mantas e tecidos. (3)

2.4 Aditivos

Embora um material compósito seja constituído por matriz e reforço, é necessário, por vezes, acrescentar cargas ou aditivos.

Estes aditivos têm como função melhorar algumas características tais como:

- Coloração;
- Resistência ao fogo;
- Estabilidade da matriz;
- Condutividade elétrica.

São também adicionados para reduzir o preço dos compósitos.

Os aditivos têm de ter boa dispersabilidade, baixa densidade, baixa humidade e ser compatível com a matriz e com reforço. (3)

2.5 Furação

Apesar das peças feitas em compósitos possuírem geometria quase final e excelentes acabamentos superficiais é necessário, por vezes, maquinar partes das peças ou excessos de material do processo de fabrico. Estes processos consistem principalmente em corte e furação. (3) (16)

Estes procedimentos de maquinagem são necessários para remover excessos de material ou garantir tolerâncias mais apertadas e efetuar furos para utilização de rebites ou parafusos, possibilitando assim, a sua utilização em estruturas mais complexas e juntas mais resistentes, uma vez que, permite a utilização de juntas mecânicas. (17)

Como referido anteriormente iremos nos focar na furação.

Na maquinagem, de materiais compósitos, não se pode esperar os mesmos resultados que em metais devido às propriedades anisotrópicas e à falta de homogeneidade, isto pode provocar defeitos indesejados. (18)

Existem vários métodos para além do método mais convencional (broca). Estes métodos podem ser aplicados em várias circunstâncias, como, por exemplo, para efetuar furos não circulares. Os métodos não tradicionais removem material não pela aplicação de forças, mas sim, por reações térmicas, químicas e abrasivas. (19)

Existem vários tipos furação não convencional:

- Jato de água: esta técnica consiste na projeção de um jato de água a alta pressão misturado com um material abrasivo. Este jato desgasta a peça removendo

assim o material. Este método tem a vantagem de não provocar zona termicamente afetada. (19)

- Laser: neste tipo de furação é utilizado um feixe de alta energia que aquece o material, o furo é realizado, uma vez que, o material é removido por vaporização. Este método tem como vantagem a extrema precisão e elevada capacidade produtiva. A grande desvantagem é o calor gerado durante a furação que pode afetar a área em redor do furo. É preferível, mas não limitado, a materiais de baixa condutividade térmica. (19)
- Furação por ultrassom: este tipo de furação pode ser aplicado a diferentes materiais, condutivos ou não, bem como a materiais duros ou dúcteis. Este tipo de maquinagem resulta da vibração da ferramenta, a alta frequência (20 kHz) e a uma amplitude entre os 5 e os 50 μm , de forma linear. Para esta maquinagem ter sucesso é necessário aplicar um fluido abrasivo. A remoção de material resulta do desgaste que o fluido provoca enquanto se desloca debaixo da ferramenta. Este processo tem como vantagem a grande precisão e a capacidade de furar materiais muito duros (compósitos cerâmicos), mas a desvantagem de ser caro, devido ao equipamento e ser lento. (19) Na Figura 11, é possível visualizar um esquema de funcionamento da maquinagem por ultrassom.

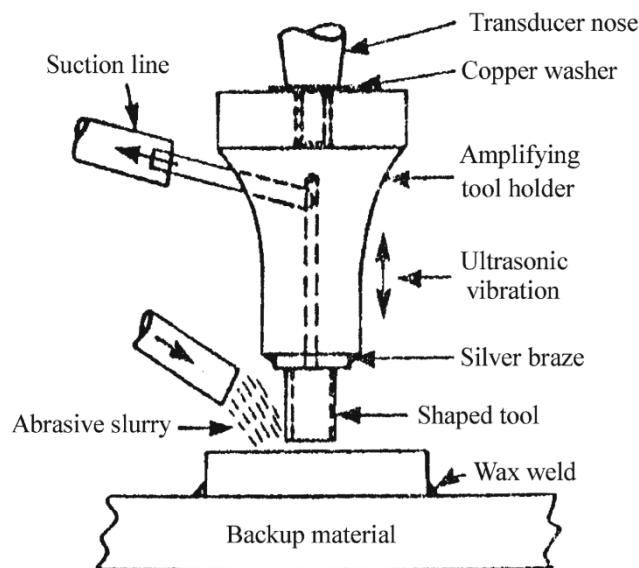


Figura 11 Esquema de maquinagem por ultrassons (75)

Se os parâmetros da furação convencional não forem adequados para o material ou geometria de broca, este processo pode provocar danos, tais como zona termicamente afetada, delaminação, arrancamento de fibras e fissuras interlaminares, o que enfraquece a área circundante ao furo. (18)

Existem vários parâmetros que influenciam a qualidade da furação.

Esses parâmetros são principalmente: (20)

- Velocidade de corte;
- Avanço;
- Utilização de fluido de trabalho;
- Broca (ferramenta);
- Material da Broca.

2.5.1 Velocidade de Corte

A velocidade de corte (V_c) consiste na velocidade linear entre a superfície de corte e a superfície da peça. Podemos então dizer que a velocidade de corte depende da velocidade de rotação da broca (n), números de rotações a que a ferramenta é submetida (rot/min), e o diâmetro (D_1) da mesma.

Assim para se calcular a velocidade de corte utiliza-se:

$$V_c = \frac{\pi * D_1 * n}{1000} \text{ (m/min)}$$

Equação 1 Velocidade Corte

Uma das características da velocidade de corte no processo de furação é esta ser maior na periferia da broca decrescendo até ao centro, onde a velocidade é zero. (21)

2.5.2 Avanço

O avanço é definido como a velocidade com que a ferramenta se desloca pela peça a maquinar. Normalmente, o avanço está associado à velocidade de rotação, assim a unidade corrente é mm/rot mas também se utiliza mm/min, nesta dissertação iremos utilizar principalmente mm/rot. (21)

O avanço é um dos principais parâmetros onde se controla a rugosidade na maquinagem de superfícies. No caso da furação, o avanço é responsável pelo tempo que demora o processo, e mais importante, pela força exercida na peça sendo o principal responsável pelo defeito “*Peel-up*” e também pelo defeito “*Push Down*”, os defeitos de delaminação serão abordados no capítulo 2.5.5. (22)

2.5.3 Fluido de Trabalho

Em algumas situações é adequado utilizar um fluido de trabalho. Tradicionalmente, utiliza-se o fluido de trabalho para evitar a adesão da peça à ferramenta, especialmente,

durante o arrefecimento e ajudar à remoção das partículas da área de maquinagem. (21)

A maquinagem de materiais compósitos é possível de ambas as formas, com e sem fluido de trabalho, havendo vantagens e desvantagens para a utilização do fluido.

Na maquinagem de alguns tipos de polímeros, o material aquece na zona de contacto com a ferramenta, devido à fricção, isto faz com que haja uma zona termicamente afetada. Este aquecimento pode provocar o amolecimento da matriz e consequentemente, a adesão à ferramenta, reduzindo a qualidade do furo. (23)

Algumas das vantagens na utilização de fluidos de trabalho são:

- Remover e recolher partículas removidas da peça evitando a exposição do operador a poeiras, por vezes nocivas;
- Controlar a temperatura durante a maquinagem.

Em contrapartida a utilização do fluido pode provocar:

- Formação de uma pasta abrasiva quando o fluido se mistura com as partículas retiradas;
- Custos adicionais quer no equipamento (necessidade de equipamento específico para aplicação e remoção do fluido), quer no processo de fabrico (ser necessário secar a peça ou limpeza do fluido). (23)

Nesta dissertação iremos efetuar a maquinagem sem fluido de trabalho.

2.5.4 Broca

A ferramenta utilizada para a furação é designada como broca.

Este tipo de ferramenta corta através de um movimento de rotação e do avanço ao longo do eixo de rotação para efetuar o furo.

Normalmente, as brocas possuem helicoidais ou flutes, estas servem para remover aparas durante a maquinagem. (21)

As brocas, na sua maioria, possuem apenas duas arestas de corte, apesar de algumas brocas especializadas poderem possuir mais ou menos arestas.

A geometria da ponta e das helicoidais varia de acordo com o material para o qual a broca é fabricada ou do revestimento e para o material que irá maquinar.

As diferentes geometrias podem ter diferentes objetivos, tais como maquinagem rápida, melhor precisão, melhores acabamentos entre outros. (21)

Em termos de materiais, as brocas são normalmente feitas de aço rápido e de metal duro, embora sejam muitas vezes revestidas por filmes que tem como finalidade melhorar as características da ferramenta. (21)

2.5.4.1 Geometria da Broca

Como dito anteriormente, a escolha das brocas depende do material a maquinar bem como dos parâmetros escolhidos. Devido a isso, existe uma grande variedade de brocas disponíveis no mercado, com as mais variáveis geometrias e diâmetros. (24)

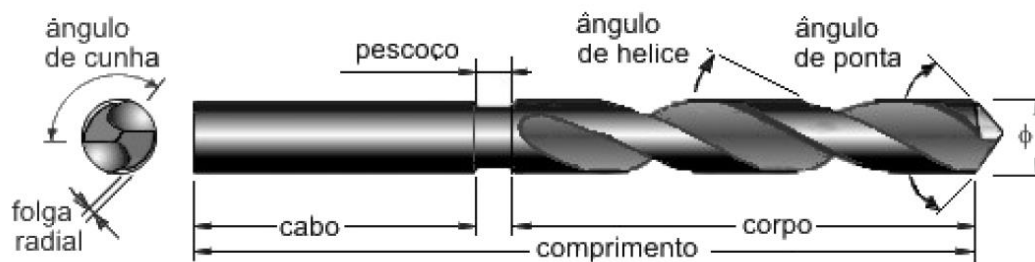


Figura 12 Broca Helicoidal (21)

Tradicionalmente, as brocas são divididas em cabo, corpo e ponta (Fig.12).

O cabo é a zona da ferramenta pela qual esta é segura durante a maquinagem, tradicionalmente, o cabo é cilíndrico, mas poderá ter outras formas, como por exemplo cónicas, e recentemente apareceram brocas de encaixe rápido. (21)

No corpo da ferramenta estão localizadas as hélices, o ângulo pelas quais estas hélices são constituídas depende do tipo de material a maquinar bem como do ângulo da ponta (Fig.13). Normalmente, são utilizados ângulos de hélices menores para maquinar materiais duros ou produzir aparas curtas. Para materiais mais macios e aparas mais longas são utilizados ângulos de hélices maiores. (24) Porém, por vezes, para efetuar a remoção da aparas é necessário efetuar o furo de forma intermitente.

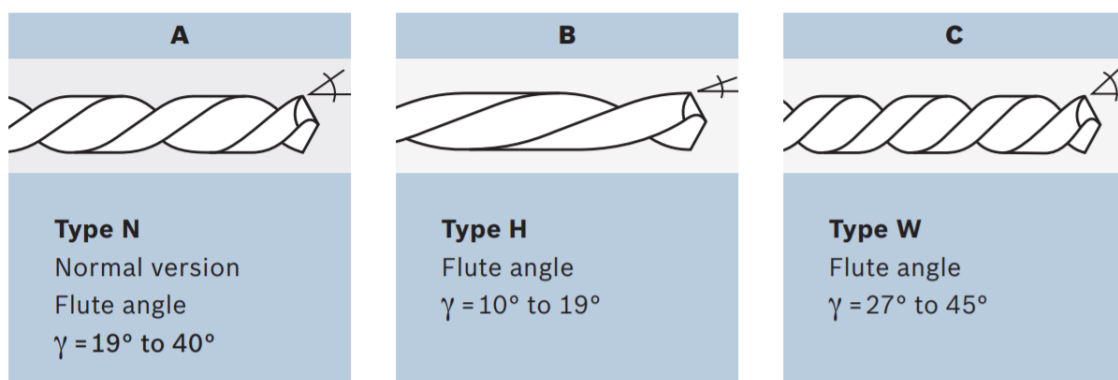


Figura 13 Variação do ângulo da helicoidal disponíveis para as brocas helicoidais pela Bosh (56)

Apesar da grande variedade de combinações que existe para o cabo e o corpo da broca existe ainda muito mais variedade de pontas de brocas.

Esta variedade existe, como dito anteriormente, devido à tentativa de otimizar a maquinação dos diferentes materiais.

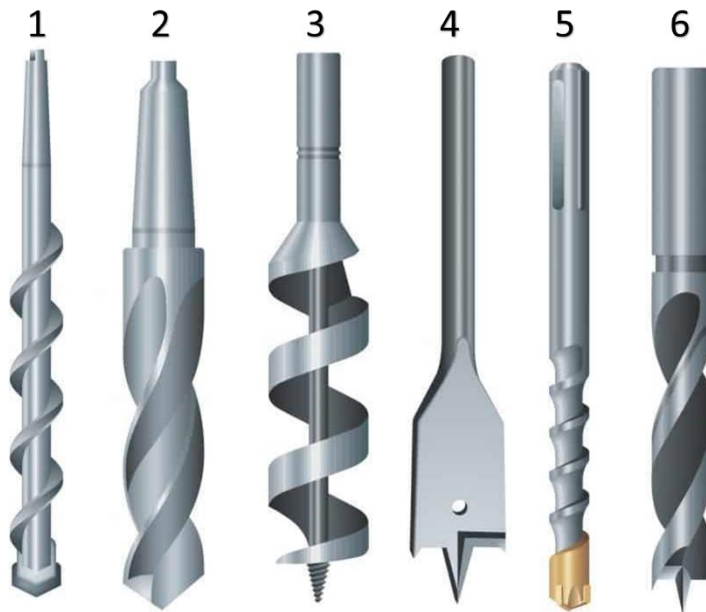


Figura 14 Ilustração de vários tipos Brocas adaptado de (26)

Como é possível observar na Figura 14 verifica-se que existe vários tipos de brocas:

1. Broca helicoidal com ponta para alvenaria e madeira e corpo cônico
2. Broca helicoidal com ponta para metais e corpo cônico
3. Broca *Auger* com ponta autoalimentada para madeira e corpo cilíndrico
4. Broca plana com ponta centrada para madeira e corpo cilíndrico
5. Broca helicoidal para alvenaria com ponta revestida e corpo de encaixe rápido
6. Broca helicoidal de ponta *Brad* e corpo cilíndrico.

Nesta dissertação iremos focar nas brocas helicoidais. Estas são as brocas mais comuns no mercado. (21) Estas podem apresentar diferentes tipos de geometria de ponta como visto nas Figuras 15 e 16.

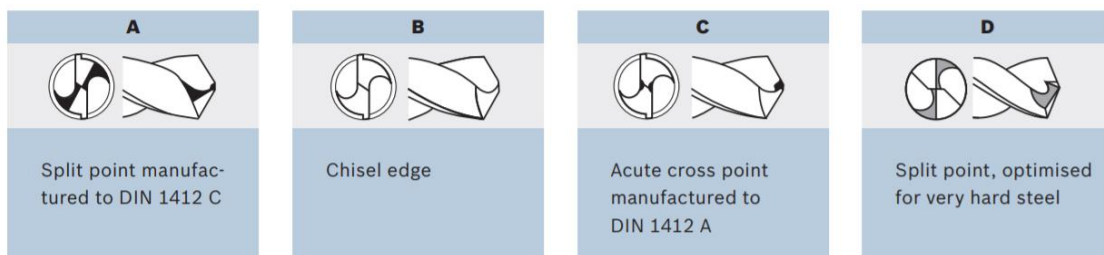


Figura 15 Diferentes tipos de pontas para brocas helicoidais para plásticos e metais disponíveis pela Bosh (56)

Algumas das pontas disponíveis nas brocas helicoidais para metais e plásticos são:

- A. Ponta dividida de acordo com a norma DIN 1412C
- B. Ponta Cinzel
- C. Ponta Cruzada de acordo com a norma DIN 1412A
- D. Ponta dividida otimizada para aços duros

Algumas das pontas disponíveis nas brocas helicoidais para madeira e alvenaria são:

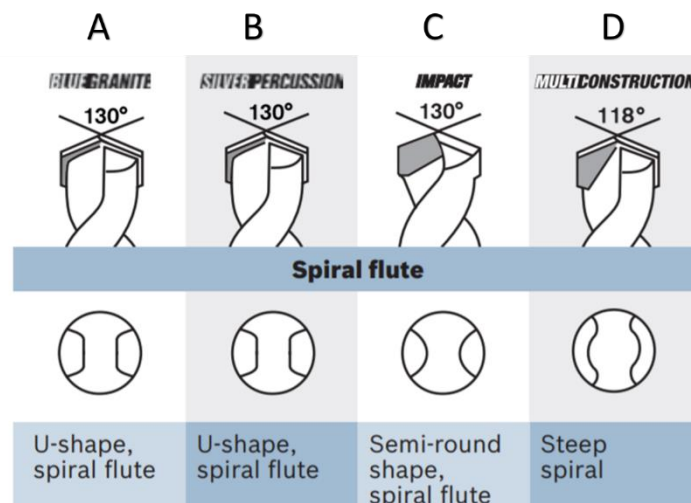


Figura 16 Diferentes tipos de Pontas para brocas helicoidais para madeira e alvenaria disponíveis pela Bosh (56)

- A. Ponta de ângulo 130° com helicoidais em U da gama *Blue Granite*
- B. Ponta de ângulo 130° com helicoidais em U da gama *Silver Percussion*
- C. Ponta de ângulo 130° com helicoidais semi-redondas da gama *Impact*
- D. Ponta de ângulo 118° com helicoidais em espiral íngreme da gama *MultiConstruction*.

Apesar, da grande variedade de pontas convencionais que existe no mercado para utilizar nas brocas helicoidais, existem outras com geometrias mais complexas como é o caso das brocas *Brad* e *Step*.

As brocas *Brad* são desenhadas com uma ponta no centro da broca, que ajuda no posicionamento correto no início da maquinagem e duas pontas de corte que garantem um corte correto das fibras (Fig.17C). Estas brocas foram desenhadas para maquinagem de madeira mas também são utilizados em polímeros e até mesmo compósitos. (25) (26)

As brocas *Step* são ferramentas em que o diâmetro da ferramenta varia ao longo do comprimento (Fig.17B). Esta ferramenta tem como vantagem a rapidez, uma vez que, uma única broca consegue furar vários diâmetros numa só passagem. (26) Estas ferramentas podem ser desenhadas de forma personalizada para a sua utilização. Assim, o diâmetro e comprimento dos *steps* podem variar, tal como, o ângulo dos mesmos podendo, por exemplo, a broca furar e escarear numa só passagem. (27) Outra característica a ter em consideração, é a diferença das forças e binário que existe durante a maquinagem devido aos diferentes diâmetros, significando isso que, por vezes, não é necessário efetuar furo piloto antes de efetuar o furo final. (28)

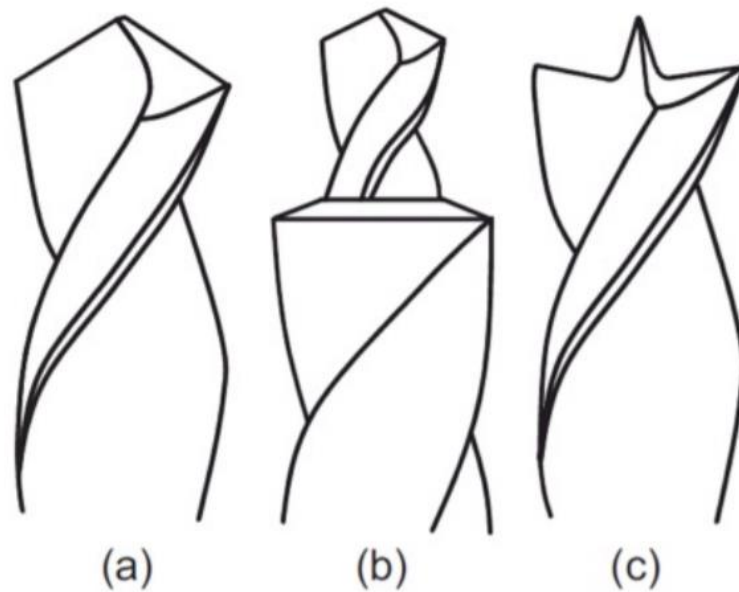


Figura 17 a) Broca Helicoidal tradicional b) Broca *Step* c) Broca *Brad* adaptado (66)

2.5.4.2 Materiais

Tal como existem diferentes tipos de geometrias e pontas de brocas, estas também podem ser fabricadas de diversos materiais e mesmo diferentes revestimentos.

Os materiais a partir dos quais as brocas são efetuadas têm de possuir características apropriadas sendo as características mais importantes: (29)

- Elevada resistência ao desgaste;
- Elevada dureza a frio e a quente;
- Elevada tenacidade;
- Baixo coeficiente de atrito;
- Elevada condutividade térmica;
- Baixo coeficiente de dilatação.

Os materiais mais utilizados para o fabrico de brocas são: (26) (30) (31) (29)

- Aço ao carbono;
- Aço rápido (HSS);
- Metal duro (Carboneto de sinterizado);
- Ultra Duros.

Os aços ao carbono podem ser apresentados com baixo ou elevado teor de carbono. Os aços com reduzido teor de carbono são caracterizados por serem as brocas mais baratas, não podem ser utilizadas em aplicações que exigem maquinar materiais duros, sendo muito utilizados para madeiras. Estas ferramentas necessitam de ser afiadas durante o seu período de vida. Os aços com elevado teor de carbono são caracterizados pela sua dureza superior quando comparado com os aços com reduzido teor de carbono. Estes aços necessitam menos manutenção e são preferíveis aos aços de teor reduzido, uma vez que, já conseguem cortar metais macios. (26) (30) (31)

As brocas de aço rápido (HSS) são as ferramentas mais comuns no mercado e são caracterizadas pela sua elevada dureza e resistência ao calor, superior ao dos aços com elevado teor de carbono. A sua elevada resistência ao calor possibilita velocidades de maquinagem mais elevadas e são indicados para a maioria dos metais, madeiras e polímeros. (26) (30) (31)

Brocas de Carboneto sinterizado são brocas extremamente quebradiças e caras, são utilizadas em situações especializadas, são excelentes para furar material muito duro e abrasivo. Devido ao seu elevado preço, por vezes, apenas, a ponta é fabricada neste material. A resistência ao desgaste é muito elevada mas devido à sua fragilidade partem-se facilmente. (26) (31) (30)

Estes tipos de brocas são fabricadas por sinterização, assim sendo, as suas matérias primas (pós) são misturadas, compactadas e sinterizadas, obtendo assim uma liga de elevada densidade e elevada dureza (1800 HV). (29)

Os carbonetos mais comuns são carboneto de tungsténio (WC), carboneto de titânio (TiC), carboneto de vanádio (V₄C₃), carboneto de Nióbio (NbC), e carboneto de tântalo (TaC). (29)

Os materiais ultra duros utilizados são principalmente boro cubico (CBN) e diamante sintético policristalino (PCD). (29)

CBN não é normalmente utilizado no fabrico de brocas, é utilizado principalmente para retificações, embora, também seja utilizado para a produção de pastilhas para torneamento e fresagem. (29)

O PCD é constituído por diamantes sintéticos. As ferramentas fabricadas neste material possuem a vida mais útil de todas e a menor taxa de desgaste entre todas as ferramentas. Este material é dos mais duros conhecidos (mais de 5000 HV). As brocas de PCD são extremamente caras (30 a 50 vezes o custo de carbonetos sinterizados). (29) O PCD é adequado para a maquinagem de ligas de alumínio e materiais abrasivos, tais como, materiais compósitos, materiais cerâmicos ente outros. (29) Na tabela 3, é possível visualizar uma comparação entre o PCD e o CBN.

Tabela 3 Propriedades dos materiais Ultra Duros (29)

Propriedades Mecânicas	PCD	CBN
Densidade (g/cm ³)	3.4	3.1
Tensão de rotura transversal (MPa)	600-1100	500-800
Dureza (HV)	5000	3500
Condutibilidade térmica (W/m*K)	550	100
Coeficiente de dilatação térmica (10 ⁻⁶ /K)	1.5	4.9

Todas as brocas podem ainda ser revestidas de modo a aumentar a sua vida útil ou melhorar algumas das suas características.

Os revestimentos mais usados são:

- Oxidação preta;
- Titânio;
- Zircónio.

A oxidação preta só pode ser utilizada em brocas de aço com elevado teor de carbono. Este revestimento melhora a resistência ao calor e melhora o atrito, protegendo também contra a corrosão. (26)

Os revestimentos de titânio são os mais utilizados nos HSS. Estes revestimentos aumentam a dureza da superfície da broca fazendo com que estas se tornem mais resistentes ao desgaste e ao calor, isto permite velocidades de maquinagem mais elevadas. Os revestimentos de titânio mais comuns são o nitreto de titânio (TiN), o carboreto de titânio (TiCN) e o nitreto de alumínio e titânio (TiAlN). (21) (30) (26)

O nitreto de titânio é caracterizado por reduzir a fricção e aumentar a resistência ao calor. Este revestimento aumenta a vida da ferramenta 5 vezes. (26)

Nitreto de alumínio e titânio aumenta a dureza superficial bem como a resistência ao calor. (26)

Carboneto de titânio possui as mesmas características que TiN mas melhoradas. (30)

Nitreto de zircônio é utilizado principalmente em ferramentas muito duras, mas quebradiças. Este revestimento aumenta a resistência ao impacto destas ferramentas, devido à sua composição reduz a fricção. (31) (26)

Na Figura 18, é possível verificar como os revestimentos afetam o aspeto da ferramenta.



Figura 18 Alguns dos diferentes tipos de revestimentos possíveis adaptado (67)

2.5.5 Defeitos

A furação de materiais compósitos é um tipo de maquinagem que requer cuidados redobrados devido à sua anisotropia e à presença de dois meios diferentes (matriz e reforço) no mesmo material.

Os defeitos mais comuns são:

- Delaminação;
- Fissuras interlaminares;
- Arrancamento e deslocamento das fibras da matriz;
- Zona termicamente afetada.

Este tipo de defeitos deve ser evitado porque as propriedades mecânicas são afetadas negativamente em redor do furo. Um bom acabamento do furo pode ter uma importância elevada, especialmente, quando a peça está sujeito a cargas. (18) (3)

Nesta dissertação iremos focar-nos defeitos por delaminação.

2.5.5.1 Delaminação

O tipo de dano mais comum na maquinagem é a delaminação, este dano consiste na separação das diferentes camadas. Essa separação ocorre principalmente em duas situações (Fig.19):

1. No início da furação, *peel-up*;
2. No fim da furação, *push-down*.

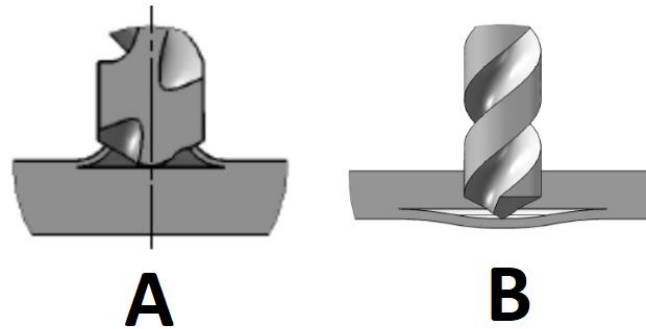


Figura 19 A) Mecanismo de delaminação *peel-up* B) Mecanismo de delaminação *push-down* (22)

A delaminação no início do furo acontece principalmente devido à tendência do material ser puxado para cima em vez de ser cortado. Isto provoca a separação das camadas superiores do resto do material. A redução do avanço costuma ser o suficiente para reduzir este tipo de danos. (22) (16)

A delaminação no fim da furação, para além dos parâmetros, também depende do tipo de fibra e da forma, como, também, do tipo de resina. Este tipo de dano acontece quando a extremidade da broca comprime de forma excessiva as camadas finais. Estas camadas são empurradas para fora, quebrando a ligação entre as camadas, antes destas serem cortadas. Reconhece-se que este dano pode ser reduzido através de uma seleção correta de parâmetros de corte e ferramenta, e, também pela utilização de suporte sacrificial, colocado na parte de baixo da peça a maquinar, de forma a não ser possível empurrar as camadas finais (Fig.20). (32) (1)

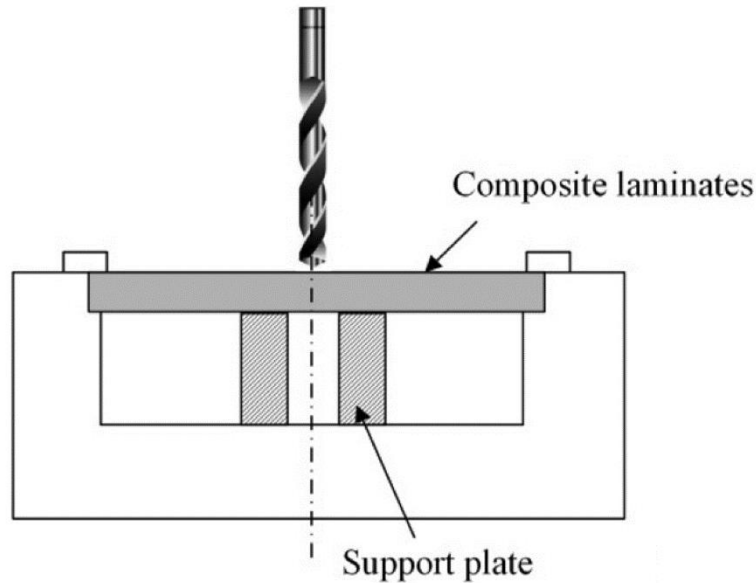


Figura 20 Utilização de suporte sacrificial para a furação (66)

2.5.5.2 Quantificação dos Danos da Furação

De forma a garantir um controlo de qualidade correto é necessário por vezes medir a quantidade de dano causada pelo processo de maquinagem. Normalmente, utiliza-se para essa avaliação ensaios não destrutivos. Esses ensaios permitem quantificar a região afetada. (33)

Inicialmente, Chen apresentou uma avaliação de dano que se baseia no diâmetro da área afetada e no diâmetro do furo desejado, isto é fazendo um rácio entre diâmetro máximo (D_{max}) da zona afetada pelo dano e o diâmetro do furo desejado (D), obtendo assim um fator de delaminação (Fe). (33) (34)

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

Equação 2 Fator de delaminação
Fe

Este fator de delaminação é utilizado devido à sua facilidade de cálculo, uma vez que, a determinação de uma área irregular é, por vezes, muito difícil, assim, a Equação 2 é apenas uma aproximação. Devido a ser uma aproximação pode acontecer que danos com áreas muito diferentes tenham o mesmo fator de Fe (Fig.21). (34)

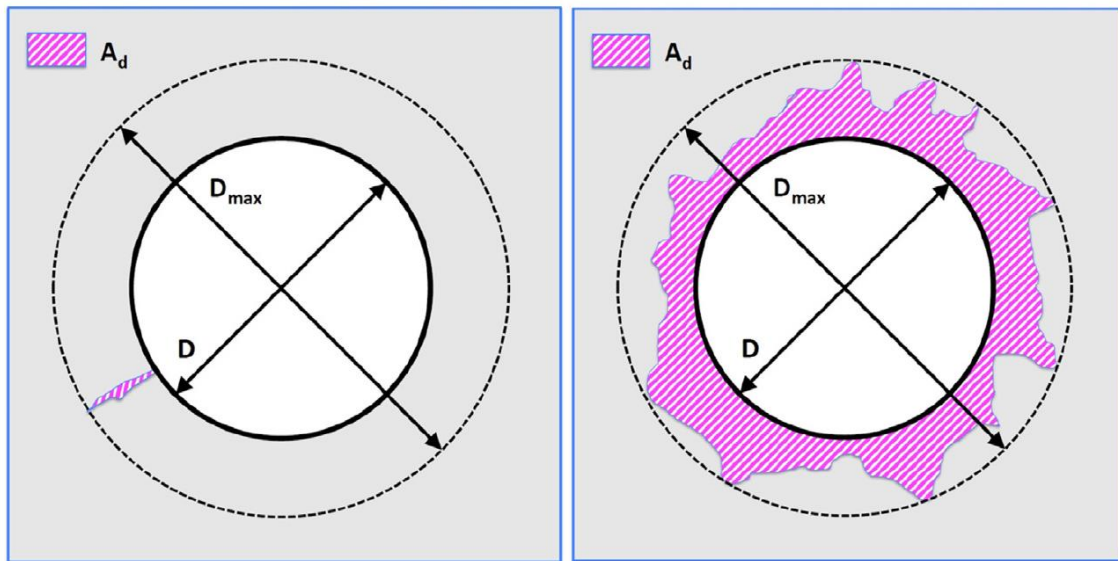


Figura 21 Áreas de dano diferentes para o mesmo fator de dano (34)

Devido à imprecisão do Fe foi-se ao longo dos anos desenvolvendo critérios para calcular mais precisamente o fator de dano. Para se calcular esses critérios é necessário a utilização de modelos matemáticos de forma a se obter a área real do dano.

Para esta dissertação iremos comparar o critério de Chen Eq.(2) com o critério de Mehta Eq.(3), que faz um rácio do dano (D_{Rat}) entre o área de delaminação à volta do furo (A_d) e a área do furo (A_0), e com a proposta de Tsao Eq.(4), que utiliza um fator de delaminação equivalente que é o rácio entre o diâmetro equivalente (D_e) e o diâmetro da broca (D_0). O D_e é calculado a partir da área de delaminação à volta do furo (A_d) e a área do furo nominal (A_0). (35)

$$D_{Rat} = A_d / A_0$$

Equação 3 Critério do Rácio de Dano

$$F_{ed} = D_e / D_0$$

Equação 4 Fator da Delaminação Equivalente

$$D_e = \left[\frac{4 * (A_d + A_0)}{\pi} \right]^{0,5}$$

Equação 5 Diâmetro Equivalente

2.6 Ensaios não destrutivos

Em todos os processos de fabrico há a possibilidade da existência de defeitos. A deteção deste defeito é de elevada importância, uma vez que, pode comprometer a qualidade ou mesmo a segurança do produto final.

Os defeitos podem ser detetados através ensaios não destrutivos. Quando se pretende garantir a qualidade total do produto, os ensaios não destrutivos são aplicados às peças de modo a utilizá-las depois de verificadas, para isso as características originais não podem ser alteradas nem danificadas. (36)

Devido às características dos materiais compósitos nem todos os ensaios não destrutivos podem ser utilizados. Assim, a escolha do método para analisar o material tem de ser cuidadosamente ponderada. Alguns ensaios, só podem ser aplicados a materiais ferrosos, não podem ser aplicados ensaios que envolvam submersão em líquidos a materiais que possuem grande capacidade de absorção. Estes fatores limita a utilização deste tipo de ensaios em materiais compósitos. (37)

Existem vários ensaios não destrutivos mas os mais aplicados em materiais compósitos são: (36) (37)

- Inspeção visual;
- Ultrassom;
- Termografia;
- *Shearography*;
- Radiografia.

A inspeção visual é o método menos tecnologicamente avançado e consiste simplesmente em visualizar a peça para detetar os defeitos de superfície. Esta técnica de diagnóstico, por vezes, é um meio de controlo suficiente, evitando assim outros tipos de testes. A principal vantagem é a rapidez e o facto de não ser preciso utilizar equipamento para ser realizado, no entanto, por vezes, a utilização de equipamento auxiliar como luzes e de apoio óticos, como lupas, é aconselhado. (36) (37)

Um dos métodos de ensaio não destrutivo muito utilizados são os ultrassons. O ultrassom consiste em utilizar ondas sonoras como forma de diagnosticar defeitos no interior de uma peça. Para ensaiar materiais compósitos são utilizadas frequências maiores, entre o 1 MHz e os 50 MHz, devido às propriedades não homogéneas destas matérias, para materiais homogéneos as frequências utilizadas variam entre os 20 kHz e os 20 MHz.

Os ensaios por ultrassons dividem-se em duas categorias: (37) (36) (38)

- *Pulse Echo*;
- *Through Transmission*.

Os ensaios por ultrassons possuem diversas vantagens tais como rapidez de execução, boa capacidade de detecção de defeitos e principalmente a possibilidade de poder ser utilizado em estaleiro. A grande desvantagem deste método é a grande formação que os operadores necessitam ter. (36) (37)

O método *Pulse Eco* consiste basicamente em enviar impulsos de som de alguns micro segundos e esperar que o som seja refletido de um defeito no interior da peça. (38) Neste método, é possível encontrar inconsistências em materiais homogêneos bem como heterogêneos. Este método é adequado para a determinação da dimensão bem como a localização da falha e controlo de qualidade. Uma das grandes vantagens deste método é apenas ser necessário acesso a um dos lados da peça. (36) (37)

Na Figura 22, é possível visualizar o conceito deste método.

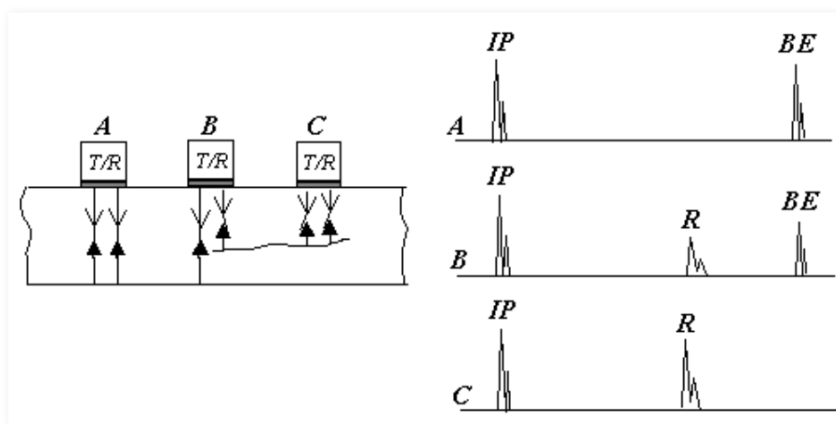


Figura 22 Conceito básico do ensaio de *Pulse Echo* (68)

No método *Through Transmission* a energia passa completamente pela peça, isto implica acesso a ambos os lados da peça, uma vez que, o emissor e o recetor têm de estar em lados opostos da peça (Fig.23). (37) (38)

Para efetuar *Through Transmission* o emissor e o recetor necessitam estar separados da superfície e a uma distância fixa, isto torna este método indicado para peças de geometria complexa que dificultam o contacto na superfície, neste método é necessário imergir a peça num meio condutor. (36) (37)

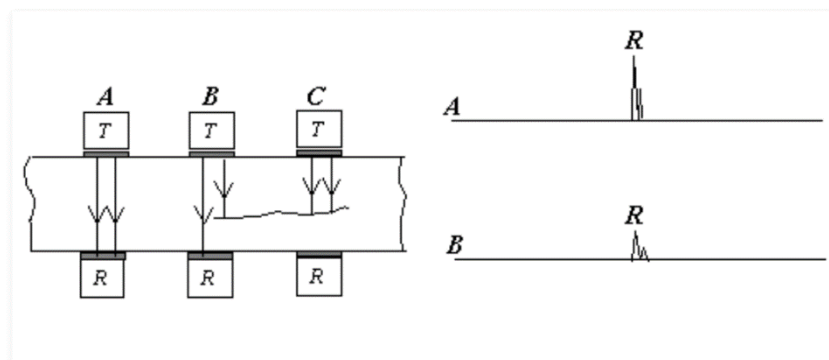


Figura 23 Conceito básico do ensaio *Through Transmission* (68)

A Termografia é um método que consiste na avaliação dos fluxos de calor de modo a determinar a existência de falhas. Este método é mais sensível a falhas perto da superfície, e funciona devido ao facto de os defeitos produzirem variações térmicas na peça (Fig.24). Um dos problemas deste método é a dificuldade de detetar defeitos longe da superfície, outra desvantagem é o preço elevado do equipamento. Em contrapartida, possibilita a análise de grandes áreas de superfície. (36)

O elevado preço do equipamento é devido à sua sensibilidade, 0.005°C , as temperaturas utilizadas são entre os -50°C e os 100°C . (37)

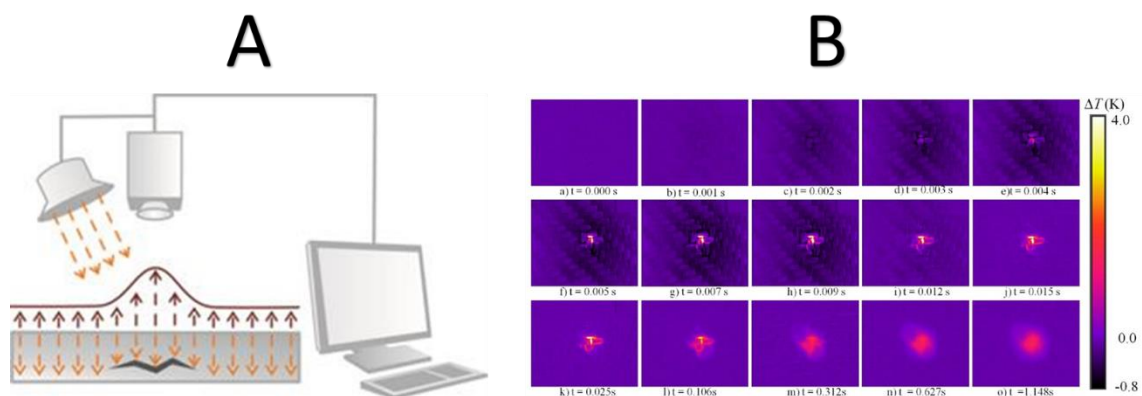


Figura 24 A) Conceito básico de um ensaio de termografia (69) B) Exemplo de resultados obtidos por termografia (70)

O ensaio de *Shearography* é um método ótico que utiliza lasers para detetar concentrações de *stress* ou falhas críticas. Uma das vantagens deste ensaio é de ser menos suscetível a interferências. A desvantagem deste método é a dificuldade de detetar outros defeitos sem ser a delaminação. (36) Outra desvantagem é que danos podem ocorrer, uma vez que, este ensaio tem de ser efetuado sob carga, e também é que como o ensaio é ótico a rugosidade da superfície pode afetar de forma significativa os resultados. (37)

Para efetuar *Shearography* não é necessário contacto com a peça (Fig.25). (37)

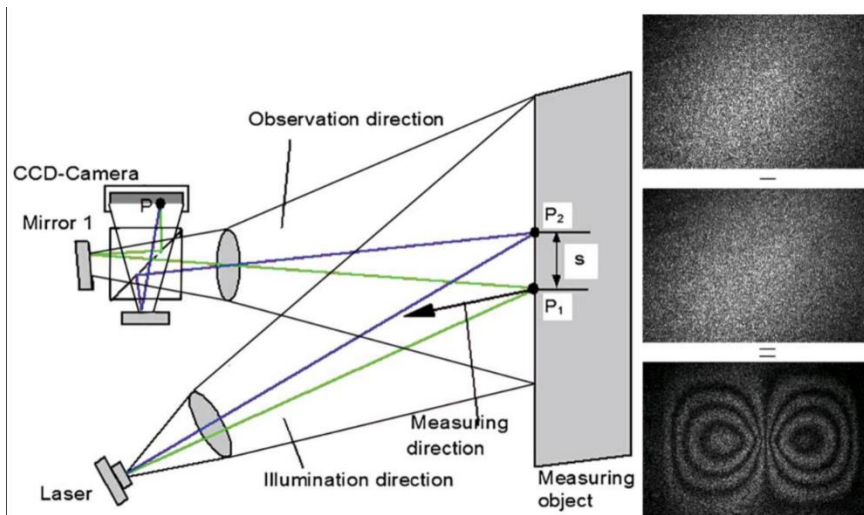


Figura 25 Diagrama de conceito de um ensaio de *Shearografia* (72)

A radiografia é um método muito utilizado em ensaios não destrutivos especialmente para materiais compósitos, uma vez que, o dano mais frequente neste tipo de materiais é a delaminação. Este tipo de dano pode ser facilmente detetado por radiografia dependendo da sua orientação ao feixe de radiação. (36)

A radiografia consiste na emissão de um feixe de radiação ionizada que atravessa a peça e é detetada no lado oposto na película sensível a esse tipo de radiação ou um sensor, a deteção de defeitos é efetuada devido à diferença de densidade que existe entre a zona sem defeito e com defeito. (37)

A potência de emissão bem como o tipo de radiação varia dependendo do material a ser examinado bem como da espessura. Para peças finas, 1 a 5 mm, é normal utilizar-se radiação de baixa voltagem, para peças mais espessas raios Gamma são utilizados, para alguns materiais raios Gamma poderão ser necessários. (36)

A potência de emissão para raios-X de baixa voltagem, normalmente, varia entre os 10 kV e os 50 kV. (37)

Por vezes, a radiografia apenas não é suficiente para detetar defeitos devido às propriedades não homogêneas dos materiais compósitos. Quando isso acontece, é necessário, quando possível, utilizar contraste, de modo a realçar as falhas, uma vez que, a falha tem de estar em contacto com a superfície da peça. Os contrastes a serem utilizados podem ser orgânicos ou inorgânicos nas tabelas 4 e 5 é possível observar a classificação de opacidade. (37)

Tabela 4 Classificação relativa dos contrastes orgânicos adaptado (37)

Hidrocarbonetos Halogenados	Classificação relativa
Diiodometano	1
Diiodobutano	
Dibromometano	2
Tetracloroetileno	
Tetracloroetano	3
Tetraclorometano	
Tricloroetileno	4
Tricloroetano	
Diclorometano	5
Tricloro Trifluoroetano	
	6

Na tabela 4, a classificação relativa de 1 corresponde a um material mais opaco que 6.

Tabela 5 Classificação relativa dos contrastes inorgânicos adaptado (37)

Contrastes Inorgânicos	Opacidade a radiografia
Iodo de Zinco	Alta
Nitrato de Prata	Media
Nitrato de Chumbo	Baixa
Sulfato de Bário	Muito Baixa

A utilização destes contrastes ajuda na deteção de falhas de pequena dimensão tais como delaminação e fissuração. Isso faz com que seja muito difícil detetar delaminação quando esta não está em contacto com a superfície. (37)

A utilização destes líquidos é inviável na análise de peça que são sensíveis a líquidos ou que se encontram em serviço. Outra desvantagem deste método é o perigo para a saúde do operador, sendo necessária formação extensiva na utilização do equipamento e proteção adequada. (37)

Em contrapartida, a qualidade de imagem é consideravelmente melhor, apesar de só dar um plano de imagem. (37)

Na Figura 26, é possível visualizar um exemplo de resultado da radiografia de um furo utilizando contraste. Na Figura 27, está representado o conceito da execução de uma radiografia.

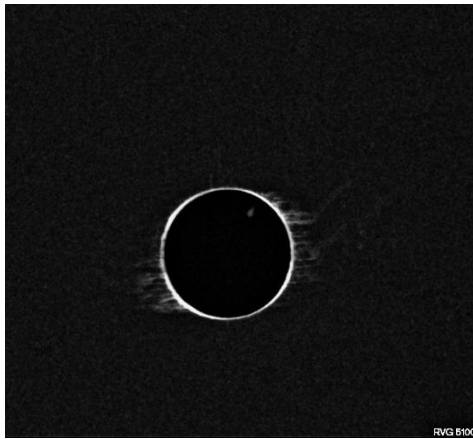


Figura 26 Exemplo de radiografia tirada com contraste de um furo

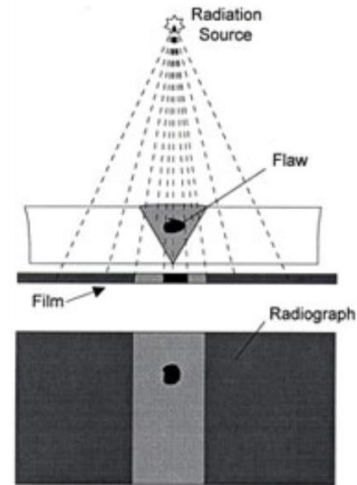


Figura 27 Diagrama de conceito de ensaio de radiografia (74)

2.7 Ensaios destrutivos

Nos ensaios destrutivos, ao contrário dos ensaios não destrutivos, a peça ou material depois de analisado fica destruído, não sendo possível a sua utilização posterior.

Estes ensaios têm como objetivo levar o material ou peça ao seu limite de modo a perceber e descobrir as suas características, possibilitando assim uma melhor compreensão e otimização do material sem pôr em causa a sua segurança.

Estes ensaios podem ser utilizados para controlo de qualidade quando utilizado sob a forma de amostras num lote de produtos.

Estes ensaios seguem normas de formas a garantir rigor na execução dos mesmos, algumas das entidades responsáveis por estas normas são ISO (*International Standards Organisation*), DIN (*Deutsches Institut für Normung*), entre outras, apesar disso estes ensaios podem ser personalizados de forma a adequarem-se mais fielmente às condições de trabalho que a peça irá sentir.

Os tipos de cargas a que os materiais podem estar sujeitos podem ser divididos em 5 categorias: (39)

1. Tração;
2. Compressão;
3. Corte;
4. Torção;
5. Dobragem.

Durante estes ensaios, a carga aplicada pode ser constante ou variar com o tempo dependendo do que se está a tentar testar. Durante um ensaio o provete pode estar sujeito a mais que um tipo de carga. (39)

Nesta dissertação iremos nos focar principalmente em ensaios do tipo tração e compressão.

2.7.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração é um dos ensaios mais utilizado. Este ensaio consiste na aplicação de uma força. Esta força tende a alongar o provete, causando uma deformação podendo mesmo levar à rotura (Fig.28). Durante o processo de ensaio regista-se a força aplicada e a deformação do provete, obtendo-se assim o gráfico de tensão-deformação. (39) (40) Esse gráfico é obtido dividindo a força pela área da secção do provete. (39)

Tradicionalmente, o gráfico Tensão-Deformação está dividido em duas fases, fase elástica e fase plástica. (39)

A fase elástica consiste na fase em que a deformação não é permanente, isto é, se a carga deixar de ser aplicada o material volta às condições iniciais. Na fase plástica, a deformação é permanente o material já não se irá encontrar nas condições de início de ensaio. (39)

Nem sempre é possível observar ambas as fases num material, por exemplo se este for muito dúctil ou frágil.

Com este ensaio é possível obtermos o Módulo de Elasticidade do material, aplicando a Lei de Hooke, a tensão de rotura e a tensão de cedência. (39) (40)

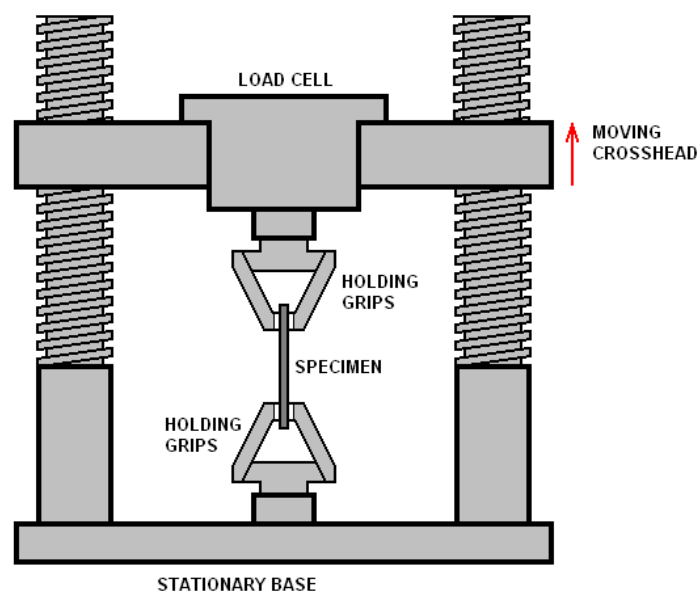


Figura 28 Esquema do conceito de ensaio de tração (71)

Existem vários ensaios derivados do ensaio de tração convencional como é o caso do *Bearing* (ASTM D5961/D5961M-17), a qual iremos seguir nesta dissertação.

Este ensaio de *Bearing* consiste em simular a reação do material quando está ligado mecanicamente e se encontra em esforço de tração. Apesar de as cargas serem aplicadas de forma semelhantes ao ensaio de tração, a informação obtida deste ensaio é muito diferente. (41)

Existem vários procedimentos para execução deste ensaio, nesta dissertação iremos focar-nos no procedimento A.

Esse procedimento consiste num provete retangular liso com um furo de 6 mm no eixo central do comprimento e a 18 mm da extremidade. O provete deve de ter 135 mm de comprimento, 36 mm de largura e entre 3 e 5 mm de espessura. Um esquema do provete está presente na Figura 29.

Neste procedimento, a carga é aplicada no furo através de um pino que une o provete ao suporte duplo. A carga é aplicada utilizando uma máquina de ensaio à tração.

Assim, a carga é aplicada diretamente no furo sendo possível obter a capacidade de sustentação do furo. O ensaio é efetuado até à força máxima que o material suporta ser alcançada.

Quer a carga como a deslocação são monitorizadas ao longo do ensaio.

Um esquema do ensaio pode ser visualizado na Figura 30.

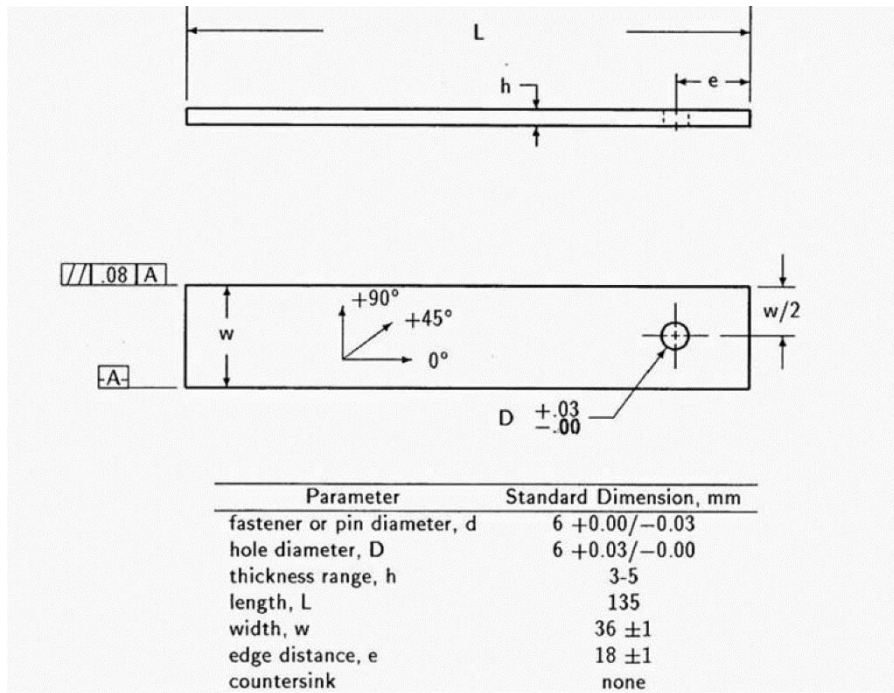


Figura 29 Esquema da descrição do provete para ensaio de *Bearing* Procedimento A (41)

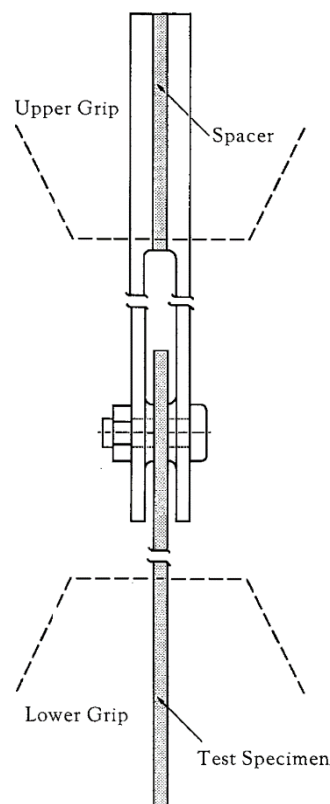


Figura 30 Esquema de ensaio de *Bearing* Procedimento A (41)

2.7.2 Ensaio de compressão

Como o nome indica este ensaio consiste em submeter o provete a um esforço de compressão, basicamente o oposto do ensaio da tração.

Este ensaio é utilizado principalmente para testar materiais mais frágeis.

Este ensaio pode falhar por o material sofrer encurvadura quando o material é dúctil.

Muita da informação obtida através deste ensaio também pode ser obtida através do ensaio de tração. (40)

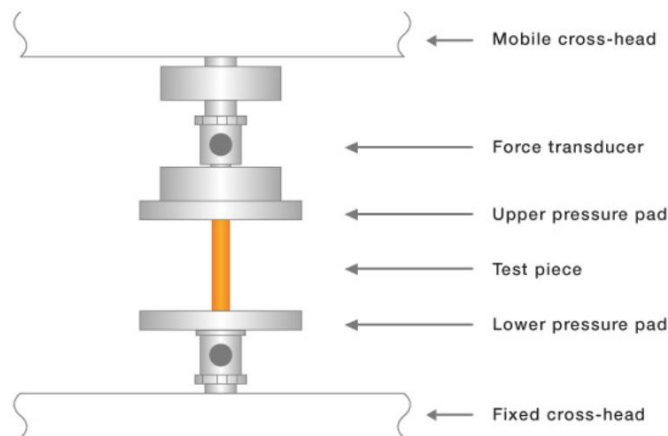


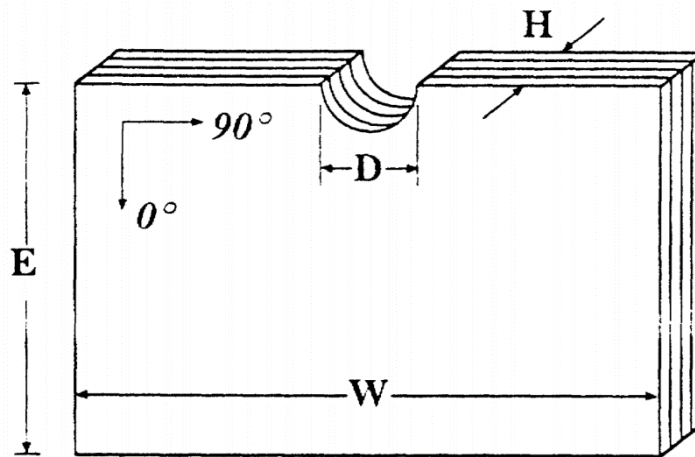
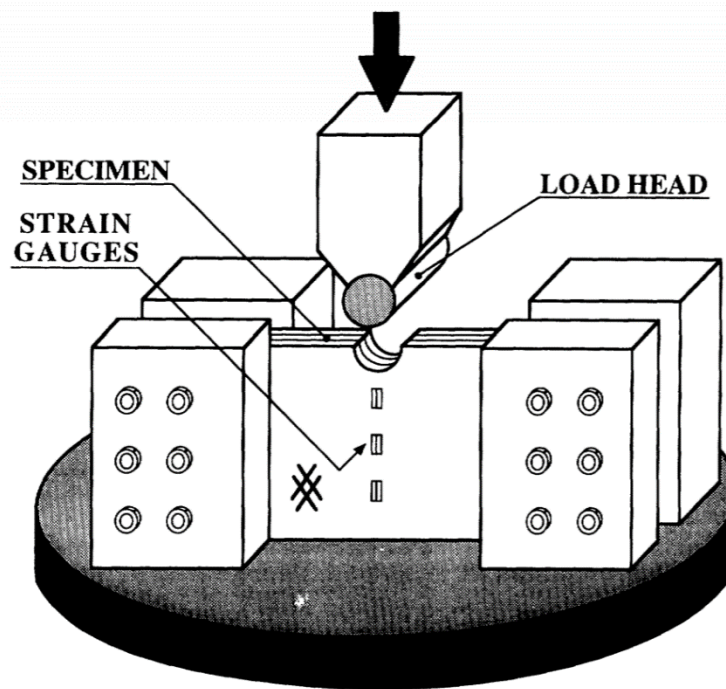
Figura 31 Diagrama do conceito de ensaio de compressão (73)

Tal como no ensaio de tração existem ensaios derivados do ensaio de compressão tais como o *Pin Bearing*.

Este ensaio consiste na aplicação de uma força vertical de compressão num entalhe semi-circular, simulando a carga exercida por uma junta mecânica. Este pode ser efetuado sem suporte lateral, simulando falha por carga pura, ou com suporte lateral, simulando falha de junta mecânica, o ensaio efetuado nesta dissertação foi com suporte lateral. (42)

O provete neste ensaio é desenhado de forma a que este falhe apenas sob a força de compressão. Outra vantagem deste tipo de provete é de ser fácil de preparar e que a superfície onde a carga foi aplicada possa ser analisada facilmente com um microscópio. Um esquema deste provete pode ser encontrado na Figura 32. (42)

A carga neste ensaio é aplicada diretamente no entalhe através de um cilindro de aço instalado na máquina de ensaio, o diâmetro deste cilindro depende do diâmetro do entalhe. Todo este ensaio é projetado de forma a que a carga seja apenas aplicada no plano do entalhe e permitir uma deformação livre do provete. Um esquema deste ensaio pode ser visualizado na Figura 33. (42)

Figura 32 Esquema de Provete para Ensaio de *Pin Bearing* (42)Figura 33 Esquema de Ensaio de *Pin Bearing* (42)

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Materiais
- 3.2 Maquinagem
- 3.3 Ensaio não destrutivo
- 3.4 Ensaio destrutivo
- 3.5 Análise de dados

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo iremos abordar a parte experimental, bem como, todos os materiais, instrumentos e processos utilizados durante esta dissertação.

A parte experimental está dividida em 4 fases:

- Preparação do provete;
- Ensaio não destrutivo;
- Ensaio destrutivo;
- Análises dos dados.

3.1 Materiais

3.1.1 *Provete*

Os provetes utilizados nesta dissertação são produzidos a partir de um pré-impregnado de carbono da marca CIT, com referência "CIT HS160 T700 ER450 UD tape 36%".

Na tabela 6, é possível verificar as suas propriedades:

Tabela 6 Propriedades do material depois de curado 2 horas a 135°C (43)

Propriedade do material curado	Unidade	Valores
Modulo de Elasticidade	GPa	127.4
Resistência à Tração	MPa	2360
Deformação	%	1.70
Modulo de compressão	GPa	113.9
Resistência à compressão	MPa	1209
Módulo de flexão	GPa	122.2
Resistência à flexão	MPa	1713
Resistência Interlaminar	MPa	95.4
Espessura depois de curado	mm	0.162

Os provetes são constituídos por 24 camadas de pré-impregnado com fibras unidirecionais e empilhadas de forma cruzada, *cross-ply*, alternando 90° entre cada camada, e foram fornecidos sob a forma de placas com cerca 3.9 mm de espessura e 150x34 mm (Fig.34 e 35).



Figura 34 Provete de Epóxi reforçado por fibras de carbono, vista frontal

3.1.2 Brocas

As brocas utilizadas para o trabalho experimental que constitui o tema desta dissertação têm todas um diâmetro nominal de 6 mm.

O tipo de brocas utilizadas podem ser observadas na tabela 7:



Figura 35 Provete de Epóxi reforçado por fibras de carbono, vista lateral

Tabela 7 Características das brocas utilizadas (Anexos 2, 3 e 4)

	<i>Step</i>	Helicoidal	<i>Brad</i>
Marca	<i>Guhring</i>	<i>Guhring</i>	<i>Guhring</i>
Modelo	739	730	1149
Tipo de material	Broca universal	Aluminio	
		Aços	
		Ferro fundido	Plásticos reforçados por fibras de aramido
		Bronze	
		Latão	
		Cobre	
		Magnésio	
		Plásticos	
Diamêtro (mm)	6	6	6
Material	Carboneto	Carboneto	Carboneto
Revestimento	Nenhum	Nenhum	Nenhum

	<i>Step</i>	Helicoidal	<i>Brad</i>
Ângulo da ponta	118°	118°	
Comprimento (mm)	101	66	66
Comprimento das Flutes (mm)	63	28	28
Espessura de trabalho (mm)		19	20
Número de Flutes	2	2	2
Tolerância	H8	H7	H8
Direção do corte	Direita	Direita	Direita
Velocidade de corte aconselhada (m/min)		80	150
Velocidade de avanço aconselhada (mm/rot)		0.080	0.05
Figura 36	A	B	C

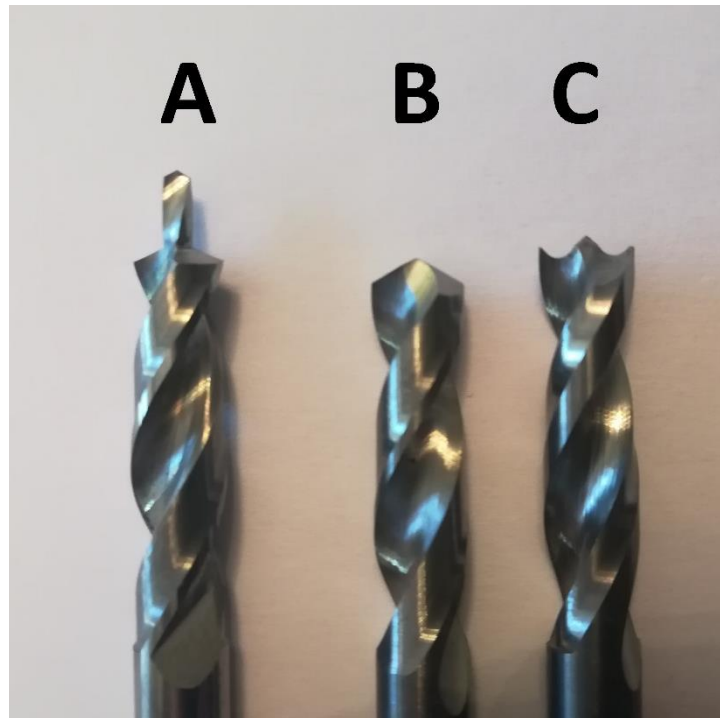


Figura 36 Tipos de Brocas utilizadas

3.1.3 Contraste

Devido às características do material utilizado foi necessário a utilização de contraste de forma a sobressair o dano provocado pela furação. O contraste utilizado foi *Diiodomethane* fabricado pela VWR Chemicals. O *Diiodomethane* é um contraste orgânico com elevada opacidade a raios X (Anexo 5).

3.2 Maquinagem

O processo de maquinagem foi efetuado numa CNC HAAS VF-2 (Anexo 9). A maquinagem consistiu em dois furos passantes a 18 mm e a 30 mm das extremidades no centro do provete. Na Figura 37 está o desenho esperado do provete.

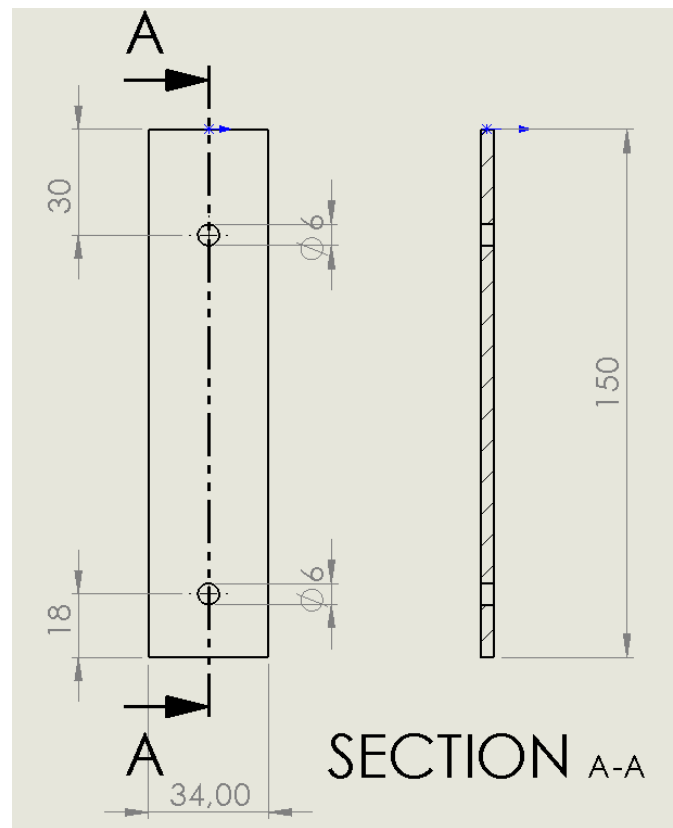


Figura 37 Desenho do provete

Os parâmetros de maquinagem definidos para esta tese foram:

- Brocas (Helicoidal, *Brad* e *Step*)
- Velocidade de rotação (constante a 2650 rpm)
- Avanço (Rápido 0.15 mm/rot, Lento 0.05 mm/rot)

Na tabela 8 podem-se verificar quais os parâmetros de corte aplicados a cada provete.

Tabela 8 Parâmetro de maquinagem para cada provete

Número de Provete	Tipo de Broca	Velocidade de rotação (rpm)	Avanço (mm/rot)
101	Helicoidal	2650	0.15
102	Helicoidal	2650	0.15
103	Helicoidal	2650	0.15
104	Helicoidal	2650	0.15
105	Helicoidal	2650	0.15
106	Helicoidal	2650	0.15
107	Helicoidal	2650	0.15
108	Helicoidal	2650	0.05
109	Helicoidal	2650	0.05
110	Helicoidal	2650	0.05
111	Helicoidal	2650	0.05
112	Helicoidal	2650	0.05
113	Helicoidal	2650	0.05
114	Helicoidal	2650	0.05
201	Falhou	Falhou	Falhou
202	<i>Brad</i>	2650	0.15
203	<i>Brad</i>	2650	0.15
204	<i>Brad</i>	2650	0.15
205	<i>Brad</i>	2650	0.15
206	<i>Brad</i>	2650	0.15
207	<i>Brad</i>	2650	0.15
208	<i>Brad</i>	2650	0.05

Número de Proвете	Tipo de Broca	Velocidade de rotação (rpm)	Avanço (mm/rot)
209	<i>Brad</i>	2650	0.05
210	<i>Brad</i>	2650	0.05
211	<i>Brad</i>	2650	0.05
212	<i>Brad</i>	2650	0.05
213	<i>Brad</i>	2650	0.05
214	<i>Brad</i>	2650	0.05
301	<i>Falhou</i>	Falhou	Falhou
302	<i>Step</i>	2650	0.15
303	<i>Step</i>	2650	0.15
304	<i>Step</i>	2650	0.15
305	<i>Step</i>	2650	0.15
306	<i>Step</i>	2650	0.15
307	<i>Step</i>	2650	0.15
308	<i>Step</i>	2650	0.05
309	<i>Step</i>	2650	0.05
310	<i>Step</i>	2650	0.05
311	<i>Step</i>	2650	0.05
312	<i>Step</i>	2650	0.05
313	<i>Step</i>	2650	0.05
314	<i>Step</i>	2650	0.05

Os provetes 201 e 301 ficaram danificados durante a maquinagem. O 201 porque não estava adequadamente fixado à mesa e o 301 porque o programa não foi executado desde o início e a broca embateu no provete danificando uma das brocas e o provete. Essa broca não foi mais utilizada.

O procedimento da furação é visualizado nas Figura 38 e 39, os resultados da maquinagem estão visíveis na Figura 40.



Figura 38 Setup da maquinagem do provete

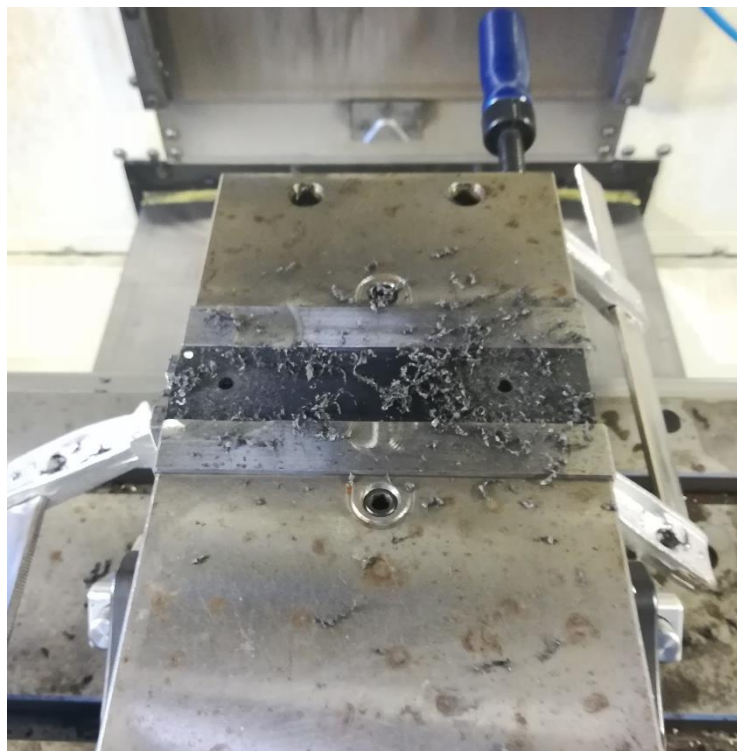


Figura 39 Provete imediatamente a seguir à furação



Figura 40 Provetes maquinados

Durante todo o processo de furação todas as forças e o binário foram monitorizadas para serem posteriormente analisadas, assim foi utilizado uma célula de carga da KISTLER type 9171A (Anexo 6).

A utilização desta célula de carga permite a medição de forças na ferramenta de corte em três eixos e do binário. Uma vez que, o processo de maquinagem foi apenas a furação, analisaremos apenas os dados do eixo vertical, ou seja, a força axial (F_z), e o binário.

3.3 Ensaios não destrutivos

3.3.1 Radiografia

A radiografia foi efetuada utilizando uma máquina de radiografia, normalmente utilizada em análise dentária, Kodak 2100 (Fig.41) e o sensor de aquisição de imagem Kodak RVG 5100 (Fig.42).

As radiografias foram efetuadas com uma potência de 60 kV e uma intensidade de 7 mA, o tempo de exposição foi de 0.050 s.



Figura 41 Máquina de radiografia Kodak 2100



Figura 42 Sensor de raios X Kodak RVG 5100

Para efetuar a radiografia foi necessário preparar os provetes. Isso consistiu em imergir os provetes em *Diiodomethane* por cerca de 15 min, de modo a garantir uma correta

penetração. Uma vez terminado o tempo procedeu-se à limpeza do líquido em excesso, com papel seco, para evitar que este esteja presente aquando da radiografia melhorando assim a nitidez da imagem (Fig.43).

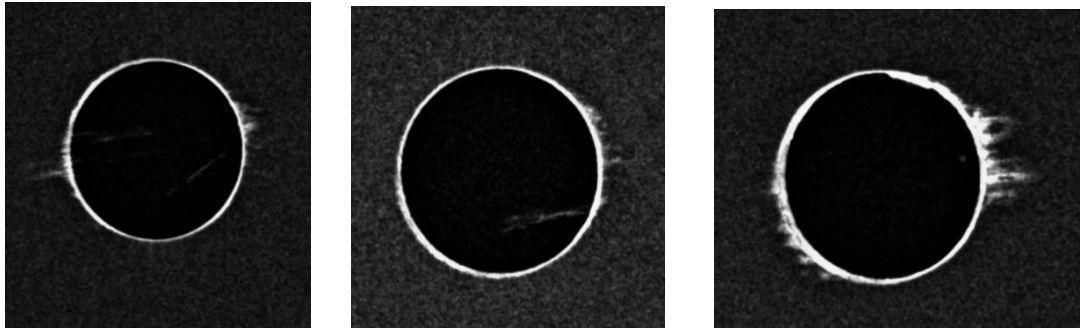


Figura 43 Exemplo de Imagens obtidas a partir da radiografia

Depois de efetuada as radiografias, analisaram-se as imagens resultantes usando para o efeito o *Software MatLab®* para posteriormente serem comparadas.

3.3.2 *Análise de imagem*

Para efetuar a análise de imagem foi utilizado o *MatLab®*.

O objetivo desta análise é de tentar definir:

- Uma fronteira entre a área afetada pelo dano e o material intacto;
- Calcular a área de dano;
- Calcular o diâmetro da circunferência mínima que contém o dano.

Esta análise tem como objetivo converter as imagens obtidas da radiografia para imagens em binário, para tal é necessário converter a imagem RGB, obtida da radiografia, para uma escala de cinzentos e posteriormente para o modelo binário.

As imagens obtidas da radiografia através do sensor digital são compostas por pixéis.

As imagens digitais podem ser distinguidas em três tipos: (44)

- Imagens de cor;
- Imagens em escala de cinzentos;
- Imagens em Binário.

As imagens a cor são também conhecidas por RGB. Neste tipo de imagens, os pixéis que as constituem são definidos por 3 valores, onde cada valor representa vermelho (R), Verde (G) e azul (B). Os valores podem variar entre o 0 e o 255. A cor do pixel é constituída pela combinação dos três valores. (44)

Uma das formas como a cor pode ser representada é através da equação 6:

$$I_{RGB} = (F_R, F_G, F_B)$$

Equação 6 Representação da cor de um Pixel

Na equação 6, $F_R(x,y)$ representa o valor de vermelho no pixel (x,y) , $F_G(x,y)$ o valor de verde e o $F_B(x,y)$ o valor de azul. (44)

Nas imagens de escala de cinzentos, cada pixel é constituído por um valor que varia também entre o 0 e o 255. (44) A conversão de uma imagem RGB para uma imagem em escala de cinzentos é efetuada utilizando um equação que transforma os três valores iniciais em apenas um valor final. (44) Nesta dissertação iremos utilizar um programa escrito em MatLab® que calcula o perímetro, área e o raio do círculo envolvente do dano.

Nas imagens em Binário, os pixéis assumem os valores 0 ou 1 significando preto ou branco, respetivamente. Assim, estas imagens são puramente brancas e pretas. Este tipo de imagens são normalmente utilizadas para detetar ou realçar fronteiras. (44) A dificuldade dessa conversão é devido à forma como a imagem é obtida na zona de fronteira que possui uma escala. Na Figura 44 é possível verificar a dificuldade de definir com exatidão a fronteira entre o defeito (C) e o material não afetado (A).

A conversão de uma imagem de escalas de cinzentos para binário é efetuada através de um algoritmo. Para se efetuar essa conversão é necessário definirmos os pixels que passam a ser representados pelo valor zero e os que passam a ser representados pelo valor um. Ou seja, temos que encontrar um *threshold level* que vai definir quais os pixels que passam a branco e quais passam a preto.

O *threshold* é um método que é utilizado para sobressair um objeto de uma imagem. Este método funciona selecionado um valor de intensidade para cada pixel, para isso uma imagem em escala de cinzentos facilita a aplicação deste método. (45) O valor de *threshold* varia entre o 0 e 1, quanto maior o valor do *threshold* maior a quantidade de pixéis pretos (valor 0) existem. O MatLab® já possui esta ferramenta.

Um dos grandes problemas deste método é a grande dependência da intensidade, não existindo qualquer outro parâmetro a ser analisado em cada pixel. Isto provoca que ruído tal como zonas de sombra ou mais iluminadas afetem a escolha do *threshold*. (45)

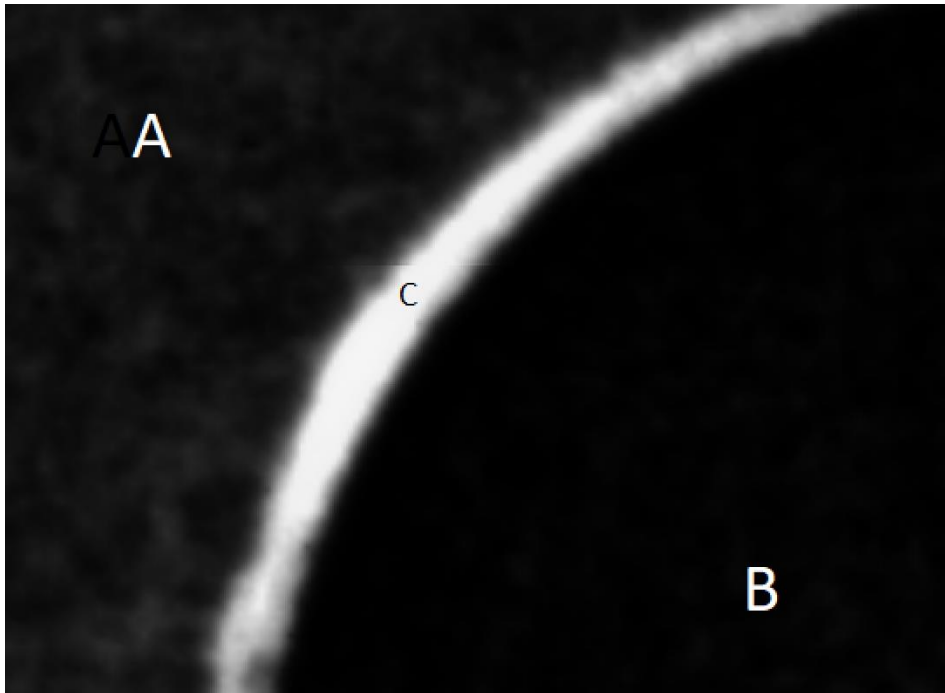


Figura 44 Exemplo de radiografia A) Material B) Furo C) Zona Delaminada

A análise inicia-se por seleccionar a imagem pretendida (Fig.45A) e seleccionar a zona relevante (Fig.45B), assim o programa irá ampliar essa imagem e transformar a imagem em binário (Fig.45C).

Uma vez efetuada essa transformação o programa fornece um *threshold*, que poderá ser aceite ou rejeitado. Este processo pode ser feito “automaticamente” ou de forma “manual”. Se o valor fornecido automaticamente for rejeitado é necessário introduzir um valor manual, o valor de *threshold* varia entre o 0 e 1. A escolha do valor de *threshold* é efetuado de forma a reduzir o ruído e tentar garantir que a fronteira seja o mais definida possível.

Uma vez definido o valor é necessário definir, manualmente, qual a fronteira exterior e interior do dano.

Uma vez definidas estas fronteiras, o programa fornece a área do dano bem como o raio de perímetro envolvente do provete.

Os valores neste programa são em pixéis que poderão ser convertidos para mm, uma vez que, um pixel corresponde a 0.00034375 mm^2 .

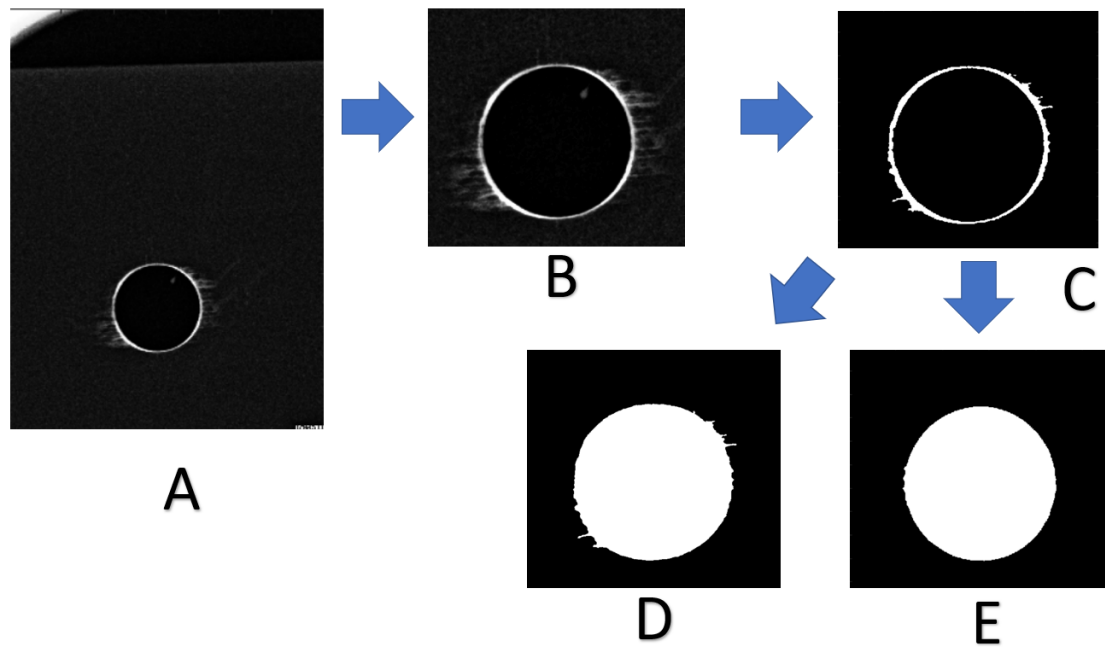


Figura 45 Passos para execução do programa em MatLab® A) Escolha de imagem B) Seleção da zona relevante C) Imagem Binária da área delaminada D) Área do Furo mais Dano E) Área do furo

Na Figura 46 é possível verificar como o valor de *threshold* altera a imagem em binário.

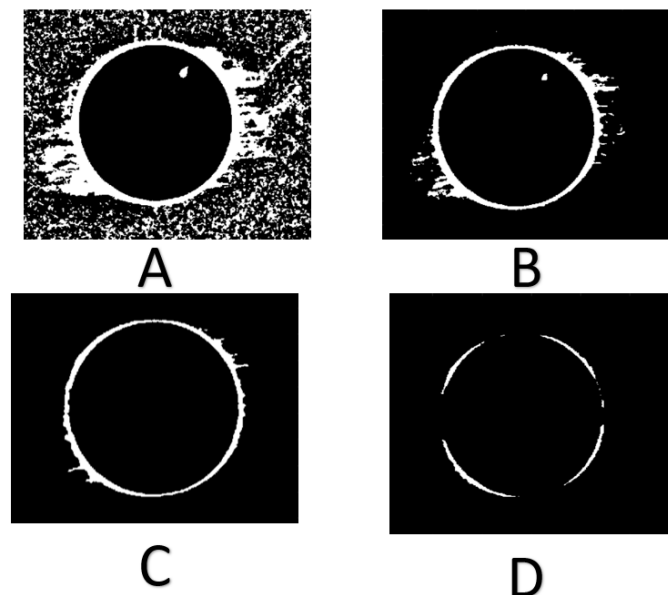


Figura 46 Diferença de imagem entre diferentes valores de *threshold* A) 0.08 B) 0.2 C) 0.38431 D) 0.8

Sempre que possível é conveniente utilizar o *threshold* automático.

3.4 Ensaios destrutivos

3.4.1 Ensaio Pin Bearing

Para o ensaio de *Pin Bearing* seguiu-se o ensaio proposto por Wang. (42)

Para efetuar esse ensaio foi necessário cortar os provetes. Esse corte foi efetuado de forma a ter 30 mm de provete e um entalhe semi-circular de 6 mm de diâmetro (Fig.47).

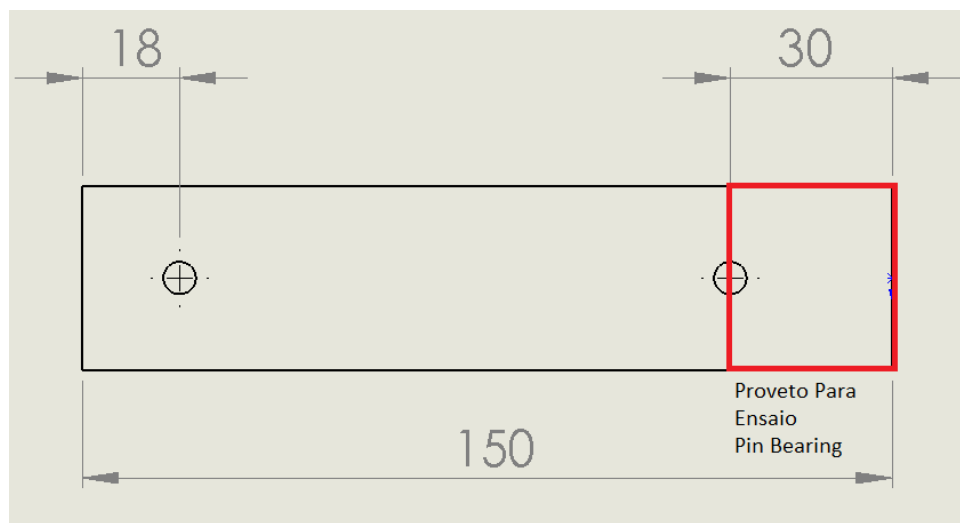


Figura 47 Esquema para corte dos provetes

O corte foi efetuado utilizando uma serra circular BATISTI MECANICA DV 25, usando água de forma a promover a limpeza e remoção das partículas (Fig.48) e evitar a sua dispersão no ar.

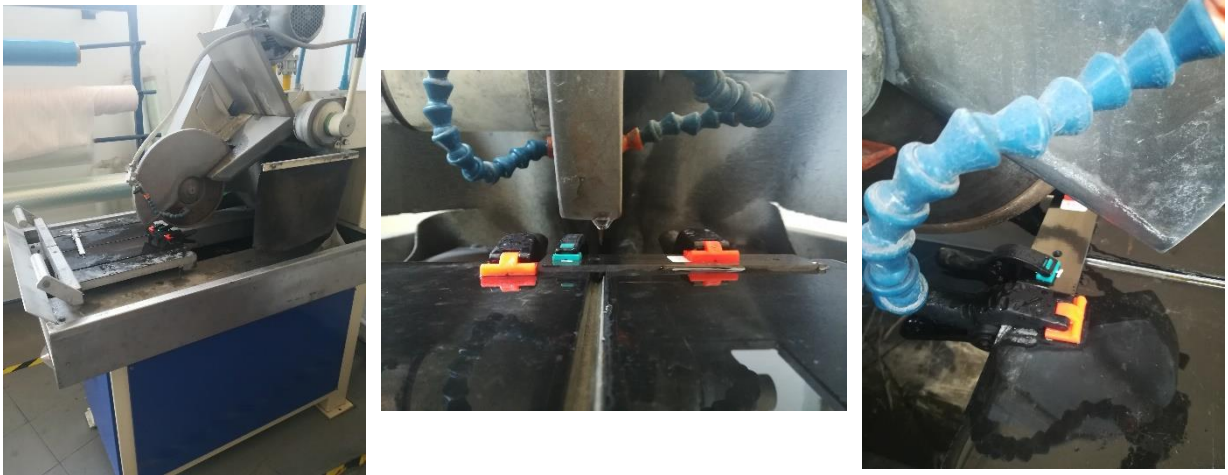


Figura 48 Setup do provete para o corte



Figura 49 Provete depois de cortado

Depois de cortados os provetes estão prontos para serem submetidos ao ensaio de *Pin Bearing* (Fig.49).

Este ensaio foi efetuado na máquina de ensaios mecânicos SHIMADZU AG-X Plus. O ensaio foi efetuado a uma velocidade de 1.27 mm/min.

O ensaio foi executado com apoio lateral, este consiste em quatro placas de aço que garantem que toda a força aplicada seja apenas de compressão.

A força foi aplicada através de uma cunha com 6.35 mm de diâmetro (Fig.50).

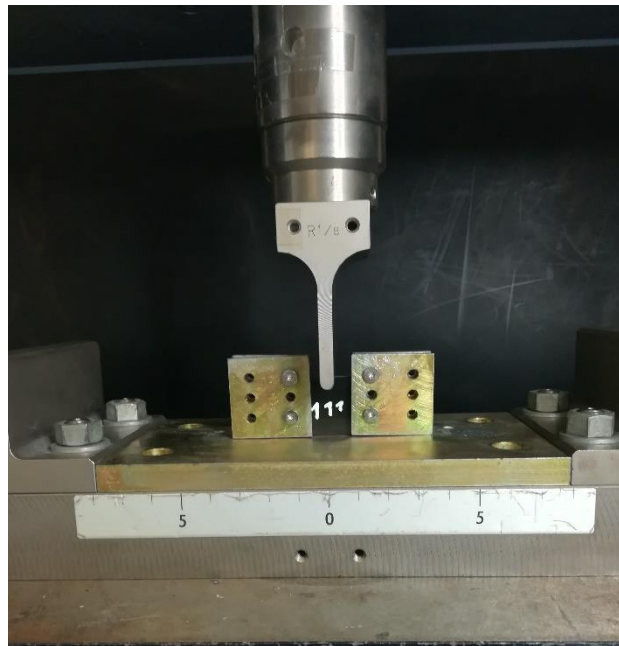


Figura 50 Setup do ensaio de *Pin Bearing*

O ensaio foi terminado quando existiu a primeira cedência por parte do material.

3.4.2 *Ensaio Bearing*

O Ensaio de *Bearing* foi efetuado segundo a norma ASTM D5961/D5961M-17 procedimento A.

O procedimento A consiste na utilização de um suporte duplo em que segura o provete através de um pino nos dois lados do provete (Fig. 51).

O pino de suporte foi aplicado de forma manual, sem o auxílio de ferramentas efetuando aperto manual, como sugerido pela norma.

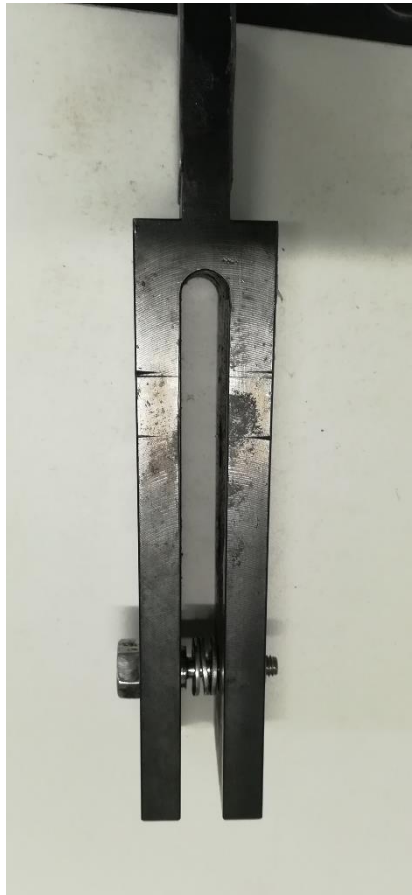


Figura 51 Suporte utilizado para o ensaio *Bearing*

A máquina utilizada para efetuar este ensaio foi a Shimadzu AG-X Plus e a velocidade do ensaio foi de 2 mm/min e termina quando existir uma cedência evidente do material (Fig.52).



Figura 52 Setup do ensaio de Bearing

Devido às características do material foi necessário aplicar insertos de forma a evitar o escorregamento durante o ensaio. Os insertos utilizados foram de alumínio e de um polímero mais macio que o do provete como se pode verificar na Figura 54. A aplicação foi efetuada utilizando o adesivo Araldite AV 138 M-1 e o endurecedor HV998 misturados numa proporção 4/1. Antes da aplicação do adesivo, a superfície dos provetes e a superfície dos insertos foi lixada com lixa 320 e limpas com álcool (Fig.53). A cura foi efetuada ao ar, por um período superior a 24h, sob a pressão de uma mola (Fig.54).

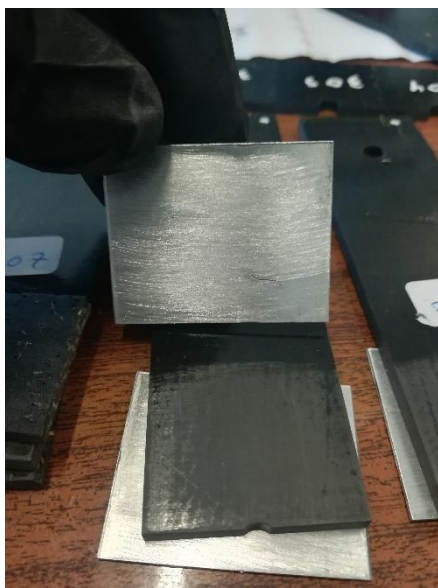


Figura 54 Superfícies preparadas para aplicação de adesivo



Figura 53 Provetes durante a cura com os dois tipos de insertos

3.4.3 Ensaio Tração

O ensaio de tração foi efetuado seguindo a norma ASTM D 638-14, apesar os provetes utilizados não seguirem as dimensões definidas pela norma.

Os provetes utilizados possuíam as dimensões presentes na Tabela 9 e na Figura 55.

Tabela 9 Dimensões dos provetes de tração

Nome	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)
100	3.6	24	200
200	3.8	24	195
300	3.6	24	195

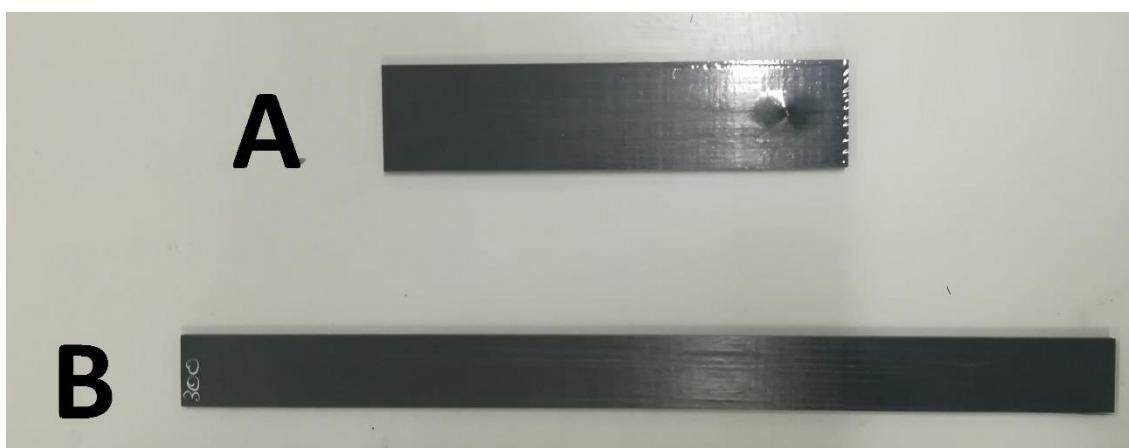


Figura 55 A) Provette para maquinagem B) Provette para tração

Devido às características do material foi necessário aplicar insertos de aço garantindo assim que o provete não escorrega durante o ensaio.

Assim os insertos foram aplicados utilizando o adesivo Araldite AV 138 M-1 e o endurecedor HV998 misturados numa proporção 4/1. Antes da aplicação do adesivo, a superfície dos provetes e a superfície dos insertos foi lixada com lixa 320 e limpos com álcool. A cura foi efetuada ao ar, por um período superior a 24h, sob a pressão de uma mola (Fig.56).



Figura 56 Provetes preparados para ensaio de tração

O ensaio foi efetuado na máquina de ensaios Shimadzu AG-X Plus, a uma velocidade de 5 mm/min.

O ensaio foi executado até existir quebra dos provetes ou quando se atingiram os 100 000 N, correspondente ao limite da máquina.

O ensaio foi executado com um extensómetro até se atingir os 45 000 N, sendo então o ensaio parado para se remover o extensómetro, evitando que este se danifique, uma vez retirado o extensómetro, o ensaio prossegue até à sua conclusão (Fig.57).



Figura 57 Setup de ensaio de tração com extensômetro

3.5 Análise de dados

3.5.1 Resultados da célula de Carga

A utilização da célula de carga Kistler 9171A foi fundamental para monitorizar todo o processo de maquinagem enquanto este é efetuado.

Nesta dissertação, os valores mais significativos a avaliar são a força axial (F_z) e o binário.

Uma vez efetuada a furação foi necessário estabilizar os dados de forma a facilitar a análise dos mesmos.

Assim foi aplicada uma média móvel de valor 12, porque cada 12 registos é o intervalo de tempo de uma rotação feita pela ferramenta.

Assim, foi possível estabilizar os dados e verificar melhor quais as tendências da força ao longo do furo.

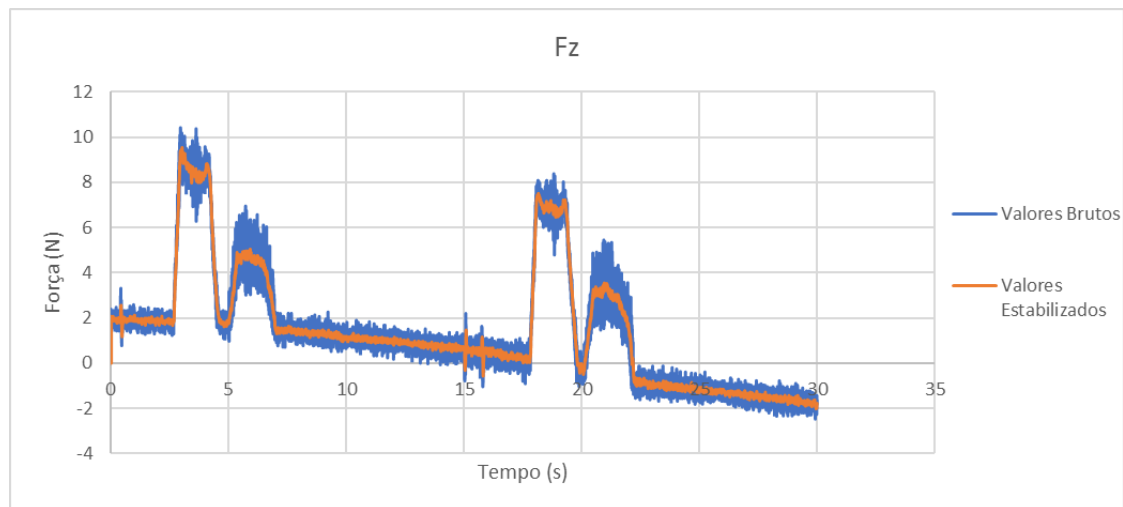


Figura 58 Força axial durante maquinação *Step Lento*

No Figura 58 é possível verificar que os valores de maquinação são decrescentes sendo necessário então nivelar o gráfico, uma vez que, cada um dos provetes possui uma tendência decrescente diferente.

De forma a nivelar os gráficos em zero foi aplicado uma função polinomial a cada uma das amostras.

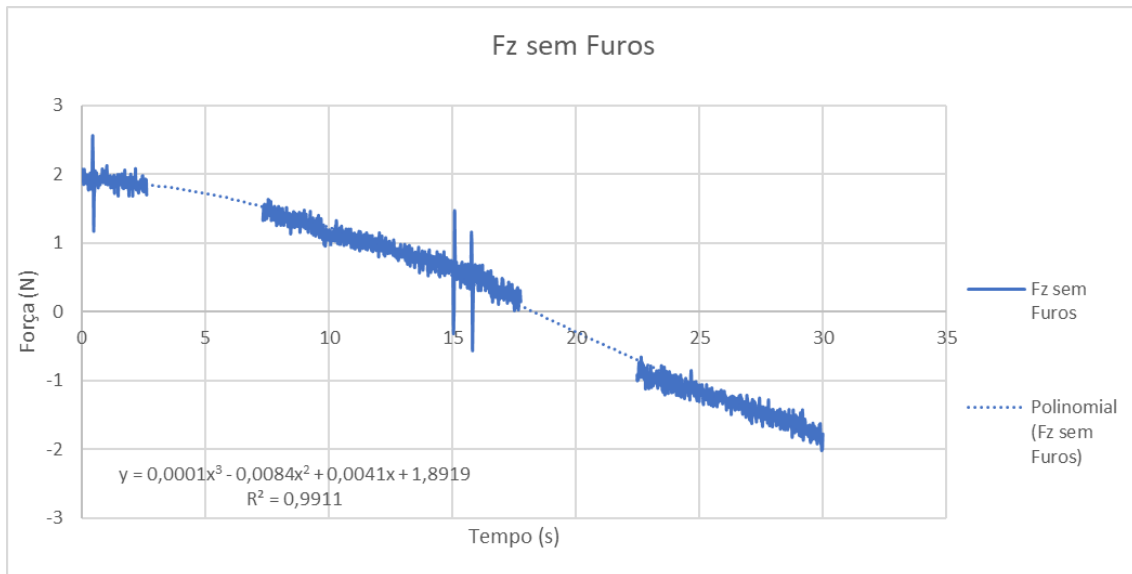


Figura 59 Linha de tendência do processo de furação

Foi feita uma função polinomial de grau 3 e devido às características desta função foi necessário remover os dados relativos aos furos, com o objetivo de obter a tendência de forma mais precisa, Figura 59.

Depois de obtida a função da tendência foi aplicada aos valores de Fz média e obteve-se o gráfico centrado em zero, Figura 60.

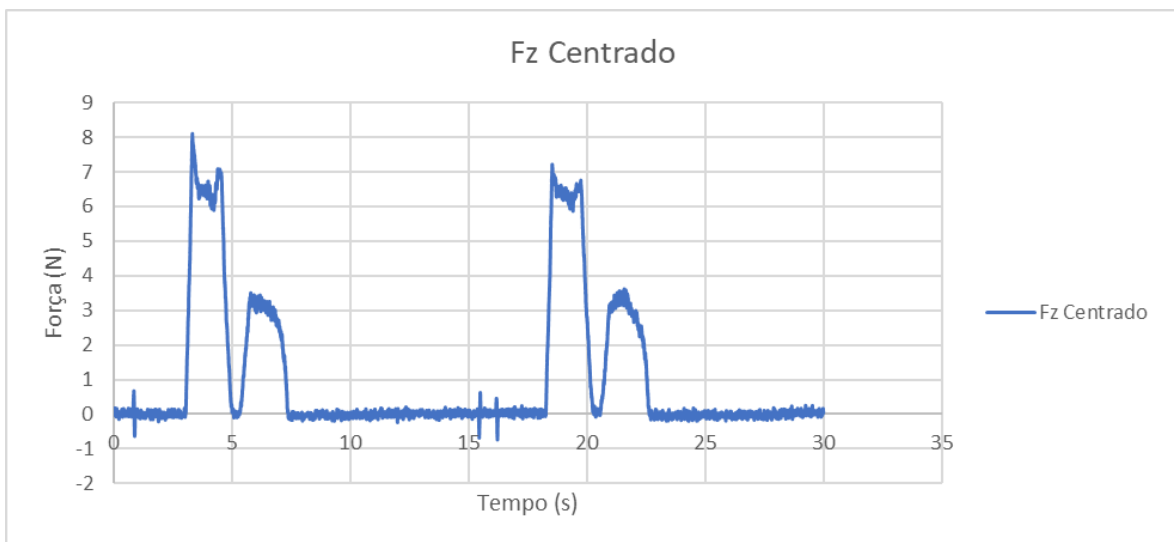


Figura 60 Valores centrados em Zero

Uma vez centrados os gráficos, é possível iniciarmos a comparação dos diferentes parâmetros de furação.

De forma, a garantir consistência na comparação iniciamos a comparação quando a célula de carga media uma força de 0.5 N, Figura 61.

Uma vez efetuados a seleção dos dados correspondentes aos furos efetuou-se uma média, representante dos diferentes parâmetros de maquinagem, da força ao longo do tempo de furação, essa média está representada a castanho na Figura 61.

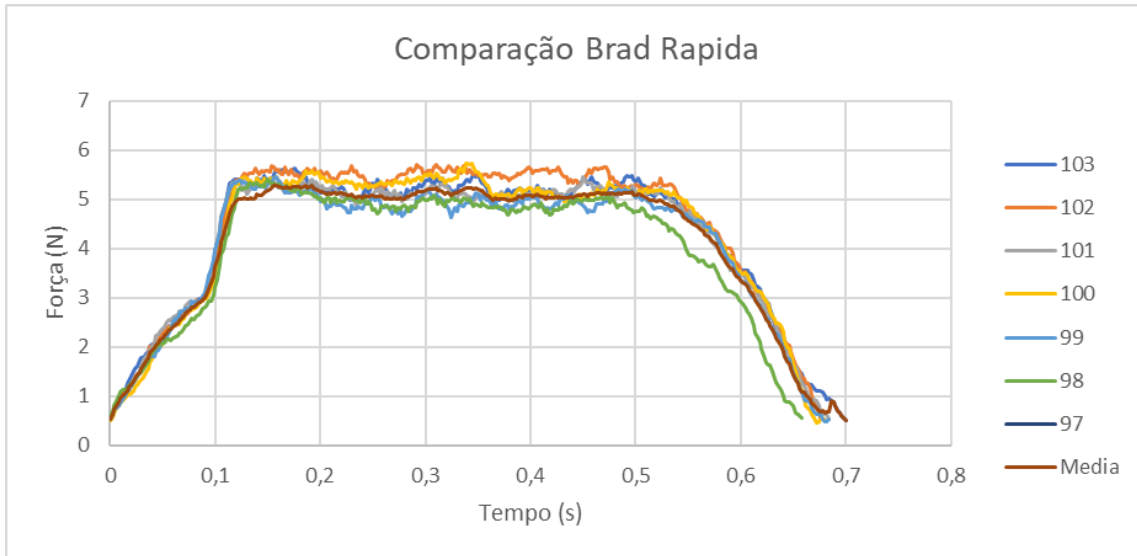


Figura 61 Comparação das amostras de maquinagem *Brad* Rápido

Depois de efetuado esse procedimento a todos os parâmetros de maquinagem e ferramentas consegue-se obter as médias, Figura 62 e 63.

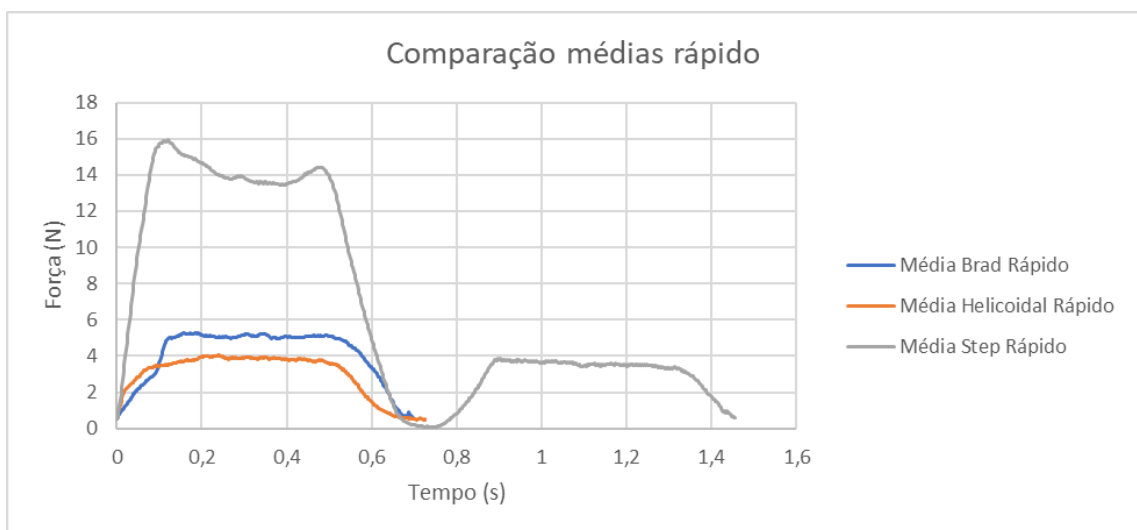


Figura 62 Comparação da média da maquinagem com velocidade de avanço 0.15 mm/rot

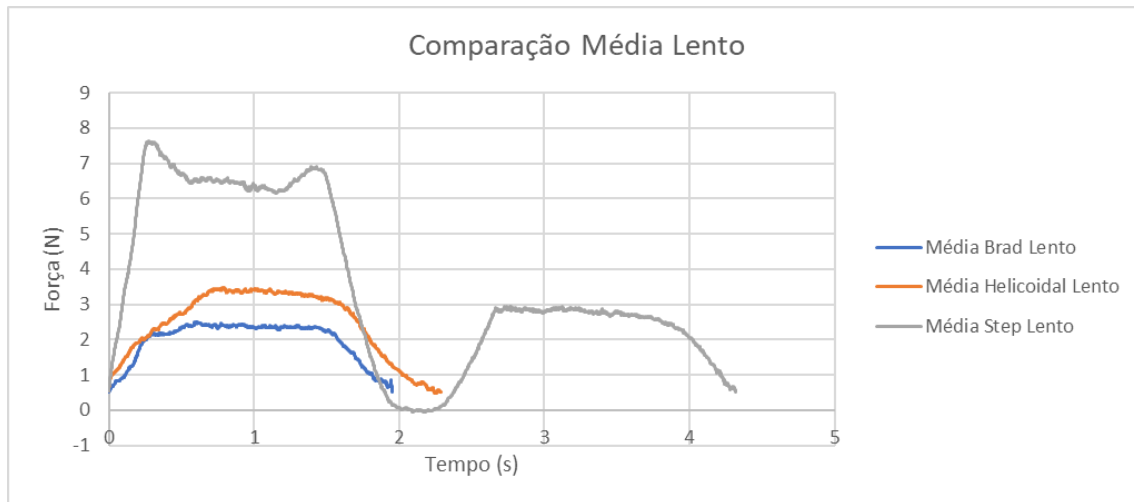


Figura 63 Comparação da média da maquinagem com velocidade de avanço 0.05 mm/rot

A análise do binário não foi possível efetuar devido   sensibilidade da célula de carga.

As forças obtidas encontram-se nas centésimas de Nm.

Na tentativa de analisar os dados e reduzir o ruído foi também submetida a uma média móvel.

Os Figuras 64, 65 e 66 são resultantes desse procedimento.

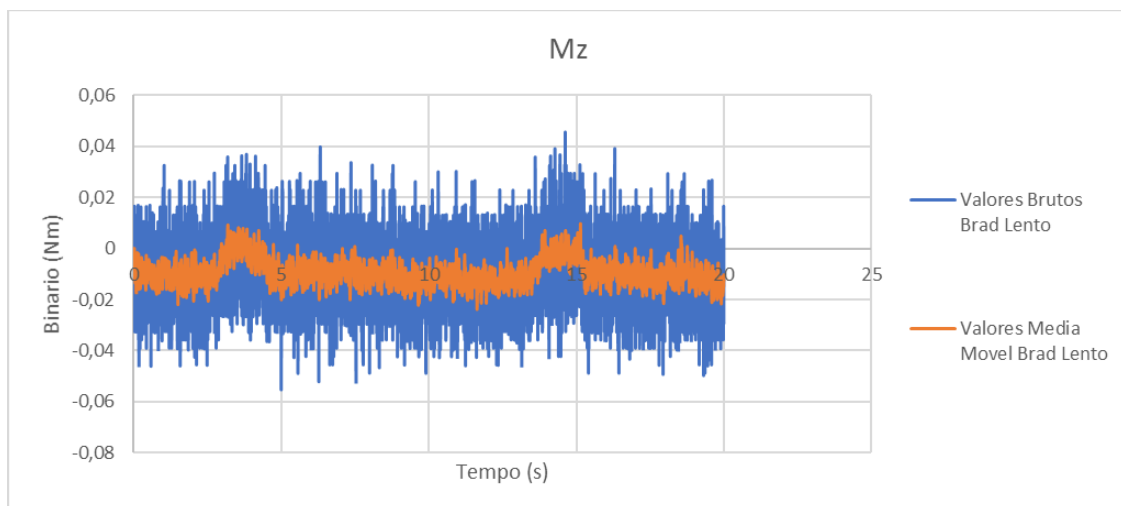


Figura 64 Variação do binário durante a maquinagem Brad com velocidade de avanço 0.05 mm/rot

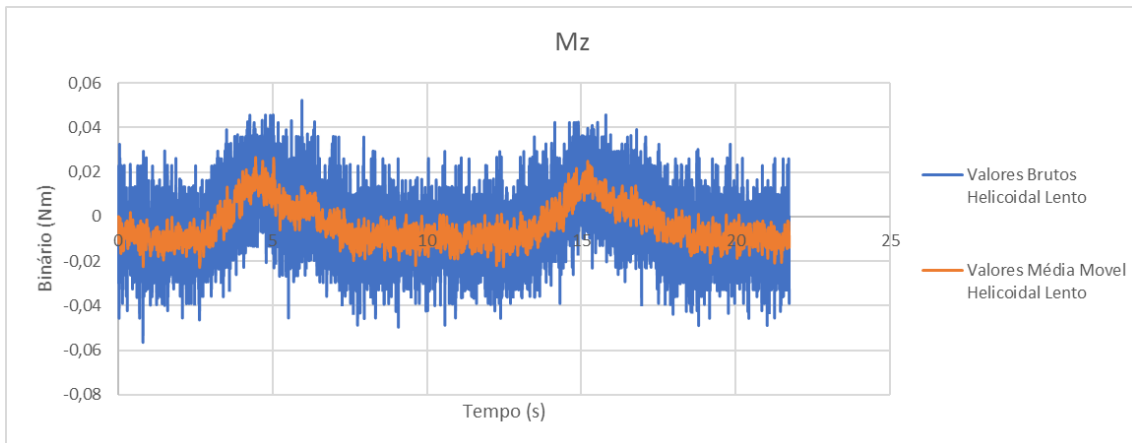


Figura 65 Variação do binário durante a maquinagem Helicoidal com velocidade de avanço 0.05 mm/rot

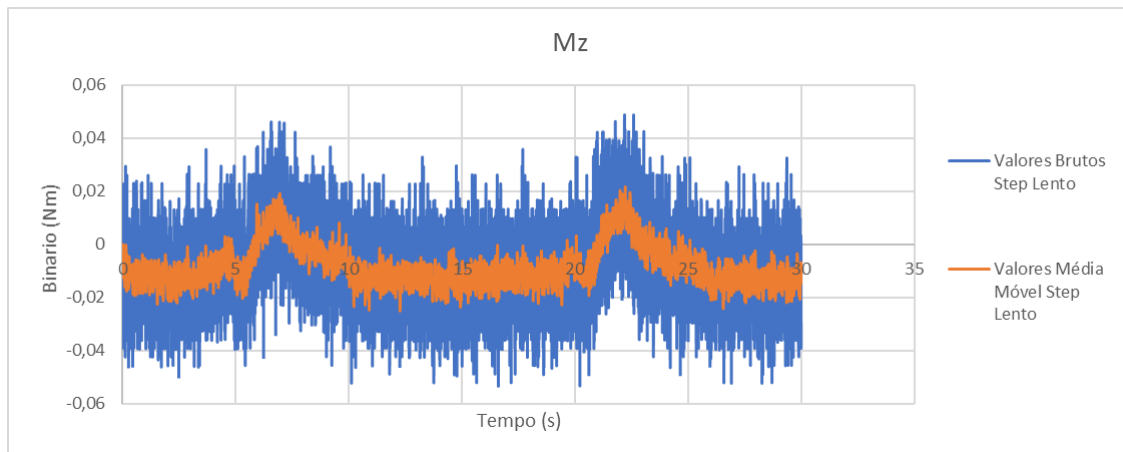


Figura 66 Variação do binário durante a maquinagem Step com velocidade de avanço 0.05 mm/rot

3.5.2 Análise de imagem

Depois de efetuadas as radiografias e analisadas pelo programa de *MatLab*[®], obteve-se os resultados presentes na Tabela 10.

Tabela 10 Resultado da análise das radiografias. Raio circ. env.-Raio do círculo envolvente

	Provete	Threshold type	Threshold lvl	Perímetro (Pixéis)	Área do furo (Pixéis)	Área do dano (Pixéis)	Raio circ. env. (Pixéis)
Step Rápido	302	automático	0.5176	1180	82602	9408	214
	303	manual	0.53	1348	82700	10413	218,3
	304	manual	0.53	1184	82408	9695	204,9
	305 repetido	automático	0.5255	1091	83216	7741	203
	306	automático	0.4431	1139	83345	6999	212,1
	307	automático	0.4431	1301	82291	9939	234
	305 segundo Furo	automático	0.4314	1185	82328	8738	218,8
Step Lento	308	automático	0.4627	1063	84265	4934	183,9
	309	automático	0.4667	1075	83370	5627	178,6
	310	manual	0.57	1463	83304	7670	200,8
	311 segundo Furo	manual	0.51	1485	83089	11916	210,1
	312	automático	0.4471	1064	83441	6242	183,1
	313	manual	0.53	1282	83341	9821	216,6
	314	automático	0.4588	1037	83576	5354	186,5
Helicoidal Rápido	202	manual	0.48	1879	83227	12812	293
	203	manual	0.5	1535	82817	10728	234,2
	203 segundo Furo	automático	0.5098	1147	83242	7255	187,3
	204	manual	0.52	1865	83797	13231	243,5
	204 segundo Furo	automático	0.5137	1069	83477	7256	197,4
	205	automático	0.4902	1026	84034	5957	177,8
	206	automático	0.4784	1028	84224	6648	188,3
	207	automático	0.4039	1039	84360	5732	189,4

	Provete	Threshold type	Threshold lvl	Perímetro (Pixéis)	Área do furo (Pixéis)	Área do dano (Pixéis)	Raio circ. env. (Pixéis)
Helicoidal Lento	208	manual	0.45	1557	83231	9255	201,3
	209	manual	0.49	1449	83181	9645	225,7
	210	manual	0.44	2460	84243	13033	212
	211 Repetido	manual	0.53	1882	82780	10749	235,4
	211 segundo Furo	automático	0.4941	1007	84125	4877	174,9
	212	automático	0.4863	1030	83507	5004	179,3
	213	automático	0.4941	1054	83586	6117	180,2
	214	manual	0.51	1413	82634	8705	193
Brad Rápido	105	automático	0.5176	1179	83453	8166	206,1
	102 repetido	automático	0.498	1749	84182	12433	237,2
	103	automático	0.3216	1204	84884	7165	219,9
	104	automático	0.4431	1457	84330	9197	248
	105 Segundo Furo	automático	0.4588	1068	83850	7474	183,4
	106	automático	0.4588	1353	83353	10057	247,2
	107	automático	0.3804	1180	83808	7108	201,4
	101 repetido	manual	0.53	2111	84430	13020	232,6
Brad Lento	110	automático	0.4824	2000	83469	15546	228,1
	108	automático	0.4078	1629	84731	10139	287
	109 repetido	automático	0.4353	1291	84789	8252	204
	111 repetido	automático	0.4902	1143	83770	6918	188,8
	111 segundo Furo	automático	0.4353	1162	83463	6725	193,4
	112	automático	0.4196	1208	84177	6706	199,1
	113	automático	0.4314	1192	83727	7016	202
	114	automático	0.4196	1138	84526	6399	182,2

Uma vez obtidos os valores do dano provocado pela furação foram aplicados os critérios de dano, de acordo com as equações 2,3 e 4, a cada uma das amostras individualmente, Tabela 11.

Tabela 11 Valores dos critérios de dano obtidos

	Provete	$Fe=D_{max}/D$	$Drat=Ad/A0$	$Fed=De/D_o$	$De=((4*(Ad+A0))/PI)^{0,5}$
Step Rápido	302	1.323	0.114	1.056	341.622
	303	1.349	0.127	1.061	343.490
	304	1.266	0.118	1.057	342.157
	305 repetido	1.255	0.094	1.046	338.502
	306	1.311	0.085	1.042	337.103
	307	1.446	0.121	1.059	342.611
	305 segundo Furo	1.352	0.106	1.052	340.372
Step Lento	308	1.137	0.060	1.030	333.181
	309	1.104	0.068	1.034	334.502
	310	1.241	0.093	1.046	338.368
	311 segundo Furo	1.298	0.145	1.070	346.265
	312	1.132	0.076	1.037	335.671
	313	1.339	0.119	1.058	342.391
	314	1.153	0.065	1.032	333.982
Helicoidal Rápido	202	1.811	0.156	1.075	347.908
	203	1.447	0.130	1.063	344.074
	203 segundo Furo	1.158	0.088	1.043	337.586
	204	1.505	0.161	1.077	348.674
	204 segundo Furo	1.220	0.088	1.043	337.588
	205	1.099	0.072	1.036	335.130
	206	1.164	0.081	1.040	336.440
207	1.171	0.070	1.034	334.702	
Helicoidal Lento					
	208	1.244	0.113	1.055	341.337
	209	1.395	0.117	1.057	342.064
	210	1.310	0.158	1.076	348.312
	211 Repetido	1.455	0.131	1.063	344.112
	211 segundo Furo	1.081	0.059	1.029	333.072
	212	1.108	0.061	1.030	333.315
	213	1.114	0.074	1.037	335.434
214	1.193	0.106	1.052	340.310	

	Provete	$Fe = D_{max}/D$	$Drat = Ad/A0$	$Fed = De/D_o$	$De = ((4*(Ad+A0))/PI)^{0,5}$
<i>Brad Rápido</i>	105	1.274	0.099	1.048	339.300
	102 repetido	1.466	0.151	1.073	347.214
	103	1.359	0.087	1.043	337.417
	104	1.533	0.112	1.054	341.229
	105 Segundo Furo	1.133	0.091	1.044	337.999
	106	1.528	0.122	1.059	342.830
	107	1.245	0.086	1.042	337.309
	101 repetido	1.438	0.158	1.076	348.288
<i>Brad Lento</i>	110	1.410	0.189	1.090	352.875
	108	1.774	0.123	1.060	342.982
	109 repetido	1.261	0.100	1.049	339.461
	111 repetido	1.167	0.084	1.041	336.950
	111 segundo Furo	1.195	0.082	1.040	336.586
	112	1.230	0.082	1.040	336.550
	113	1.248	0.085	1.042	337.135
	114	1.126	0.078	1.038	335.968

Depois de obtidos os dados e calculados os critérios de avaliação é possível efetuar uma comparação entre os diferentes parâmetros de maquinagem, as diferentes brocas e entre os diferentes critérios de avaliação.

Para isso foi efetuado a média dos valores obtidos do MatLab® e dos critérios obtidos das amostras individuais.

Devido aos dados obtidos do MatLab® serem em pixels, foi efetuada a conversão dos dados para mm e para mm², Tabela 12.

Um pixel tem como dimensão 0.0003438 mm² e 0.0185405 mm de lado.

Tabela 12 Médias da análise das radiografias

		Threshold IvI	Perímetro (mm)	Área do furo (mm)	Área do dano (mm)	Raio circ env (mm)
Step rápido	Desvio padrão	0.043	1.543	0.135	0.394	0.178
	media	0.489	22.323	28.428	3.090	3.986
Step lento	Desvio padrão	0.042	3.404	0.119	0.833	0.256
	media	0.492	22.431	28.698	2.532	3.601
Helicoidal rápido	Desvio padrão	0.035	6.553	0.175	0.989	0.690
	media	0.487	24.538	28.754	2.991	3.965
Helicoidal lento	Desvio padrão	0.028	8.649	0.185	0.930	0.391
	media	0.487	27.468	28.672	2.895	3.712
Brad rápido	Desvio padrão	0.066	6.140	0.166	0.751	0.405
	media	0.451	26.191	28.887	3.206	4.116
Brad lento	Desvio padrão	0.028	5.373	0.177	1.001	0.585
	media	0.440	24.944	28.903	2.909	3.904

Os critérios são adimensionais, não é necessária nenhuma conversão, Tabela 13 e 14.

Tabela 13 Média dos critérios de dano

Média	$Fe=D_{max}/D$	$Drat=Ad/A0$	$Fed=De/Do$	$De=((4*(Ad+A0))/PI)^{0,5}$
<i>Step rápido</i>	1.329	0.109	1.053	340.837
<i>Step lento</i>	1.200	0.090	1.044	337.766
Helicoidal rápido	1.322	0.106	1.051	340.263
Helicoidal lento	1.237	0.102	1.050	339.744
<i>Brad rápido</i>	1.372	0.113	1.055	341.448
<i>Brad lento</i>	1.301	0.103	1.050	339.814

Tabela 14 Desvio Padrão dos critérios de dano

Desvio padrão	$F_e = D_{max}/D$	$Drat = A_d/A_0$	$F_{ed} = D_e/D_o$	$De = ((4*(A_d + A_0))/\pi)^{0,5}$
Step rápido	0.059	0.014	0.007	2.143
Step lento	0.085	0.029	0.014	4.541
Helicoidal rápido	0.230	0.035	0.017	5.361
Helicoidal lento	0.130	0.033	0.016	5.064
Brad rápido	0.135	0.027	0.013	4.060
Brad lento	0.195	0.035	0.017	5.385

3.5.3 Pin Bearing

O ensaio de *Pin Bearing* foi efetuado com o objetivo de descobrir a que tensão ocorreu a primeira cedência.

Os resultados obtidos vêm em força-deslocamento, Figura 67.

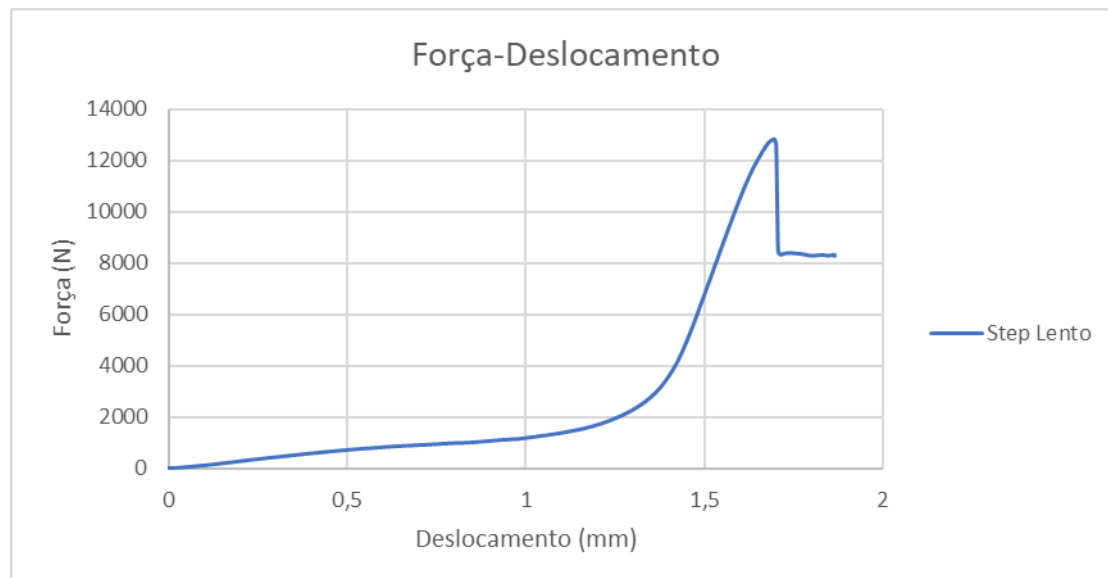


Figura 67 Exemplo de gráfico Força-Deslocamento de resultados obtidos no ensaio Pin Bearing

De forma a simplificar a análise e comparação entre os resultados das diferentes amostras selecionou-se apenas os dados em que a força do ensaio foi superior a 2000 N, Figura 68.

A área para o cálculo de tensão é definida como a área de projeção do entalhe.

Conseguimos obter assim uma análise Tensão-Deslocamento.

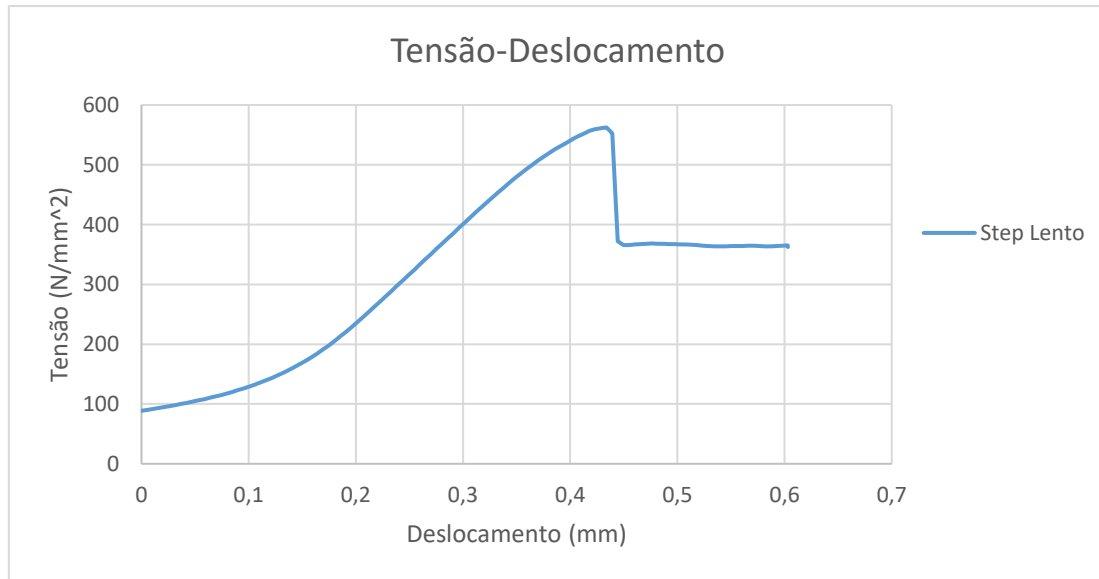


Figura 68 Exemplo de gráfico Tensão-Deslocamento de ensaio de Pin Bearing

Com estes dados conseguimos comparar os resultados entre os diferentes parâmetros e brocas, Tabela 15.

Tabela 15 Dados obtidos do ensaio de Pin Bearing

		Nome	Máx Força	Máx Deslocamento	Tensão Máxima
		Unidade	N	mm	N/mm ²
<i>Brad</i>	Lento	101	12950.1	2.6028	567.986
		102	12216.4	1.9942	535.805
		103	13215.8	2.2535	579.639
		104	12072.3	1.6979	529.485
		105	12593.6	2.2112	552.349
		106	12309.8	8.5082	539.903
		107	11773.2	1.6884	516.367
	Rápido	108	12831.6	1.4446	562.789
		109	11787.7	1.6979	517.006
		110	12793.3	1.6358	561.111
		111	12401.3	1.4810	543.917
		112	12901.2	1.5233	565.844
		113	Falhou	Falhou	Falhou
		Média	12190.4	2.3893	547.683
<i>Helicoidal</i>	Lento	202	10565.9	1.4492	463.414
		203	13181.8	1.3751	578.148
		204	12881.6	1.3063	564.984
		205	12870.2	1.1899	564.483
		206	12320.5	1.2058	540.373
		207	13008.6	1.2217	570.550
		Rápido	208	12600.3	1.4863
	209		12642	1.5550	554.475
	210		11110.4	1.2964	487.296
	211		12218.3	1.3487	535.890
	212		12995.2	1.5444	569.967
	213		12841.5	1.4651	563.224
			Média	12436.4	1.3703
<i>Step</i>	Lento	302	11843.6	2.1424	519.455
		303	12449.2	1.4968	546.018
		304	11853.5	2.6133	519.889
		305	12502.7	2.4387	548.365
		306	12385.4	1.5074	543.218
		307	12469.5	2.2906	546.907
		Rápido	308	12798.3	2.1107
	309		12267.5	1.6133	538.046
	310		12474.7	1.2481	547.134
	311		12824.6	1.6979	562.482
	312		12620.7	1.9149	553.538
	313		11427.5	2.6292	501.205
			Média	12326.4	1.9753

Uma vez calculado a tensão máxima e obtidas a força máxima aplicada nas diferentes amostras foi efetuada a média de cada um dos parâmetros, Tabela 16.

Tabela 16 Média dos resultados obtidos de *Pin Bearing*

	Média Força Máxima	Média Tensão Máxima
<i>Brad Lento</i>	12447.3	545.93
<i>Brad Rápido</i>	12543.0	550.13
<i>Helicoidal Lento</i>	12471.4	546.99
<i>Helicoidal Rápido</i>	12401.3	543.92
<i>Step lento</i>	12250.7	537.31
<i>Step Rápido</i>	12402.2	543.96

Na Figura 69 é possível visualizar o estado dos provetes no fim do ensaio.

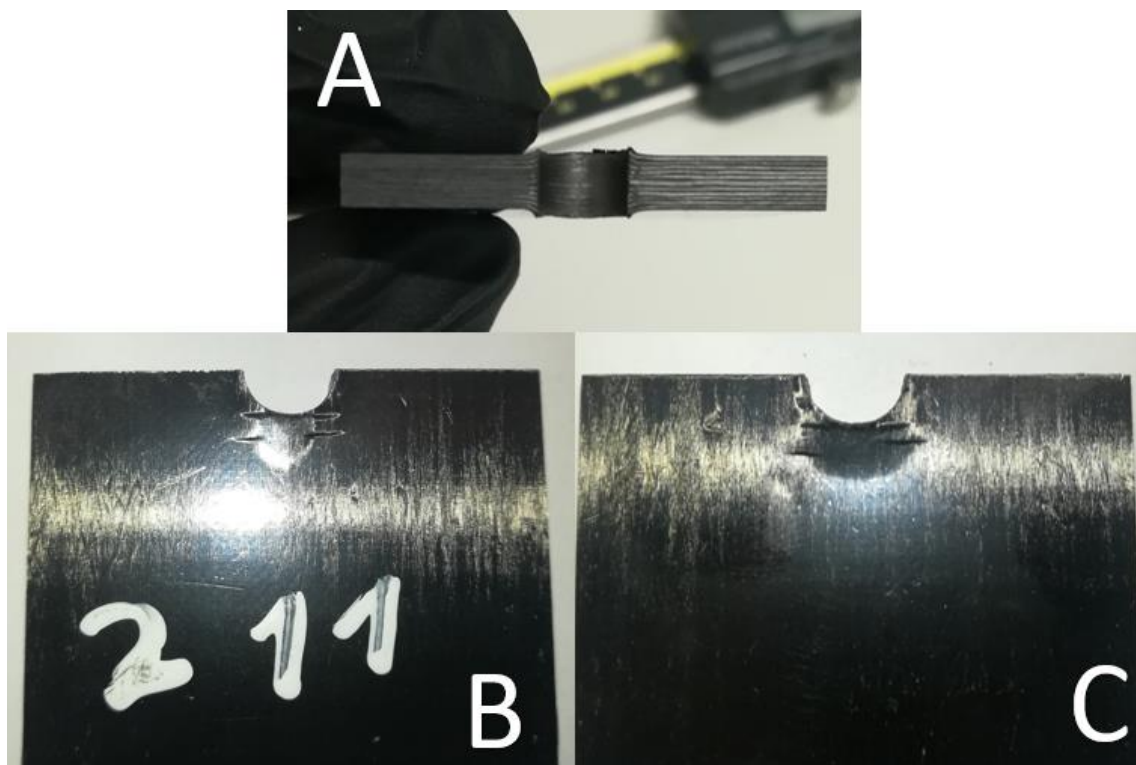


Figura 69 Estado do Provede depois do ensaio de *Pin Bearing*

3.5.4 *Bearing*

O ensaio de *Bearing* teve vários problemas durante a execução pelo que alguns dos ensaios falharam devido à existência de escorregamento, as amostras que foram sujeitas a esses ensaios falhados não foram analisadas pois ficaram danificadas.

O ensaio de *Bearing* têm o objetivo determinar a que tensão quando ocorre a primeira cedência, Tabela 17.

Tabela 17 Dados obtidos do ensaio *Bearing*

Broca	Avanço	Nome	Insert	Força	Deslocamento	Tensão
		Unidade		N		mm
<i>Brad</i>	Rápido	101	Polímero	6998.333	2.5489	306.944
	Rápido	104	Polímero	8585.66	5.6666	376.564
	Lento	108	Polímero	7114.729	3.1000	312.050
	Lento	111	Polímero	8242.655	2.5340	361.520
<i>Brad</i>	Lento	110	Alumínio	7838.217	2.2822	343.781
	Lento	113	Alumínio	7565.085	2.2573	331.802
	Lento	114	Alumínio	7622.322	2.4072	334.312
Helicoidal	Rápido	207	Polímero	7478.619	2.8406	328.010
	Lento	211	Polímero	7944.854	2.5843	348.459
Helicoidal	Rápido	202	Alumínio	7033.428	2.2572	308.484
	Rápido	203	Alumínio	6983.916	2.1670	306.312
	Rápido	204	Alumínio	7281.081	2.3250	319.346
	Rápido	205	Alumínio	7215.77	2.1250	316.481
	Rápido	206	Alumínio	7782.332	2.2822	341.330
	Lento	208	Alumínio	7991.966	2.1572	350.525
	Lento	209	Alumínio	8678.516	2.9989	380.637
	Lento	210	Alumínio	7888.619	1.8253	345.992
	Lento	212	Alumínio	8245.563	2.1406	361.648
	Lento	213	Alumínio	7411.687	3.3406	325.074
	Lento	214	Alumínio	7021.538	2.1239	307.962
<i>Step</i>	Rápido	302	Polímero	7493.543	3.5003	328.664
	Rápido	307	Polímero	7254.568	2.9250	318.183
	Lento	309	Polímero	7585.796	3.5739	332.710
	Lento	313	Polímero	6536.356	2.5426	286.682
<i>Step</i>	Rápido	303	Alumínio	6840.213	2.3250	300.009
	Rápido	304	Alumínio	8209.133	2.7423	360.050
	Rápido	305	Alumínio	6890.059	2.3006	302.196
	Rápido	306	Alumínio	7760.016	2.3406	340.352
	Lento	308	Alumínio	7820.781	2.2406	343.017
	Lento	310	Alumínio	7568.614	2.6989	331.957
	Lento	311	Alumínio	7636.007	2.9753	334.913
	Lento	312	Alumínio	6996.091	2.0917	306.846
Lento	314	Alumínio	7403.851	2.3753	324.730	

Os dados obtidos neste ensaio são apresentados sob a forma de Força-Deslocamento, Figura 70.

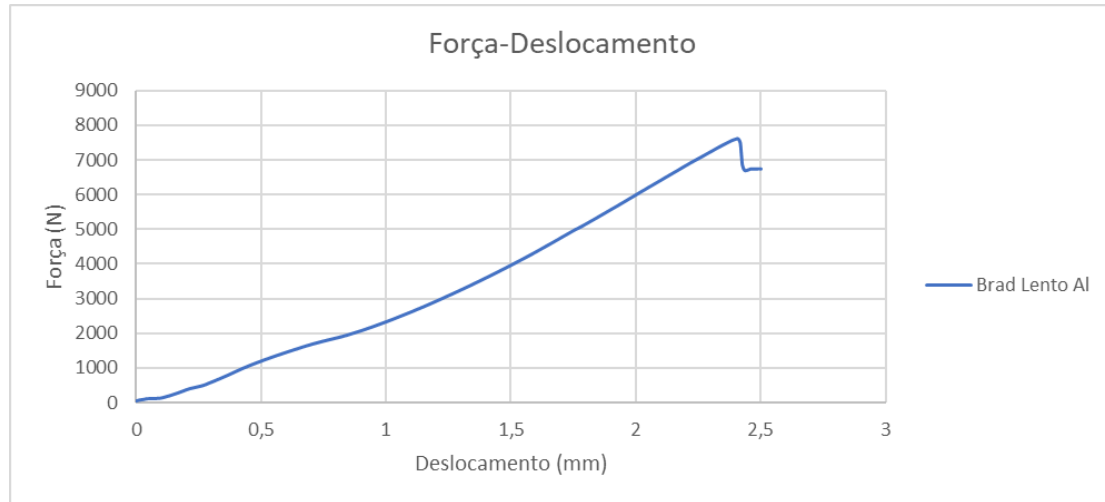


Figura 70 Gráfico exemplo Força-Deslocamento de ensaio Bearing

Seguidamente, calculou-se a tensão, para tal a área utilizada foi a secção da projeção do centro do furo.

Assim, a Figura 71 representa um exemplo do gráfico Tensão-Deslocamento neste tipo de ensaios.

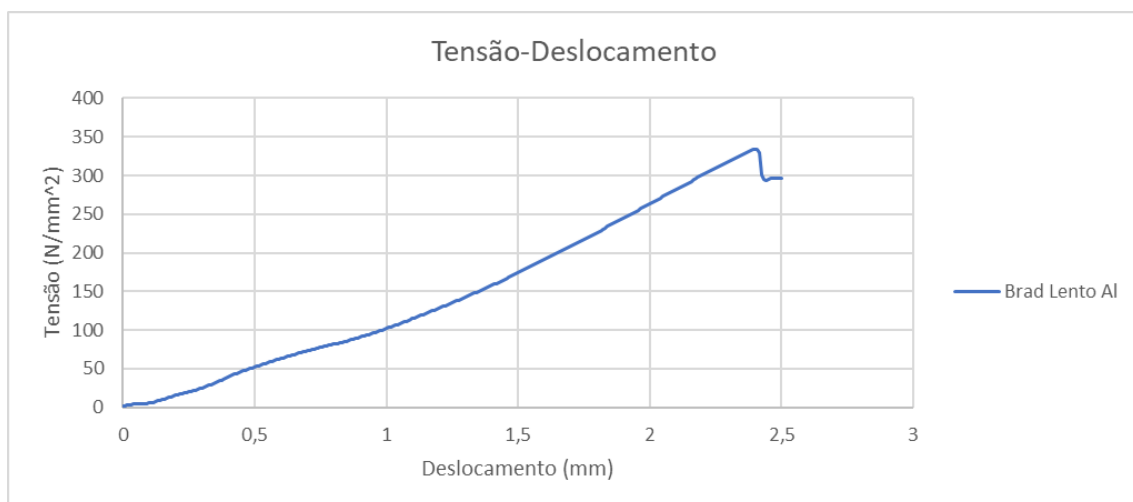


Figura 71 Gráfico exemplo de Tensão-Deslocamento de ensaio Bearing

Os resultados deste ensaio podem então ser comparados entre os diferentes parâmetros e Brocas utilizadas, Tabela 18.

O estado dos provetes pode ser visualizado na Figura 72.

Tabela 18 Média dos resultados obtidos do ensaio de *Bearing*

		Média Força	Média Deslocamento	Média Tensão
		N	mm	N/mm ²
<i>Brad</i>	Rápido	7791.997	4.1078	341.754
	Lento	7676.602	2.5161	336.693
Helicoidal	Rápido	7295.858	2.3328	319.994
	Lento	7883.249	2.4530	345.757
<i>Step</i>	Rápido	7407.922	2.6890	324.909
	Lento	7363.928	2.6426	322.979

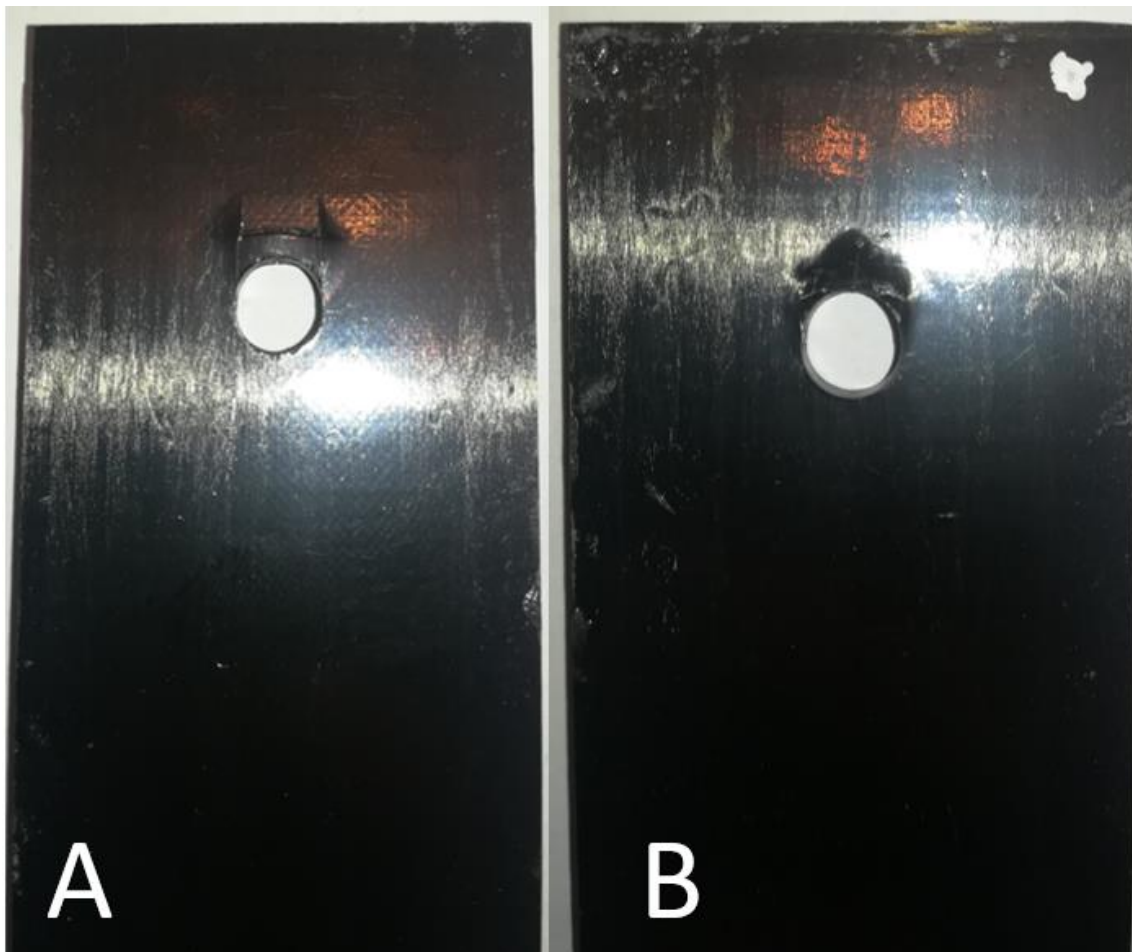


Figura 72 Estado do provete depois do ensaio de *Bearing*

3.5.5 Tração

Do ensaio de tração foi obtido o gráfico de tensão-deformação, Figura 73.

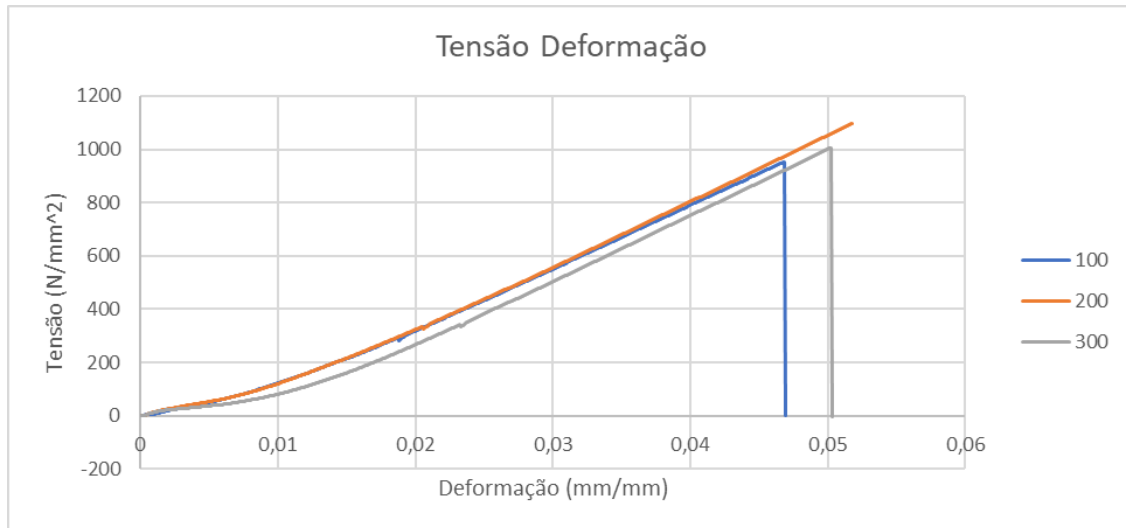


Figura 73 Gráfico Tensão-Deformação ensaio de Tração

O ensaio de tração também nos permitiu obter várias informações sobre o material entre elas, o módulo de elasticidade bem como a tensão de rotura.

Para a obtenção do módulo de elasticidade foi utilizado os dados obtidos pelo extensômetro, Figura 74.

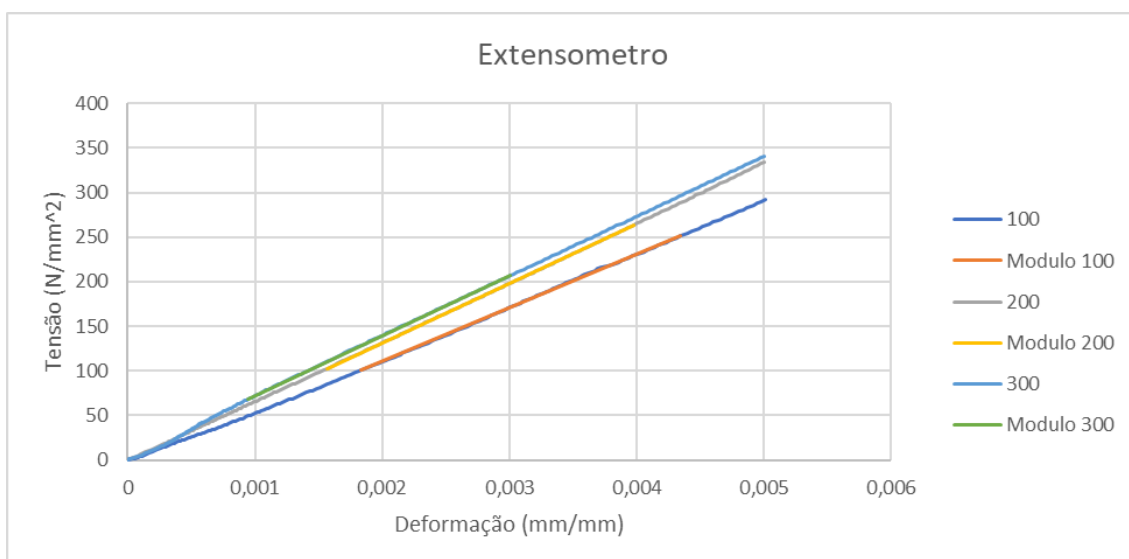


Figura 74 Gráfico Tensão-Deformação com extensômetro

No provete 200 não existiu rotura.

Os resultados obtidos do módulo de elasticidade (E), tensão de rotura (R_m) e deformação no momento de rotura (e_{rot}) podem ser verificados na Tabela 19.

Tabela 19 Resultados obtidos do ensaio de tração

Provete	E [MPa]	R_m [MPa]	e_{rot} [-]
100	60007.5	953.533	0.0469
200	66710.5	xxx	xxx
300	67299.5	1006.664	0.0503
Média	64672.5	980.099	0.0486

CONCLUSÕES

- 4.1 Análise de Resultados
- 4.2 Propostas de trabalhos futuros
- 4.3 Conclusão

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 Análise de Resultados

4.1.1 Análise dos resultados da Furação

Nas Figuras 75, 76 e 77 é possível verificar que a velocidade de avanço tem muita influência na força axial, bem como a geometria da broca varia a força aplicada durante a maquinação.

Verifica-se assim que na broca *Brad* o aumento da velocidade de avanço duplica a força axial aumentando em cerca 111% a força exercida.

No caso da broca *Step* a força duplica no primeiro diâmetro havendo um aumento de 109% na força exercida, mas no segundo diâmetro aumenta apenas cerca de 1N com o aumento da velocidade de avanço correspondendo a cerca de 32% de aumento

No caso da broca Helicoidal existiu um aumento de apenas 0.5 N correspondente a cerca de 17%, com o aumento da velocidade de avanço.

É de lembrar que a velocidade de avanço lenta é de 0.05 mm/rot e a velocidade de avanço rápida é de 0.15 mm/rot.

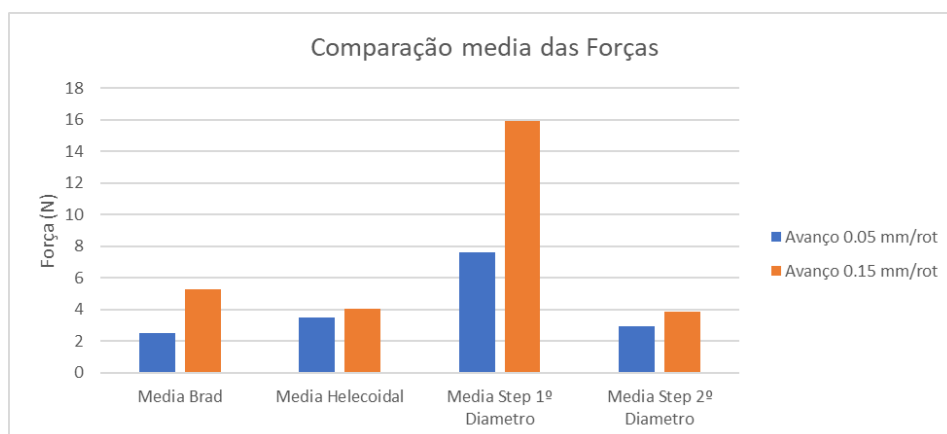


Figura 75 Comparação entre parâmetros e brocas

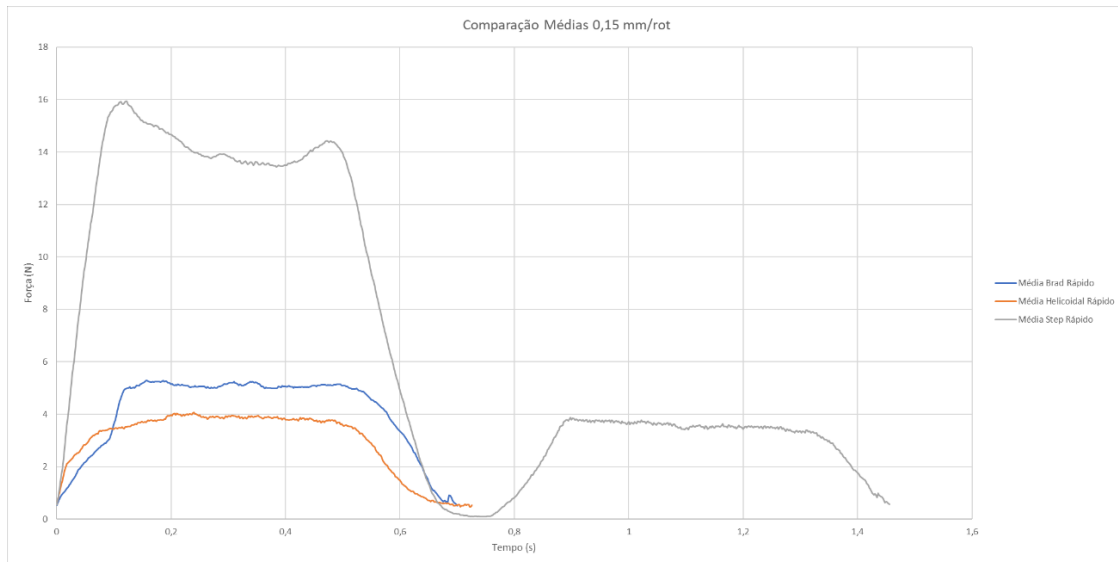


Figura 76 Comparação da média da maquinagem de avanço rápido

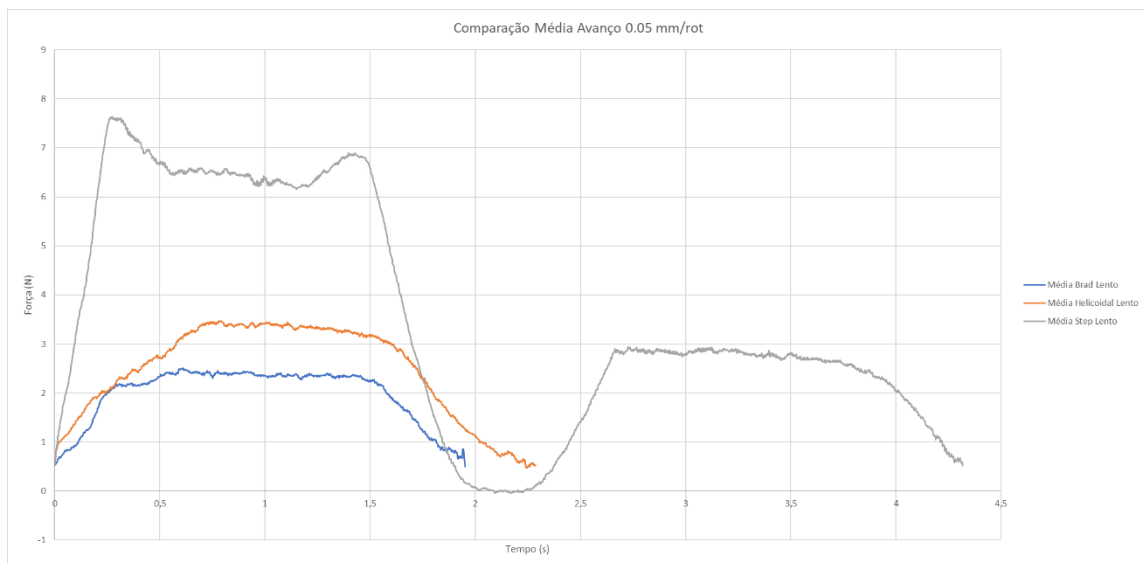


Figura 77 Comparação da média da maquinagem de avanço lento

O aumento da força axial com o aumento da velocidade de avanço é um resultado esperado conforme a literatura. (46)

O aumento da força não é proporcionalmente igual para todas as ferramentas, isto deve-se ao facto que cada ferramenta tem parâmetros de maquinagem aconselháveis diferentes. Assim é normal a força exercida pela broca Helicoidal ser menor que a *Brad* com o avanço de 0.15 mm/rot pois estes parâmetros são mais adequados à broca

Helicoidal e o contrário é verificado com a velocidade de avanço 0.05 mm/rot sendo este parâmetro mais adequado para a broca *Brad*.

Nas Figuras 75, 76 e 77 é possível verificar que a variação de força durante a maquinagem depende apenas da geometria da broca. No caso da broca *Step* é possível verificar que a furação foi executada em dois passos, o primeiro passo em que se inicia com o diâmetro inferior e que possui forças muito superiores do que as outras brocas e o segundo passo que possui forças semelhantes às outras brocas.

No caso da broca *Brad* é possível verificar que em ambas as velocidades de avanço, a variação da força possui uma distribuição semelhante a um planalto mantendo uma força constante.

Já no caso da broca Helicoidal a distribuição das forças segue semelhante a uma parábola.

Essas variações são explicadas pela distribuição da concentração da força axial na ponta da broca. Cada uma das geometrias de pontas distribui a força de forma diferente (Fig.78).

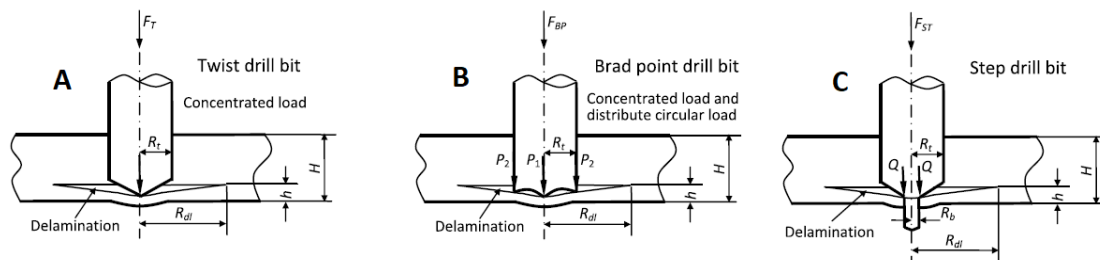


Figura 78 Esquema da concentração de forças A) broca Helicoidal B) broca *Brad* C) broca *Step* (47)

De acordo com a literatura quando menor for a velocidade de corte, maior é a força axial exercida pela broca. (48) Devido à primeira etapa da furação com a broca *Step* ser executada com um diâmetro inferior e uma velocidade de rotação constante, é efetuada com uma velocidade de corte menor que a segunda fase da furação. Esta diferença de velocidade provoca a diferença da força axial entre as duas fases da furação.

4.1.2 Análise de radiografia

Na análise das radiografias é possível verificar que o parâmetro que mais alterou significativamente as áreas de delaminação e o raio do círculo envolvente é o aumento da velocidade de avanço. A broca *Brad* sofreu um aumento de 22% na área de delaminação e de 5.4% no raio do círculo envolvente. A broca *Step* sofreu um aumento de 10.2% na área e 10.7% no raio. A broca Helicoidal sofreu um aumento de 3.3% na área e 6.8% no raio.

Comparando as diferentes brocas para cada uma das velocidades verifica-se que para a velocidade de avanço 0.15 mm/rot a Broca Helicoidal possui a área menor de delaminação existindo um aumento de 3.3% para a broca *Step* e de 7.2% para a broca *Brad*. A Broca Helicoidal foi também a que possui menor raio do círculo envolvente sendo o aumento da broca *Brad* 3.8% e a broca *Step* 0.54%.

Quando a velocidade de avanço é 0.05 mm/rot a broca *Step* possui a menor área de delaminação entre os três tipos de brocas. Quer a broca *Brad* quer a broca Helicoidal possuíram aumentos de área semelhantes quando comparado com a broca *Step*, 14.9% e 14.3% respetivamente. No caso do raio do círculo envolvente, a broca *Step* voltou a ser a menor, existindo um aumento de 3.1% no caso da broca Helicoidal e 8.4% na broca *Brad*.

É possível também verificar que existe uma diferença de 26.6% (0.674 mm²) na área de delaminação entre o parâmetro que possui a área menor, *Step*, com uma velocidade de avanço de 0.05 mm/rot, com uma área de 2.532 mm², e o parâmetro que provocou mais área dano *Brad* com a velocidade de avanço de 0.15 mm/rot, com uma área de 3.2063 mm². Os desvios padrões variam entre os 0.394 mm² e os 1.001 mm².

No caso do raio do círculo envolvente, a diferença foi de 14.3% (0.514 mm) e os parâmetros foram os mesmos que no caso da área de delaminação *Brad* rápido (4.116 mm), e o raio menor foi o de *Step* lento (3.601 mm). Os desvios padrões existentes neste caso variam ente 0.178 mm e os 0.698 mm.

Verifica-se ainda que a diferença entre os valores maiores e os valores menores quer na área do dano quer no raio do círculo envolvente estão dentro do desvio padrão de alguns dos parâmetros de maquinaria analisados.

Quando se analisa os critérios de danos verifica-se a mesma tendência que quando analisado a área de delaminação e o raio da circunferência envolvente, a diferença entre os valores maiores e menores são menores que o desvio padrão de alguns dos parâmetros individuais, como verificado nas Figuras 79, 80 e 81.

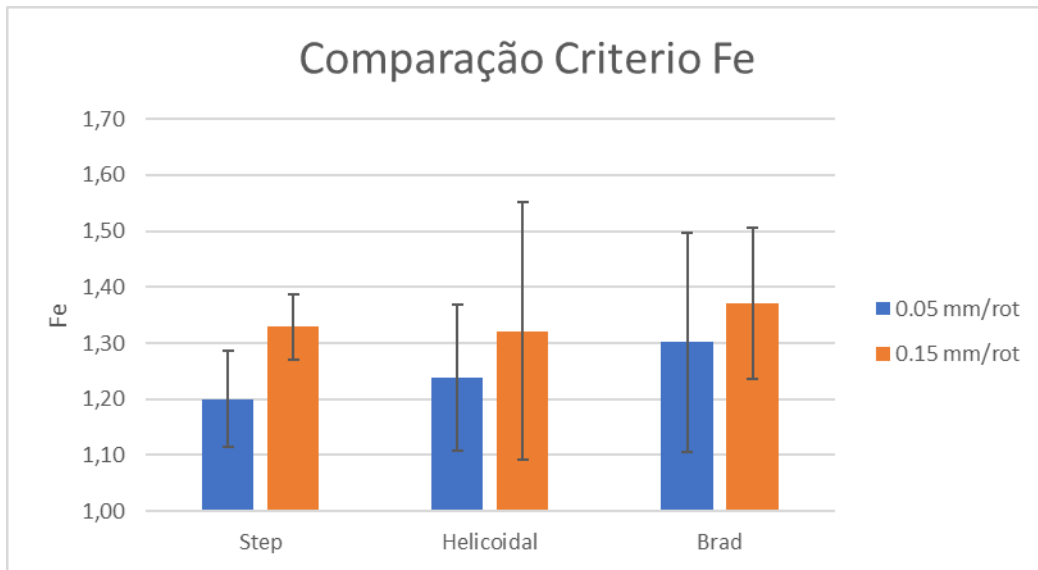


Figura 79 Gráfico comparação Fe

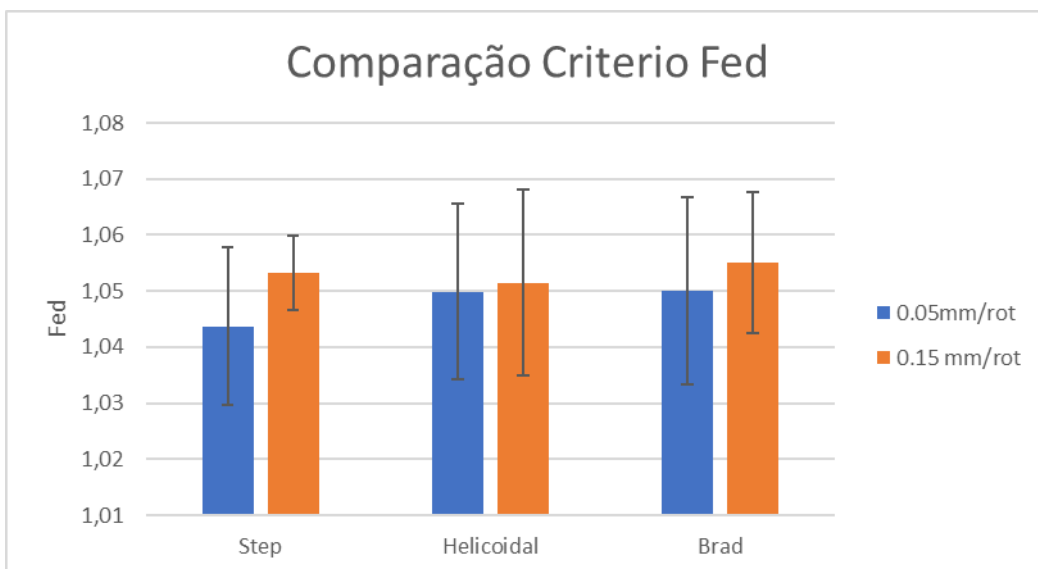


Figura 80 Gráfico comparação Fed

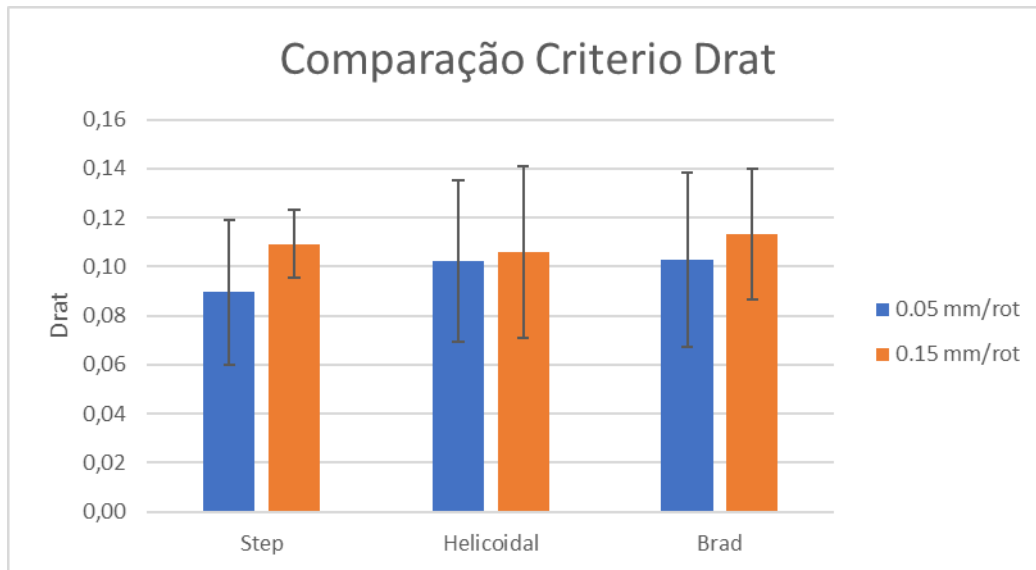


Figura 81 Gráfico comparação Drat

É possível assim verificar consistência nos danos obtidos. Na tabela 20 está a classificação relativa entre os diferentes parâmetros indo do dano menos extenso (1) até ao dano mais extenso (6).

Tabela 20 Classificação relativa dos parâmetros

	Área do Delaminado Relativo	Raio circ env. Relativo	Fe Relativo	Drat Relativo	Fed Relativo
<i>Step</i> rápido	5	5	5	5	5
<i>Step</i> lento	1	1	1	1	1
Helicoidal rápido	4	4	4	3	3
Helicoidal lento	2	2	2	4	4
<i>Brad</i> rápido	6	6	6	6	6
<i>Brad</i> lento	3	3	3	2	2

Apesar das pequenas diferenças nos valores é possível verificar que o parâmetro *Step* lento obteve os melhores resultados que nos valores obtidos da maquinagem.

A inconsistência que se nota nos parâmetros helicoidal rápido e lento e no *Brad* lento deve-se ao facto de se utilizar a área de furo nominal para o cálculo dos critérios e não a dimensão real do furo. Essas inconsistências estão presentes nos fatores *Drat* e *Fed*,

estes fatores têm em comum ser necessário utilizar a área do furo bem como a área de dano para o seu cálculo.

Tendo em consideração que na área do furo real o excesso de material removido é considerado dano, a classificação relativa fica diferente, sendo possível verificar essa diferença na tabela 21.

Tabela 21 Classificação relativa dos parâmetros tendo em conta a área real do furo

	Área do dano Completa Relativo	Raio circ env. Relativo	Fe Relativo	Drat Relativo	Fed Relativo
<i>Step</i> rápido	2	5	5	2	2
<i>Step</i> lento	1	1	1	1	1
Helicoidal rápido	4	4	4	4	4
Helicoidal lento	3	2	2	3	3
<i>Brad</i> rápido	6	6	6	6	6
<i>Brad</i> lento	5	3	3	5	5

Tendo em conta a área excessiva do furo como dano é de verificar que a inconsistência desaparece e que os fatores *Drat* e *Fed* dependem principalmente da área de dano e que o fator *Fe* depende apenas do raio da circunferência envolvente.

Mesmo assim é de verificar que a broca *Step* lento continua a ter a melhor classificação e a *Brad* rápido a pior.

É de notar que velocidades de avanço menores tendem a provocar fatores de delaminação menores como é referido na literatura. (22) (49)

É de voltar a lembrar que quando se refere a lento é referido à velocidade de avanço 0.05 mm/rot e rápido é referente a uma velocidade de avanço de 0.15 mm/rot.

4.1.3 Análise resultados Pin Bearing

Com a análise dos resultados obtidos no ensaio de *Pin Bearing* verificou-se que os parâmetros de maquinaria não altera de forma significativa a resistência dos provetes.

No Figura 82 é possível verificar que a diferença entre as tensões máximas estão dentro do desvio padrão de todos os parâmetros.

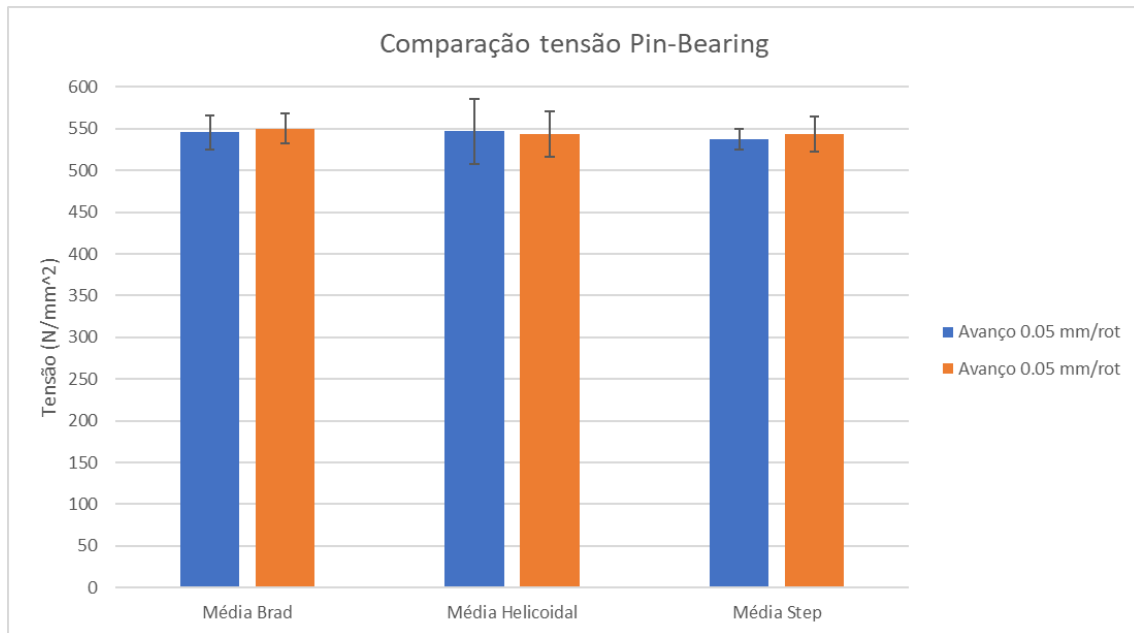


Figura 82 Comparação da tensão média do ensaio de Pin Bearing

Com esta comparação é possível concluir que este conjunto de parâmetros de maquinagem com as brocas selecionadas não afetam de forma significativa a resistência deste material ao ensaio de *Pin Bearing*.

Comparando os resultados com os resultados obtidos por Pedro Silva (50) (51) é possível verificar que a disposição da direção das camadas têm mais influência na resistência das placas do que os parâmetros de furação e as brocas utilizadas.

De acordo com a literatura seria de esperar verificar uma diminuição da resistência com o aumento da força axial durante a furação. (52)

4.1.4 Análise dos resultados do ensaio de Bearing

O ensaio de *Bearing* permitiu verificar que os resultados são bastante inconsistentes entre os diferentes parâmetros.

Comparando os diferentes parâmetros é possível reparar que não existe diferença entre a velocidade de avanço rápida e lenta para a broca *Step*.

Devido a problemas durante o ensaio apenas duas amostras de *Brad* rápido foi utilizado.

É de notar que a broca helicoidal possui a maior diferença entre a velocidade de avanço rápida e lenta.

A broca Helicoidal possui a maior resistência de todos os parâmetros quando maquinada com a velocidade de avanço lenta, mas a pior quando a velocidade de avanço é rápida.

De entre todas as brocas a que possui melhor resistência em média foi a *Brad*, a que possui os piores resultados foi a *Step*. A broca Helicoidal possui os resultados mais inconsistentes, como dito anteriormente possui o melhor resultado e o pior.

No Figura 83 é possível visualizar como os parâmetros afetam a tensão no resultado de *Bearing*.

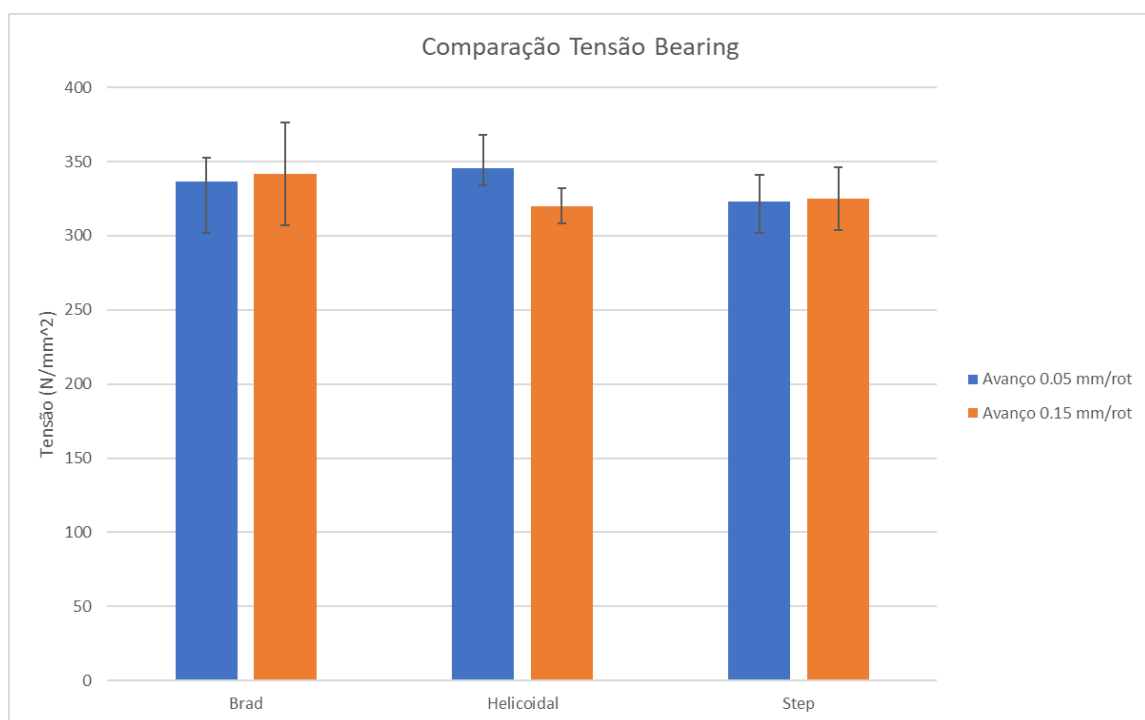


Figura 83 Comparação da tensão média do ensaio de Bearing

Foi verificado pela literatura que fatores de dano elevados podem provocar a diminuição da resistência a uma solicitação numa ligação mecânica. (53) Outro parâmetro que pode afetar a capacidade do material é a tolerância entre o suporte do ensaio e o provete a ser testado, a tolerância deve ser adequada de forma a evitar deslocamentos do provete durante o ensaio e garantir que as forças são aplicadas da forma pretendida. (53) Outro fator que também afeta a resistência é o binário com que o pino é apertado. (54) É referido pela literatura que quando a força de aperto é aumentada a sua resistência também tende a aumentar. (54)

É de lembrar que nesta dissertação o aperto foi efetuado de forma manual e sem o auxílio de ferramentas como recomendado pela norma seguida.

4.1.5 Análise dos resultados do ensaio de Tração

Depois de analisados os dados do ensaio de tração foi possível determinar que o material possui um módulo de elasticidade (E) de cerca 65 GPa, uma tensão de rotura (R_m) de 980 MPa e uma deformação de rotura (e_{rot}) de 4.9%.

É de salientar que o ensaio foi efetuado a 3 provetes e que um deles não teve rotura.

É de lembrar que as propriedades publicitadas para fibras a 0° foram módulo de elasticidade de 127.4 GPa, tensão de rotura de 2360 MPa e deformação de rotura de 1.70%.

Esta diferença de propriedades mecânicas, entre o material ensaiado e a *datasheet*, resulta da disposição da direção das fibras serem cruzadas nos provetes de teste, ao contrário de ser unidirecional como publicitado pelo fabricante. (55)

4.2 Propostas de Trabalhos Futuros

Depois de realizado o trabalho experimental que conduziu a esta dissertação é possível verificar-se que seria necessário desenvolver um método de modo a estabilizar o processo de radiografia garantido assim mais consistência nos resultados. Essa estabilização teria como objetivo permitir uma exposição à radiação igual por toda a superfície, evitando a descoloração ao longo da imagem (Fig.84).

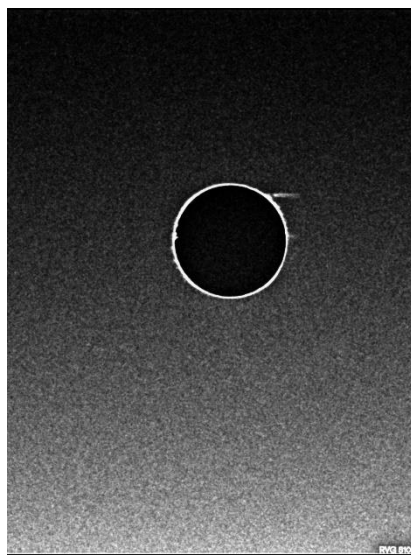


Figura 84 Exemplo de uma imagem em que a radiação não ocorreu de forma igual por toda a superfície

Era interessante avaliar o dano utilizando outros critérios como por exemplo o perímetro do dano.

Era necessário também analisar a Broca Step quando a velocidade de corte é constante e quando comparado ao método de utilização de furo piloto

Seria também interessante analisar as características dos furos utilizando os parâmetros aconselhados pelo fabricante das ferramentas, de modo a verificar se melhoram ou pioram como expressado na literatura.

Outra situação que seria interessante explorar é verificar como a tolerância do furo afeta o dano provocado pela furação bem como a sua resistência.

4.3 Conclusão

Esta dissertação tinha como objetivo analisar e quantificar os danos provocados pela furação de um laminado de carbono epóxi e posteriormente avaliar as características do material maquinado. Esta dissertação possuía também um objetivo secundário que era analisar a variação de força e de binário durante a furação para cada um dos parâmetros e brocas.

O objetivo principal deste trabalho foi cumprido.

Assim foi possível verificar que os parâmetros de maquinagem utilizados afetam, a qualidade do furo.

A qualidade do furo foi verificada através de um ensaio não destrutivo, radiografia com contraste.

Com este ensaio foi possível verificar como os parâmetros de furação bem como as brocas afetam a qualidade do furo.

Com este ensaio foi possível verificar que com o parâmetro de velocidade de avanço de 0.05 mm/rot a quantidade de dano foi sempre inferior comparando com a mesma ferramenta, mas com velocidade de avanço de 0.15 mm/rot.

Verificou-se também que a geometria da broca afeta a qualidade do furo sendo que a broca *Step* possui a melhor qualidade de furação.

A qualidade do furo foi avaliada com a aplicação de critério de dano.

Cada critério de dano tem em consideração parâmetros diferentes de modo a avaliar a qualidade, estes parâmetros são: área de dano, raio da circunferência envolvente do dano, área do furo e raio do furo.

Alguns critérios avaliam apenas as áreas ou os raios enquanto outros têm em consideração ambas.

Uma dificuldade desta avaliação é a determinação de forma precisa dos parâmetros necessários para os calcular.

Para determinar as áreas de delaminação foi utilizado um programa MatLab®.

Este *software* processa a imagem depois de convertida para uma escala de cinzentos e posteriormente converte para uma imagem binária onde é definida uma fronteira de dano. Para efetuar a conversão de imagem de escala de cinzentos para binário é preciso selecionar como escolher quais pixels são convertidos para preto e quais são convertidos para branco. Essa escolha é feita a partir de um nível de intensidade, esse nível tem o nome de *threshold* e varia entre 0 e 1.

Essa conversão da imagem para binário permite definir a fronteira entre a zona delaminada e a zona não afetada de forma concreta.

Uma vez definidas as diferentes zonas da placa, zona de furo, zona delaminada e zona não afetada, o programa define a área das diferentes zonas em pixels que poderão ser convertidas para o sistema métrico, uma vez, que a área de cada pixel é uma constante.

Conseguimos assim quantificar os dados.

Depois de quantificado o dano foi possível verificar se este afeta a resistência do furo ao suporte de cargas. Para isso foram utilizado ensaio destrutivos de *Bearing* e *Pin Bearing*.

Com o ensaio de *Pin Bearing* não se verificou diferenças significativas na resistência dos provetes furados com diferentes parâmetros, podemos então assumir que o dano provocado pela furação com a gama de parâmetros escolhidos não afetou a resistência deste material.

No ensaio de *Bearing* os resultados não foram tão consistentes como no ensaio de *Pin Bearing* mesmo assim é possível verificar que não existiu diferença significativa. Nas pequenas diferenças que existiu não seguiram nenhum padrão como verificado nas radiografias.

É de notar que a resistência do material no ensaio de *Pin Bearing* é significativamente superior aos do ensaio de *Bearing*. Essa diferença nas tensões é proveniente da forma como o ensaio é executado, no *Pin Bearing* é submetido à compressão enquanto no *Bearing* é submetido à tração.

O ensaio de tração foi efetuado de forma a determinar as propriedades do material base, não tendo sido verificado qualquer anomalia durante a execução nem nos resultados obtidos.

O objetivo secundário não foi cumprido na sua totalidade, apenas as forças axiais foram analisadas.

Devido a ser uma furação apenas as forças axiais foram tidas em consideração. O binário durante a maquinagem não foi possível analisar devido à sensibilidade da célula de carga utilizada e aos baixos valores verificados durante a operação de furação.

Da análise das forças axiais foi possível verificar que o aumento da velocidade de avanço provoca o aumento da força axial, verificou-se também que a redução a velocidade de corte também pode provocar o aumento da força axial.

Outro parâmetro que afeta de modo muito significativo a força axial é a geometria da broca devido à distribuição das forças pela ponta da broca.

A realização desta dissertação permitiu alargar e consolidar conhecimentos obtidos ao longo do mestrado e da licenciatura, nas áreas dos ensaios mecânicos, ensaios não destrutivos, maquinagem de peças e na área dos materiais compósitos. Forneceu uma experiência prática e elucidativa devido à utilização dos mais diferentes equipamentos. Permitiu verificar também que existe ainda muito para descobrir na área dos materiais

compósitos, no design de ferramentas otimizadas para os diferentes materiais bem como na maquinagem em geral sendo necessário uma aprendizagem constante e ao longo de toda a futura carreira que se avizinha. Apesar disso esta oportunidade ofereceu conhecimentos fundamentais que irão acompanhar-me no resto da minha vida profissional.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. *Drilling damage in composite material*. Durão, Luís Miguel P., et al. 5, s.l. : MDPI AG, 2014, Materials, Vol. 7, pp. 3802-3819. 10.3390/ma7053802.
2. Rolls-Royce. Rolls-Royce. *Rolls-Royce*. [Online] 09 de Janeiro de 2020. [Citação: 20 de Janeiro de 2020.] <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2020/09-01-2020-rr-opens-new-facility-in-bristol.aspx>.
3. Magalhães, Marcelo F. S. F. de Moura | Alfredo B. de Moraes | António G. de. *Materiais Compósitos*. s.l. : Publindústria, 2009, p. 382.
4. Hexcel Congratulates Boeing on the First Flight of the 777X. [Online] <https://www.hexcel.com/News/News-Releases/3174/hexcel-congratulates-boeing-on-the-first-flight-of-the-777x>.
5. Weaving a way to fusion energy | AMRC. [Online] <https://www.amrc.co.uk/news/weaving-a-way-to-fusion-energy>.
6. Teijin to Establish Teijin Automotive Center Europe to Expand Conceptual, Designing, Prototype and Evaluation Capabilities | News | TEIJIN. [Online] https://www.teijin.com/news/2020/20200128_2458.html.
7. Jones, Robert M. *MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS SECOND EDITION*. Virginia, Usa : Taylor & Fancis, 1999. 24061-0219.
8. Reddy Nagavally, Rahul. *COMPOSITE MATERIALS-HISTORY, TYPES, FABRICATION TECHNIQUES, ADVANTAGES, AND APPLICATIONS*. 2016. 978-93-86083-69-2.
9. T.D. Papathanasiou e D C Guell. *Flow-Induced Alignment in Composite Materials*. s.l. : Woodhead, 1997.
10. The Average Cost - Of a Formula 1 car in 2018 | Life Beyond Sport. [Online] <https://lifebeyondsportmedia.com/The-Average-Cost>.
11. Ramakrishna, S, et al. *Biomedical applications of polymer-composite materials: a review*. 2000.
12. Daniel, Isaac M. e Ishai, Ori. *Engineering mechanics of composite materials*. s.l. : Oxford University Press, 2006. p. 411. 9780195150971.
13. *Application of composite materials in modern constructions*. Pastuszak, Przemysław D. e Muc, Aleksander. 13 de 3 de 2013, Key Engineering Materials, Vol. 542, pp. 119-129. 10.4028/www.scientific.net/KEM.542.119.
14. Manuel Jorge Dores de Castro. *Termoplásticos Termoendurecíveis Plásticos Elastómeros Principais tipos de Polímeros*. ISEP. Porto : s.n., 2011.
15. Ali Alhashmy Saudi Aramco, Hasan. *Fabrication of Aluminium Matrix Composites (AMCs) by Squeeze Casting Technique Using Carbon Fiber as Reinforcement*. University of Ottawa. Ottawa : s.n., 2012.

16. *Experimental delamination analyses of CFRPs using different drill geometries*. Grilo, T. J., et al. 1, 2 de 2013, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 45, pp. 1344-1350. 10.1016/j.compositesb.2012.07.057.
17. *Drilling of composites and resulting surface integrity*. Brinksmeier, E., Fangmann, S. e Rentsch, R. 1, 2011, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 60, pp. 57-60. 10.1016/j.cirp.2011.03.077.
18. Tagliaferri, V, Caprinot, G e Diterlizzi, A. *EFFECT OF DRILLING PARAMETERS ON THE FINISH AND MECHANICAL PROPERTIES OF GFRP COMPOSITES*. 1990. pp. 77-84.
19. Singh, Prithpal, et al. Developments of non-conventional drilling methods—a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. s.l. : Springer, 1 de 1 de 2020. Vol. 106, 5-6, pp. 2133-2166. 10.1007/s00170-019-04749-0.
20. Fertl, W. H., Chilingar, G. V., & Robertson, J. O. Chapter 6 Drilling parameters. *Origin and Prediction of Abnormal Formation Pressures*. 2002, 6.
21. Magalhães Luis. *PROCESSOS DE FABRICO II TEXTO DE APOIO ÀS AULAS*. Isep. Porto : s.n., 2016.
22. *AVALIAÇÃO DE FERRAMENTAS PARA A FURAÇÃO DE LAMINADOS*. Durão, L M P, et al. 2013, *Mecânica Experimental*, Vol. 22, pp. 133-142. 1646-7078.
23. *Wet vs dry CFRP drilling: Influence of cutting fluid on tool performance*. Kerrigan, Kevin e Scaife, Richard J. s.l. : Elsevier B.V., 2018. *Procedia CIRP*. Vol. 77, pp. 315-319. 10.1016/j.procir.2018.09.024.
24. Bosh. *Drilling*. 2010. p. 76.
25. FISCH Brad Point Twist Drills | FINE TOOLS. [Online] <https://www.fine-tools.com/fisch-holzbohrer.html>.
26. Types of Drill Bits: Materials and Finishes | SARDCOSARDCO. [Online] <https://sardco.com/?product=types-of-drill-bits-materials-and-finishes&fbclid=IwAR3QSzsGvXIGVW27vtYFiFwaDg2gvjBEwnjlaH1xuvt0tFyLDci97zRxQLU>.
27. Masam. *Catalogue of Special Cutting Tools*. 2019. p. 15.
28. *Thrust and torque force analysis in the drilling of aramid fibre-reinforced composite laminates using RSM and MLPNN-GA*. Anarghya, A, et al. 2018, *Heliyon*, Vol. 4, p. e00703. 10.1016/j.heliyon.2018.
29. J. Paulo Davim. *Princípios da Maquinagem*. s.l. : Publindústria, 2008. p. 288. 9789728953249.
30. Different Types of Drill Bit Materials | AutoDrill. [Online] <http://www.drill-hq.com/2012/08/different-types-of-drill-bit-materials/>.
31. Drill Bit Material: What Are Drill Bits Made Out Of? [Online] <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/drill-bit-materials/>.
32. Victor Hugo C. de Albuquerque¹, João Manuel R. S. Tavares¹, Luís M. P. Durão². *Evaluation of Delamination Damages on Composite Plates using Techniques of Image Processing and Analysis and a Backpropagation Artificial Neural Network*. 2008.

33. *Correlation of drilling damage with mechanical strength: A geometrical approach.* Miguel Silva, Jorge, et al. s.l. : Elsevier Ltd, 1 de 12 de 2017, *Composite Structures*, Vol. 181, pp. 306-314. 10.1016/j.compstruct.2017.08.080.
34. *Evaluation of bore exit quality for fibre reinforced plastics including delamination and uncut fibres.* Voß, Robert, et al. s.l. : Elsevier Ltd, 1 de 1 de 2016, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Vol. 12, pp. 56-66. 10.1016/j.cirpj.2015.09.003.
35. *Damage assessment of fibre reinforced laminates.* Durão, Luís Miguel P., et al. s.l. : Elsevier Ltd, 1 de 12 de 2015, *Composite Structures*, Vol. 133, pp. 939-946. 10.1016/j.compstruct.2015.08.020.
36. *A review of non-destructive testing methods of composite materials.* Gholizadeh, S. s.l. : Elsevier B.V., 2016. *Procedia Structural Integrity*. Vol. 1, pp. 50-57. 10.1016/j.prostr.2016.02.008.
37. Kapadia, Ajay e Ltd, Twi. *National Composites Network Best Practice Guide Non Destructive Testing of Composite Materials.*
38. Prakash, R. *Non-destructive testing of composites.* 1980.
39. Durão, Luís Miguel Pereira. *Sebenta de Introdução à Engenharia I Ensaios Mecânicos.* Porto : s.n., 2016.
40. Zolin, Ivan. *Ensaios Mecânicos e Análises de Falhas.* Santa Maria-RS. 2011.
41. *Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates 1.* 2012, p. 32. 10.1520/D5961_D5961M-10.
42. *Bearing Failure of Bolted Composite Joints. Part I: Experimental Characterization.* Wang Hong-Sheng, Hung Chang-Li e Chang Fu-Kuo. 1996, *Journal of Composite Materials.*
43. CIT - Composite Materials Italy. CIT HS160 T700 ER450 36 Mechanical Properties. 2015. p. 1.
44. *A Theory Based on Conversion of RGB image to Gray image.* Kumar, Tarun e Verma, Karun. 2, s.l. : Foundation of Computer Science, 10 de 9 de 2010, *International Journal of Computer Applications*, Vol. 7, pp. 5-12. 10.5120/1140-1493.
45. Bangare, Sunil L, Dubal, Amruta e Bangare, Pallavi S. *Reviewing Otsu's Method For Image Thresholding.* 2015. pp. 21777-21783.
46. *Drilling tool geometry evaluation for reinforced composite laminates.* Durão, Luís Miguel P., et al. 7, 6 de 2010, *Composite Structures*, Vol. 92, pp. 1545-1550. 10.1016/j.compstruct.2009.10.035.
47. Liu, De Fu, Tang, Yong Jun e Cong, W. L. A review of mechanical drilling for composite laminates. *Composite Structures*. 3 de 2012. Vol. 94, 4, pp. 1265-1279. 10.1016/j.compstruct.2011.11.024.
48. *Characterization of the dry high speed drilling process of woven composites using Machinability Maps approach.* Rawat, Sanjay e Attia, Helmi. 1, 2009, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 58, pp. 105-108. 10.1016/j.cirp.2009.03.100.
49. Goncalves, D J S, et al. *Avaliação de Ferramentas na Furação de laminados Compósitos.* 2010.

50. Viana Da Silva, Pedro Emanuel. *ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DO DANO EM MATERIAIS COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA*. Isep. 2016.
51. Silva, Pedro, Matos, João E. e Durão, Luís M.P. Analysis of damage outcome in the strength of polymer composite materials. *Journal of Composite Materials*. s.l. : SAGE Publications Ltd, 1 de 2 de 2019. Vol. 53, 4, pp. 547-560. 10.1177/0021998318787855.
52. *Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: Part I - Effect of machining parameters*. Khashaba, U. A., et al. 3, 3 de 2010, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 41, pp. 391-400. 10.1016/j.compositesa.2009.11.006.
53. *Bearing strength and progressive failure analysis of the punched hole of CFRP under tensile loading*. Abdullah, M. S., et al. 5-8, s.l. : Springer London, 1 de 7 de 2018, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 97, pp. 2163-2171. 10.1007/s00170-018-2091-x.
54. Caprino, G, et al. *Pin-bearing strength of glass mat reinforced plastics*.
55. *Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aerospace applications: a review*. Aamir, Muhammad, et al. 5-6, s.l. : Springer, 1 de 12 de 2019, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 105, pp. 2289-2308. 10.1007/s00170-019-04348-z.
56. Bosh. Drilling Overview. 2010. p. 8.
57. An Introduction to Composite Materials | fugahumana - Human Flight. [Online] <https://fugahumana.wordpress.com/2012/07/03/an-introduction-to-composite-materials/>.
58. Best Recurve Bow :-Mongolian Traditional Horsebow 30-60LBS. [Online] <http://www.bestrecurvebowz.com/best-recurve-bow-mongolian-traditional/>.
59. What is the design lifespan of a motorized fiberglass boat? - Quora. [Online] <https://www.quora.com/What-is-the-design-lifespan-of-a-motorized-fiberglass-boat>.
60. Rolls-Royce Unveils Gen-Next Jet Engine Designs. [Online] <https://www.industryleadersmagazine.com/rolls-royce-unveils-gen-next-jet-engine-designs/>.
61. Dan Nevill | Flickr. [Online] <https://www.flickr.com/photos/dnevill/>.
62. Professional Epoxy Clear Casting Resin for Jewellery and Coatings up to 10mm Thick, Clear Resin for Crafts - Easy Composites. [Online] <https://www.easycomposites.co.uk/#!/resin-gel-silicone-adhesive/casting-resin/glasscast-10-clear-epoxy-casting-resin.html>.
63. SIGRAFIL® Carbon Fibers | SGL Carbon. [Online] <https://www.sglcarbon.com/en/markets-solutions/material/sigrafil-continuous-carbon-fiber-tows/>.
64. Mat • M2 Terrassa • Distribuidores de Fibra de Vidrio en Barcelona. [Online] <http://www.m2terrassa.com/productos/fibra-de-vidrio/mat/>.
65. What Is Twill Fabric? Definition and Characteristics of the Popular Twill Weave - 2020 - MasterClass. [Online] <https://www.masterclass.com/articles/what-is-twill-fabric-definition-and-characteristics-of-the-popular-twill-weave>.

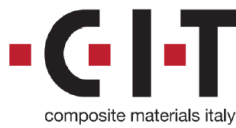
66. Geng, Daxi, et al. Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review. *Composite Structures*. s.l. : Elsevier Ltd, 15 de 5 de 2019. Vol. 216, pp. 168-186. 10.1016/j.compstruct.2019.02.099.
67. A Guide To Drill Bits | smartDIYer. [Online] <https://smartdiy.com/drill-bit-types/>.
68.Simple Guy, Simple Thoughts: Ultrasonic Testing - Probe Systems (Theory). [Online] <http://abloggermind.blogspot.com/2011/09/ultrasonic-testing-probe-systems-theory.html>.
69. Thermographic inspection of composites - Materials Today. [Online] <https://www.materialstoday.com/composite-applications/features/thermographic-inspection-of-composites/>.
70. *Infrared thermography to impact damaging of composite materials*. Boccardi, Simone, et al. [ed.] Tribikram Kundu. s.l. : SPIE, 2017. Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2017. Vol. 10170, p. 1017004. 10.1117/12.2261077.
71. EngArc - L - Tensile Test. [Online] http://www.engineeringarchives.com/les_mom_tensiletest.html.
72. *Digital Shearography for NDT: Phase Measurement Technique and Recent Developments*. Zhao, Qihan, et al. 12, s.l. : MDPI AG, 18 de 12 de 2018, Applied Sciences, Vol. 8, p. 2662. 10.3390/app8122662.
73. Compression Test | UL. [Online] <https://www.ultrac.com/en/solutions/test-methods/mechanical/compression-test.html>.
74. Radiography. [Online] <http://www.milinc.com/services/nondestructive-testing-ndt/radiography/>.
75. *Vibration suppression in multi-tool ultrasonic machining to multi-external and parametric excitations*. Kamel, M. M., El-Ganaini, W. A.A. e Hamed, Y. S. 3, 6 de 2009, Acta Mechanica Sinica/Lixue Xuebao, Vol. 25, pp. 403-415. 10.1007/s10409-009-0229-7.

ANEXOS

- 6.1 Ficha Técnica Carbono-Epóxi T700
- 6.2 Ficha técnica broca Helicoidal
- 6.3 Ficha técnica broca Step
- 6.4 Ficha técnica broca Brad
- 6.5 Ficha técnica do contraste da radiografia
- 6.6 Ficha técnica da célula de carga Kistler 9171A
- 6.7 Ficha técnica da máquina de radiografia Kodak 2100
- 6.8 Ficha técnica do sensor de radiografia Kodak 5100
- 6.9 Ficha técnica da máquina CNC HAAS VF-2

6 ANEXOS

6.1 Ficha Técnica Carbono-Epóxi T700



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

CIT HS160 T700 ER450 UD tape 36%

MECHANICAL PROPERTIES OF PREPREG LAMINATES

Test carried out on a UD ER450 TAPE – T700 Carbon Prepreg
(Standard cure cycle: 2 hours @ 135°C).

Cured Material Property	Unit	Actual Values
Tensile Modulus 0°	GPa	127.4
Tensile Strength 0°	MPa	2360
Tensile Strain	%	1.70
Compression Modulus 0°	GPa	113.9
Compression Strength 0°	MPa	1209
Flexural Modulus 0°	GPa	122.2
Flexural Strength 0°	MPa	1713
Inter-laminar Shear Strength	MPa	95.4
Cured Ply Thickness	mm	0.162

Laminates Cure condition: 2 hours @ 135°C

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

M-PDS R0

November 2015

6.2 Ficha técnica broca Helicoidal

GUHRING

Use this number when searching for this item:

9007300060000

Drill, 6mm, Stub, Type N, Carbide, Uncoated



>> Item Info

EDP #	9007300060000
Series	730
Order Code	6.000
Coating	Uncoated
Coolant Through	No
Cutting Direction	RH
Drilling Depth	Stub length
Material	Carbide
Point Angle	118°
Shank	Straight
Type	Type N
Tolerance	h7

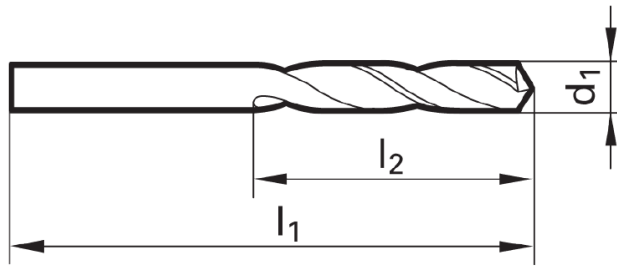
>> Features

- facet point grind
- main cutting edge form straight

>> Suggested Materials

- Aluminum
- Alloyed Steels
- Free Cutting Steels
- Tool Steels
- Stainless Steels
- Ti and Ti-alloys
- Cast Iron
- Brass
- Bronze
- Copper
- Magnesium
- Special Alloys
- Plastic
- Hardened Steels

>> Technical Specs



EDP #	Code No.	Cut Ø	Cut Ø	Cut Ø	Cut Ø	Shank Ø	OAL	Flute Length	Drilling Depth	Drilling Depth	Shank Type	Flutes
		d1	d1	d1	d1	d2	l1	l2	tmax	tmax		
		mm	inch	frac.	wire / letter	mm	mm	mm	mm	inch		
9007300060000	6.000	6.000	0.2362			6.000	66.00	28.00	19.00	0.748	Straight	2



WARNING:
This product contains Cobalt, a chemical known to the State of California to cause cancer. For more information go to www.P65Warnings.ca.gov

*** **DISCLAIMER:** Data on this PDF is subject to change at any time without notice.

6.3 Ficha técnica broca Step

GUHRINGNavigator data sheet 739

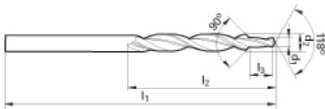


cutting rates

Feed

Master data

Description	Straight shank subland drills
Standard	Gühring standard
Surface finish	bright
Cutting direction	right hand
Tool material	Carbide
on shank	Straight
Coolant	none
Point angle	118°
Type	N
Tolerance zone	h9
Discount group	102



Dimensions

d1 [mm]	l1 [mm]	Flute length [mm]	No. of slots	Shank Ø d2 [mm]	shank length [mm]	Protruding length [mm]	LG-Stufe1 [mm]	D-Stufe1 [mm]	Größe
4.500	80	47	2	4.5	33	52	11.4	3.3	M 4
5.500	93	57	2	5.5	36	62	13.6	4.2	M 5
6.600	101	63	2	6.6	38	68	16.5	5	M 6
9.000	125	81	2	9	44	86	21	6.8	M 8
11.000	142	94	2	11	48	99	25.5	8.5	M10

6.4 Ficha técnica broca Brad

15/07/2020

Gühring Navigator

GUHRINGNavigator folha de dados 1149



Taxas de corte

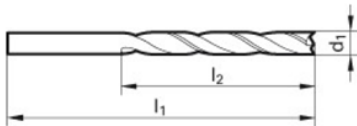
Grupo principal	Sub grupo	Dureza <=	Velocidade de corte V_c [m/min]	VRC
Plásticos	Fibra de aramida reforçada	1000 N/mm ²	150	1

Avanço

f_u [mm]	VRC
$d1$ [mm] <= 1	
2,5	0,025
3,15	0,032
4	0,04
5	0,04
6,3	0,05
8	0,063
10	0,08
12,5	0,08

Dados mestre

Descrição	Brocas Kevlar
Padrão	Norma Gühring
Acabamento superficial	brilhante
Direção de corte	à direita
Material da ferramenta	Metal duro
Na haste	reto
Refrigerante	nenhum
Tipo	N
Zona de tolerância	h8
Rabattgruppe	102



Dimensões

$d1$ [mm]	Gesamtlänge [mm]	Comprimento do canal [mm]	Número de rasgos	Haste \varnothing [mm]	Comprimento da haste [mm]	$d1$ [polegada]	Comprimento protuberante [mm]
2.380	43	14	2	2,38	29	3/32	19
2.500	43	14	2	2,5	29		19
2.780	46	16	2	2,78	30	7/64	21
3.000	46	16	2	3	30		21
3.200	49	18	2	3,2	31		23
3.570	52	20	2	3,57	32	9/64	25
4.000	55	22	2	4	33		27
4.500	58	24	2	4,5	34		29
4.760	62	26	2	4,76	36	3/16	31

<https://navigator.guehring.de/navigator/index.php?sorte=1149&mod=dat>

1/2

6.5 Ficha técnica do contraste da radiografia



Product Specification



Material	25633.186
Material description	Diiodomethane
Grade	AnalaR NORMAPUR for mineralogy
CAS Number	75-11-6
Molecular formula	CH ₂ I ₂
Molecular mass	267.84

Characteristics	Specifications
Assay (on anhydrous substance)	Min. 99.4 %
Stabilizer (Copper)	About 45 g/l
Acidity	Max. 0.003 meq/g
Density (20/4)	3.310 --> 3.322
Solidification point	5.0 --> 6.2 °C

Signature

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

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

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

For Professional use in Laboratory or Manufacturing. Not for use as an Active Pharmaceutical Ingredient or Food or Animal Feed. Suitability and intended use of the product remains the responsibility of the user.

VWR International LLC, Radnor Corporate Center, Building One, Suite 200, 100 Matsonford Road, Radnor, PA 19087, USA
VWR International bvba, Haasrode Research Park Zone 2020, Geldenaaksebaan 464, 3001 Leuven, Belgium

25633.186 - Page 1 / 1

6.6 Ficha técnica da célula de carga Kistler 9171A

4-component Dynamometer (RCD) – Rotating – for measuring large cutting forces in heavy machining, Type 9171A...

KISTLER
measure. analyze. innovate.

Advantages of a rotating Dynamometer

Employing a rotating dynamometer as a measuring tool offers a number of advantages to the user:

- The torque to be applied during the machining process is measured directly. This permits an accurate assessment of the condition of the tool, such as its state of wear
- The rotor of a rotating dynamometer rotates with the tool and allows the direct quantification of the mechanical load of the tool
- Thanks to the independence of workpiece mass, size and shape, the cutting force and torque of the cutting process can be measured on complex and cost-intensive components, e.g. structural parts of aircraft or Blisks (Blade Integrated Disc)

Technical data

Rotor Type 9171Axxx0

Speed, max.		min ⁻¹	12 000
Measuring range 1, nominal	F _x , F _y	N	-20 000 ... 20 000
	F _z	N	-30 000 ... 30 000
	M _z	N·m	-1 000 ... 1 000
Calibration range			in acc. with page 6
Sensitivity range 1	F _x , F _y	mV/N	≈0,48
	F _z	mV/N	≈0,3
	M _z	mV/N·m	≈8,75
Sensitivity range 2	F _x , F _y	mV/N	≈1,2
	F _z	mV/N	≈1,2
	M _z	mV/N·m	≈24
Sensitivity range 3	F _x , F _y	mV/N	≈4,8
	F _z	mV/N	≈4,8
	M _z	mV/N·m	≈96
Linearity		% FSO	≤±1,0
Hysteresis		% FSO	≤±1,0
Crosstalk	F _x ↔ F _y	% FSO	≤±2,0
	F _{x,y} → F _z	% FSO	≤±3,0
	F _z → F _{x,y}	% FSO	≤±1,0
	F _z → M _z	mN·m/N	≤±1
	M _z → F _z	N/N·m	≤±1
Natural frequency ¹⁾	f _{0, Fx,y}	Hz	≈1 100
	f _{0, Fz}	Hz	≈7 600
Natural frequency ²⁾	f _{0, Fx,y}	Hz	≈900
	f _{0, Fz}	Hz	≈5 800
Low-pass (anti-aliasing)		kHz	3,0
Low-pass filter type			6 pole, Butterworth
Sampling rate per channel		kHz	22,2
Resolution		bit	12
Operating temperature range		°C	0 ... 60
Degree of protection (IEC 60529)			IP67

Internal cutting fluid pressure, max.	bar	70
Balancing class	G	≤2,5
Weight (rotor only, without spindle adapter, without tool adapter)	kg	≈3,3
Weight Type 9171A151x (with attached spindle adapter HSK-A100 and tool adapter ER32) measured without tool and clamping nut	kg	≈7,2

¹⁾ Applies to Type 9171A150x (RCD with spindle adapter HSK-A100, without tool adapter)

²⁾ Applies to Type 9171A151x (RCD with spindle adapter HSK-A100 and tool adapter ER32) measured with collet, clamping nut, tool m_{tool} = 126 g

Signal conditioner Type 5238B...

Number of channels		4
Number of ranges per channel		3
Low-pass (adjustable)		
Cut-off frequency 1	kHz	0,1
Cut-off frequency 2	kHz	0,3
Cut-off frequency 3	kHz	1,0
Low-pass filter type		6 pole, Butterworth
Signal output FSO	V	±10
Connector signal output		4xBNC neg. D-Sub neg. 15 pin
Interface (for remote control)		RS-232C
Power supply	VAC	V
100 ... 240		
Tolerance	%	±10
Mains frequency	Hz	50 ... 60
Operating temperature range	°C	0 ... 60
Degree of protection (IEC 60529)		IP30
Dimensions WxHxD	mm	248x253x146
Weight (signal conditioner only)	kg	3,4

9171A_003-155d-08-19

Page 2/8

The information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes without advance notice. Liability for the consequential damages arising from the application of Kistler products is excluded.

© 2015 ... 2019 Kistler Group, Eulachstraße 22, 8408 Winterthur, Switzerland
Tel. +41 52 224 11 11, info@kistler.com, www.kistler.com. Kistler Group products are protected by various intellectual property rights. For more details visit www.kistler.com

6.7 Ficha técnica da máquina de radiografia Kodak 2100

TECHNICAL SPECIFICATIONS

X-ray generator:

300 kHz

Focal spot:

0.7 mm

Tube current:

60 kV

Mounting options:

Wall (horizontal right and left, vertical), ceiling, mobile, floor

3 arm lengths available:

Short (170 cm / 67 in.), Standard (188 cm / 74 in.), Long (205 cm / 81 in.)

2 types of timer:

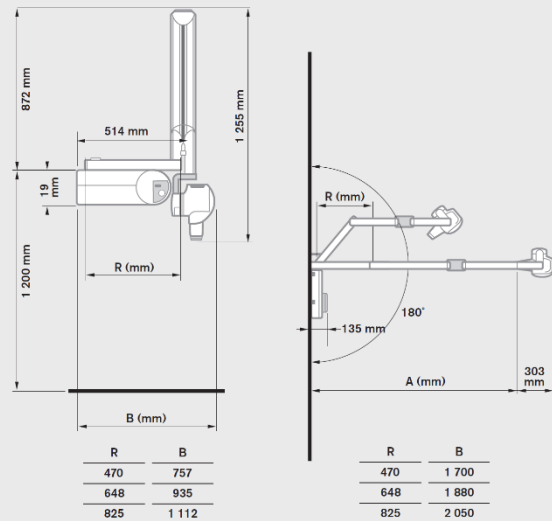
Dual-installation layout: remote (close to the unit or outside the treatment room) or integrated to the unit

Timer settings:

Manual time settings, film or digital mode

Options and accessories:

Synchronization link with Kodak RVG system, collimators (size A, B, C), long cone (30 cm / 12 in.)



© Eastman Kodak Company 2006.
Kodak, Insight and RVG are trademarks
of Eastman Kodak Company.

For more information,
contact: 1-800-944-6365
or visit www.kodak.com/dental

1488 03/20/06

6.8 Ficha técnica do sensor de radiografia Kodak 5100

TECHNICAL SPECIFICATIONS

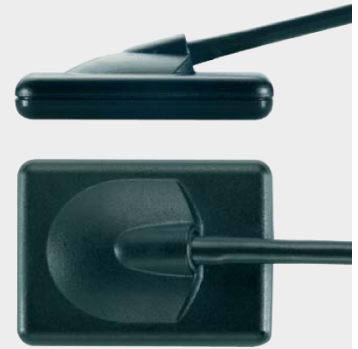
- True image resolution: 14 lp/mm
- Theoretical sensor resolution: 27.03 lp/mm
- Kodak sensor technology with optical fiber
- Connection: USB 2 – high speed

Size 1 sensor: all-purpose sensor providing the best compromise between ease of use and active area.

- Outside dimensions: 27.5 x 37.7 mm
- Dimensions of active area: 22 x 30 mm
- Matrix dimension: 1200 x 1600

Size 2 sensor: Designed with a larger surface - active area is 60% greater than size 1 sensor for Bite Wing images.

- Outside dimensions: 32.2 x 44.1 mm
- Dimensions of active area: 27 x 36 mm
- Number of pixels: 1440 x 1920



6.9 Ficha técnica da máquina CNC HAAS VF-2



Plano Parque Empresarial - Pavilhão 300/400
Rua de Batel - 4485-253 - Cuihabreu - Portugal
TEL. +351 229 351 850 FAX. +351 229 351 851
NIPC 505 109 379 EMAIL asales@asales.pt
EPS 41° 17'05,51" N 8° 37' 43,71" W

Características Técnicas Principais, VF-2

- Cursos XYZ de 762 x 406 x 508mm
- Monitorização da Carga da Ferramenta
- Cabina Envolvente Metálica
- Impulsor Vectorial (Estrela/Triângulo) 15kW/20CV
- Módulo de Roscado Rígido
- Lubrificação Automática
- Armazém Trocador Ferramentas de 20 Posições
- Árvore ISO 40 DIN69871-A ou BT 40
- Construção Robusta em Ferro Fundido
- 5 Funções M Livres
- Árvore de 10.000 rpm
- Chuveiro de Lavagem por Fluido de Corte
- Servo Motores de Avanços Fiáveis
- Pistola de Ar
- Sopros de Ar da Árvore
- Monitor TFT LCD de 15" (38cm)
- Extractor Transportador de Aparas
- Sistema de Fluido de Corte Generoso com Tanque de 208l
- Avanços Rápidos 25,4m/min.
- Botão de Libertação da Ferramenta
- 2 Anos de Garantia

Outras características incluídas:

- Cabina Sem Fugas de Fluido de Corte
- Estrutura da Base e Coluna Monobloco de Ferro Fundido Fabricada nos E. U. América
- Árvore com Arrefecimento a Líquido e Ventilação a Ar
- Acoplamento Directo dos Servo Motores
- Tabuleiro de Recolha do Fluido de Corte de Fácil Acesso e Destacável
- Árvore de Alta Eficiência e Precisão com Montagem Cartucho

www.sales.pt

AFTERSALES - Tecnologia de Maquinagem, Comércio e Serviços, S.A.