



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Mecânica**

**ISEL**



## **Caraterização do Dano Induzido por Furação em Materiais Compósitos Laminados**

**MARISA SOFIA FARIA ALVES**  
(Licenciada em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica Ramo de Manutenção e Produção

Orientador (es):

Doutora Maria Amélia Ramos Loja  
Doutora Inês de Carvalho Jerónimo Barbosa  
Doutor Ivo Manuel Ferreira de Bragança

Júri:

Presidente: Doutor José Augusto da Silva Sobral  
Vogais:

Doutor João Filipe de Almeida Milho  
Doutora Maria Amélia Ramos Loja

**Setembro de 2017**



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia Mecânica**

**ISEL**

## **Caraterização do Dano Induzido por Furação em Materiais Compósitos Laminados**

**MARISA SOFIA FARIA ALVES**  
(Licenciada em Engenharia Mecânica)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Mecânica Ramo de Manutenção e Produção

Orientador (es):

Doutora Maria Amélia Ramos Loja  
Doutora Inês de Carvalho Jerónimo Barbosa  
Doutor Ivo Manuel Ferreira de Bragança

Júri:

Presidente: Doutor José Augusto da Silva Sobral

Vogais:

Doutor João Filipe de Almeida Milho  
Doutora Maria Amélia Ramos Loja

**Setembro 2017**

## **Agradecimentos**

Finda a elaboração do trabalho final de mestrado, é de evidenciar a contribuição de todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concessão deste trabalho para com os quais demonstro aqui a minha gratidão e reconhecimento da sua intervenção.

Em especial à orientação e colaboração dos professores, Maria Amélia Loja, Inês Barbosa e Ivo Bragança que sem os quais a elaboração deste trabalho não seria possível e que sempre se encontravam predispostos a esclarecer qualquer dúvida, a repetir ensaios e a procurar formas de contornar os problemas implícitos das atividades experimentais.

Aqueles que lidam comigo no dia-a-dia, os quais sempre me encorajaram e acreditaram no meu trabalho proferindo palavras de incentivo.

Agradece-se aqui também, o apoio financeiro do projeto IPL/2016/*CompDrill*/ISEL - Previsão da variabilidade em materiais compósitos, induzida por operações de furação e o auxílio e disponibilidade do equipamento Raio-X por parte do Dr. André Caetano da Vetgilão.



## **Resumo**

Os materiais compósitos laminados com reforço de fibras longas, sob a forma unidirecional ou tecido, são utilizados em inúmeras aplicações que podem ir desde a conceção, a construção e a reparação de componentes e sistemas no âmbito das mais variadas indústrias.

Consoante o tipo de aplicação dos materiais compósitos, poderemos estar perante a necessidade de se recorrer a um processo de ligação que implique a necessidade de furação destes. Esta operação para além de fragilizar a zona onde é realizada, poderá provocar danos no laminado e em consequência acelerar a sua degradação até ocorrer falha.

Neste trabalho são estudadas diferentes técnicas de análise não destrutivas (digitalização passiva (*scan*), raio-X e termografia passiva) bem como diferentes condições de furação desde a furação de diferentes espessuras, furação com diferentes ferramentas utilizando os mesmos parâmetros, furação de diferentes tamanhos de fibra (fibra curta e fibra longa) e utilização de diferentes parâmetros de furação de modo a que se possa aferir em que condições o dano induzido é menor, tendo por base modelos matemáticos de quantificação do dano induzido pela furação de materiais compósitos.

**Palavras – Chave:** Compósitos laminados; Furação, Dano; Termografia; Raio-X; Processamento de imagem.



## **Abstract**

Laminated composites materials with long fiber reinforcement, in a unidirectional form or woven, are used in numerous applications ranging from the design, construction and repair of components and systems in the most varied industries.

Depending on the characteristics of the application, we may be facing a process of connection between components constructed with these materials, which imply the need to drill them. This operation, in addition to weakening the area where it is carried out, may cause damage to the laminate and consequently accelerate its degradation until failure occurs.

In this work, several drilling conditions are studied, from the drilling of different thicknesses, drilling with different tools using the same parameters, drilling of different types of fiber (short fiber and long fiber) and use of different drilling parameters in order to can verify under what conditions the induced damage is smaller using mathematical models of the quantification of the damage induced by the drilling of composite materials taking into account the images obtained through non-destructive analysis techniques (passive scanning, x-ray and passive thermography) during the drilling tests described in the present work.

**Key Words:** Laminated Composites; Drilling; Damage; Thermography; X-ray; Digital Image Processing.



## Lista de Símbolos e Abreviaturas

$A$	Área transversal;
$A_d$	Área delaminada;
AHT	Aquecimento anormal;
$A_{max}$	Área obtida com o $D_{max}$ da zona de dano;
BZT01	Fresa de com duas arestas de corte;
BZT03	Fresa com dez arestas de corte;
$D_{AVG}$	Área do furo;
$D_{MAR}$	Área danificada;
$D_{max}$	Diâmetro máximo;
$D_{RAT}$	Rácio de dano;
$D_0$	Diâmetro nominal do furo;
$\Delta T$	Variação da temperatura ao longo da espessura do lamiado;
$E_f$	Módulos de elasticidade da fibra;
$E_m$	Módulos de elasticidade da matriz;
$E_l, E_t$	Módulos de elasticidade;
$E_1$	Módulos de elasticidade longitudinal, na direção 1;
$E_2$	Módulos de elasticidade longitudinal, na direção 2;
$E_3$	Módulos de elasticidade longitudinal, na direção 3;
$\varepsilon$	Emissividade;
$\varepsilon_T$	Deformação transversal;
$\varepsilon_L$	Deformação longitudinal;
$F_{critica}$	Força crítica para ocorrer delaminação;
$F_{da}$	Fator de área delaminada;
$F_{daj}$	Fator de dano ajustado;
$F_d$	Fator de dano;

$G_{Ic}$	Taxa crítica de libertação de energia em modo I;
$G_{It}$	Módulo de corte;
$h$	Espessura a furar;
$IV$	Infravermelha;
$n$	Número de camadas do laminado;
$N_p(A_d)$	Número de pixéis correspondente à área delaminada;
$N_p(A_0)$	Número de pixéis correspondente à área do furo;
$N_p(D_{max})$	Número de pixéis correspondente ao diâmetro máximo;
NDT	Técnicas não destrutivas
$\nu_f$	Coefficiente de <i>Poisson</i> da fibra;
$\nu_m$	Coefficiente de <i>Poisson</i> da matriz;
$\nu_{lt}, \nu_{lt}$	Coefficientes de <i>Poisson</i> ;
$P_{ult}$	Carga limite;
$\overline{Q}_{ij}$	Coefficientes elásticos reduzidos transformados;
$\sigma$	Constante de <i>Stephan – Boltzmann</i> $\approx 5.67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ ;
SHT	Aquecimento de superfície;
$T$	Temperatura da superfície;
VHT	Aquecimento por unidade de volume;
$W$	Energia irradiada;
$W_e$	Energia emitida;
$W_r$	Energia refletida;
$W_T$	Energia transmitida;
$W_x$	Energia total;
$X$	Resistência longitudinal;
$Y$	Resistência transversal;
$z_k$	Espessura da camada k em relação ao plano médio da placa.

## Índice

Agradecimentos .....	i
Abstract.....	v
Capítulo 1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Relevância do tema.....	1
1.3 Estrutura do trabalho.....	2
1.4 Objetivos.....	3
Capítulo 2. Revisão Bibliográfica .....	5
2.1 Modelos matemáticos desenvolvidos .....	5
2.2 Influência de diferentes geometrias e parâmetros de furação no processo de furação de materiais compósitos.....	12
2.3 Análise do empilhamento na qualidade do furo .....	14
2.4 Morfologia do dano .....	15
Capítulo 3. Avaliação da Furação de Materiais Compósitos .....	21
3.1 Materiais compósitos .....	21
3.1.1 Processos de fabrico .....	22
3.1.2 Compósitos laminados.....	26
3.1.3 Estudo do comportamento Mecânico de uma Lâmina .....	28
3.1.4 Propriedades mecânicas de uma lâmina .....	29
3.2 Processo de Furação.....	31
3.3 Testes não destrutivos .....	35
3.3.1 Termografia .....	36
3.3.2 Raio-X .....	40
Capítulo 4. Desenvolvimento Experimental .....	43
4.1 Produção das placas de compósito de fibra de vidro por via húmida.....	43
4.2 Ensaios de furação .....	45

4.3	Metodologia de Análise das Imagens .....	49
4.4	Validação da parametrização das câmaras e metodologia de análise .....	56
Capítulo 5. Análise de Resultados.....		65
5.1	Avaliação qualitativa dos ensaios de furação .....	65
5.2	Digitalização passiva .....	70
5.3	Raio-X.....	84
5.4	Termografia .....	91
5.5	Combinação das três técnicas .....	97
Capítulo 6. Conclusões e Desenvolvimentos futuros.....		105
Bibliografia.....		109
Anexo A.....		112
Anexo B.....		123
Anexo C.....		127
Anexo D.....		131
Anexo E.....		135
Anexo F.....		139
Anexo G.....		143
Anexo H.....		145
Anexo I.....		149
Anexo J.....		153
Anexo K.....		157
Anexo L.....		161
Anexo M.....		165
Anexo N.....		167
Anexo O.....		171

## Índice de Figuras

Figura 1 - Ilustração das cargas existentes no processo de furação (adaptado de Ismail et al. (2017)) .....	8
Figura 2 - Representação esquemática do dano obtido e dados para a determinação do fator de dano (adaptado de İşIk & Ekici 2010) .....	9
Figura 3 - Influência do avanço: (a) na força axial de furação; (b) no fator de delaminação (Gonçalves 2011).....	13
Figura 4 – Dano obtido pela furação da placa com: (a) Fibras unidirecionais; (b) Empilhamento [0/90/0]s (Bhatnagar et al. (2004)). .....	15
Figura 5 - Morfologia do dano com profundidades de corte diferentes (adaptado de Wang et al. 2014).....	16
Figura 6 - Delaminação: (a) Oculta; (b) de saída na periferia do furo passante; (c) oculta (Wang et al. 2014). .....	17
Figura 7 - Furos obtidos com diferentes taxas de alimentação: (a) taxa de alimentação de 0.02mm/rot; (b) taxa de alimentação de 0.06mm/rot (adaptado de Wang et al. (2014)). .....	17
Figura 8 - Relação entre (a) variação do diâmetro do diâmetro do furo com profundidade e taxa de alimentação; (b) variação da força axial com a profundidade de corte (adaptado de Wang et al. (2014)). .....	18
Figura 9 - Processo de furação (a) com suporte; (b) sem suporte (adaptado de (Capello 2004)). .....	19
Figura 10 - Furo realizado: (a) Sem suporte; (b) Com suporte (Capello 2004) .....	19
Figura 11 - Temperatura média atingida no processo de furação sem sistema de refrigeração e com refrigeração externa e interna (adaptado de (Ramesh et al. 2015)). .....	20
Figura 12 - (a) Fibras unidirecionais; (b) Fibras multidirecionais/tecido (Sandvik Coromant 2010).....	21
Figura 13 - Esquema de um compósito sanduiche (adaptado de Materials & Company n.d.).....	22

Figura 14 - Representação esquemática da modelação por contacto (adaptado de Almeida (2012)).	23
Figura 15 - Representação esquemática da modelação por compressão (Almeida 2012).	24
Figura 16 - Representação esquemática da modelação por vácuo/Autoclave (adaptado de Gay et al. (2003)).	24
Figura 17 - Representação esquemática da modelação por RTM e SRIM (Compósitos 2014).	25
Figura 18 - Representação esquemática da modelação por revolução de componentes (adaptado de Gay et al. (2003)).	26
Figura 19 - Representação esquemática da modelação por pultrusão (adaptado de Gay et al. 2003).	26
Figura 20 – Empilhamento de camadas de um laminado (Gay et al. 2003).	27
Figura 21 - Ensaios mecânicos necessários para a caracterização mecânica de um laminado (Anon 1997).	31
Figura 22 - Representação esquemática das regiões de uma broca convencional (adaptado de Ismail et al. (2017)).	32
Figura 23 - Broca helicoidal (Rezende et al. 2016).	33
Figura 24 - Broca Brad (Makwana et al. 2015).	33
Figura 25 - Broca Dagger (Nicolau & Andrade 2013).	33
Figura 26 - Broca bidiametral (a) helicoidal; (b) dentes direitos (Gonçalves 2011).	34
Figura 27 - Representação da delaminação: a) à entrada; b) à saída (Vieira 2011).	35
Figura 28 - Modos de transferência de calor, (adaptado de Martin 1999).	37
Figura 29 - Tipos de aquecimento: (a) SHT; (b) VHT; (c) AHT (adaptado de Yang & He 2016).	39

Figura 30 - Imagens termográficas (a) Entalhe no painel de alumínio; (b) Delaminação entre duas camadas do remendo; (c) Superfície de saída do furo (delaminação à saída) (Avdelidis et al. 2003). .....	40
Figura 31 - Imagem Raio-X de uma placa de fibra de sisal (a) Tempo correto de imersão; (b) Tempo excessivo de imersão (Vieira 2011). .....	42
Figura 32 - Imagens Raio-X: (a) na placa sem furo; (b) placa com furo; (c) placa com furo com eliminação dos danos residuais (Silva et al. 2014). .....	42
Figura 33 - (a) Tecido de fibra de vidro; (b) Manto de fibra de vidro.....	43
Figura 34 – (a) Tecido de fibra de vidro; (b) Mistura de resina com o catalisador numa razão de 3 para 1; (c) Adicionar sobre a camada peel-ply camadas de fibra de vidro e pincelar com a mistura de resina e catalisador; (d) Colocação de pesos sobre a placa. ....	44
Figura 35 - Setup utilizado: (a) Câmara termográfica superior; (b) Câmara termográfica inferior; (c) Ferramenta; (d) Estrutura de suporte; (e) Provete.....	46
Figura 36 – (a) Ferramenta BZT01; (b) Ponta da ferramenta (fabricante BZT , referência 751 080060F).....	47
Figura 37 - (a) Ferramenta BZT03; (b) Ponta da ferramenta (fabricante BZT, referência 751070060F).....	47
Figura 38 - Ferramenta Dagger (fabricante: GANDTRACK; referência: GT-50-6.0 63089).....	48
Figura 39 - Ferramenta helicoidal (fabricante: SECO; referência:840060R050Z4.0) ...	48
Figura 40 - Conversão da (a) imagem original em (b) imagem binária. ....	50
Figura 41 - Imagem obtida após a aplicação do filtro FFT Bandpass. ....	51
Figura 42 - (a) Aplicação da ferramenta Thershold; (b) área do furo com a área de dano. ....	52
Figura 43 - (a) Fixação de um ponto a marcar o centro do furo; (b) Traçar linhas que passem pelo centro até encontrar o diâmetro máximo. ....	52

Figura 44 - Imagem termográfica do instante em que a temperatura máxima é atingida durante o processo de furação. ....	53
Figura 45 - (a) Propriedades RGB do ponto selecionado; (b) Ferramenta "Color Threshold"; (c) Evidência dos pixéis com as propriedades RGB definidas. ....	55
Figura 46 - Setup de verificação da parametrização das câmaras (a) Câmara superior; (b) Câmara inferior; (c) Ferro de Soldar. ....	57
Figura 47 - Frames do vídeo de arrefecimento do ferro de soldar utilizado para a validação da metodologia de determinação manual de temperatura (a) Frame 1; (b) Frame 2. ....	60
Figura 48 – Análise da temperatura na vizinhança do ponto 1 (a) furo efetuado com a ferramenta BZT01 na placa 10A; (b) furo 1 efetuado com a ferramenta helicoidal na placa 10A; (c) furo 2 efetuado com a ferramenta Dagger na placa 10A. ....	62
Figura 49 – Scan de dois furos efetuados com os parâmetros P1 na placa 10B com a ferramenta BZT03 (a) Furo 1; (b) Furo 4. ....	66
Figura 50 – Imagem obtida pela câmara superior no instante imediatamente após o recuo da ferramenta BZT03 aquando da furação do primeiro furo da placa 10B com os parâmetros P1. ....	67
Figura 51 – Influência do ponto de medição de temperatura na imagem adquirida pela câmara inferior: (a) Imagem original; (b) Seleção da área na imagem com o RGB correspondente à gama de temperatura a analisar (“color Threshold”); (c) Isolar a área a analisar; (d) Preenchimento/eliminação das linhas do indicador de temperatura conforme a sua vizinhança. ....	67
Figura 52 - Furo nulo realizado com a broca Dagger na placa 10A (a) À entrada da ferramenta; (b) À saída da ferramenta. ....	68
Figura 53 – (a) Furo realizado com a fresa BZT03; (c) Furo realizado com a broca helicoidal. ....	69
Figura 54 – Furo após eliminar o excesso superficial do fluído de contraste. ....	70
Figura 55 - Imagens Scan: (a) Placa 30A à entrada da ferramenta; (b) Placa 30A à saída da ferramenta; (c) Placa 20A à entrada da ferramenta (d) Placa 20A à saída da	

ferramenta; (e) Placa 10A à entrada da ferramenta; (f) Placa 10A à saída da ferramenta; (g) Placa 10B à entrada da ferramenta; (h) Placa 10B à saída da ferramenta; (i) Placa 10C à entrada da ferramenta; (j) Placa 10C à saída da ferramenta; (k) Placa 10M à entrada da ferramenta; (l) Placa 10M à saída da ferramenta.....	72
Figura 56 - Furos obtidos com os parâmetros P4 (a) À entrada do furo; (b) À saída do furo com a ferramenta BZT03 na placa 10B. ....	81
Figura 57 - Furos obtidos com os parâmetros P4 (ver Tabela 5) (a) À entrada do furo; (b) À saída do furo com a ferramenta Dagger na placa 10C.....	81
Figura 58 - Furos obtidos com os parâmetros iniciais, P0, (a) à entrada do furo; (b) à saída do furo com a ferramenta Dagger na placa 10M. ....	82
Figura 59 - Furos efetuados com a ferramenta Dagger (a) Furos 2 e 3 da placa 10A à entrada da ferramenta; (b) Furos 2 e 3 da placa 10A à saída da ferramenta; (c) Furos 1 e 2 da placa 10C à entrada da ferramenta; (d) Furos 1 e 2 da placa 10C à saída da ferramenta.....	83
Figura 60 - Imagens raio-X: (a) Placa 30A à entrada da ferramenta; (b) Placa 20A à entrada da ferramenta; (c) Placa 10A à entrada da ferramenta (d) Placa 10B à entrada da ferramenta; (e) Placa 10C à entrada da ferramenta; (f) Placa 10M à entrada da ferramenta.....	85
Figura 61 – Frame captado pela (a) Câmara superior; (b) Câmara inferior. ....	91
Figura 62 – Aparas que se acumulam em torno do furo durante o processo de furação. 92	
Figura 63 – Aprisionamento de aparas ao longo do curso da ferramenta BZT03.....	99



## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Principais técnicas de termografia NDT (adaptado de Yang & He 2016). ..	39
Tabela 2 – Caraterísticas dos provetes. ....	45
Tabela 3 – Caraterísticas da câmara termográfica inferior. ....	47
Tabela 4 – Caraterísticas e parâmetros de operação máximos das ferramentas utilizadas. .....	48
Tabela 5 - Parâmetros de furação utilizados nos ensaios. ....	49
Tabela 6 - Parâmetros utilizados para a furação dos furos 1 e 2 da placa 30A. ....	49
Tabela 7 – Metodologia de determinação da temperatura. ....	56
Tabela 8 - Processo de arrefecimento do ferro de soldar captado com a câmara inferior (CI) e com a câmara superior (CS). ....	58
Tabela 9 - Processo de arrefecimento do ferro de soldar captado com a câmara inferior (CI) e com a câmara superior (CS) parametrizadas com emissividade de 0.75 e 1 respetivamente. ....	59
Tabela 10 - Processo de arrefecimento do ferro de soldar captado com a câmara inferior (CI) e com a câmara superior (CS) utilizando o plástico de proteção da câmara inferior, ....	60
Tabela 11 - Valores de temperatura automáticos e analíticos. ....	61
Tabela 12 – Temperatura dos pontos na vizinhança do ponto 1 e respetivos desvios. ..	62
Tabela 13 - Análise da área de dano à entrada e saída dos furos realizados com a ferramenta BZT03 a partir das imagens scan. ....	73
Tabela 14 - Fatores de dano à entrada da ferramenta BZT03 determinados a partir das imagens scan. ....	74
Tabela 15 - Fatores de dano à saída da ferramenta BZT03. ....	75
Tabela 16 – Temperatura máxima atingida na face superior e inferior de placas com diferentes espessuras e diferentes tamanhos de fibra com a ferramenta BZT03. ....	93

Tabela 17 – Condições em que se obteve menores danos e temperaturas segundo cada técnica de análise não destrutiva. ....	97
Tabela 18 – Área de dano à entrada do furo determinada a partir das imagens e raio-X. ....	98

## Índice de Gráficos

Gráfico 1 - Variação dos fatores de dano com o aumento de espessura a furar.....	76
Gráfico 2– Variação dos fatores de dano induzido pela furação com a ferramenta BZT03 em placas com diferentes tamanhos de fibra. ....	77
Gráfico 3 - Variação dos fatores de dano induzido pela furação com a ferramenta Dagger em placas com diferentes tamanhos de fibra. ....	78
Gráfico 4 - Variação do fator de dano induzido pelas diferentes ferramentas na placa 10A. ....	79
Gráfico 5 - Variação do fator de dano induzido pelos diferentes parâmetros de furação (ver Tabela 5) na placa 10B com a ferramenta BZT03. ....	80
Gráfico 6 - Variação do fator de dano induzido pelos diferentes parâmetros de furação (ver Tabela 5) na placa 10C com a ferramenta Dagger. ....	80
Gráfico 7 - Variação dos fatores de dano com diferentes ferramentas numa placa de fibra curta. ....	82
Gráfico 8 - Comparação dos fatores de dano nos dois primeiros e últimos furos efetuados com a ferramenta Dagger. ....	84
Gráfico 9 – Variação dos fatores de dano com o aumento de espessura a furar. ....	86
Gráfico 10 - Variação dos fatores de dano induzido pela furação com a ferramenta BZT03 em placas com diferentes tamanhos de fibra. ....	87
Gráfico 11 - Variação dos fatores de dano induzido pela furação com a ferramenta Dagger em placas com diferentes tamanhos de fibra. ....	88
Gráfico 12 - Variação do fator de dano induzido pelas diferentes ferramentas na placa 10A. ....	89
Gráfico 13 - Variação do fator de dano induzido pelos diferentes parâmetros de furação na 10B com a ferramenta BZT03. ....	90
Gráfico 14 - Variação do fator de dano induzido pelos diferentes parâmetros de furação na 10C com a ferramenta Dagger. ....	90

Gráfico 15 - Comparação dos fatores de dano induzidos nos dois primeiros e últimos furos efetuados com a ferramenta Dagger. ....	91
Gráfico 16 - Temperatura máxima atingida durante a furação de fibra curta e fibra longa com a ferramenta BZT03 e Dagger. ....	94
Gráfico 17 - Temperatura máxima atingida durante a furação de fibra curta e fibra longa com a diferentes ferramentas. ....	95
Gráfico 18 - Temperatura máxima atingida no processo de furação da placa 10B com a ferramenta BZT03 utilizando diferentes parâmetros de furação (ver Tabela 5). ....	96
Gráfico 19 - Temperatura máxima atingida no processo de furação da placa 10B com a ferramenta Dagger utilizando diferentes parâmetros de furação (ver Tabela 5). ....	96
Gráfico 20 - Temperaturas atingidas á distância do raio máximo de dano e temperatura máxima atingida no processo de furação de cada furo na placa 10M com a ferramenta BZT03. ....	100
Gráfico 21 - Temperaturas atingidas á distância do raio máximo de dano e temperatura máxima atingida no processo de furação de cada furo na placa 10M com a ferramenta Dagger. ....	101
Gráfico 22 - Temperaturas atingidas á distância do raio máximo de dano e temperatura máxima atingida no processo de furação de cada furo na placa 10A com a ferramenta Helicoidal. ....	102
Gráfico 23 - Temperaturas atingidas á distância do raio máximo de dano e temperatura máxima atingida no processo de furação de cada furo na placa 10B com a ferramenta BZT03 e com os parâmetros P4 (ver Tabela 5). ....	103
Gráfico 24 - Temperaturas atingidas á distância do raio máximo de dano e temperatura máxima atingida no processo de furação de cada furo na placa 10B com a ferramenta Dagger e com os parâmetros P4 (ver Tabela 5). ....	104

## **Capítulo 1. Introdução**

Com o presente capítulo pretende-se fazer um enquadramento geral do presente trabalho, evidenciando a relevância deste estudo para a atualidade bem como os principais objetivos do mesmo seguido da enumeração sequencial do conteúdo desta dissertação.

### **1.1 Enquadramento**

Os compósitos constituem um dos mais interessantes grupos de materiais da nossa sociedade, sendo por isso que a sua aplicação em várias áreas da indústria tem vindo a ser cada vez mais frequente na medida em que permite a combinação de propriedades específicas, tal como a combinação do baixo peso e da elevada resistência, o que torna estes materiais ideais para aplicações em que estas características sejam desejáveis (*Gonçalves 2011*).

Este grupo de materiais requer especial atenção aquando da sua maquinaria devido à sua natureza anisotrópica, sensibilidade ao calor e fraca resistência a cargas de impacto que resultam em danos interlaminares tais como possíveis fraturas das fibras e descolamento fibra/matriz (*Amaro et al. 2012*).

O processo de furação é um dos processos de maquinaria que suscita maior preocupação quando aplicado a este tipo de material, uma vez que induz danos que influenciam as propriedades mecânicas destes materiais e nem sempre são detetáveis a olho nu. Posto isto, é importante serem estudados quais os parâmetros que induzem menor dano bem como as condições de furação mais adequadas.

### **1.2 Relevância do tema**

Nos últimos anos, os compósitos foram amplamente aplicados nas áreas da indústria aeronáutica, aeroespacial, de defesa e de transporte pelas suas excelentes propriedades tal como a alta resistência, alta relação rigidez-peso, alta capacidade de amortecimento e capacidade de *design* (*Zuo et al. 2015*).

A constante necessidade de montagem de componentes requer processos de furação, durante o qual ocorrem alguns danos, desencadeados pela anisotropia do material. ((*Gonçalves 2011*),(*Bhatnagar et al. 2004*),(*Işık & Ekici 2010*),(*Singh & Bhatnagar*

2006)). Esses danos afetam as propriedades mecânicas do material pondo em risco a fiabilidade<sup>1</sup> dos componentes tal como a diminuição da resistência à fadiga.

O processo de furação de compósitos tem sido alvo de investigação, pelo que esta é uma área de especial interesse na medida em que este processo é um dos processos mais utilizados para a ligação de materiais e quando aplicada a materiais compósitos põe em causa a sua integridade.

Na medida em que não é fácil obter as características que os materiais compósitos possuem com a aplicação de um só material, é importante que as consequências do processo de furação neste material sejam minimizadas tendo em consideração a importância destes dois aspetos.

Outros processos de ligação de materiais utilizados são a soldadura e a ligação por colas/adesivos. Num processo de soldadura a ligação dos componentes ocorre através da fusão parcial das partes a serem unidas, enquanto no segundo a ligação dos componentes é feita com a utilização de uma substância adesiva que sofre uma reação de endurecimento físico-químico, fazendo com que as peças se juntem através da aderência superficial (adesão) e a resistência interna (coesão) (*Rique et al. 2015*). A principal desvantagem da utilização destes dois processos ao invés do processo de furação é que a ligação torna-se numa ligação permanente ou dificilmente desmontável.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho encontra-se dividido em 6 capítulos e apresenta-se estruturado da seguinte forma:

**Capítulo I** – Enquadramento do tema realçando os principais aspetos sobre a sua relevância bem como a definição dos objetivos de análise a alcançar.

**Capítulo II** – Revisão bibliográfica onde são abordados os vários modelos matemáticos de quantificação de dano, a influência da utilização de diferentes geometrias de ferramentas e parâmetros de furação sobre materiais compósitos, a análise do empilhamento de camadas na qualidade dos furos efetuados e por fim a morfologia do dano causado pela furação deste tipo de materiais.

---

<sup>1</sup> Fiabilidade – capacidade de um bem cumprir com a sua função durante a sua vida útil.

**Capítulo III** – É apresentado, de forma resumida, o conceito de materiais compósitos e como se podem apresentar/classificar conforme a sua disposição estrutural seguindo ainda com a descrição dos processos de fabrico associados a estes materiais, dando especial atenção aos compósitos laminados, os quais são objeto de estudo neste trabalho, e análise do respetivo comportamento e propriedades mecânicas.

**Capítulo IV** – É feita a descrição de toda a atividade experimental efetuada, desde a produção das placas, ensaios de furação realizados, descrição da metodologia de análise das imagens e por fim a validação da parametrização das câmaras e metodologia de análise das imagens.

**Capítulo V** – Consta uma avaliação qualitativa dos ensaios anteriormente descritos, realçando aspetos relevantes para a compreensão da análise dos dados adquiridos em laboratório que fazem parte deste capítulo sendo apresentados primeiramente a análise da digitalização passiva seguida da análise raio-X e termográfica. Ainda neste capítulo, é apresentada uma análise que conjuga as técnicas de análise não destrutiva utilizadas.

**Capítulo VI** – Por fim, neste capítulo são apresentadas as conclusões e descrição de outros trabalhos futuros.

Os anexos referentes a este trabalho e enunciados ao longo do mesmo são apresentados após o capítulo VI.

## **1.4 Objetivos**

A presente dissertação tem como principal objetivo a caracterização do dano provocado por operações de furação em compósitos laminados de fibra de vidro com matriz polimérica, considerando para o efeito diferentes parametrizações tais como:

- Diferentes espessuras da placa de teste;
- Geometrias de brocas diferentes;
- Diferentes tamanhos de fibras (curta e longa);
- Diferentes velocidades de corte e avanço.



## Capítulo 2. Revisão Bibliográfica

### 2.1 Modelos matemáticos desenvolvidos

Com o intuito de antever o valor da força crítica, foram desenvolvidos modelos por diversos autores onde a principal diferença entre eles são as considerações assumidas no seu desenvolvimento.

Segundo Wang *et al.* (2014), Hocheng e Dharan desenvolveram um modelo analítico para determinar a força crítica para a ocorrência de delaminação com brocas helicoidais, tendo por base de que a delaminação trata-se de uma propagação de fissuras circulares entre camadas (Qi *et al.* 2014), e consideram que a força que a broca exerce sobre o material comporta-se como uma carga pontual, formulando a força crítica como se evidencia na equação (1).

$$F_{critica} = \pi \left[ \frac{8G_{Ic}Eh^3}{3(1-\nu^2)} \right]^{1/2} \quad (1)$$

Onde:

$F_{critica}$  - Força crítica para ocorrer delaminação;

$G_{Ic}$  – Taxa crítica de libertação de energia em modo de falha (modo I);

$E$  – Módulo de elasticidade;

$h$  - Espessura a furar;

$\nu$  – Coeficiente de Poisson.

Lachaud *et al.* (2001) apresentam dois modelos para o cálculo da força axial crítica, em que num deles consideram que a força aplicada se comporta como carga concentrada (equação (2)) e outro onde a mesma se comporta como carga distribuída (equação (3)).

$$F_{critica} = 8\pi \left[ \frac{2G_{Ic}D}{1 - \frac{D'}{8D}} \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$F_{critica} = 8\pi \left[ \frac{G_{Ic}D}{\frac{1}{3} - \frac{D'}{8D}} \right]^{1/2} \quad (3)$$

Onde:

$G_{IC}$  - Taxa crítica de libertação de energia em modo I;

$D$  – Determinado a partir da equação (4) com base nos coeficientes  $D_{11}$ ;  $D_{12}$ ;  $D_{22}$  e  $D_{66}$  da matriz de rigidez à flexão do laminado dados pela equação (6) segundo a aplicação da teoria clássica de placas;

$D'$  – Determinado a partir da equação (5) com base nos coeficientes  $D_{11}$ ;  $D_{12}$ ; e  $D_{66}$  da matriz de rigidez à flexão do laminado dados pela equação (6) segundo a aplicação da teoria clássica de placas.

$$D = \frac{1}{8}(3D_{11} + 2D_{12} + 4D_{66} + 3D_{22}) \quad (4)$$

$$D' = \frac{D_{11} + D_{12}}{2} + \frac{D_{12} + D_{66}}{3} \quad (5)$$

$$|D_{ij}| = \sum_{k=1}^n (\overline{Q}_{ij})_k \left( \frac{z_k^3 - z_{k-1}^3}{3} \right) \quad (6)$$

Onde:

$n$  – Número de camadas do laminado;

$z_k$  - Espessura da camada  $k$  em relação ao plano médio da placa;

$\overline{Q}_{ij}$  – Coeficientes elásticos reduzidos transformados dados pela equação (7).

$$\overline{Q}_{ij} = [T]^{-1}[Q][T] \quad (7)$$

Onde:

$[T]$  – É a matriz dada pela equação (8) a qual representa a matriz de transformação em que  $\alpha$  define o ângulo de orientação das camadas.

$[Q]$  - É a matriz dada pela equação (9) a qual representa os coeficientes elásticos que por sua vez são obtidos pela equação (10).

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \sin^2 \alpha & 2 \sin \alpha \cos \alpha \\ \sin^2 \alpha & \cos^2 \alpha & -2 \sin \alpha \cos \alpha \\ -\sin \alpha \cos \alpha & \sin \alpha \cos \alpha & \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Q_{11} = \frac{E_l}{1 - \nu_{lt}\nu_{tl}}$$

$$Q_{22} = \frac{E_t}{1 - \nu_{lt}\nu_{tl}} \quad (10)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{tl}E_l}{1 - \nu_{lt}\nu_{tl}} = \frac{\nu_{lt}E_t}{1 - \nu_{lt}\nu_{tl}}$$

$$Q_{66} = G_{lt}$$

Onde:

$E_l, E_t$ - Módulos de elasticidade;

$G_{lt}$  – Módulo de corte;

$\nu_{lt}, \nu_{tl}$  – Coeficientes de *Poisson*.

Em que os índices  $l$  e  $t$  dizem respeito à direção longitudinal e transversal respetivamente.

Recentemente *Ismail et al.* (2017) desenvolveram um modelo analítico também para determinar o valor da força crítica. Este modelo difere dos modelos enunciados anteriormente na medida em que admitem a coexistência de uma carga distribuída (nas arestas de corte) e de uma carga concentrada (na aresta transversal) Figura 1, formulando a força crítica como se apresenta na equação (11).

$$F_{Critica} = 12\pi \left( \frac{D_{22}}{D_{11}} \right)^{1/4} \sqrt{\frac{2D_c^*(D' + G_{lc})}{(16\gamma^2 + 2(1 - \gamma)^2)}} \quad (11)$$

Onde:

$D_{22}$  e  $D_{11}$  – Coeficientes da matriz de rigidez à flexão determinados pela equação (6);

$D_c^*$  – Parâmetro dado pela equação (12) associado à rigidez à flexão crítica;

$D'$  – Parâmetro dado pela equação;

$\gamma$  – Parâmetro dado pela equação (15) assumindo valores entre 0 e 1.

$$D_c^* = 2D_{11} + \frac{2}{3}(D_{12} + 2D_{66}) \left( \frac{D_{11}}{D_{22}} \right)^{1/2} \quad (12)$$

$$D' = (\overline{D_{11}} + \overline{D_{22}} + 2\overline{D_{12}} + 4\overline{D_{16}} + 4\overline{D_{26}} + 4\overline{D_{66}}) \Delta T^2 \quad (13)$$

Por sua vez:

$\Delta T$  – Variação da temperatura ao longo da espessura do lamiado;

$\overline{D_{ij}}$  – Determinados com base na equação (14) para  $i, j = 1, 2$  e  $6$ .

$$\overline{D_{ij}} = \sum_{k=1}^n \left( \frac{z_k^3 - z_{k-1}^3}{3} \right) (Q_{ij}^k \alpha_i^k \alpha_j^k) \quad (14)$$

$$\gamma = \frac{\alpha}{1 + \alpha} \text{ com } \alpha = \frac{P_c}{P_L} \quad (15)$$

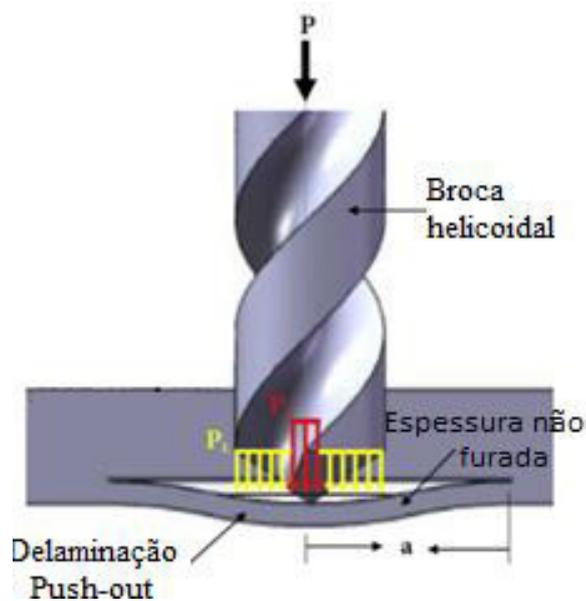


Figura 1 - Ilustração das cargas existentes no processo de furação (adaptado de Ismail et al. (2017))

Tendo em conta que a geometria da broca é um aspeto fundamental no processo de furação, desenvolveram uma expressão semelhante à expressão anterior (equação (11)) que permite antever o valor da força axial crítica tendo em conta o ângulo de ponta da broca ( $\beta$ ) (equação (16)) de modo a que se consiga eliminar a ocorrência de delaminação.

$$F_{critica} = 12\pi \left( \frac{D_{22}}{D_{11}} \right)^{1/4} \sqrt{\frac{2D_c^*(D' + G_{IC})}{(16\gamma^{2\beta} + 2(1 - \gamma^\beta)^2)}} \quad (16)$$

Com a aplicação deste modelo, é possível antever com maior precisão a força crítica.

O dano proveniente do processo de furação pode ser quantificado pelo quociente entre o diâmetro máximo de dano ( $D_{max}$ ) e o diâmetro nominal ( $D_0$ ) do furo, os quais se encontram representados na Figura 2, denominando-se por fator de dano ( $F_d$ ) (equação (17)), ((Işık & Ekici 2010), (Silva et al. 2014), (Durão et al. 2004)).

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_0} \quad (17)$$

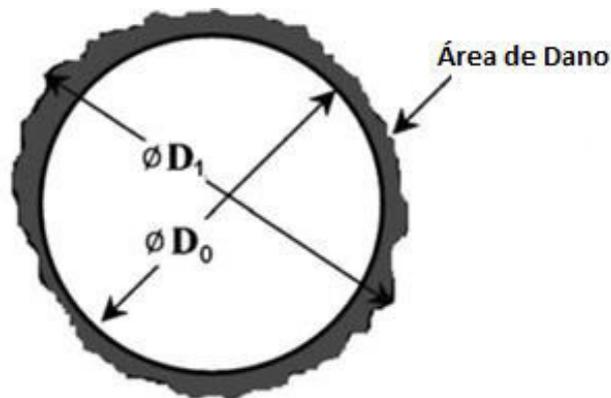


Figura 2 - Representação esquemática do dano obtido e dados para a determinação do fator de dano (adaptado de Işık & Ekici 2010)

Durão et al. (2004) estudaram a variação deste fator na furação de compósitos reforçados com fibra de carbono unidirecional, tendo concluído que havia uma relação aproximadamente linear entre a força axial durante o processo de corte e o valor do fator de delaminação. O fator de delaminação aumenta com o desgaste da ferramenta e varia com o material, para as mesmas condições de corte e material da ferramenta, nos diversos resultados obtidos para o fator de dano por este autor o valor variou entre 1 e 2.

Segundo *Durão et al.* (2004), *Metha et. al.* definiram um outro método de análise da qualidade do furo, o qual consiste no quociente entre a área danificada ( $D_{MAR}$ ) e a área do furo ( $D_{AVG}$ ), sendo denominado este fator por rácio de dano ( $D_{RAT}$ ) e expresso na equação (18).

$$D_{RAT} = \frac{D_{MAR}}{D_{AVG}} \quad (18)$$

Após surgirem novos fatores de quantificação do dano induzido pela furação em materiais compósitos, o fator de dano ( $F_d$ ) foi alvo de análise crítica por parte de vários autores, *Juan C. Campos et al.* (2007) verificaram experimentalmente que furos cujo fator de dano ( $F_d$ ) é idêntico, em virtude de possuírem o mesmo diâmetro máximo de dano ( $D_{max}$ ), apresentavam uma área de dano diferente.

Uma vez que se retiram conclusões distintas aquando da análise da área de dano e do fator de dano, estes autores defendem que um fator ideal para caraterizar a extensão do dano induzido pela furação é um fator que contemple não só o diâmetro máximo de delaminação como também a área delaminada.

*Ahn et al.* (2014) propuseram que a análise da qualidade do furo fosse feita segundo a determinação do fator de área de dano ( $F_{da}$ ) o qual é expresso matematicamente pela equação (19) na têm em conta que as áreas na imagem são proporcionais ao numero de pixéis apropriados.

$$F_{da} = 1 + \frac{N_p(A_d)}{N_p(A_0)} \quad (19)$$

Onde:

$N_p(A_d)$  –Número de pixéis correspondente à área delaminada;

$N_p(A_0)$ - Número de pixéis correspondente à área do furo;

Sendo o diâmetro máximo de delaminação ( $D_{max}$ ) e a área de delaminação ( $A_d$ ) dados pela equação (20) e (21) respetivamente.

$$D_{max} = D_0 \frac{N_p(D_{max})}{N_p(D_0)} \quad (20)$$

$$A_d = A_0 \frac{N_p(A_d)}{N_p(A_0)} \quad (21)$$

Onde:

$N_p(D_{max})$  – Número de pixels correspondente ao diâmetro máximo;

$D_0$  – Diâmetro nominal do furo.

Sabendo que a área de delaminação à entrada do furo é geralmente diferente da área de delaminação à saída, com o intuito de aproximar estas áreas, os autores utilizaram um suporte de acrílico na parte inferior do material aquando da furação.

Através da realização de vários ensaios com diferentes parâmetros, aquando da análise comparativa da zona de dano à entrada e saída do furo utilizando o fator de dano ( $F_d$ ) expresso na equação (17) e o fator de área de dano ( $F_{da}$ ) expresso na equação (19), concluíram que quanto maior for a velocidade de avanço, menores são estes fatores uma vez que diminui o tempo de aplicação da força de corte no material.

Como espetável, os fatores  $F_d$  e  $F_{da}$  à entrada e saída do furo foram semelhantes, uma vez que a utilização do suporte de acrílico impediu que as camadas inferiores se descolassem umas das outras pela ação da força axial exercida durante o processo de furação.

O fator de área de dano ( $F_{da}$ ) mostrou ser mais sensível e consistente que o fator de dano ( $F_d$ ), o qual é constante embora a área de dano seja significativamente diferente em torno do furo, mostrando assim que o fator de área de dano ( $F_{da}$ ) é mais adequado e útil para a avaliação do mesmo.

Na busca por um fator que tenha em consideração tanto o diâmetro máximo de delaminação bem como a área de dano em torno do furo, *Davim* (2007) propôs um fator denominado por fator de dano ajustado ( $F_{daj}$ ) o qual é constituído por duas partes, a primeira parte representa a contribuição do tamanho da fissura (fator de dano convencional ( $F_d$ )) e a segunda parte representa a contribuição da área de dano, sendo definido matematicamente pela equação (23).

$$F_{daj} = F_d + \frac{A_d}{(A_{max} - A_0)} (F_d^2 - F_d) \quad (22)$$

Onde:

$A_{max}$ - Área obtida com o  $D_{max}$  da zona de dano.

## **2.2 Influência de diferentes geometrias e parâmetros de furação no processo de furação de materiais compósitos**

A existência de várias geometrias de broca no mercado faz com que se obtenha furos com diferentes qualidades, pelo que este fator também é alvo de estudo na procura de qual a geometria mais indicada para a furação de compósitos.

Na furação de compósitos de matriz epoxídica reforçados com fibras de carbono, *Gonçalves et. al. (Gonçalves et al. 2011)* realizaram a monitorização do fator de delaminação e da força axial exercida durante o processo recorrendo a diferentes geometrias de ferramenta (broca helicoidal com ângulo de ponta de 85° e de 120°, broca *Brad*, broca bidiametral helicoidal e de dentes direitos) em carboneto de tungsténio utilizando três velocidades de avanço (0.02, 0.06 e 0.12 mm/rotação) e uma velocidade de rotação da ferramenta constante de 2800 rpm. Na Figura 3 encontram-se os resultados obtidos pelos autores, a partir dos quais se verifica um aumento da força axial, proporcional ao aumento da velocidade de avanço independentemente da geometria da ferramenta, como também que a diferença da força axial gerada por cada broca é maior quanto maior for a velocidade de avanço, onde se constata que ângulos de ponta menores correspondem a menores valores de força axial. Com os resultados obtidos é possível afirmar que a escolha de um avanço baixo permite reduzir a força axial bem como a delaminação à volta do furo.

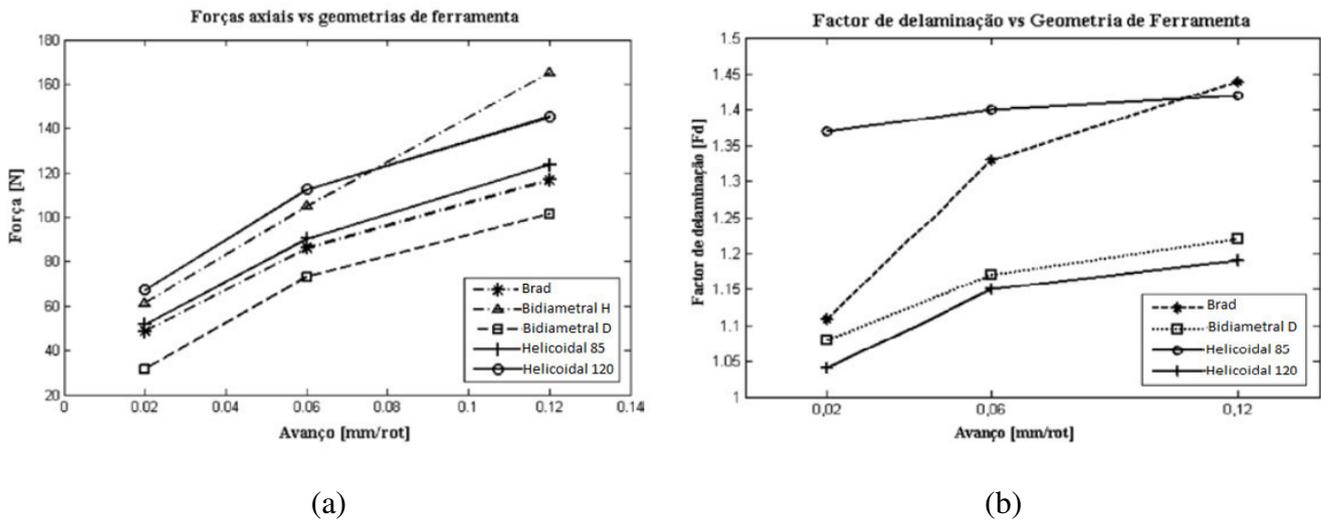


Figura 3 - Influência do avanço: (a) na força axial de furação; (b) no fator de delaminação (Gonçalves 2011).

Tendo em conta diferentes parâmetros de corte, *Samy & Kumaran (2017)* analisaram experimentalmente a influência destes sobre a temperatura desenvolvida durante o processo de furação, a força axial e a rugosidade da superfície utilizando ferramentas com ângulos de ponta de  $90^\circ$ ,  $118^\circ$  e  $135^\circ$ . Para monitorizar a temperatura desenvolvida no processo de furação utilizaram técnicas de medição com contacto que consiste na utilização de um termopar, o qual permite uma aquisição de dados contínuos e é usualmente colocado na interface ferramenta/peça bem como no orifício da broca que se destina à passagem do fluido refrigerante, e técnicas de medição sem contacto que consiste em técnicas de termografia. A força axial e a rugosidade são analisadas com recurso a um dinamómetro e a um perfilómetro, respetivamente.

Estes autores concluíram que o aumento da temperatura era proporcional ao aumento dos parâmetros operacionais. Este aumento, influencia a extração e geometria da apar, o desgaste da ferramenta e a rugosidade da superfície e, por sua vez, a força axial influencia diretamente o desgaste da ferramenta. Assim sendo, a seleção das condições de entrada adequadas é essencial para minimizar os defeitos e melhorar a vida útil da ferramenta.

Neste estudo verificou-se ainda que o aumento do ângulo de ponta da broca reduz a força axial exercida sobre a peça de trabalho quando esta opera em condições de velocidade do fuso mais elevadas (2800 rpm) e velocidade de avanço baixa (0.1 mm/rev). Aquando da análise da qualidade do furo tendo em conta o fator de dano ( $Fd$ ), os autores obtiveram resultados contraditórios, sendo que a broca com ângulo de ponta de  $90^\circ$  produziu furos com fatores de delaminação menores que as restantes brocas.

Outra conclusão deste estudo foi que o aumento da taxa de alimentação conduz ao aumento da rugosidade da superfície, embora a utilização de velocidades do fuso e ângulos de ponta mais elevados tenha produzido superfícies de melhor qualidade.

Também com o intuito de analisar o comportamento de diferentes geometrias na furação de materiais compósitos, *Rezende et. al. (Rezende et al. 2016)* realizaram estudos sobre o efeito da furação com diferentes geometrias da broca e da existência de furos piloto<sup>2</sup> na força axial e na altura das aparas geradas pela furação de material compósito de sanduíche de alumínio. Neste caso, os autores concluíram que a existência de um furo piloto na furação conduz a um melhor desempenho no que diz respeito à força axial embora este promova a deformação plástica, a qual influencia negativamente o tamanho das aparas. No entanto, foram obtidas aparas menores aquando da furação com a broca *Brad*.

### **2.3 Análise do empilhamento na qualidade do furo**

A orientação das camadas do laminado é também alvo de estudo no contexto da avaliação da qualidade do furo. De destacar neste âmbito, o trabalho publicado por *Bhatnagar et al. (2004)* que realizaram ensaios de furação utilizando dois provetes de fibra de vidro, um com o empilhamento de  $[0/90/0]_s$  e outro com fibras unidirecionais.

Os autores verificaram que a zona de dano na placa com fibras unidirecionais tem forma elíptica com o eixo maior da elipse aproximadamente no sentido das fibras (Figura 4 (a)). Relativamente à placa com o empilhamento de  $[0/90/0]_s$  a zona de dano é claramente menor que a zona de dano da placa unidirecional, sendo que nesta a área de dano é aproximadamente circular pelo que se encontra em redor da periferia do furo como se evidencia na Figura 4 (b).

---

<sup>2</sup> Furo inicial com menores dimensões que o furo final.

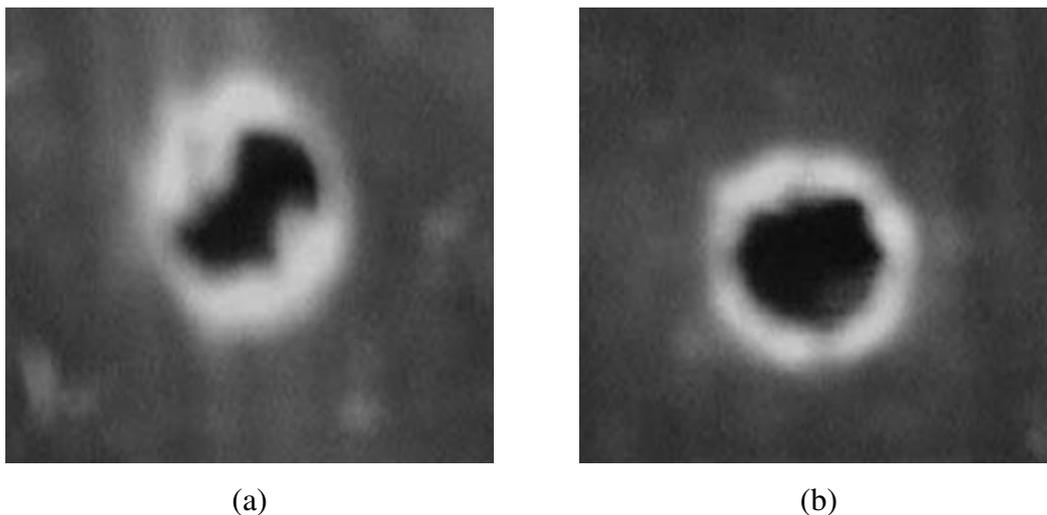


Figura 4 – Dano obtido pela furação da placa com: (a) Fibras unidirecionais; (b) Empilhamento  $[0/90/0]_s$  (Bhatnagar et al. (2004)).

## 2.4 Morfologia do dano

Wang et al. (2014) estudaram a morfologia do dano tendo por base o modelo da força crítica formulado por Hocheng e Dharan, já referido anteriormente. Wang et al. (2014) realizaram experimentalmente vários furos com nove penetrações diferentes na mesma placa de fibra de carbono com matriz epoxídica de 3.1mm de espessura e com os mesmos parâmetros de furação à exceção da taxa de alimentação a qual foram aumentando a cada furo efetuado.

Nesses ensaios, Wang et al. (2014) utilizaram um dinamómetro para medir a força axial exercida pela broca na placa e um microscópio para observar de forma pormenorizada a entrada e saída da broca na placa e medir a delaminação.

Após a realização dos ensaios, obtiveram as imagens que se apresentam na Figura 5, e que evidenciam o comportamento do material à furação com profundidades de corte distintas, sendo posteriormente modelada a morfologia do dano num *Software* de desenho tridimensional.

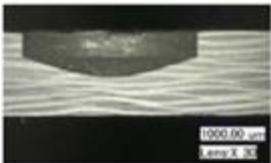
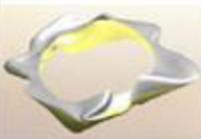
Profundidade de furação (mm)	Morfologia do dano	Delaminação	Profundidade de furação (mm)	Morfologia do dano	Delaminação
2.1		Sem dano	2.5		Sem dano
2.9		Sem dano	3.3		
3.7			4.1		
4.5			4.9		
5.3					

Figura 5 - Morfologia do dano com profundidades de corte diferentes (adaptado de Wang et al. 2014).

Por análise das imagens obtidas, verifica-se que para profundidades de corte baixas não ocorre dano, pois a força axial é menor que a resistência interlaminar do material, quando a profundidade ultrapassa mais de metade da espessura do material, a coesão deste diminui e conseqüentemente o valor da força crítica também diminui sendo ela menor que a força axial exercida, conduzindo por isso à ocorrência de dano, o mesmo acontece para os furos passantes. Foi ainda possível constatar que as furações com profundidade superior à espessura da placa promovem a eliminação da delaminação visível à saída embora possa haver delaminação oculta. Por isso é necessário efetuar sempre uma correta avaliação dos furos efetuados de modo a detetá-la caso haja.

Nas imagens apresentadas na Figura 6, constata-se a ocorrência de delaminação com diferentes morfologias, sendo perceptível alguma semelhança entre a Figura 6 (a) e a Figura 6 (c). Ambas evidenciam delaminação oculta embora tenham uma extensão do dano diferente. Na Figura 6 (b) observa-se a ocorrência de delaminação à saída, facilmente detetável a olho nu.

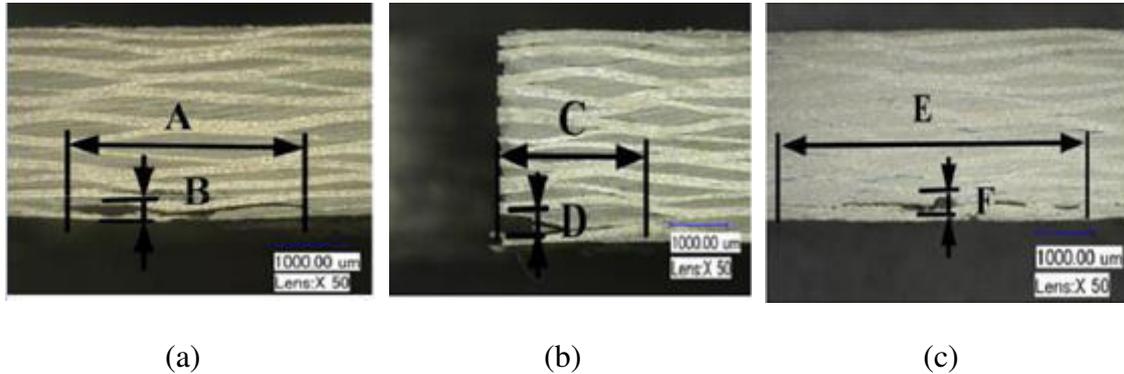


Figura 6 - Delaminação: (a) Oculta; (b) de saída na periferia do furo passante; (c) oculta (Wang et al. 2014).

Através da análise da qualidade dos furos obtidos com velocidades de avanço distintas concluíram que quanto maior for a velocidade de avanço pior é a qualidade da parede do furo. Na Figura 7, pode observar-se que o furo efetuado com uma taxa de alimentação de  $0.02\text{mm/rot}$  apresenta melhor qualidade que o furo efetuado com o avanço de  $0.06\text{mm/rot}$ .

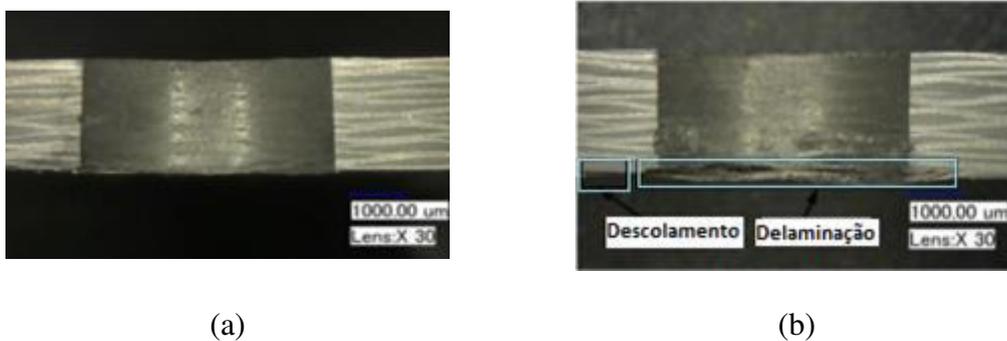


Figura 7 - Furos obtidos com diferentes taxas de alimentação: (a) taxa de alimentação de  $0.02\text{mm/rot}$ ; (b) taxa de alimentação de  $0.06\text{mm/rot}$  (adaptado de Wang et al. (2014)).

Após a furação, Wang et al. (2014) realizaram a medição do diâmetro dos furos ao que constataram que o diâmetro seria inferior ao diâmetro da broca utilizada, tal facto deve-se ao fenómeno de retração do material após o recuo da broca Figura 8 (a).

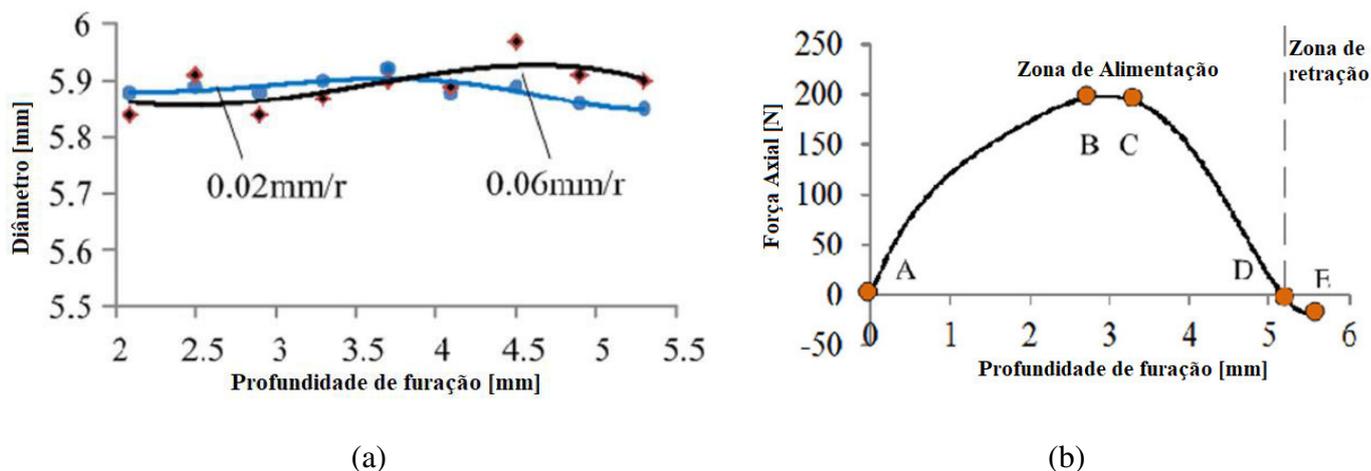


Figura 8 - Relação entre (a) variação do diâmetro do diâmetro do furo com profundidade e taxa de alimentação; (b) variação da força axial com a profundidade de corte (adaptado de Wang et al. (2014)).

A força axial não é constante ao longo da furação. Inicialmente aumenta com a profundidade até ultrapassar cerca de metade da espessura do material a partir da qual sofre uma diminuição especialmente quando se trata de um furo passante cujo avanço da ferramenta é superior à espessura do material a furar. Quando isto ocorre, a retração que o material sofre elimina o dano na periferia do furo, o que não significa que elimine totalmente o dano (Figura 8 (b)).

Com o intuito de aumentar o valor da força crítica de furação e conseqüentemente diminuir a probabilidade de ocorrência da delaminação, alguns autores testaram vários métodos. Capello (2004) comprovou que a utilização de um suporte sob o provete durante o processo de furação pode reduzir drasticamente a ocorrência da delaminação embora a força axial exercida na furação com suporte seja maior que a força axial exercida na furação sem suporte. Este fato permite concluir que o mecanismo da delaminação decorrente da furação com suporte difere do mecanismo da delaminação decorrente da furação sem suporte.

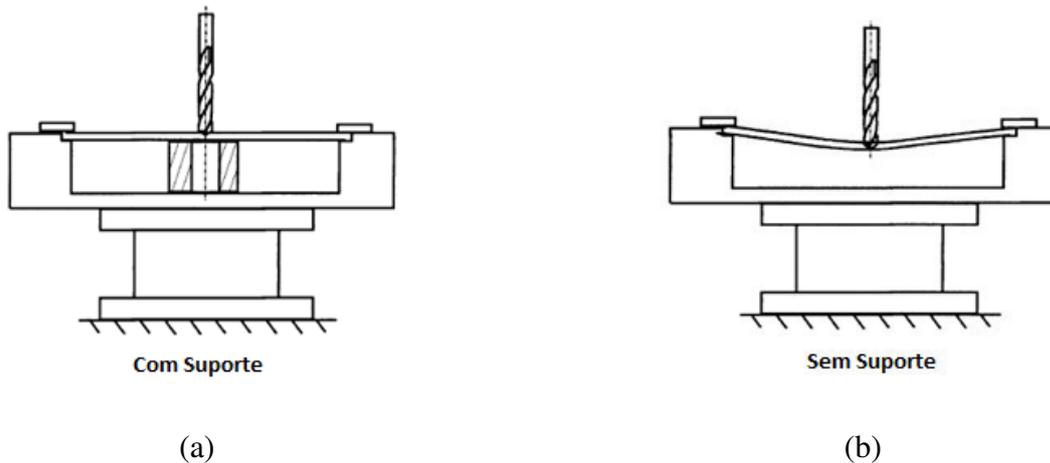


Figura 9 - Processo de furação (a) com suporte; (b) sem suporte (adaptado de (Capello 2004)).

Na representação esquemática visível na Figura 9 (b) representa-se a deformada transversal que o material sofre aquando da furação sem suporte produzindo furos com má qualidade como se pode ver na Figura 9 (a). Esta deformada contribui para que ocorra descolamento das camadas inferiores. Já na furação com suporte (Figura 8 (a)), este faz com que ocorra uma reação de valor igual à força axial exercida pela broca eliminando assim a flexão do material, aumentando a força necessária ao processo de furação e produzindo furos de melhor qualidade embora não sejam livres de delaminação como se evidencia na Figura 10 (b).

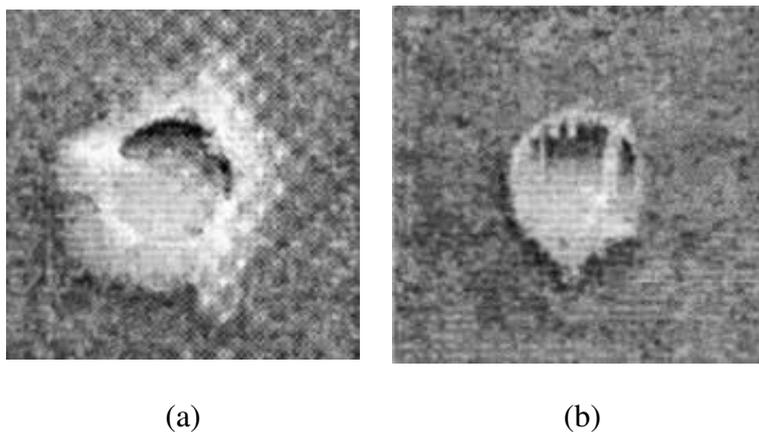


Figura 10 - Furo realizado: (a) Sem suporte; (b) Com suporte (Capello 2004)

Com o intuito de determinar qual o sistema de refrigeração mais eficiente que permitirá obter temperaturas mais baixas durante o processo de furação bem como menores fatores de dano *Ramesh et al. (2015)* monitorizaram a temperatura máxima atingida na furação de um compósito de fibra de vidro epoxídica sem refrigeração e com refrigeração interna e externa, tendo obtido os resultados médios apresentados na Figura 11.

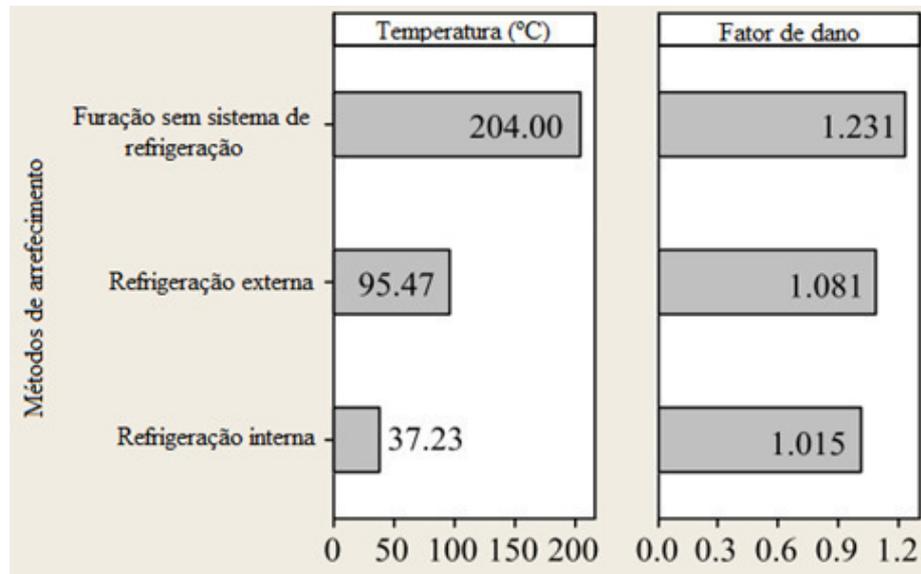


Figura 11 - Temperatura média atingida no processo de furação sem sistema de refrigeração e com refrigeração externa e interna (adaptado de (Ramesh et al. 2015)).

Através da Figura 11, constata-se que com a utilização de refrigeração interna atingem-se temperaturas mais baixas durante a furação bem como se obtém furos com fator de dano menor.

## Capítulo 3. Avaliação da Furação de Materiais Compósitos

### 3.1 Materiais compósitos

Um material compósito resulta da combinação macroscópica de dois ou mais materiais ou fases com propriedades físico-químicas nitidamente distintas com a finalidade de se obter materiais com propriedades inalcançáveis individualmente (*Materials & Company n.d.*). Para que seja designado por compósito, os materiais constituintes devem ser imiscíveis<sup>3</sup> e quimicamente compatíveis.

Estes materiais contêm na sua constituição duas fases, uma fase contínua denominada por matriz, que pode ser de natureza polimérica, orgânica, cerâmica ou metálica e cuja principal função é proteger o material de ataques químicos, conferir forma e manter as camadas juntas e uma fase descontínua denominada por reforço que podem ser partículas ou fibras, e cuja principal função é fornecer tenacidade ao material atuando como materiais estruturais para sustentar carregamentos uma vez que têm maior rigidez que a matriz (*Rique et al. 2015*).

Os compósitos são classificados consoante a natureza da matriz bem como segundo o tipo de reforço, podendo ele ser de partículas ou de fibras, as quais podem ser longas ou curtas. As fibras contínuas/longas podem ainda denominar-se por unidirecionais caso se encontrem orientadas numa só direção, Figura 11 (a), ou multidirecionais/tecido caso se encontrem conforme é apresentado na Figura 12 (b) (*Compósitos 2014*).

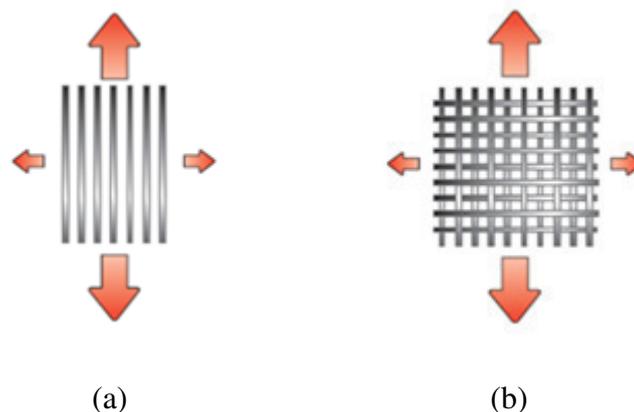


Figura 12 - (a) Fibras unidirecionais; (b) Fibras multidirecionais/tecido (*Sandvik Coromant 2010*).

---

<sup>3</sup> Imiscíveis – materiais que ao se misturarem mantêm a sua individualidade.

Os materiais compósitos com reforço de fibras longas, tecidos, possuem uma resistência constante em todas as direções e apresentam uma probabilidade menor de ocorrência de defeitos aquando da sua manipulação (*Sandvik Coromant 2010*).

As fibras curtas destinam-se a aplicações nas quais se pretende propriedades mecânicas semelhantes nas diferentes direções, já as fibras longas conferem melhores características na direção longitudinal das fibras.

É importante conhecer-se a disposição, o tamanho das fibras e o empilhamento das camadas do compósito uma vez que estes fatores influenciam o comportamento do material e definem em que áreas devem ser implementados.

Um tipo de materiais compósitos também utilizado com alguma frequência na indústria e que é estruturalmente diferente daqueles que se falou anteriormente, é o compósito sanduíche, o qual é constituído por duas lâminas de um determinado material e um núcleo o qual pode ou não ser ligado as laminas por intermédio de um adesivo, como se pode observar na Figura 13.

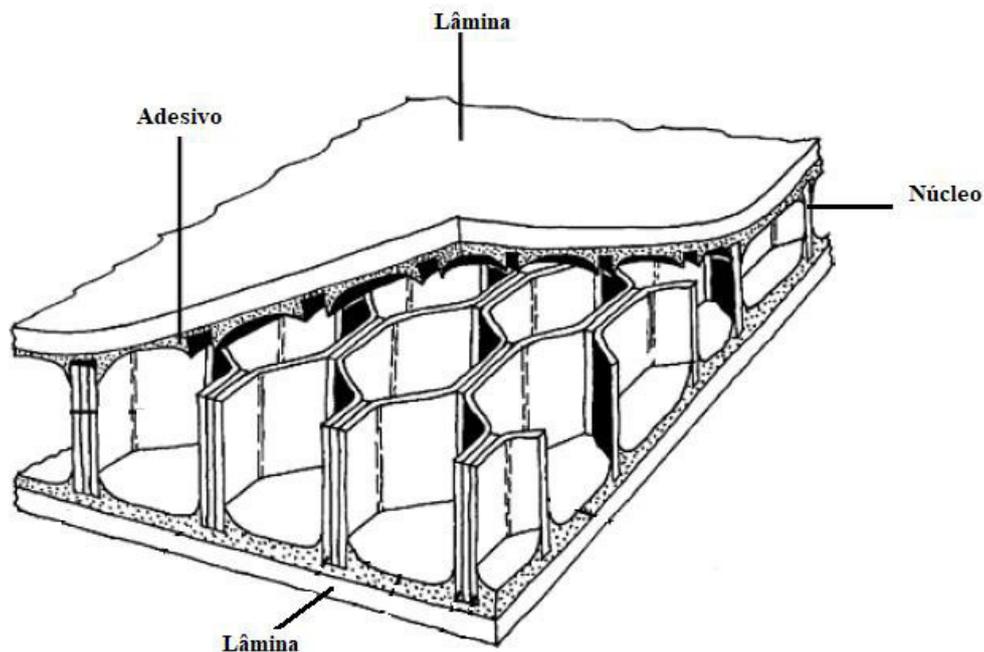


Figura 13 - Esquema de um compósito sanduíche (adaptado de *Materials & Company n.d.*).

### 3.1.1 Processos de fabrico

A este tipo de materiais encontram-se associados diversos processos de fabrico que por sua vez também influenciam as propriedades finais do compósito. Estes processos devem

ser realizados de forma cuidada visto que podem haver danos induzidos durante o seu processo de fabrico (Chaki et al. 2015). Os processos de fabrico podem diferir consoante diversos fatores entre os quais se destacam o custo, facilidade de fabrico, tamanho dos componentes a produzir. Sendo os seguintes processos os mais comuns:

- **Modelação por contacto** – este processo é também designado por modelação em aberto na medida em que a disposição das camadas de fibras e do reforço é feita manualmente sobre um molde aberto (Gay et al. 2003) como se evidencia na Figura 14.

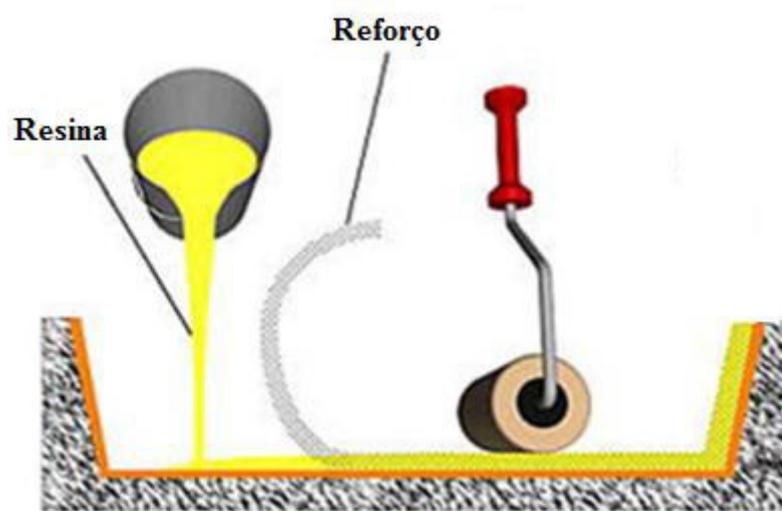


Figura 14 - Representação esquemática da modelação por contacto (adaptado de Almeida (2012)).

- **Modelação por via húmida (wet Hand lay-up)** – Trata-se de um processo manual, onde se utiliza um molde, desmoldante e um rolo ou uma espátula para espalhar a resina. Seguindo as seguintes etapas: o reforço e a resina catalisada são dispostos sobre um molde; impregnar o reforço com a resina utilizando um rolo; dispor sequencialmente as camadas de reforço, inicia-se a cura no fim da qual se remove o molde (Reddy 1997).
- **Modelação por compressão** – neste processo existe um contramolde que fecha comprimindo o reforço e a matriz que é adicionada sob a forma líquida sobre o reforço, seguindo para uma prensa que por sua vez aplica uma pressão variável entre um a dois bar. A polimerização pode realizar-se tanto a temperatura ambiente ou a temperaturas superiores através do aquecimento dos pratos da prensa (Gay et al. 2003) (Figura 15).

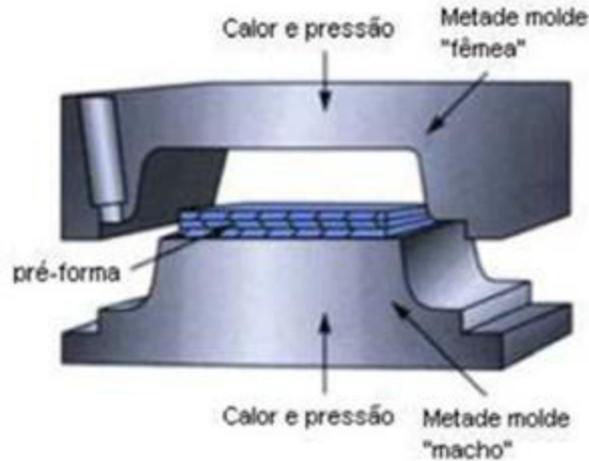


Figura 15 - Representação esquemática da modelação por compressão (Almeida 2012).

- Modelação por vácuo/Autoclave** – é utilizado um molde aberto com um plástico macio adesivamente ligado ao molde. Consiste em consolidar um componente pré-formado através da aplicação simultânea de temperatura, pressão e vácuo. Numa primeira fase deste processo, o objetivo visa baixar a viscosidade da resina para a eliminação de voláteis e promover o fluxo de resina de modo a garantir teores de fibra elevados e homogêneos. Segue-se o processo com a aplicação de vácuo no molde para a eliminação de porosidades e conseqüentemente aumentar a adesão das fibras à matriz, finalizando-se com a cura e consolidação do componente através da aplicação de pressão ou calor com feixe de elétrons ou raio-X (Gay et al. 2003), (Almeida 2012).

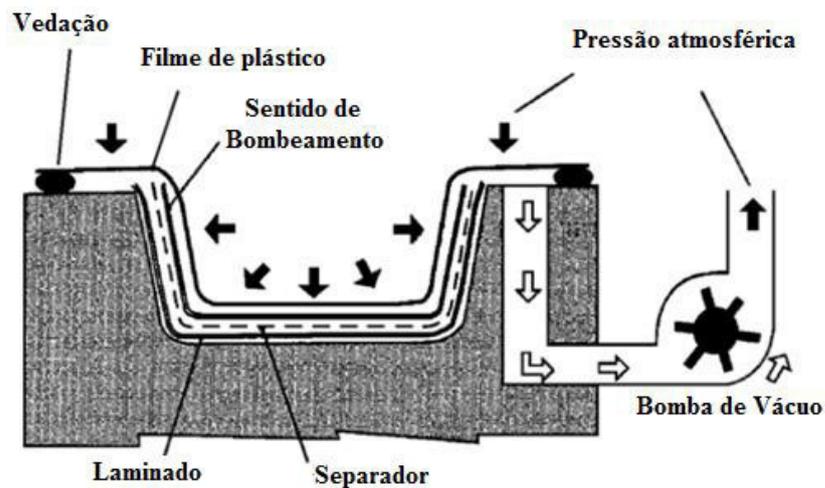


Figura 16 - Representação esquemática da modelação por vácuo/Autoclave (adaptado de Gay et al. (2003)).

- Modelação por transferência de resina** - é também denominado por RTM (*Resin Transfer Molding*), tal como o próprio nome indica trata-se de um processo em que a resina de baixa viscosidade é transferida para um molde fechado contendo material de reforço (fibras) a baixas velocidades e pressões (Figura 17). A este processo assemelha-se o processo designado por SRIM (*Structural injection moulding*) o qual difere do RTM no método de mistura das resinas antes da injeção, possuindo o SRIM duas resinas que são misturadas numa câmara de mistura a alta velocidade antes da injeção no molde.

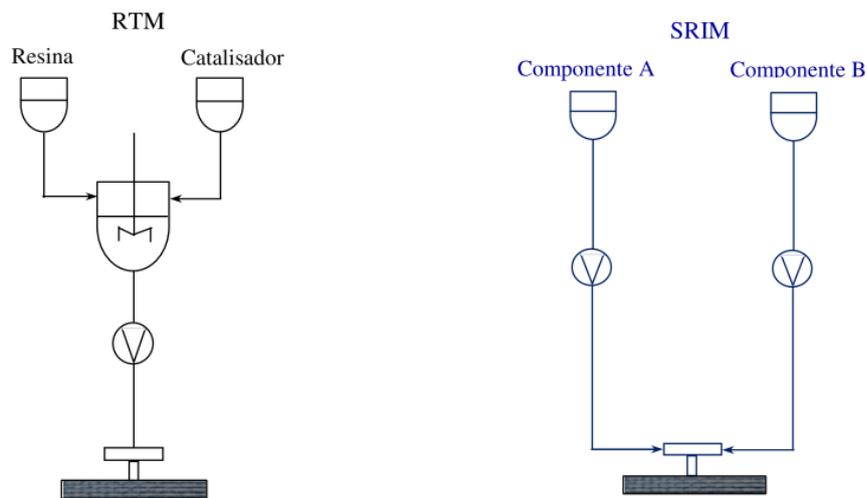


Figura 17 -Representação esquemática da modelação por RTM e SRIM (Compósitos 2014).

- Modelação por revolução de componentes** – neste processo as fibras de reforço contínuas são posicionadas segundo um padrão pré-determinado para compor uma forma oca geralmente cilíndrica. Os fios individuais são alimentados através de um banho de resinas e, em seguida, enrolados continuamente em torno de um mandril (processo automático) (Figura 18). Após um número apropriado de camadas, a cura é executada num forno ou à

temperatura ambiente, após a retirada do mandril. Antes do enrolamento começar, o mandril é revestido com um agente desmoldante.

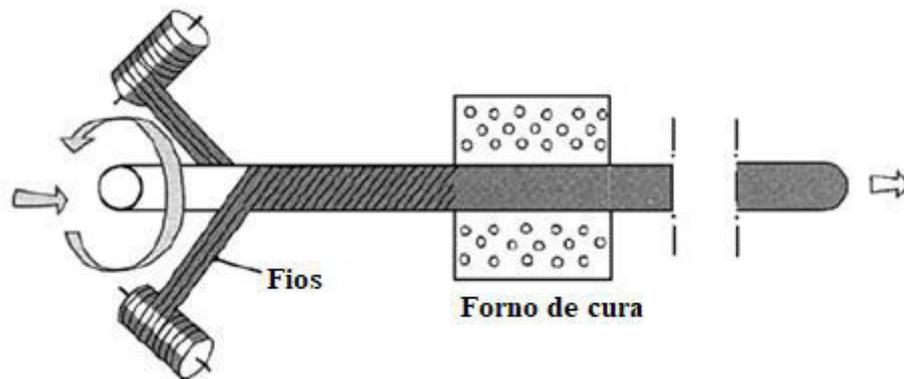


Figura 18 -Representação esquemática da modelação por revolução de componentes (adaptado de Gay et al. (2003)).

- **Pultrusão** – processo usual para o fabrico de plásticos reforçados por fibras, com a forma de perfis de secção constante, tais como vigas, calhas, tubos cilíndricos ou outras secções. Neste processo usam-se fibras contínuas que passam por um banho de resina, sendo a seguir trefiladas através de uma fieira aquecida, a qual determina a forma que terá a secção da peça final (Figura 19). Com este processo obtém-se resistências mecânicas elevadas, devido à grande concentração de fibras e à sua orientação paralela ao comprimento das peças trefiladas.

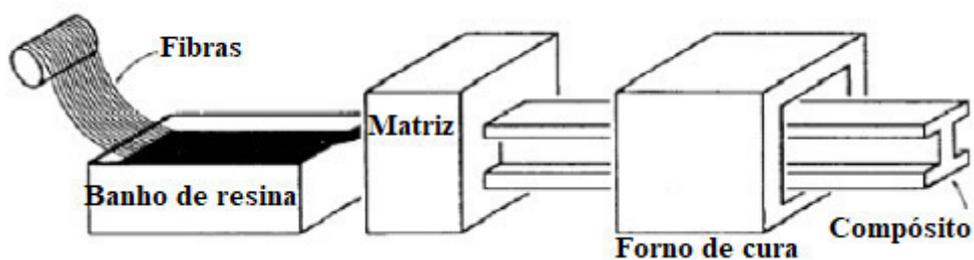


Figura 19 -Representação esquemática da modelação por pultrusão (adaptado de Gay et al. 2003)).

### 3.1.2 Compósitos laminados

Os compósitos laminados, apresentam frequentemente configurações que envolvem empilhamento de camadas de material compósito com reforço de fibras longas, em que os ângulos de orientação das fibras poderão variar de camada para camada, como é possível observar na Figura 20.

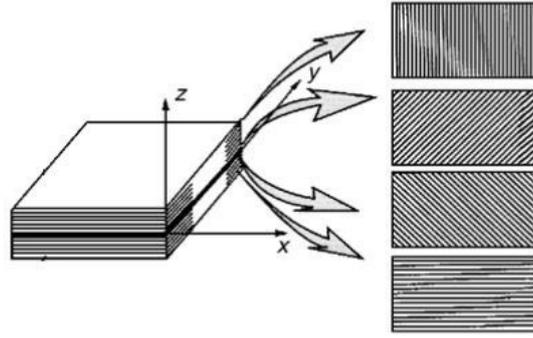


Figura 20 – Empilhamento de camadas de um laminado (Gay et al. 2003).

As fibras são dispostas visando um melhor desempenho de acordo com condições de funcionamento específicas, uma vez que a sua orientação influencia os valores dos coeficientes elásticos reduzidos transformados de cada camada, de acordo com a equação (23):

$$\begin{aligned}
 \bar{Q}_{11} &= Q_{11}m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})n^2m^2 + Q_{22}n^4 \\
 \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})n^2m^2 + Q_{12}(n^4 + m^4) \\
 \bar{Q}_{13} &= Q_{13}m^2 + Q_{23}n^2 \\
 \bar{Q}_{16} &= -Q_{11}mn^4 + Q_{11}m^3n - (Q_{12} - 2Q_{66})mn(m^2 - n^2) \\
 \bar{Q}_{22} &= Q_{11}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})n^2m^2 + Q_{22}m^4 \\
 \bar{Q}_{23} &= Q_{13}n^2 + Q_{23}m^2 \\
 \bar{Q}_{26} &= -Q_{22}m^3n + Q_{11}mn^3 + (Q_{12} + 2Q_{66})mn(m^2 - n^2) \\
 \bar{Q}_{33} &= Q_{33} \\
 \bar{Q}_{36} &= (Q_{13} - Q_{23})mn \\
 \bar{Q}_{44} &= Q_{44}m^2 + Q_{55}n^2 \\
 \bar{Q}_{45} &= (Q_{55} - Q_{44})mn \\
 \bar{Q}_{55} &= Q_{55}m^2 + Q_{44}n^2 \\
 \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12})m^2n^2 + Q_{66}(m^2 - n^2)^2
 \end{aligned} \tag{23}$$

Onde  $m$  e  $n$  significam  $\cos(\theta)$  e  $\sin(\theta)$  respectivamente, sendo  $\theta$  o ângulo entre as direções  $x$  e  $1$  positivas do laminado e da camada  $k$ , respectivamente.

O ângulo de orientação da fibra é de extrema importância na análise do comportamento do laminado. Em função da disposição das fibras por camada, os compósitos laminados podem ser classificados em:

- Laminados quase isotrópicos: São laminados formados por três ou mais camadas de espessura de material idêntico (ex. [+45/0/-45/90], [60/0/-60]);
- Laminados cruzados: Nestes laminados a orientação dos ângulos das fibras nas laminas é alternada (ex. [0/90/0/90]);
- Laminados unidirecionais: O ângulo de orientação das fibras é igual em todas as camadas (ex.  $\theta = 0^\circ$ );
- Laminados angulados: São laminados em que os ângulos de orientação das fibras nas laminas é alternada (ex. [ $\theta$ /- $\theta$ / $\theta$ /- $\theta$ ] quando  $\theta \neq 0^\circ$  ou  $90^\circ$ ).
- Laminados simétricos: A orientação da camada é simétrica em relação ao eixo central do laminado, isto é, para cada camada acima do plano médio, há uma camada idêntica (incluindo material, espessura e ângulo de orientação das fibras), situada a uma distância igual abaixo do eixo do laminado, ou seja  $\theta(z) = \theta(-z)$ , onde  $z$  é a distância a partir do centro. De acordo com o código padrão de laminação (Jones 2010), os laminados simétricos são representados pela letra “s”, que indica simetria em relação ao centro do compósito.
- Laminados antissimétricos: Nestes laminados, a orientação da camada é antissimétrica em relação ao eixo do laminado, ou seja, para cada uma das camadas com ângulo de orientação das fibras,  $\theta$ , acima do plano médio, existe uma camada com ângulo de orientação de fibra,  $-\theta$ , com material e espessura idêntica a uma distância abaixo do plano médio. Assim, para um laminado antissimétrico verifica-se  $\theta(z) = -\theta(z)$ .

### 3.1.3 Estudo do comportamento Mecânico de uma Lâmina

Os materiais compósitos são inerentemente heterogêneos do ponto de vista microscópico. Do ponto de vista macroscópico, as propriedades do material compósito são derivadas de uma média ponderada dos materiais constituintes, fibra e matriz, pelo que são considerados como um material homogêneo.

As relações constitutivas são independentes do fato do material ser ou não heterogêneo, uma vez que as relações tensão-deformação se mantêm para um determinado ponto do corpo.

### 3.1.4 Propriedades mecânicas de uma lâmina

Uma lâmina unidirecional é tratada como um material ortotrópico cujos planos de simetria do material são paralelos e transversais à direção das fibras. O eixo de coordenadas do material  $x_1$  é considerado paralelo à fibra, o eixo  $x_2$  é perpendicular ao plano da lâmina. As propriedades de uma lâmina de material ortotrópico são obtidas por meio de uma abordagem teórica ou por ensaios mecânicos que seguem as normas ASTM (*American Society for Testing and Materials*).

A abordagem teórica, para determinar as constantes de engenharia de um material compósito reforçado com fibras contínuas, baseia-se nos seguintes pressupostos:

- Existe uma ligação perfeita entre as fibras e a matriz;
- As fibras são paralelas e uniformemente distribuídas;
- A matriz está livre de microfissuras e inicialmente num estado isento de tensões residuais;
- Tanto a fibra como a matriz são isotrópicos e obedecem à lei de *Hooke*;
- As cargas aplicadas são paralelas ou perpendiculares à direção da fibra.

Os módulos de elasticidade e os módulos de corte bem como o coeficiente de *Poisson* de um material compósito reforçado com fibras podem ser expressos em função dos módulos de elasticidade, dos módulos de corte e dos coeficientes de *Poisson* e frações de volume dos constituintes (fibra e matriz) pela equação (24).

$$\begin{aligned} E_L &= E_f V_f + E_m V_m \\ E_T &= \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f} \\ \nu_{LT} &= \nu_f V_f + \nu_m V_m \\ G_f &= \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)} \\ G_m &= \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \\ G_{LT} &= \frac{G_f G_m}{G_f V_m + G_m V_f} \end{aligned} \tag{24}$$

Onde o índice  $f$ ,  $m$ ,  $L$  e  $T$  significam fibra, matriz, direção longitudinal às fibras e direção transversal às fibras respectivamente, sendo o módulo de elasticidade representado pela

letra  $E$ , o coeficiente de *Poisson* é representado pela letra  $\nu$ , a fração de volume representada pela letra  $V$  e o módulo de corte é representado pela letra  $G$ .

Como referido anteriormente, estas constantes podem também ser determinadas através de ensaios de provetes normalizados. São necessários pelo menos quatro ensaios para determinar  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $G_{13}$ , resistência longitudinal  $X$ , resistência transversal  $Y$  e a resistência ao corte  $S$ .

Para determinar  $E_L$ ,  $\nu_{LT}$  e a resistência longitudinal  $X$ , a norma ASTM D3039/D 3039M recomenda a utilização de um provete com uma espessura mínima de 1mm e que tenha quatro camadas orientadas a  $0^\circ$  (Figura 21 (a)). Este provete é tracionado longitudinalmente e as deformações transversais e longitudinais são medidas com a utilização de extensómetros. Através da medição da carga aplicada ( $P$ ), da área transversal ( $A$ ), da deformação longitudinal ( $\varepsilon_L$ ) e da deformação transversal ( $\varepsilon_T$ ) é possível calcular os valores do módulo de elasticidade, do coeficiente de *Poisson* e a resistência longitudinal  $X$  pelas expressões presentes na equação (25):

$$\begin{aligned}
 E_L &= \frac{P}{A\varepsilon_L} \\
 \nu_{LT} &= -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \\
 X &= \frac{P_{ult}}{A}
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

Onde  $P_{ult}$  é a carga limite, ou seja, a carga aplicada quando o material alcança o seu limite de elasticidade.

É feito o mesmo procedimento experimental para determinar  $E_T$ ,  $\nu_{TL}$  e a resistência transversal  $Y$ , sendo agora o provete tracionado na direção transversal às fibras como se apresenta na Figura 21 (b) sendo estas constantes calculadas pela equação (26):

$$\begin{aligned}
 E_T &= \frac{P}{A\varepsilon_T} \\
 \nu_{TL} &= -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \\
 Y &= \frac{P_{ult}}{A}
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

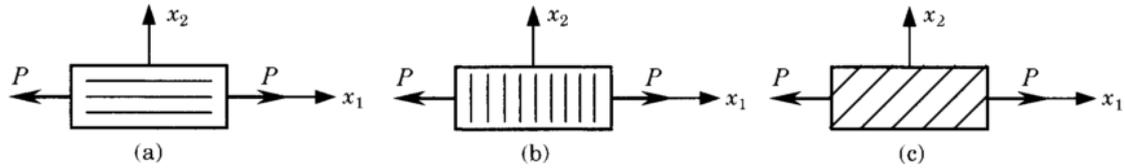


Figura 21 - Ensaio mecânicos necessários para a caracterização mecânica de um laminado (Anon 1997).

O ensaio a realizar para se determinar o módulo de elasticidade transversal  $G_{LT}$  segue a norma ASTM D 3518/D 3518M que recomenda a utilização de um provete com espessura de 2.5mm com doze camadas orientadas a  $+45^\circ$  e  $-45^\circ$ , este ensaio consiste em tracionar o provete a  $45^\circ$  em relação à direção da fibra, como se apresenta na Figura 21 (c). Sendo o módulo de corte  $G_{LT}$  definido pela equação (27).

$$G_{LT} = \frac{1}{\frac{4}{E_x} - \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{LT}}{E_1}} \quad (27)$$

$$E_x = \frac{P/A}{\varepsilon_x}$$

### 3.2 Processo de Furação

A furação é dos processos de maquinagem mais utilizados, na medida em que permitem a montagem de vários componentes de um mecanismo através de parafusos ou rebites, os quais permitem fácil desmontagem (Gonçalves et al. 2011). Este processo pode ser efetuado com ou sem sistema de refrigeração, o qual pode ser interno quando o fluido refrigerante é expelido por um canal existente no centro da ferramenta de corte, ou externo quando o fluido é expelido para a zona do furo durante a furação por uma mangueira existente no engenho de furação, podendo também haver a coexistência dos dois tipos de refrigeração.

Esta técnica foi desenvolvida inicialmente para maquinar aço, tendo hoje em dia vários campos de aplicação, consoante cada tipo de aplicação as ferramentas possuem propriedades mecânicas específicas.

Entre as ferramentas específicas para maquinar compósitos e as ferramentas convencionais, a grande diferença é o fato de possuírem maior resistência á temperatura

desenvolvida no processo de furação e geralmente possuem um maior número de arestas de corte.

No mercado é possível encontrar ferramentas com diferentes geometrias e material. A ferramenta utilizada em processos de furação convencionais denomina-se por broca a qual é munida de dois movimentos simultâneos, movimento de rotação e de avanço segundo o eixo de furação, com velocidades reguladas. No entanto, existem também fresas que desempenham a mesma função, sendo que o que distingue uma fresa de uma broca é que as fresas possuem capacidade de corte em duas direções, vertical e horizontal.

Na Figura 22 apresentam-se as diferentes regiões de uma broca convencional.

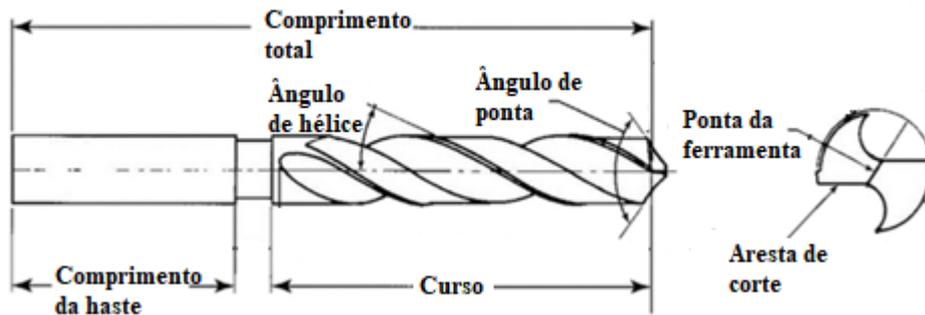


Figura 22 - Representação esquemática das regiões de uma broca convencional (adaptado de Ismail et al. (2017)).

No processo de furação é possível utilizar-se um fluido refrigerante de modo a atenuar as temperaturas atingidas durante o mesmo. Este fluido pode ser introduzido durante o processo através de um sistema externo à ferramenta, com recurso a um canal que conduza o fluido até à zona de furação, ou através de um sistema interno para o qual é necessário que a ferramenta possua um orifício interior por onde será injetado o fluido durante o processo de furação.

O processo de refrigeração durante a furação permite minimizar ou até mesmo eliminar os danos provocados pelas temperaturas atingidas durante o processo de furação. Estas temperaturas podem não só danificam o material base a furar como podem também conduzir a um maior desgaste da ferramenta que por sua vez irá produzir furos com tolerâncias diferentes das pretendidas.

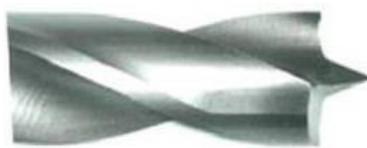
A seleção correta do tipo de broca a utilizar é fundamental para a produção de furos com qualidade admissível sem que comprometa a fiabilidade do componente. As brocas podem classificar-se segundo a sua geometria em:

- Broca helicoidal – geometria padrão, comum em qualquer fabricante deste tipo de ferramenta, considerada a broca com campo de aplicação mais vasto. Existem brocas helicoidais com ângulos de ponta e material distinto.



*Figura 23 - Broca helicoidal (Rezende et al. 2016).*

- Broca *Brad* – geometria de ponta específica em forma de foice que provoca o tensionamento das fibras antes do seu corte, promove menos rugosidade à superfície. Esta broca foi utilizada primeiramente para furação em madeira, mas atualmente tem vindo a revelar-se de interesse na furação de compósitos, Figura 24.



*Figura 24 - Broca Brad (Makwana et al. 2015).*

- Broca *Dagger* – Possui um ângulo de ponta menor que em qualquer broca, e por isso diminui o efeito da indentação, mas necessita de mais espaço para a saída da apara prolongando o tempo de corte.



*Figura 25 - Broca Dagger (Nicolau & Andrade 2013).*

- Broca bidiametral – Pode ser de hélice ou de dentes diretos, a sua geometria proporciona uma diminuição da força axial que conseqüentemente diminui o

efeito da indentação causada pela ponta da broca numa furação efetuada num só passo, (Figura 26).



Figura 26 - Broca bidiametral (a) helicoidal; (b) dentes diretos (Gonçalves 2011).

- Brocas *Faceted* – trata-se de uma broca helicoidal com número de arestas cortantes variável;

Geralmente o processo de furação dos materiais compósitos é efetuado com recurso a técnicas e ferramentas da indústria de materiais metálicos com as devidas adaptações (Tavares et al. 2010). Isto levanta algumas dificuldades marcadas pela natureza não homogénea dos compósitos, sendo frequente a existência de uma orla de dano à volta da periferia do furo efetuado.

Os danos decorrentes da furação em compósitos tratam-se essencialmente de delaminação, defeitos de circularidade, arrancamento de fibras, descolamento fibra/matriz bem como danos térmicos (queima da matriz) ((Tavares et al. 2010), (Işık & Ekici 2010), (Bhatnagar et al. 2004)). Dentro dos danos enumerados, a delaminação é o dano mais frequente e o que suscita maior dificuldade de eliminação (Gonçalves et al. 2011), (Tavares et al. 2010), comprometendo severamente as propriedades mecânicas do material e sendo por isso alvo de constante investigação.

A delaminação é caracterizada pelo descolamento de camadas do laminado que se agrava ao longo da penetração da ferramenta, a qual exerce uma força axial superior à resistência interlaminar do compósito tendo como principal consequência a perda de propriedades mecânicas (resistência estática ou à fadiga) (Tavares et al. 2010). A ocorrência deste dano é também desencadeada pela ação conjunta dos outros danos acima referidos, como por exemplo as tensões térmicas provocam amaciamento da matriz que se torna mais frágil e consequentemente facilita a ocorrência da delaminação.

Podem ocorrer dois tipos de delaminação, sendo eles denominados na literatura por delaminação à entrada ou “*peel-up*” (Figura 27 (a)) quando o dano ocorre no momento inicial de contacto da broca com o material, o qual tende a ser puxado para cima ao longo

das arestas de corte da broca devido ao efeito de abrasão, e à saída ou “*push down*” (Figura 27 (b)) e que ocorre quando a broca se aproxima da última camada a furar devido à força axial tende a fletir as camadas provocando a rotura das ligações entre as camadas consecutivas (Gonçalves 2011)(Nicolau & Andrade 2013)(Vieira 2011).

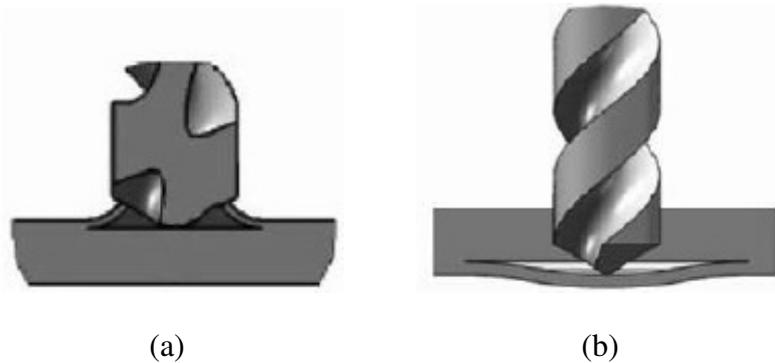


Figura 27 - Representação da delaminação: a) à entrada; b) à saída (Vieira 2011).

A força exercida pela broca no material que dá início à delaminação é designada por força crítica ( $F_C$ ), pelo que a força axial deverá ser menor que esta.

### 3.3 Testes não destrutivos

Como anteriormente referido, a furação de materiais compósitos pode induzir danos interlaminares, os quais não são perceptíveis a olho nu, sendo assim necessário aplicar técnicas não destrutivas capazes de detetar e caracterizar esse tipo de dano. Estas técnicas baseiam-se em métodos não destrutivos (NDT), com os quais é possível detetar não só a ocorrência de dano como também a sua forma e dimensão sem que ocorra deformação plástica do componente.

Uma dificuldade encontrada no domínio dos métodos não destrutivos é a ausência de um método de referência capaz de avaliar inequivocamente o dano total desenvolvido num material compósito sob carga mecânica, onde o fenómeno de dano é muito complexo, sendo assim necessária a combinação de diferentes técnicas não destrutivas (Chaki et al. 2015).

Existem vários tipos de métodos de análise não destrutivos, tais como a radiografia de contraste (denominado habitualmente por raio x), termografia, varrimento ultrassónico (também conhecido por C-Scan), *scan*, entre outros.

De entre estas técnicas, o presente trabalho considera as técnicas de termografia, raio-X e *scan*.

### 3.3.1 Termografia

Esta técnica foi descoberta em 1800 por *William Herschel* tendo posteriormente em conjunto com o seu filho (1840), *Henry Becquerel*, descoberto que certas substâncias emitiam luminescência quando expostas à radiação infravermelhos (IV), além de que poderiam ser produzidas imagens/mapas termográficos através da distribuição de temperaturas na superfície dos objetos quer esta seja emitida por radiação na faixa de radiação infravermelha ou micro-ondas.

Todos os corpos emitem radiação IV. A intensidade com que essa radiação é emitida depende basicamente de dois fatores: a temperatura do corpo e a sua emissividade<sup>4</sup> ( $\epsilon$ ). Um corpo que emite/absorve toda a radiação nele incidente possui uma emissividade igual a um em todos os comprimentos de onda, denominando-se por corpo negro perfeito.

Na natureza não existem corpos negros perfeitos, ou seja, nenhum objeto consegue ter uma absorção/emissão perfeita, deixando-se atravessar/refletir parcialmente pela radiação nele incidente. Com isto, são também denominados por corpos cinzentos aqueles que possuem uma emissividade próxima de um e por corpos reais ou não cinzentos aqueles que apresentam uma emissividade baixa.

A energia irradiada ( $W$ ) pela superfície de um corpo é expressa segundo a lei de *Stephan-Boltzman* pela equação (28).

$$W = \epsilon\sigma T^4 \quad (28)$$

Onde:

$\epsilon$  - Emissividade;

$\sigma$  - Constante de *Stephan – Boltzmann*  $\approx 5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$ ;

$T$  - Temperatura da superfície.

---

<sup>4</sup> Emissividade – capacidade de emitir energia por radiação da sua superfície.

Os instrumentos de medição recolhem dados correspondentes aos três modos de transferência de energia, sendo eles a energia emitida ( $W_e$ ), a energia refletida ( $W_r$ ) e a energia transmitida ( $W_t$ ) (Figura 28).

A energia total ( $W_x$ ) que o equipamento deteta quando incide sobre a superfície de um corpo é dada pela soma da energia emitida por cada modo de transferência de calor, de acordo com a equação (29):

$$W_x = W_e + W_r + W_t \quad (29)$$

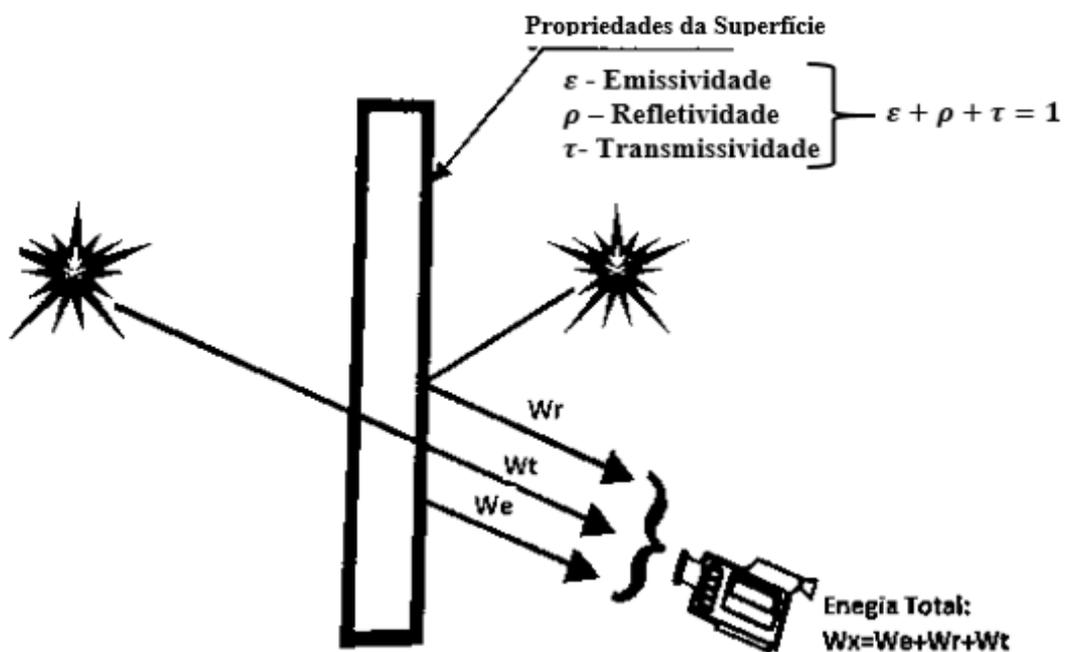


Figura 28 - Modos de transferência de calor, (adaptado de Martin 1999).

Uma vez que a componente que está relacionada com a energia emitida pela superfície é a componente  $W_e$ , torna-se evidente a existência de um problema significativo aquando da medição da temperatura  $IV$ , que consiste na eliminação/compensação do efeito das restantes componentes ( $W_r$  e  $W_t$ ). Este problema faz com que os mapas termográficos obtidos não sejam totalmente precisos.

É também necessário ter em atenção a atmosfera circundante, na medida em que esta pode induzir erros na medição da temperatura emitida pelo corpo, uma vez que poderá ocorrer absorção atmosférica. Uma forma de reduzir/eliminar este efeito é diminuir a distância existente entre o corpo e o equipamento de medição, embora a maioria dos equipamentos

utilizados na termografia *IV* forneçam ao usuário meios para corrigir os erros atmosféricos.

Ao longo dos anos, esta área tem vindo a sofrer sucessivas melhorias tecnológicas tendo-se tornado numa ferramenta de análise e principalmente de deteção de danos (NDT) com aplicação em diversas áreas, tais como:

- Na ciência (ex. medicina, astronómia, arqueologia, metrologia, etc.);
- Em segurança e vigilância (ex. combate a incêndios, buscas e salvamento, etc.);
- Em edifícios (ex. deteção de zonas com isolamento deficiente, deteção de humidade/fugas de ar, etc.);
- Em sistemas mecânicos;
- Em sistemas elétricos (ex. ligações soltas/deterioradas, deteção de circuitos com sobrecargas, etc.);
- Em energias renováveis (ex. painéis fotovoltaicos, análise do aproveitamento da energia eólica, etc.).

A técnica de termografia tem sido alvo de constante manipulação ao longo dos anos, existindo assim várias técnicas de termografia desenvolvidas para a deteção de danos. Esta técnica pode ser efetuada com recurso a uma fonte térmica exterior, denominando-se por termografia ativa e por termografia passiva quando não se utiliza fontes térmicas exteriores. Na Tabela 1 apresentam-se as principais técnicas de termografia ativa, exemplificando esquematicamente como se comporta cada tipo de aquecimento na Figura 29 (*Yang & He 2016*):

Tabela 1 – Principais técnicas de termografia NDT (adaptado de Yang & He 2016).

Fonte térmica	Tecnologia	Tipo de aquecimento	
<b>Excitação ótica</b>	Excitação ótica convencional, flash, lâmpada	Termografia convencional	SHT
	Laser	Termografia laser	SHT
<b>Excitação eletromagnética</b>	Corrente de Foucault induzida	Corrente de aquecimento por acréscimo/correntes de Foucault	SHT, VHT e AHT
	Corrente elétrica	Termografia de condução	SHT, VHT e AHT
	Campo magnético	Termografia por indução magnética	VHT
	Micro-ondas	Termografia micro-ondas	VHT e AHT
<b>Onda mecânica</b>	Vibração, onda sonora	Vibro termografia	AHT
	Ultrassons	Termografia de ultrassons	AHT
<b>Tensão</b>	Tensão	Análise de tensão termoelástica	VHT

Onde as siglas SHT, VHT e AHT significam:

SHT – Aquecimento de superfície;

VHT – Aquecimento por unidade de volume;

AHT – Aquecimento anormal.

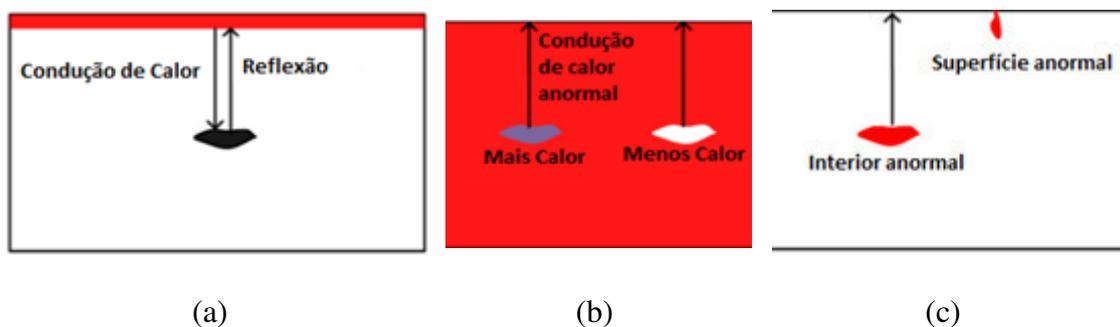


Figura 29 - Tipos de aquecimento: (a) SHT; (b) VHT; (c) AHT (adaptado de Yang & He 2016).

A técnica de termografia é também aplicada como análise não destrutiva no âmbito de indústria aeroespacial, onde são frequentemente utilizados remendos de material compósito na reparação de regiões danificadas ou defeituosas de aeronaves. *Avdelidis et al. (2003)* aplicaram a técnica de termografia transitória na inspeção de três defeitos (entalhe em painéis de alumínio, delaminação entre duas camadas de material de um remendo, análise da superfície de saída do furo em material compósito de fibra de carbono) criados artificialmente com o intuito de testar a aplicabilidade desta técnica. Estes autores aqueceram a zona de interesse com recurso a uma lâmpada de flash e monitorizaram a variação de temperatura com recurso a uma câmara IV, capturando várias imagens em tempos de arrefecimento diferentes, sendo possível identificar a existência dos defeitos induzidos (Figura 30).

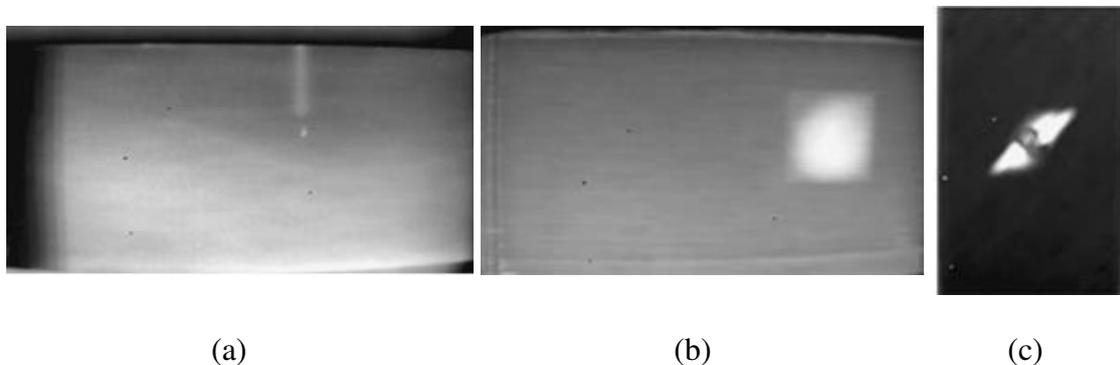


Figura 30 - Imagens termográficas (a) Entalhe no painel de alumínio; (b) Delaminação entre duas camadas do remendo; (c) Superfície de saída do furo (delaminação à saída) (*Avdelidis et al. 2003*).

Esta técnica tem como principal vantagem a rapidez com que é possível analisar grandes áreas de defeitos superficiais produzindo resultados de fácil interpretação. Tem como principal desvantagem a limitação de que o seu sucesso é altamente dependente da profundidade e tamanho do defeito, o que restringe a sua aplicação a defeitos próximos da superfície (*Avdelidis et al. 2003*).

### 3.3.2 Raio-X

A técnica de raio-X pode também ser utilizada como técnica não destrutiva no processo de análise de falhas.

Esta técnica consiste na produção de eletrões acelerados (pelo cátodo) em direção a um alvo metálico (ânodo) no qual colidem e perdem energia cinética cedendo energia aos eletrões que estão nos átomos do ânodo. Estes eletrões são então acelerados emitindo

ondas eletromagnéticas que são denominadas por raio-X. Este processo ocorre dentro de uma ampola.

Quando aplicado à detecção de danos em compósitos é necessário mergulhar o material num fluido de contraste de modo a que este penetre até as áreas de dano, onde fica aprisionado, e posteriormente possa absorver a radiação nele incidente gerando sombras na imagem digitalizada que evidencia a zona de dano.

Este método proporciona uma imagem de alta qualidade e resolução permitindo observar a ocorrência de delaminação e fissuras interlaminares (Kortschot & Zhang 1995), (Silva et al. 2014).

Como fluidos de contraste, são habitualmente utilizados:

- Cloreto de ouro;
- Iodeto de Zinco;
- Diodometano.

O método de radiografia raio-X é ótimo na obtenção de informação acerca do tamanho, embora tenha a limitação de não ser capaz de localizar o dano ao longo da espessura do material. Para que tal seja possível tem de ser acompanhado de uma técnica destrutiva (Amaro et al. 2012).

Outro aspeto importante a ter em conta é o tempo de imersão do componente no fluido contrastante, o qual é determinante na obtenção de imagens precisas para determinados materiais compósitos, sendo necessário ter-se em conta o carácter higroscópico das fibras. Por exemplo, um compósito de fibras de sisal, que tem grande capacidade de absorção, quando é imerso durante um tempo excessivo, produz imagens raio-X que não são precisas, como se pode observar na Figura 31 (Vieira 2011).

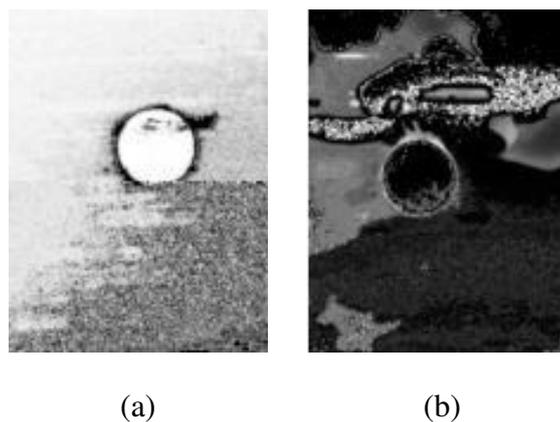


Figura 31 - Imagem Raio-X de uma placa de fibra de sisal (a) Tempo correto de imersão; (b) Tempo excessivo de imersão (Vieira 2011).

É sabido que por vezes na fase de produção do material compósito são induzidos alguns defeitos, designados por defeitos residuais. De modo a analisar os defeitos induzidos pela furação numa placa de fibra de vidro, Silva *et al.* (Silva et al. 2014) realizaram um raio-X à placa antes da furação, no qual é evidente a existência de defeitos residuais (Figura 32 (a)) que são eliminados manualmente no processamento de imagem obtida após a furação (Figura 32 (b) e (c)) com o objetivo de poder quantificar somente o dano induzido pelo processo de furação.

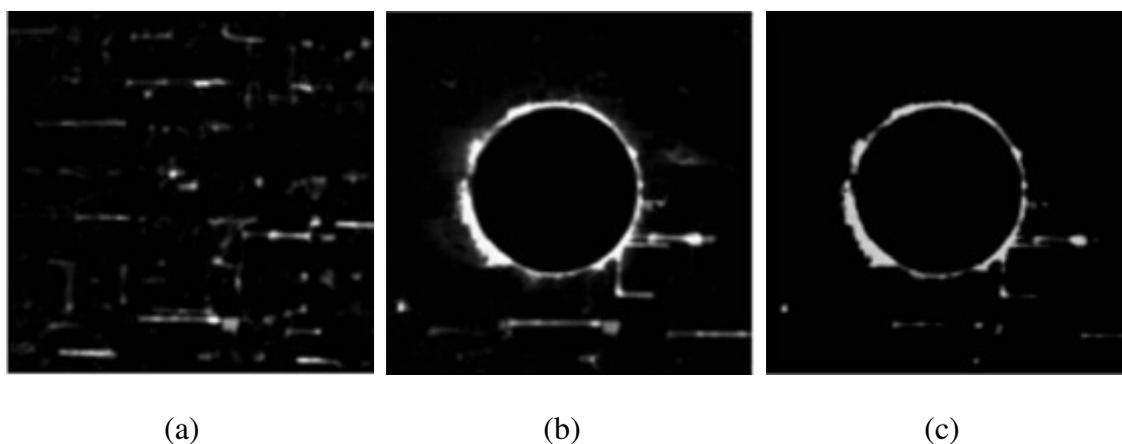


Figura 32 - Imagens Raio-X: (a) na placa sem furo; (b) placa com furo; (c) placa com furo com eliminação dos danos residuais (Silva et al. 2014).

## Capítulo 4. Desenvolvimento Experimental

### 4.1 Produção das placas de compósito de fibra de vidro por via húmida

Inicialmente produziram-se três placas com 10 camadas, uma placa com 20 camadas e outra com 30 camadas de tecido de fibra de vidro (fibra longa) e por fim uma placa com 10 camadas de manto de fibra de vidro (fibra curta). Todas as placas produzidas têm uma configuração quadrada com 250mm de aresta.

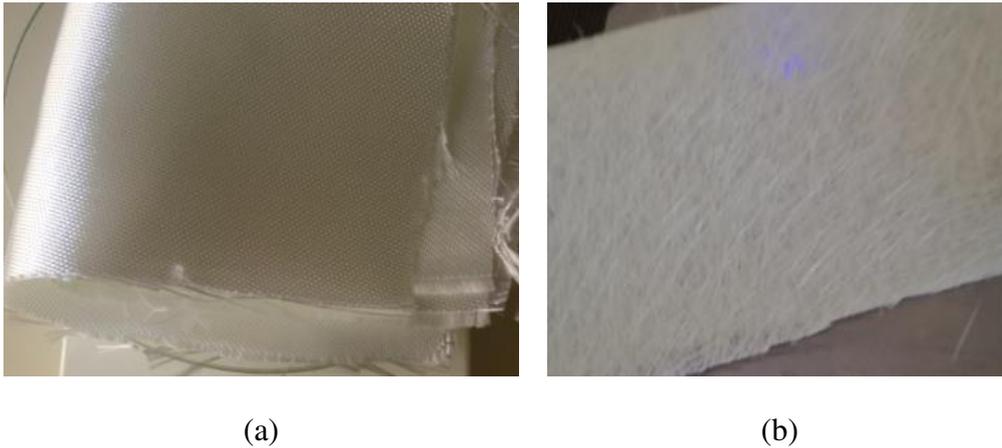


Figura 33 - (a) Tecido de fibra de vidro; (b) Manto de fibra de vidro.

O processo de produção das placas de material compósito de fibra de vidro e matriz epoxídica utilizado fora o processo de modelação manual (*wet-layup*), para tal utilizou-se:

- Duas bases de metal, previamente forradas com desmoldante;
- Camadas de tecido/manta de fibra de vidro;
- Duas camadas de *peel-ply*;
- Duas camadas de feltro absorvente;
- Resina *epoxy* e catalisador;
- Copo de mistura;
- Pincel.

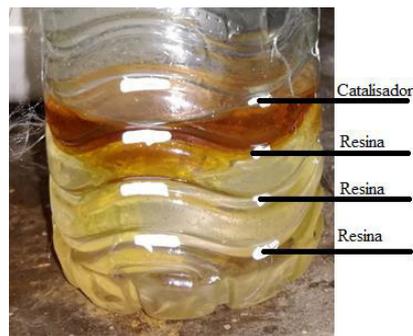
Tendo-se seguido o seguinte procedimento:

1. Preparar o laboratório reunindo todo o material necessário para a realização do trabalho prático;
2. Recortar as camadas necessárias de tecido (Figura 34 (a)) e manta de fibra de vidro, duas de desmoldante, duas de *peel-ply* e por fim duas de feltro com o tamanho superior ao pretendido para cada placa a produzir;

3. Dispor por cima de uma placa metálica, uma camada de material desmoldante, uma camada de feltro seguida de uma camada de *peel-ply* e outra de fibra;
4. Misturar a resina e o catalisador com uma relação de 3 para 1 como prescrito pelo fabricante (Figura 34 (b));
5. Impregnar a camada de tecido, com a mistura realizada;
6. Aplicar sucessivamente as restantes camadas de fibra de vidro impregnando-as uma a uma com a mistura, (Figura 34 (c));
7. Depois da última camada de fibra colocar uma camada *peel-ply*, em seguida uma camada de feltro e por fim colocar a base de metal forrada com o papel desmoldante;
8. Após a colocação de uma placa metálica sobre o empilhamento anterior, colocar sobre esta alguns pesos para exercer maior pressão (Figura 34 (d));
9. Deixar a placa em repouso durante 24 horas para ocorrer a cura;
10. Findo o processo de cura remover as camadas envolventes da placa laminada.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 34 – (a) Tecido de fibra de vidro; (b) Mistura de resina com o catalisador numa razão de 3 para 1; (c) Adicionar sobre a camada *peel-ply* camadas de fibra de vidro e pincelar com a mistura de resina e catalisador; (d) Colocação de pesos sobre a placa.

Após a produção das placas laminadas, mediu-se a espessura de cada uma delas e determinou-se as propriedades mecânicas de cada uma das placas. Esta informação é apresentada na Tabela 2 bem como a classificação atribuída a cada uma delas de modo a que possamos distingui-las ao longo do documento.

Tabela 2 – Características dos provetes.

	Provete	Espessura [mm]	$V_f$ [ $m^3$ ]	$E_l$ [GPa]	$E_t$ [GPa]	$\nu_{lt}$	$G_{lt}$ [GPa]
<b>Tecido</b>	<b>10A</b>	2,88	0,36	29.7	6.8	0.28	4.9
	<b>10B</b>	3	0.35	28.7	6.7	0.28	4.8
	<b>10C</b>	2,945	0.36	29.2	6.8	0.28	4.8
	<b>20A</b>	5,54	0.38	30.7	7	0.28	5
	<b>30A</b>	8,36	0.38	30.6	6.9	0.28	5
<b>Manto</b>	<b>10M</b>	6,37	0.64	6.60	6.2	0.3	4.4

Para a determinação das propriedades presentes na Tabela 2, utilizou-se as expressões matemáticas presentes na equação (24) tendo em conta as propriedades da fibra de vidro definidas em Jones 2010, e da matriz definidas pelo fabricante (Sicomín Epoxy Systems 2014). Apresentam-se os cálculos, de forma detalhada, relativos a cada placa, no Anexo A.

Pela Tabela 2, observa-se que as propriedades mecânicas das placas com o mesmo número de camadas e tamanho de fibra são semelhantes como seria espetável. Ainda assim, o aumento do número de camadas para o dobro e para o triplo não fez variar significativamente o valor das propriedades mecânicas.

Quanto à placa com reforço de manto de fibra de vidro, esta já apresenta propriedades mecânicas menores que as placas com reforço de fibra longa.

## 4.2 Ensaio de furação

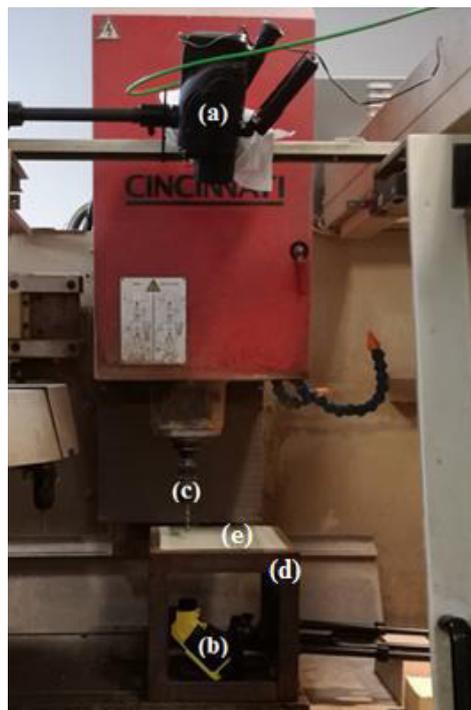
Para a elaboração dos ensaios de furação, utilizou-se a máquina CNC (Cincinnati Arrow 500VMC) presente em laboratório na qual se colocaram duas câmaras termográficas com objetivo de se obterem imagens na superfície superior (câmara *ThermaVue CSI 735R INFRARED*) e inferior (câmara *TROTEC*) do material durante o processo de furação.

A câmara utilizada para captar as imagens da face superior da placa fora a câmara *ThermaVue CSI 735R INFRARED*, da qual não se tem conhecimento sobre as suas

características funcionais. A câmara utilizada para captar a face inferior da placa fora a câmara *TROTEC* sendo as suas as características funcionais apresentadas na Tabela 3.

Inicialmente parametrizaram-se as câmaras termográficas para a análise de temperaturas compreendidas entre 15°C e 88°C. Após a realização do primeiro ensaio de furação com a broca BZT03 na placa 30A constatou-se, através da análise das imagens obtidas, que o limite superior do intervalo de temperaturas definido era ultrapassado durante o processo de furação, pelo que para os seguintes ensaios o intervalo de temperaturas passou a ser [23°C; 250°C].

A placa de material compósito é colocada na parte superior de uma estrutura de suporte construída com um perfil “L” reproduzindo uma geometria paralelepípedica, como se pode ver na Figura 35, à qual é fixa com recurso a grampos. A câmara termográfica inferior encontra-se no interior da estrutura de suporte alinhada com a broca e a câmara superior está o mais alinhada possível com a broca, uma vez que o cabeçote da ferramenta não permite que estas estejam totalmente alinhadas.



*Figura 35 - Setup utilizado: (a) Câmara termográfica superior; (b) Câmara termográfica inferior; (c) Ferramenta; (d) Estrutura de suporte; (e) Provette.*

Tabela 3 – Características da câmara termográfica inferior.

Propriedades:	Câmara TROTEC ec060:
Resolução	160 × 120
Intervalo de temperaturas	−2°C a 250 °C
Comprimento de onda do laser	635nm

Utilizaram-se as ferramentas que se apresentam nas Figura 36, Figura 37, Figura 38 e Figura 39, as quais possuem os parâmetros de operação máximos definidos pelo fabricante para a maquinação de materiais compósitos apresentados na Tabela 4. Os parâmetros máximos das ferramentas, *Dagger* e helicoidal não se encontram disponibilizados pelos fabricantes.



(a)



(b)

Figura 36 – (a) Ferramenta BZT01; (b) Ponta da ferramenta (fabricante BZT, referência 751 080060F).



(a)



(b)

Figura 37 - (a) Ferramenta BZT03; (b) Ponta da ferramenta (fabricante BZT, referência 751070060F).



(a)

Figura 38 - Ferramenta Dagger (fabricante: GANDTRACK; referência: GT-50-6.0 63089)



(a)

Figura 39 - Ferramenta helicoidal (fabricante: SECO; referência: 840060R050Z4.0)

Tabela 4 – Características e parâmetros de operação máximos das ferramentas utilizadas.

Ferramenta	Denominação	Diâmetro [mm]	Nº de arestas de corte (z)	Parâmetros máximos	
				Velocidade de rotação [rpm]	Velocidade de avanço [mm/min]
<b>BZT01</b>	HSC - ponta de carboneto	6	2	13262.91	11141
<b>BZT03</b>	HSC - ponta de carboneto	6	10	13262.91	55705
<i>Dagger</i>	-	6	2	-	-
<b>Helicoidal</b>	-	6	2	7960	1359

Os ensaios de furação realizados dividem-se basicamente em três partes. Na primeira realizaram-se 5 furos com a ferramenta BZT03 nas placas 10A, 20A, 30A e 10M mantendo constantes a velocidade de rotação ( $n$ ) e a velocidade de avanço ( $f$ ), que se apresentam na Tabela 5 identificados pelo conjunto de parâmetros P0. Os primeiros dois furos da placa 30A foram realizados com velocidades diferentes devido aos passos iniciais efetuados para o ajuste dos parâmetros de furação, que se apresentam na

Tabela 6.

Na segunda parte, realizaram-se 5 furos na placa 10A com cada uma das ferramentas (BZT01, BZT03, *Dagger* e Helicoidal) mantendo constantes os parâmetros de furação (parâmetros P0 da Tabela 5).

*Tabela 5 - Parâmetros de furação utilizados nos ensaios.*

<b>Parâmetros</b>	<b>Velocidade de rotação [rpm]</b>	<b>Velocidade de avanço [mm/min]</b>
<b>P0</b>	5300	640
<b>P1</b>	2650	318
<b>P2</b>	1300	156
<b>P3</b>	1300	78
<b>P4</b>	1300	234

*Tabela 6 - Parâmetros utilizados para a furação dos furos 1 e 2 da placa 30A.*

<b>Furo</b>	<b>Velocidade de rotação [rpm]</b>	<b>Velocidade de avanço [mm/min]</b>
<b>1</b>	<b>3975</b>	<b>192</b>
<b>2</b>	5300	384

Na terceira parte dos ensaios, fizeram-se variar os parâmetros de furação, nomeadamente a velocidade de rotação ( $n$ ) e a velocidade de avanço ( $f$ ), sobre as placas 10B e 10C, efetuando a furação na placa 10B com a ferramenta que na primeira fase de ensaios atingiu temperaturas superiores (BZT03) e na placa 10C a ferramenta que atingiu menores temperaturas (*Dagger*) durante o processo de furação. Ainda nesta parte do ensaio, após ter-se verificado qual a ferramenta que induz menor dano nas placas de fibra longa, com essa mesma broca efetuaram-se 5 furos com os parâmetros P0 da Tabela 5 na placa de fibra curta (10M).

### **4.3 Metodologia de Análise das Imagens**

Para a análise das imagens provenientes do *scan* e raio-X recorreu-se à aplicação *ImageJ*, implementando a metodologia que a seguir se apresenta para a quantificação da área de dano:

1. Calibração da imagem: Conhecendo a distância entre dois pontos presentes na imagem a analisar ou noutra imagem obtida com os mesmos parâmetros de captação de imagem, aberta em segundo plano; e com recurso à ferramenta

“*Straight*” da aplicação, traça-se uma linha que ligue esses dois pontos fazendo corresponder o comprimento dessa mesma linha ao número de pixéis presentes entre esses dois pontos;

2. Seleção da área de interesse: Com a utilização da ferramenta “*rectangular, oval, polygon selections* ou *freehand selections*” seleciona-se a área de interesse e, com a opção “*Duplicate*”, abre-se uma nova janela só com a área a estudar, na qual é assumida a calibração previamente efetuada;
3. Conversão da imagem em 8 bits: É necessário que a imagem seja binária (imagem apresenta pixéis com diferentes escalas de cinza) para que posteriormente se possa aplicar a ferramenta *Threshold*, a qual permite que se estabeleçam valores limites, máximo e mínimo da intensidade dos pixéis exibidos na imagem de modo a que se possa obter uma imagem em que só a zona de dano seja apresentada (Figura 40).

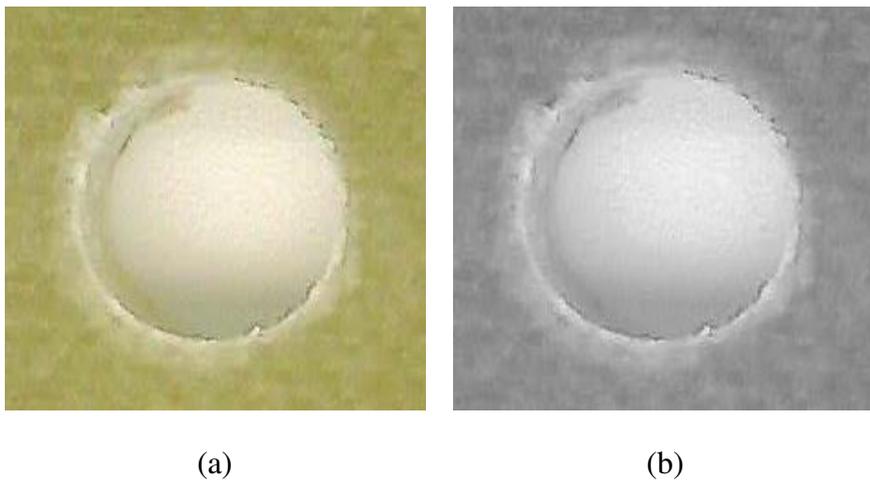


Figura 40 - Conversão da (a) imagem original em (b) imagem binária.

4. Aplica-se o filtro *FFT Bandpass*: este filtro efetua correções de sombra bem como suaviza a imagem através da remoção das frequências elevadas e das frequências baixas obtendo-se uma imagem tal como se apresenta na Figura 41;

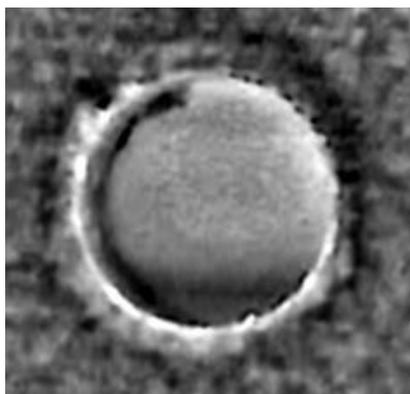


Figura 41 - Imagem obtida após a aplicação do filtro FFT Bandpass.

5. Aplica-se a ferramenta *Threshold*: Esta ferramenta tem 16 métodos diferentes de análise automática, os quais diferem entre si no algoritmo de análise associado a cada método. No presente trabalho considera-se a opção *Default* que tem por base um algoritmo denominado por *IsoData*. Este algoritmo consiste em dividir a imagem entre fundo e objeto, assumindo um limite de escala de cinza inicial. Posteriormente são determinadas médias do valor dos pixels abaixo e acima do limite inicial seguindo com o registo do valor dessas médias, o limite é incrementado e o processo é repetido até o limite determinado ser maior que a média composta exibindo por fim a imagem, cuja escala de cinza se encontra limitada através da ultima iteração efetuada pelo algoritmo, na qual é possível ajustar manualmente a escala de cinza caso a imagem apresentada não seja a pretendida.

Após se aplicar esta ferramenta obtém-se uma imagem como a que se apresenta na Figura 42 (a).

De modo a que se obtenha somente a área de interesse, seleciona-se a linha que delimita a zona de dano e com recurso á ferramenta “*Create Mask*” obtém-se a Figura 42 (b).

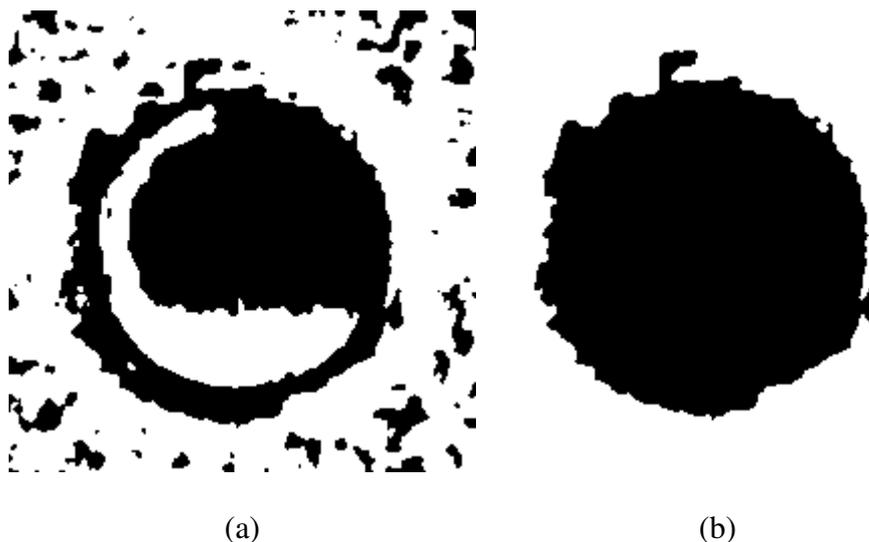


Figura 42 - (a) Aplicação da ferramenta *Thershold*; (b) área do furo com a área de dano.

6. Cálculo da área de dano: para determinar a área de dano subtrai-se a área do furo com diâmetro de  $6mm$  à área a preto da Figura 42 (b) a qual é calculada automaticamente pela aplicação, tendo em conta a calibração efetuada inicialmente.
7. Determinação do diâmetro máximo: com a ferramenta *“point”* fixa-se manualmente um ponto no centro do furo e com recurso á ferramenta *“Straight”* traça-se linhas que partem de uma extremidade, passam pelo centro do furo (ponto definido) e chegam a outra extremidade até encontrar o diâmetro máximo de dano.

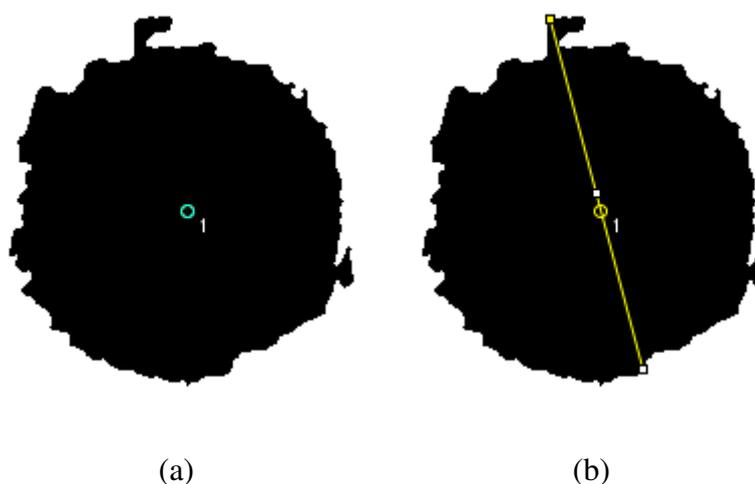


Figura 43 - (a) Fixação de um ponto a marcar o centro do furo; (b) Traçar linhas que passem pelo centro até encontrar o diâmetro máximo.

Para a análise da temperatura atingida durante o processo de furação, bem como a área termicamente afetada durante este processo, recorre-se aos vídeos termográficos efetuados durante o processo de furação.

A identificação do ponto em que a temperatura máxima é atingida é feita tendo em conta a escala de cores, presente na Figura 44, onde a cor azul corresponde a temperaturas iguais ou inferiores à temperatura mínima parametrizada e a cor branca corresponde a temperaturas iguais ou superiores à temperatura máxima parametrizada.

Para a determinação das gamas de temperatura atingidas durante o processo de furação, uma vez que nem sempre foi possível que os indicadores de temperatura definidos na câmara (indicadores 1, 2, 3 e 4 presentes na Figura 44) coincidissem com a zona de furação, teve que se recorrer a uma determinação manual das respetivas gamas de temperatura, a qual é feita seguindo o seguinte procedimento:

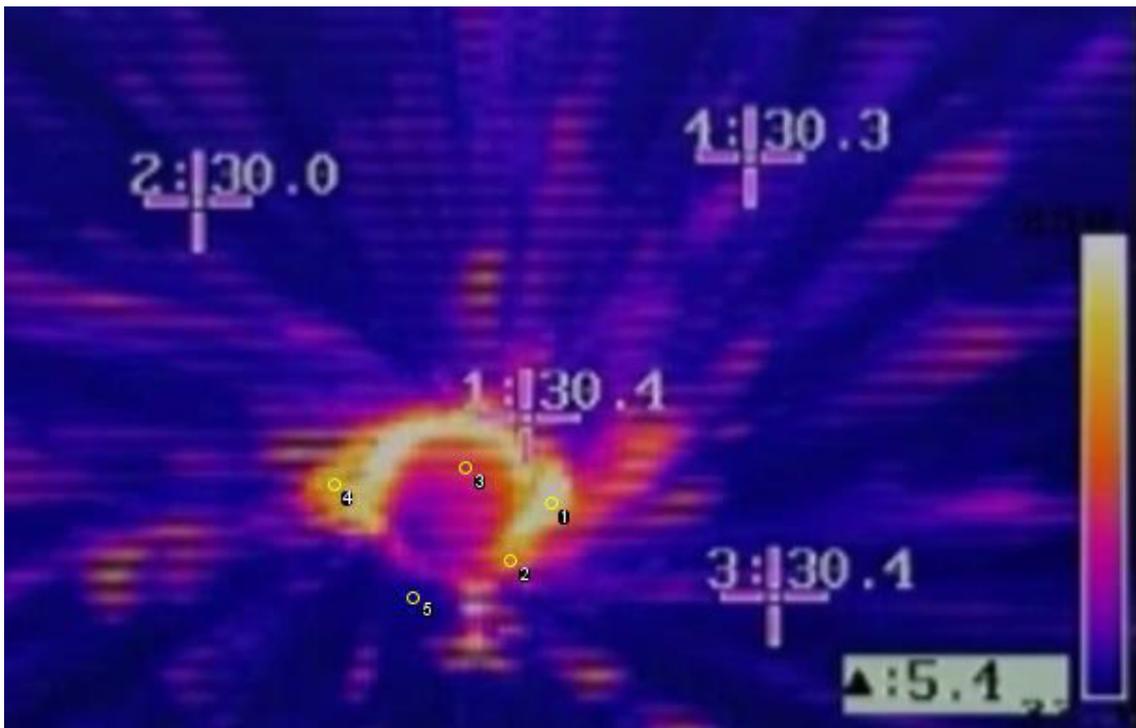


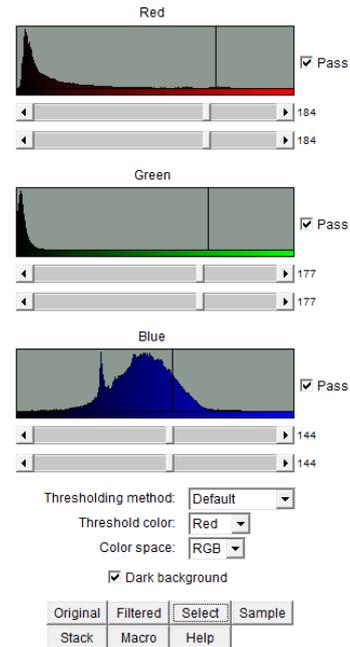
Figura 44 - Imagem termográfica do instante em que a temperatura máxima é atingida durante o processo de furação.

1. Determinar as características *RGB* (*red green blue*) do sistema de cada cor exibida na imagem em redor do furo recorrendo à ferramenta “*point*” da aplicação *ImageJ*. Para esse efeito é colocado um ponto em cada cor presente na imagem (pontos 1, 2, 3, 4 e 5 da Figura 44) e posteriormente através da opção “*RGB*

*Measure*” é apresentada as propriedades RGB de cada ponto definido na imagem (Figura 45 (a) propriedades RGB do ponto 1 da Figura 44).

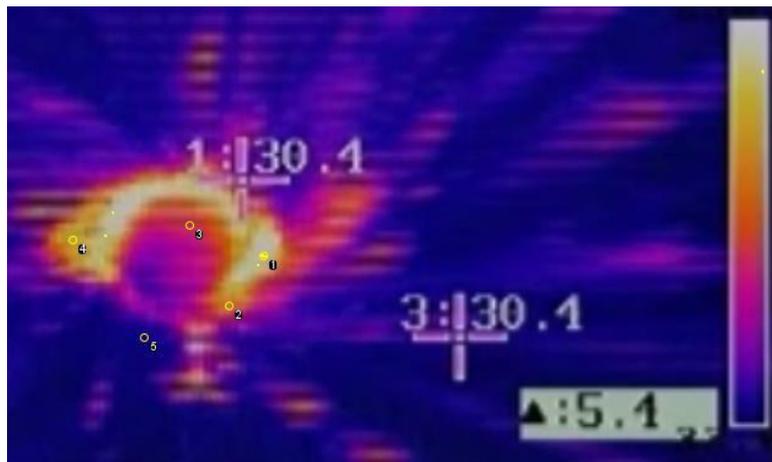
2. Evidenciar na imagem todos os pixéis com as propriedades RGB de cada ponto: Com recurso à ferramenta “*Color Threshold*” (Figura 45) define-se o valor RGB de cada ponto para que todos os pixéis presente na imagem com esse mesmo valor de RGB sejam evidenciados, nomeadamente, o pixel presente na escala de cores com o valor de RGB do ponto a analisar (Figura 45 (c)). Caso não seja evidenciado na escala de cores nenhum pixel, faz-se aumentar o intervalo de valores RGB até que surja o pixel identificativo na escala de cores. A razão pela qual pode não surgir o ponto definido imediatamente na escala de cores deve-se à qualidade da imagem captada não ser a mais adequada para este efeito.

1	Red	184
2	Green	177
3	Blue	144
4	$(R+G+B)/3$	168
5	$0.299R+0.587G+0.114B$	175



(a)

(b)



(c)

Figura 45 - (a) Propriedades RGB do ponto selecionado; (b) Ferramenta "Color Threshold"; (c) Evidência dos pixels com as propriedades RGB definidas.

- Determinar o valor de temperatura: sendo conhecida a distância na escala de cores entre a temperatura mínima e máxima parametrizada determina-se, com recurso à ferramenta "Straight", a distância entre a temperatura mínima parametrizada e o pixel evidenciado na escala de cores. Através de uma interpolação, detalhada na equação (30), determina-se a temperatura correspondente ao ponto evidenciado na escala de cores que corresponde à temperatura do ponto cujas propriedades RGB foram inseridas na ferramenta "Color Threshold" na qual se usou as funções

“Default, Red e RGB” uma vez que as restantes opções foram testadas mas os resultados obtidos não eram fiáveis..

Ou seja, assumindo que:

$D$  – Distância entre a temperatura máxima e a temperatura mínima parametrizada na escala de cores da câmara;

$d$  – Distância entre a temperatura mínima parametrizada e o pixel evidenciado na escala de cores da câmara;

$D_0$  – Distância correspondente à temperatura mínima definida na escala de cor, a qual é zero.

Com base na Tabela 7, determina-se o valor da temperatura  $x$  que se encontra à distância  $d$  pela equação (30).

*Tabela 7 – Metodologia de determinação da temperatura.*

<b>Distância à temperatura mínima [pixéis]</b>	<b>Temperatura [°C]</b>
$D$	250
$d$	$x$
$D_0$	25

$$x = \frac{(250 - 25)}{(D - D_0)}(d - D_0) + 25 \quad (30)$$

#### **4.4 Validação da parametrização das câmaras e metodologia de análise**

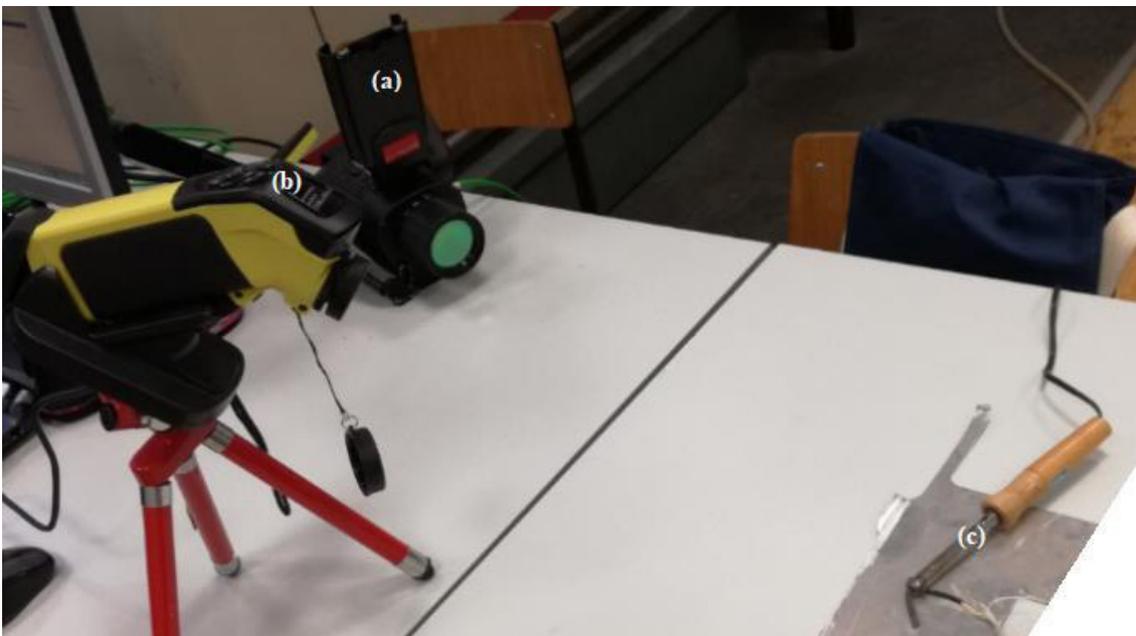
Para a elaboração do presente trabalho foi necessário efetuar procedimentos e metodologias de análise alternativas. Assim, é necessário verificar a influência de cada metodologia e procedimento adotado nos resultados obtidos.

Foi necessário verificar os seguintes aspetos:

- Parametrização de ambas as câmaras;

- Influência da parametrização do valor de emissividade do material nos valores de temperatura medidos pela câmara inferior.
- Influência do plástico de proteção da lente da câmara inferior nos valores de temperatura apresentados;
- Metodologia de medição de temperatura manual;

Como são utilizadas duas câmaras termográficas para este estudo é importante que estas estejam igualmente parametrizadas. Com o intuito de se verificar que as câmaras termográficas estariam ambas com a mesma parametrização e por sua vez a medir corretamente a temperatura, foi utilizada uma fonte de calor para a qual se pudesse apontar ambas as câmaras de modo a verificar se em ambas era apresentado o mesmo valor de temperatura. Para tal utilizou-se um ferro de soldar como sendo a fonte de calor, tendo primeiramente posicionado as câmaras termográficas para o mesmo ponto, como se apresenta na Figura 46. Posteriormente captou-se o processo de arrefecimento do ferro de soldar com ambas as câmaras, uma vez que, no processo de aquecimento, o ferro de soldar atingia temperaturas superiores à gama de temperatura definida nas câmaras termográficas num curto espaço de tempo.



*Figura 46 - Setup de verificação da parametrização das câmaras (a) Câmara superior; (b) Câmara inferior; (c) Ferro de Soldar.*

Procedeu-se então à análise do processo de arrefecimento, tendo para o efeito captado os valores de temperatura a cada 5 segundos de arrefecimento, sendo a câmara inferior

denominada por CI e a câmara superior denominada por CS. Os valores de temperatura captados apresentam-se na Tabela 8.

*Tabela 8 - Processo de arrefecimento do ferro de soldar captado com a câmara inferior (CI) e com a câmara superior (CS).*

<b>Tempo [s]</b>	<b>Temperatura CI [°C]</b>	<b>Temperatura CS [°C]</b>	<b>Diferença [°C]</b>	<b>Desvio em relação à CI %</b>
<b>5</b>	73,7	74	0,3	0,4
<b>10</b>	73	73	0	0
<b>15</b>	72,3	72	0,3	0,4
<b>20</b>	71,5	72	0,5	0,7
<b>25</b>	70,9	71	0,1	0,1
<b>30</b>	70,3	70	0,3	0,4
<b>35</b>	69,6	69	0,6	0,9
<b>40</b>	69,1	68	1,1	1,6
<b>45</b>	68,2	67	1,2	1,7

Com base na Tabela 8, é facilmente perceptível a proximidade entre os valores de temperatura da câmara superior e da câmara inferior ao longo do processo de arrefecimento, uma vez que o desvio máximo é cerca de 2% entre cada câmara. Pelo que se pode concluir que as câmaras se encontram devidamente parametrizadas.

Uma vez que cada corpo possui a sua emissividade, a fibra de vidro possui uma emissividade igual a 0.75. Com o objetivo de se verificar que a temperatura medida pelas câmaras, parametrizadas com a emissividade igual a 1, era a temperatura que se atingia realmente durante o processo de furação, definiu-se na câmara inferior o valor da emissividade da fibra de vidro e voltou-se a apontar ambas as câmaras para o mesmo ponto do ferro de soldar e captamos novamente o processo de arrefecimento com ambas as câmaras sendo a emissividade parametrizada na câmara superior fora de 1.

Na Tabela 9 registaram-se os valores de temperatura atingida por cada câmara a cada 5 segundos de arrefecimento.

*Tabela 9 - Processo de arrefecimento do ferro de soldar captado com a câmara inferior (CI) e com a câmara superior (CS) parametrizadas com emissividade de 0.75 e 1 respetivamente.*

<b>Tempo [s]</b>	<b>Temperatura CI [°C]</b>	<b>Temperatura CS [°C]</b>	<b>Diferença [°C]</b>	<b>Desvio em relação à CI [%]</b>
<b>5</b>	78	77	1	1,3
<b>10</b>	77,2	76	1,2	1,6
<b>15</b>	76,2	75	1,2	1,6
<b>20</b>	75,5	74	1,5	2
<b>25</b>	74,9	73	1,9	2,6
<b>30</b>	74,2	73	1,2	1,6
<b>35</b>	73	72	1	1,4
<b>40</b>	72,5	71	1,5	2,1
<b>45</b>	71,9	71	0,9	1,3

Os desvios presentes na Tabela 9 são eles também pequenos pelo que se pode concluir que a definição do valor da emissividade na câmara não influencia significativamente os resultados uma vez que os desvios são da mesma ordem de grandeza que os desvios obtidos quando ambas as câmaras possuem a mesma parametrização (Tabela 8).

Devido ao fato da câmara inferior estar diretamente por baixo da zona de furação, colocou-se um plástico sobre a lente da câmara com o objetivo de evitar danificar a lente da desta com as aparas que se formam durante o processo de furação. Para analisar a influência deste plástico na medição de temperatura, voltou-se a utilizar a mesma metodologia, apontou-se ambas as câmaras para o mesmo ponto do ferro de soldar e captamos o seu processo de arrefecimento. Na Tabela 10 registaram-se os valores de temperatura a cada 5 segundos de arrefecimento captada por cada uma das câmaras.

Tabela 10 - Processo de arrefecimento do ferro de soldar captado com a câmara inferior (CI) e com a câmara superior (CS) utilizando o plástico de proteção da câmara inferior,

Tempo [s]	Temperatura	Temperatura	Diferença	Desvio em relação
	CI [°C]	CS [°C]		
5	66,3	75	8,7	11,6
10	65,7	74	8,3	11,2
15	65,1	74	8,9	12
20	64,8	72	7,2	10
25	63,9	72	8,1	11,3
30	62,8	71	8,2	11,5
35	62,7	70	7,3	10,4
40	60,6	69	8,4	12,2
45	59,7	69	9,3	13,5

Da Tabela 10 verifica-se que a utilização do plástico de proteção induz uma diminuição de cerca de 10°C na medição de temperatura.

A metodologia de determinação da temperatura descrita anteriormente foi validada através da utilização dos vídeos captados para a análise da parametrização das câmaras. Uma vez que na imagem são visíveis quatro pontos de medição automática, como se pode observar na Figura 47, determinou-se analiticamente, conforme descrito no capítulo anterior, através da equação (30) a temperatura junto a esses pontos de dois *frames* do vídeo tendo se verificado que os valores obtidos eram próximos dos valores apresentados pelos pontos de medição automática da câmara, apresentando-os na Tabela 11.

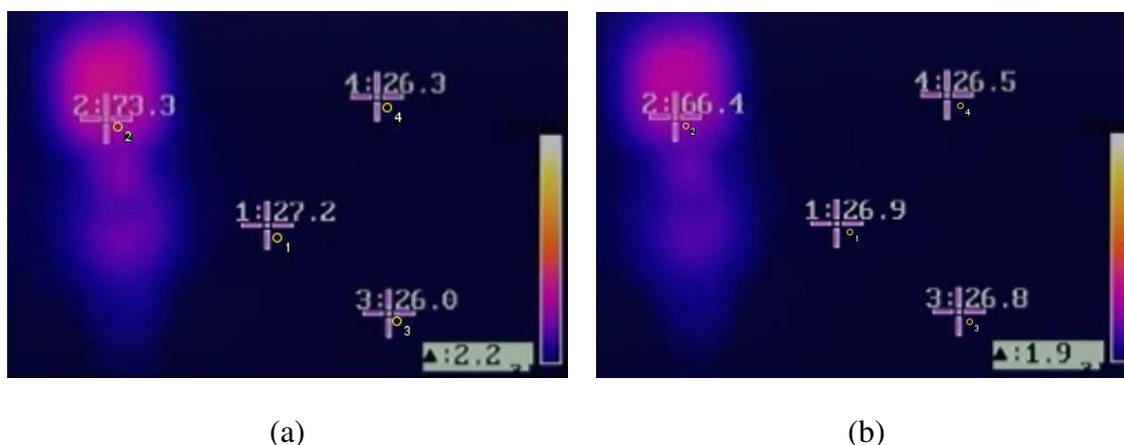


Figura 47 - Frames do vídeo de arrefecimento do ferro de soldar utilizado para a validação da metodologia de determinação manual de temperatura (a) Frame 1; (b) Frame 2.

Conforme os valores apresentados na Tabela 11 pode-se afirmar que o erro do método analítico é mínimo pelo que se utilizou esta metodologia na análise efetuada neste trabalho.

*Tabela 11 - Valores de temperatura automáticos e analíticos.*

<i>Frame</i>	Nº indicador/ Ponto	Temperatura do indicador [°C]	Temperatura determinada [°C]	Desvio em relação ao indicador [%]
<b>1</b>	1	27,2	26,34	0
	2	73,3	77,66	0.1
	3	26	26,34	0
	4	26,3	27,03	0
<b>2</b>	1	26,3	26,9	0.
	2	70,14	66,4	0.1
	3	27,03	26,8	0
	4	26,37	26,5	0

Ainda sobre a validação do método analítico, analisou-se o comportamento da temperatura na vizinhança do ponto selecionado como sendo o ponto de temperatura máxima. Para tal, analisou-se quatro pontos (pontos 2, 3, 4 e 5 da Figura 48 (a), (b) e (c)) em redor do ponto de temperatura máxima (ponto 1 das Figura 48 (a), (b) e (c)) para três furos selecionados de forma aleatória e determinou-se os respetivos desvios.

A temperatura dos pontos presentes na Figura 48, apresenta-se na Tabela 12 bem como os respetivos desvios.

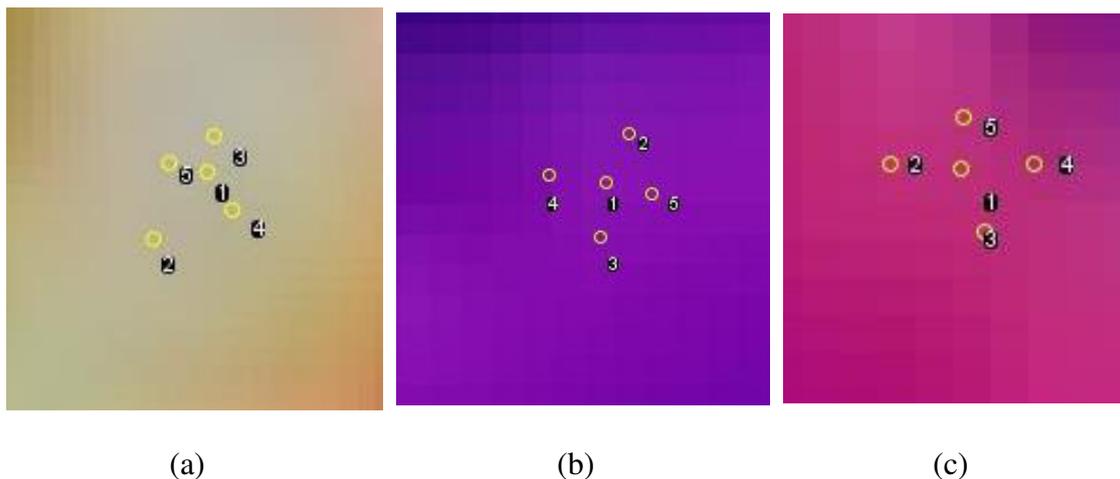


Figura 48 – Análise da temperatura na vizinhança do ponto 1 (a) furo efetuado com a ferramenta BZT01 na placa 10A; (b) furo 1 efetuado com a ferramenta helicoidal na placa 10A; (c) furo 2 efetuado com a ferramenta Dagger na placa 10A.

Tabela 12 – Temperatura dos pontos na vizinhança do ponto 1 e respetivos desvios.

Placa 10A	Ponto	Temperatura do ponto [°C]	Desvio em relação ao ponto 1 [%]
<b>Furo 1 BZT01</b>	1	227,3	-
	2	232,1	0,021
	3	236,6	0,041
	4	229,2	0,009
	5	236,9	0,042
<b>Furo 1 Helicoidal</b>	1	65,9	-
	2	65,9	0,001
	3	66	0,002
	4	68,6	0,041
	5	65,1	0,012
<b>Furo 1 Dagger</b>	1	103,2	-
	2	110	0,065
	3	105,2	0,018
	4	112,3	0,087
	5	104,7	0,013

Tendo em consideração os desvios presentes na Tabela 12, conclui-se que apesar da precisão, aquando da seleção manual do pixel correspondente à temperatura máxima tendo em conta a escala de cores presente na imagem, ser baixa é expetável que o valor

de temperatura não varie de forma significativa na sua vizinhança, uma vez que os desvios entre a temperatura do ponto selecionado e a temperatura dos pontos que se encontram na sua vizinhança são próximos de zero.



## Capítulo 5. Análise de Resultados

Após os ensaios de furação, procedeu-se à realização de *scans* e raio-X às placas furadas de modo a que se possa determinar a área de dano através da aplicação *ImageJ* utilizando o procedimento de análise de imagem referido anteriormente no ponto 4.3, seguido da análise de resultados de cada técnica destrutiva (*scan*, raio-X e termografia) e posteriormente com uma análise comparativa entre estas técnicas de modo a que se possa concluir qual o método mais eficaz na quantificação do dano.

Na análise das imagens *scan* e raio-X determinou-se o diâmetro máximo de dano e a área de dano à entrada e saída de cada furo, tendo em conta estes dois parâmetros, determinou-se o fator de dano ( $F_d$ ), o fator de área delaminada ( $F_{da}$ ) e o fator de dano ajustado ( $F_{daj}$ ) os quais quantificam a qualidade do furo.

Por fim, quanto às imagens termográficas, estudaram-se as gamas de temperatura atingidas durante o processo de furação e respetivas distâncias ao centro e áreas afetadas por cada gama de temperatura com o objetivo de se estabelecer uma relação entre a área/localização do dano obtida pela análise dos *scans*, raio-X e das gamas de temperatura atingidas em cada furo. Uma vez que a temperatura é um fator que influencia fragilização do material (*Tavares et al. 2010*), são também analisados quais os parâmetros de furação que permitem obter temperaturas menores durante o processo de furação.

### 5.1 Avaliação qualitativa dos ensaios de furação

Tendo em consideração de que as placas produzidas foram feitas em laboratório através da modelação por compressão, foram induzidos alguns defeitos residuais nas placas durante o processo de fabrico. De modo a contornar este fator, antes de se iniciar os ensaios de furação delimitou-se nas placas a área útil de furação que visivelmente se apresentava livre de defeitos superficiais, o que não garante que não existam realmente defeitos entre as camadas do compósito, que posteriormente irão afetar a análise de dados. Tendo estes fatores em consideração, e de forma a obtermos valores mais representativos dos parâmetros em estudo, efetuou-se um conjunto de cinco furos para cada condição em estudo.

Dentro da repetibilidade efetuada é perceptível a diferença entre a qualidade superficial de furos efetuados nas mesmas condições. Pode-se observar na Figura 49 (a) o primeiro furo e na Figura 49 (b) o quarto furos realizados com os parâmetros P1 (ver Tabela 5), na placa

10B. A qualidade superficial do quarto furo é visivelmente pior que a qualidade superficial do primeiro furo embora ambos os furos tenham sido efetuados nas mesmas condições de furação.



*Figura 49 – Scan de dois furos efetuados com os parâmetros P1 na placa 10B com a ferramenta BZT03  
(a) Furo 1; (b) Furo 4.*

Como já foi suprarreferido, para a realização dos ensaios recorreu-se à utilização de duas câmaras termográficas, uma superior e outra inferior, com o objetivo de se estudar a temperatura atingida durante o processo em ambas as faces da placa.

Após efetuar o primeiro ensaio verificou-se que o cabeçote da ferramenta tapava a imagem da câmara superior sendo que nos é somente possível determinar a temperatura presente na zona de furação após o recuo da ferramenta, não sendo assim possível determinar gamas de temperatura nem áreas associadas uma vez que esta câmara se encontra ligeiramente afastada da placa e não está alinhada com o eixo de furação. Na Figura 50 apresenta-se a imagem obtida pela câmara superior imediatamente após o recuo da ferramenta na qual é evidente que as imagens obtidas por esta câmara são de difícil análise.

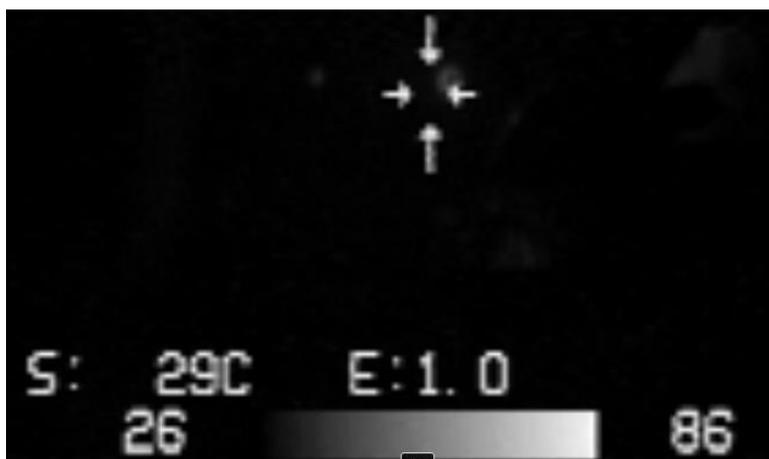


Figura 50 – Imagem obtida pela câmara superior no instante imediatamente após o recuo da ferramenta BZT03 quando da furação do primeiro furo da placa 10B com os parâmetros P1.

Outro aspecto que também influencia a análise das imagens termográficas é a presença dos indicadores de temperatura (Figura 51 (a)), tanto nas imagens adquiridas pela câmara superior como pela câmara inferior, uma vez que o referencial dos mesmos, aquando do tratamento de imagem na fase de realização do “Color Threshold”, Figura 51 (b), o local onde se encontra o indicador de temperatura fica um efeito de uma interrupção da imagem, como se constata na Figura 51 (c). Para contornar este fato preenche-se/apaga-se a zona onde estes se encontram os indicadores de temperatura assumindo que essa zona tem o mesmo valor de *RGB* que a sua vizinhança, obtendo-se a Figura 51 (d).

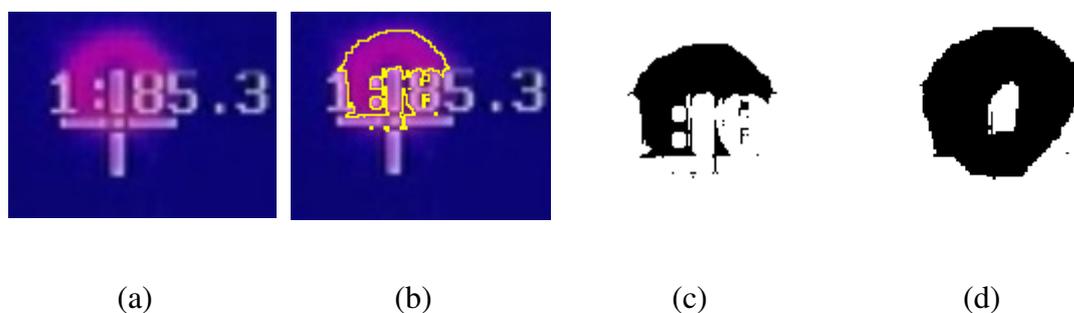


Figura 51 – Influência do ponto de medição de temperatura na imagem adquirida pela câmara inferior: (a) Imagem original; (b) Seleção da área na imagem com o RGB correspondente à gama de temperatura a analisar (“color Threshold”); (c) Isolar a área a analisar; (d) Preenchimento/eliminação das linhas do indicador de temperatura conforme a sua vizinhança.

No início do processo de furação eram desconhecidos os valores máximos de temperatura atingidos por cada ferramenta neste processo. Pelo que, inicialmente parametrizou-se a câmara superior para um intervalo de temperaturas compreendido entre os 15°C e a temperatura máxima medida por esta (88°C). De seguida parametrizou-se a câmara inferior para o mesmo intervalo. Tendo-se verificado, através dos vídeos efetuados na

furação da placa 30A, que o valor máximo do intervalo de temperaturas era atingido e provavelmente ultrapassado em ambas as câmaras.

Uma vez que a câmara superior já se encontrava parametrizada para o seu valor máximo de temperatura, alterou-se somente o intervalo de temperatura da câmara inferior para uma temperatura mínima de 25°C e uma temperatura máxima de 122°C, a qual se verificou ser novamente atingida após a análise dos furos realizados na placa 20<sup>a</sup>. Por fim parametrizou-se esta câmara para o seu valor máximo de medição, 250°C, embora esta temperatura seja igualmente atingida em alguns ensaios.

Os dois primeiros furos da placa 30A foram realizados com parâmetros de corte inferiores aos pretendidos uma vez que se tratavam dos primeiros furos, estes serviram para que se pudesse fazer os devidos ajustes para os seguintes furos/ensaios.

Aquando da realização do furo 1 da placa 10B, este foi efetuado, por lapso, com os parâmetros utilizados no ensaio anterior a este, parâmetros P0 da Tabela 5 em vez de ser com os parâmetros P1 presentes na mesma tabela. De referir também que, no primeiro furo efetuado com a ferramenta *Dagger*, o cabeçote da ferramenta, cujo sistema de fixação é por encaixe, caiu durante o processo de furação, acrescentando dano, como se pode observar através da Figura 52, o que inviabilizou a análise deste furo.

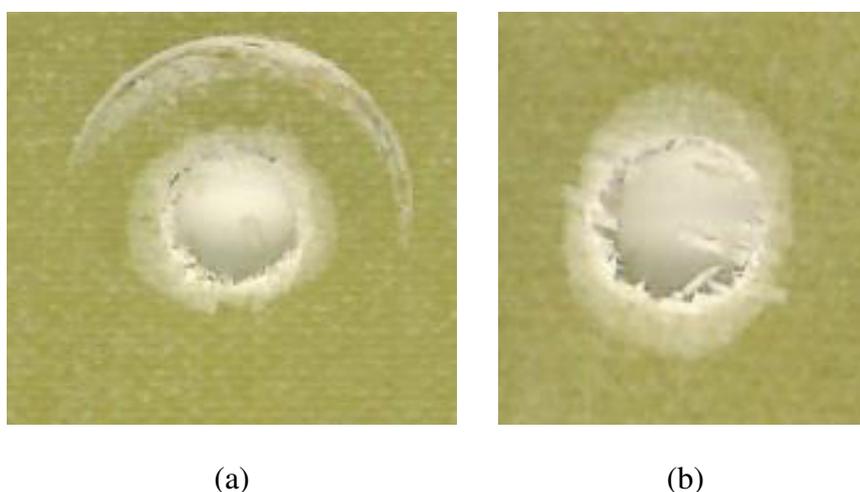


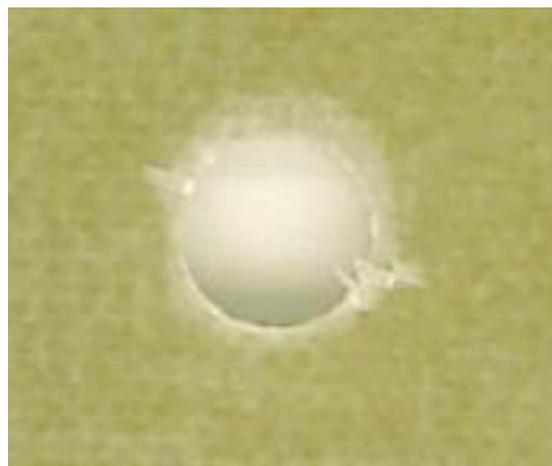
Figura 52 - Furo nulo realizado com a broca *Dagger* na placa 10A (a) À entrada da ferramenta; (b) À saída da ferramenta.

O fato de se utilizarem ferramentas diferentes, duas brocas e duas fresas, que segundo o fabricante são próprias para maquinar materiais compósitos, serve para evidenciar que a qualidade do furo é visivelmente distinta, como se pode observar através da Figura 53 (a).

Na Figura 51 (a) apresenta-se um furo efetuado com a fresa BZT03 e na Figura 53 (b) um furo efetuado com a broca helicoidal. Deteta-se a existência de uma “tampa” à saída do furo efetuado com a ferramenta BZT03 ligada à placa por apenas algumas fibras que surge aquando da furação das últimas camadas do compósito estas são cortadas por arrombamento devido á força axial exercida pela ferramenta no material, o que contribui para a ocorrência de uma delaminação interlaminar superior à que ocorre com a utilização das brocas.



(a)



(b)

*Figura 53 – (a) Furo realizado com a fresa BZT03; (c) Furo realizado com a broca helicoidal.*

O raio-X fora efetuado somente à face superior da placa, uma vez que se tratara de um estudo preliminar.

Após imersão dos furos no fluído de contraste, necessário para efetuar o raio-X aos mesmos, aquando da fase de eliminar os excessos de fluído detetou-se que este se encontrava em estado sólido sobre a placa e conseqüentemente de difícil eliminação pelo que se recorreu a um pano húmido para eliminar os excessos o que posteriormente influenciou a qualidade do raio-X, visto que, ficou fluído de contraste em excesso no interior do furo e pouco à superfície como se pode observar na Figura 54.

A razão pela qual o excesso de fluído se tornára difícil de eliminar dever-se-á ao fato das condições ambientais não serem favoráveis, nomeadamente a temperatura ser elevada, bem como o tempo de imersão possa ter sido excessivo.



Figura 54 – Furo após eliminar o excesso superficial do fluido de contraste.

## 5.2 Digitalização passiva

As imagens *scan* obtidas apresentam-se na Figura 55. Através da análise destas figuras determinou-se a área de dano bem como os diferentes fatores de dano expressos matematicamente pelas equações (17), (19) e (22).



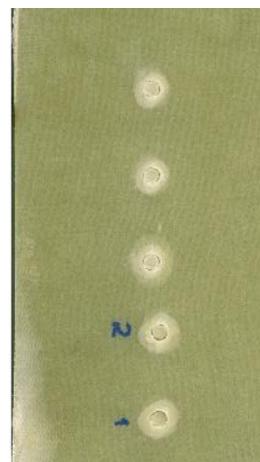
(a)



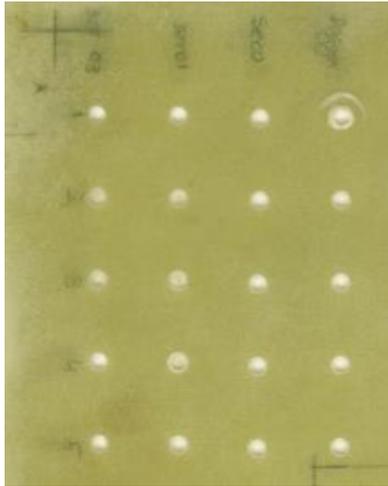
(b)



(c)



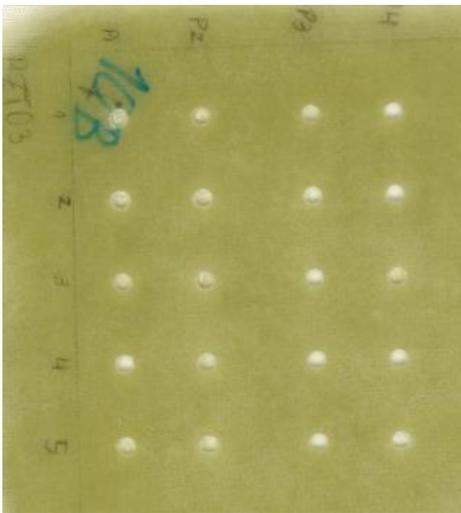
(d)



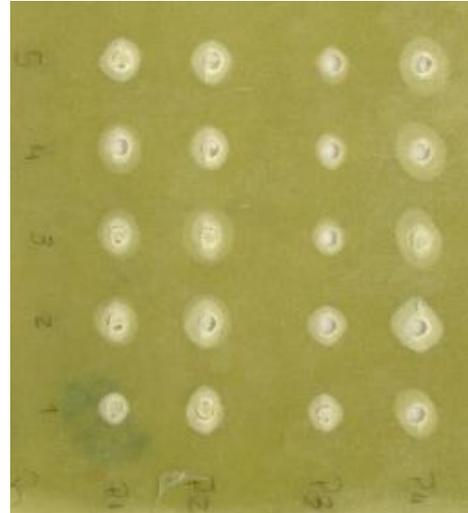
(e)



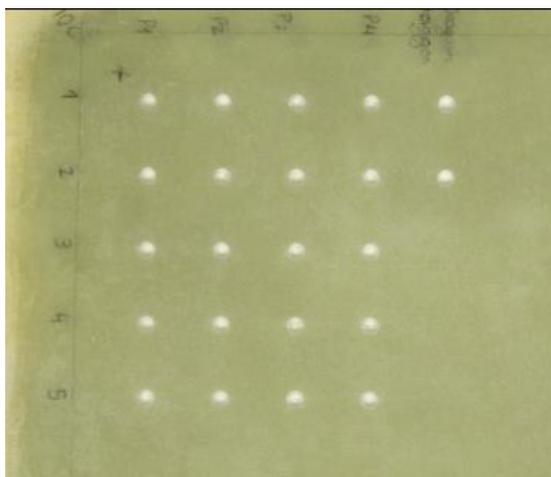
(f)



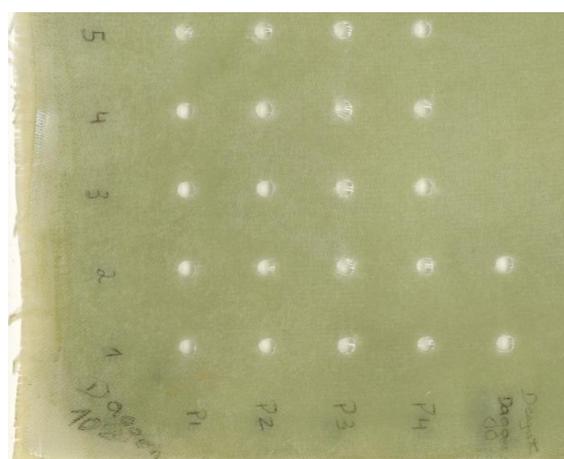
(g)



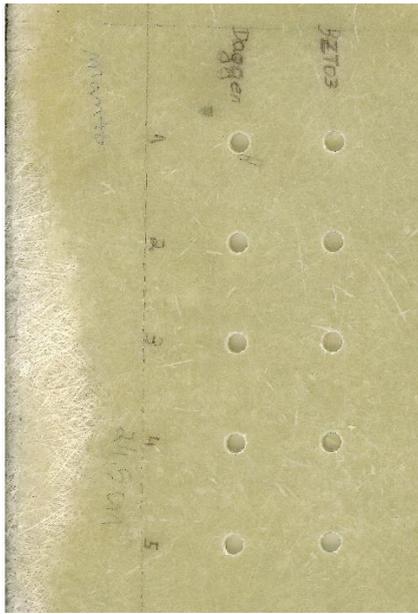
(h)



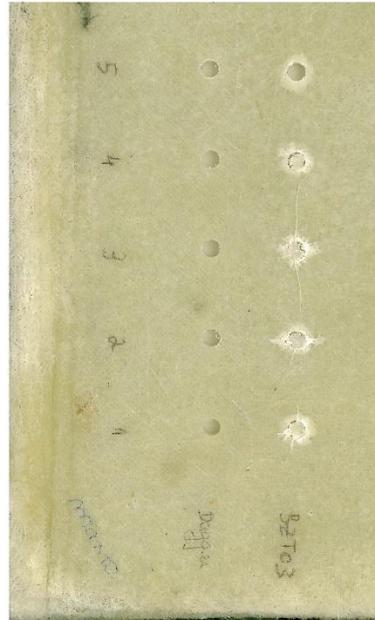
(i)



(j)



(k)



(l)

Figura 55 - Imagens Scan: (a) Placa 30A à entrada da ferramenta; (b) Placa 30A à saída da ferramenta; (c) Placa 20A à entrada da ferramenta (d) Placa 20A à saída da ferramenta; (e) Placa 10A à entrada da ferramenta; (f) Placa 10A à saída da ferramenta; (g) Placa 10B à entrada da ferramenta; (h) Placa 10B à saída da ferramenta; (i) Placa 10C à entrada da ferramenta; (j) Placa 10C à saída da ferramenta; (k) Placa 10M à entrada da ferramenta; (l) Placa 10M à saída da ferramenta.

Na Tabela 13 apresentam-se os resultados, da análise dos scans, referentes à área de dano causado à entrada e saída da ferramenta BZT03, aquando da utilização dos mesmos parâmetros de furação ( $n = 5300rpm$  e  $f = 640mm/min$ ), nas placas de 30, 20 e 10 camadas de tecido de fibra de vidro e na placa de 10 camadas de manto de fibra de vidro.

Os furos 1 e 2 da placa 30A foram efetuados com velocidades de rotação e de avanço menores que os restantes furos devido às etapas iniciais de parametrização do processo, pelo que na comparação dos valores de dano induzido nestes furos com o dano induzido nos estantes se verifica uma grande discrepância de valores.

Tabela 13 - Análise da área de dano à entrada e saída dos furos realizados com a ferramenta BZT03 a partir das imagens scan.

	Nº furo	Diâmetro máximo à entrada [mm]	Diâmetro máximo à saída [mm]	Área máxima à entrada [mm <sup>2</sup> ]	Área máxima à saída [mm <sup>2</sup> ]	Área de dano à entrada [mm <sup>2</sup> ]	Área de dano à saída [mm <sup>2</sup> ]
<b>30<sup>a</sup></b>	1	7,5	11,165	44,179	97,906	16,464	57,466
	2	7,877	15,713	48,732	193,914	17,274	82,789
	3	7,394	21,52	42,939	363,726	15,802	283,824
	4	7,26	25,546	41,396	512,249	15,307	407,714
	5	8,302	29,976	54,132	705,728	22,266	270,109
<b>20<sup>a</sup></b>	1	7,063	14,123	39,180	156,655	7,438	130,434
	2	6,87	14,81	37,068	172,266	5,272	284,76
	3	6,69	23,243	35,151	424,301	5,412	201,721
	4	7,409	13,031	43,113	133,366	6,697	216,19
	5	6,373	14,909	31,899	174,577	4,38	100,048
<b>10<sup>a</sup></b>	1	6,769	11,589	35,986	105,483	6,233	73,626
	2	7,041	12,663	38,937	125,94	6,194	64,263
	3	7,238	12,458	41,146	121,895	8,641	55,221
	4	7,696	11,980	46,518	112,721	10,031	93,46
	5	6,489	10,139	33,071	80,738	5,8	100,409
<b>10M</b>	1	7.735	14.045	46.991	154.929	10.299	82.505
	2	7.453	18.658	43.627	273.414	10.307	90.414
	3	11.531	30.540	104.430	732.534	17.9	95.281
	4	8.767	12.227	60.366	118.379	16.343	39.641
	5	8.251	13.728	53.469	148.015	14.418	83.376

Tendo em conta os dados apresentados na Tabela 13 procedeu-se ao cálculo do fator de dano ( $F_d$  equação (17)), fator de área delaminada ( $F_{da}$  equação (19)) bem como do fator de dano ajustado ( $F_{daj}$  equação (22)) de modo a que se possa fazer uma análise comparativa entre estes valores à entrada (Tabela 14) e à saída (Tabela 15) da ferramenta.

Tabela 14 - Fatores de dano à entrada da ferramenta BZT03 determinados a partir das imagens scan.

Placa	Nº furo	Fator de dano ( $F_d$ )	Fator de área delaminada ( $F_{da}$ )	Fator de dano ajustado ( $F_{daj}$ )
<b>30<sup>a</sup></b>	1	1,25	1,582	1,573
	2	1,313	1,611	1,66
	3	1,232	1,559	1,541
	4	1,21	1,541	1,506
	5	1,384	1,787	1,841
<b>Média</b>	-	1.275	1.629	1.629
<b>20<sup>a</sup></b>	1	1,177	1,263	1,319
	2	1,145	1,186	1,245
	3	1,115	1,191	1,216
	4	1,235	1,237	1,366
	5	1,062	1,155	1,142
<b>Média</b>	-	1.147	1.206	1.258
<b>10<sup>a</sup></b>	1	1,128	1,220	1,245
	2	1,174	1,219	1,292
	3	1,206	1,306	1,373
	4	1,283	1,355	1,482
	5	1,082	1,205	1,188
<b>Média</b>	-	1.250	1.4	1.471
<b>10M</b>	1	1.289	1.364	1.494
	2	1.242	1.365	1.444
	3	1.922	1.633	2.338
	4	1.46	1.578	1.804
	5	1.375	1.510	1.670
<b>Média</b>	-	1.458	1.490	1.750

Tabela 15 - Fatores de dano à saída da ferramenta BZT03.

Placa	Nº furo	Fator de dano ( $F_d$ )	Fator de área delaminada ( $F_{da}$ )	Fator de dano ajustado ( $F_{daj}$ )
<b>30<sup>a</sup></b>	1	1,861	3,032	3,183
	2	2,619	3,928	4,738
	3	3,587	11,038	11,436
	4	4,258	15,42	15,935
	5	4,996	10,553	12,956
<b>Média</b>	-	4.280	12.337	13.442
<b>20<sup>a</sup></b>	1	2,354	5,613	5,592
	2	2,468	11,071	9,636
	3	3,874	8,134	9,544
	4	2,172	8,646	7,407
	5	2,485	4,538	5,008
<b>Média</b>	-	2.671	7.6	7.437
<b>10<sup>a</sup></b>	1	1,932	3,604	3,647
	2	2,111	3,273	3,653
	3	2,076	2,953	3,395
	4	1,997	4,305	4,199
	5	1,690	4,551	3,921
<b>Média</b>	-	2.146	3.078	3.564
<b>10M</b>	1	2.341	3.918	4.385
	2	3.110	4.198	5.529
	3	5.090	4.370	7.907
	4	2.046	2.402	2.988
	5	2.288	3.949	4.340
<b>Média</b>	-	2.975	3.767	5.030

Através da análise dos fatores determinados nas tabelas acima, verifica-se que o dano à saída da ferramenta é superior ao dano que surge à entrada da ferramenta, bem como existe uma maior variação dos fatores de dano à saída do furo.

É também possível observar que o fator de dano ( $F_d$ ) e o fator de área delaminada ( $F_{da}$ ) são menos conservativos, uma vez que têm em conta somente o diâmetro máximo de delaminação e a área máxima delaminada, respetivamente, para quantificar a qualidade do furo embora haja uma proximidade entre os valores de fator de dano ajustado ( $F_{daj}$ ) e o fator de área delaminada ( $F_{da}$ ), o que nos leva a afirmar que para a quantificação do dano o parâmetro que maximiza o valor do fator é a área, tal como afirmam *Juan C. Campos et al. (2007)*.

Para facilitar a análise da variação dos fatores de dano induzidos pela furação de provetes de material compósito, calculou-se o valor médio dos cinco furos realizados para cada fator, presente na Tabela 14 e Tabela 15, sendo esse o valor que se utilizou na construção do Gráfico 1 e do Gráfico 2.

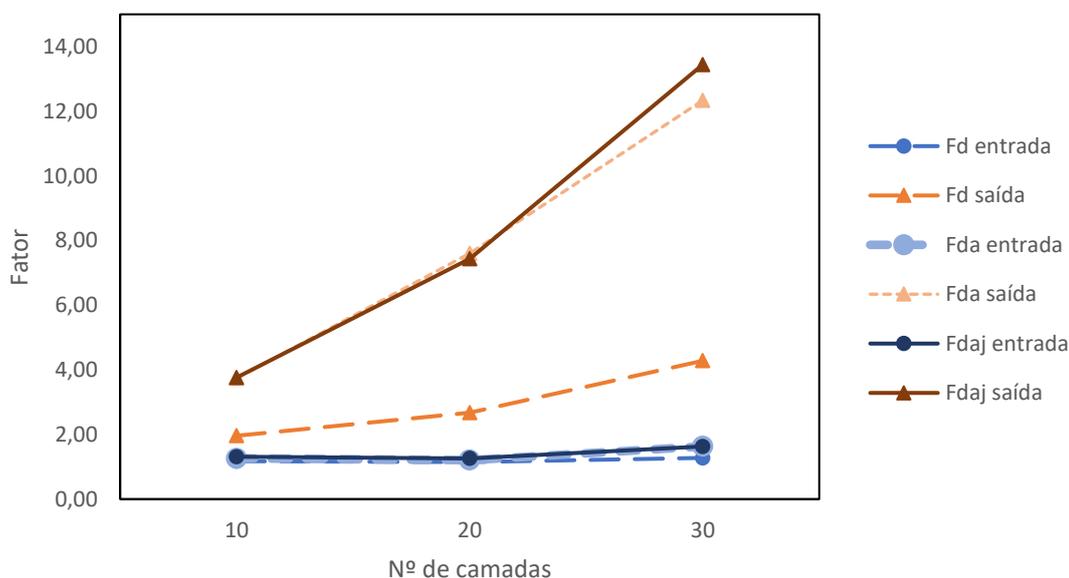


Gráfico 1 - Variação dos fatores de dano com o aumento de espessura a furar.

Analisando o Gráfico 1, constata-se que os fatores de dano aumentam com o aumento da espessura da placa a furar. É também visível o fato de que o fator de área delaminada à saída ( $F_{da}$  saída) e o fator de dano ajustado à saída ( $F_{daj}$  saída) são mais conservativos na avaliação da qualidade do furo uma vez que apresentam valores superiores aos restantes fatores como seria espetável uma vez que ambos têm em consideração o valor da área de dano, que como foi anteriormente verificado, é o parâmetro que majora os fatores.

Com o intuito de se estudar a influência do tamanho da fibra na qualidade dos furos, no Gráfico 2 e no Gráfico 3 apresentam-se os fatores de dano induzido obtidos pela furação

da placa 10A de fibra longa e da placa 10M de fibra curta com as ferramentas BZT03 e *Dagger*, respetivamente, com os parâmetros de furação iniciais (P0 da Tabela 5).

De forma a clarificar a informação, as tabelas que serviram de suporte para elaborar os gráficos seguintes (Gráfico 3 até ao Gráfico 24) encontram-se em anexo, o qual se encontra devidamente identificado ao longo do documento.

Os fatores presentes no Gráfico 3 foram calculados com base nas tabelas presente no Anexo B.

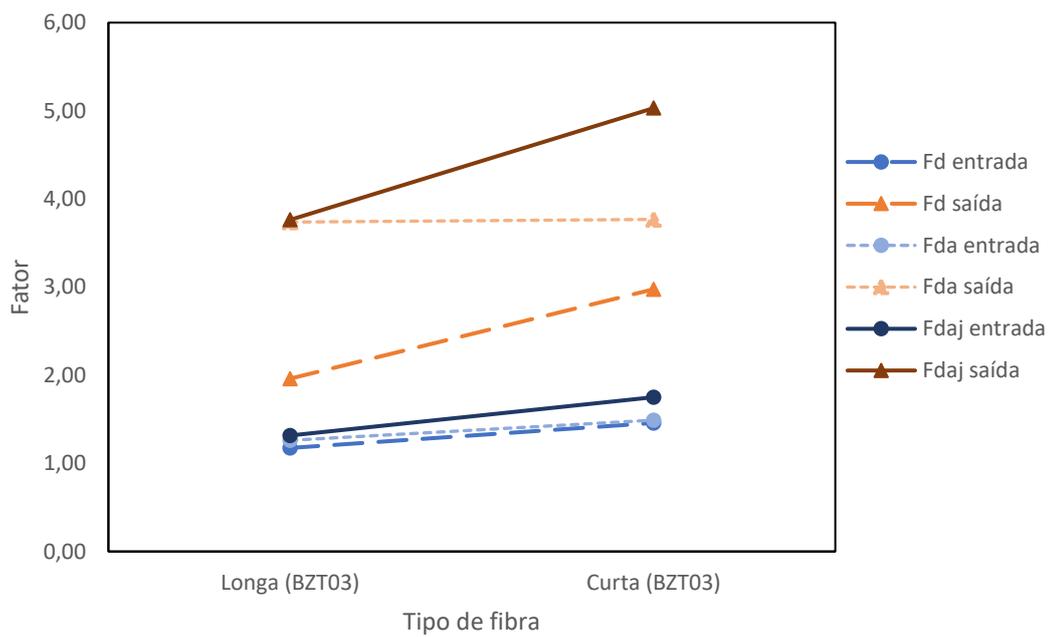


Gráfico 2– Variação dos fatores de dano induzido pela furação com a ferramenta BZT03 em placas com diferentes tamanhos de fibra.

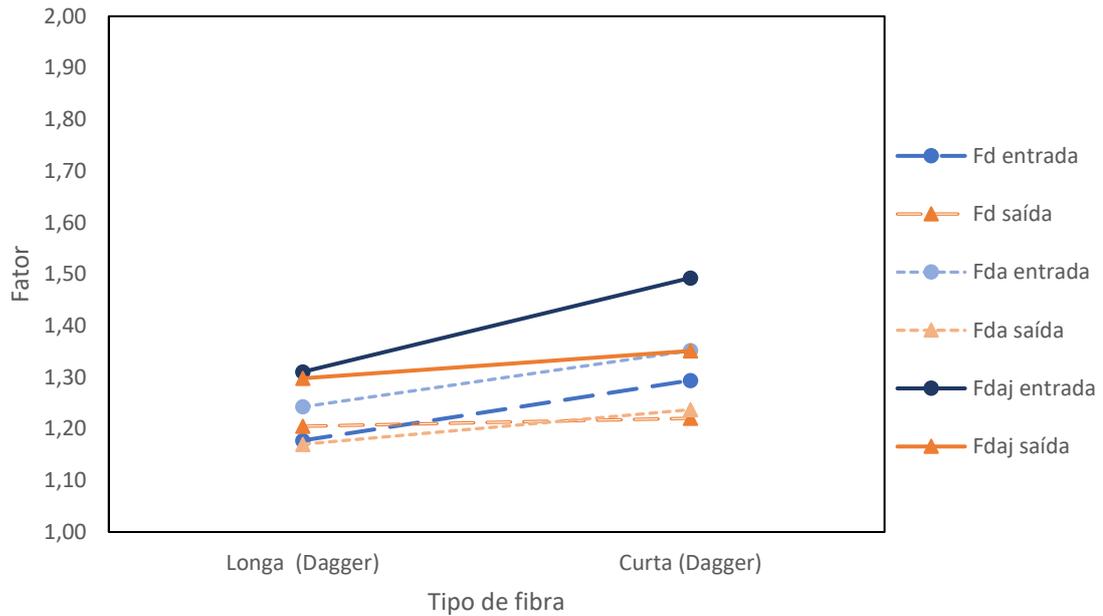


Gráfico 3 - Variação dos fatores de dano induzido pela furação com a ferramenta Dagger em placas com diferentes tamanhos de fibra.

Ainda na placa 10A, utilizando as diferentes ferramentas referidas anteriormente e os parâmetros iniciais, realizou-se 5 furos com cada uma delas. A área de dano e respetivos fatores induzidos por cada uma das ferramentas nesta placa apresentam-se no Anexo C.

Tendo em conta os fatores de dano determinados (Anexo C.) construiu-se o Gráfico 4, a partir do qual pode-se constatar que com as ferramentas *Dagger* e helicoidal obteve-se fatores de dano menores comparativamente com as ferramentas BZT01 e BZT03.

De salientar ainda que, com a ferramenta *Dagger* o dano à entrada e à saída assumem valores próximos, pelo que se pode afirmar que com esta ferramenta é possível obter furos em material compósito de fibra longa com maior qualidade que com qualquer outra ferramenta ensaiada.

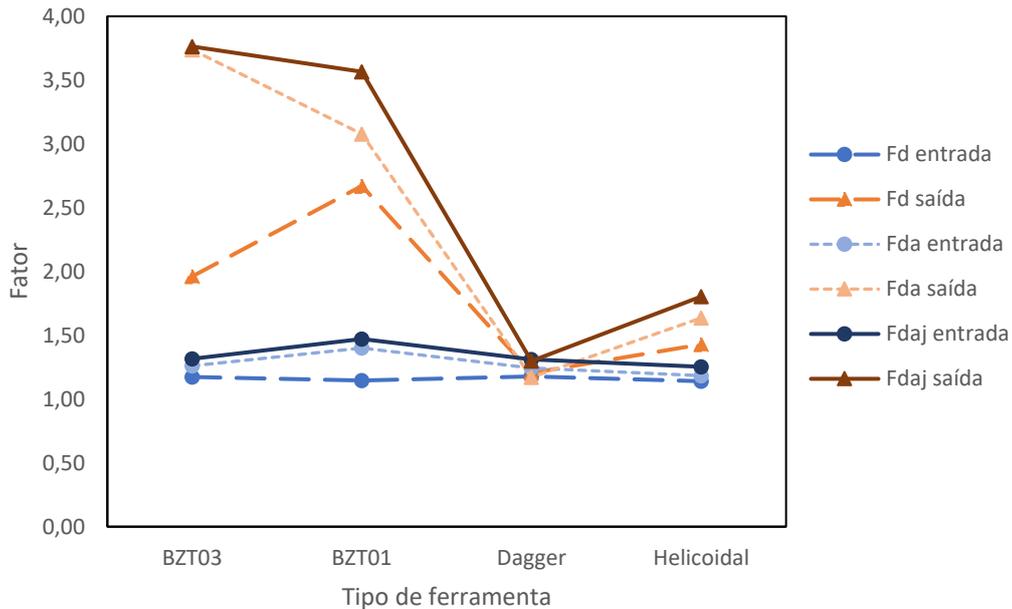


Gráfico 4 - Variação do fator de dano induzido pelas diferentes ferramentas na placa 10A.

Fez-se variar os parâmetros de furação com a ferramenta BZT03 e *Dagger* nas placas 10B e 10C, respetivamente, de modo a que se possa aferir quais os parâmetros mais indicados para minimizar o dano induzido na furação. Evidenciando no Anexo D e E a área de dano e respetivos fatores induzidos nestas condições na placa 10B e 10C, respetivamente. Os parâmetros utilizados apresentam-se na Tabela 5.

O Gráfico 5 e o Gráfico 6 apresentam de forma resumida a variação dos fatores de dano induzido pela utilização de cada parâmetro na placa 10B e na placa 10C (presentes nos Anexos D e E)

Através da análise destes gráficos, constata-se que tanto com a ferramenta BZT03 como com a ferramenta *Dagger* os parâmetros que induzem furos de pior qualidade são os parâmetros P4 (velocidade de rotação de 1300 rpm e velocidade de avanço 234 mm/min), sendo que com estes parâmetros são atingidos fatores de dano maiores com a ferramenta BZT03 do que com a ferramenta *Dagger*.

Na Figura 56 e na Figura 57, apresentam-se os furos obtidos com a ferramenta BZT03 e com a ferramenta *Dagger*, respetivamente, utilizando os parâmetros P4, através das quais é perceptível que o dano causado pela ferramenta BZT03 é maior que o dano causado pela ferramenta *Dagger*.

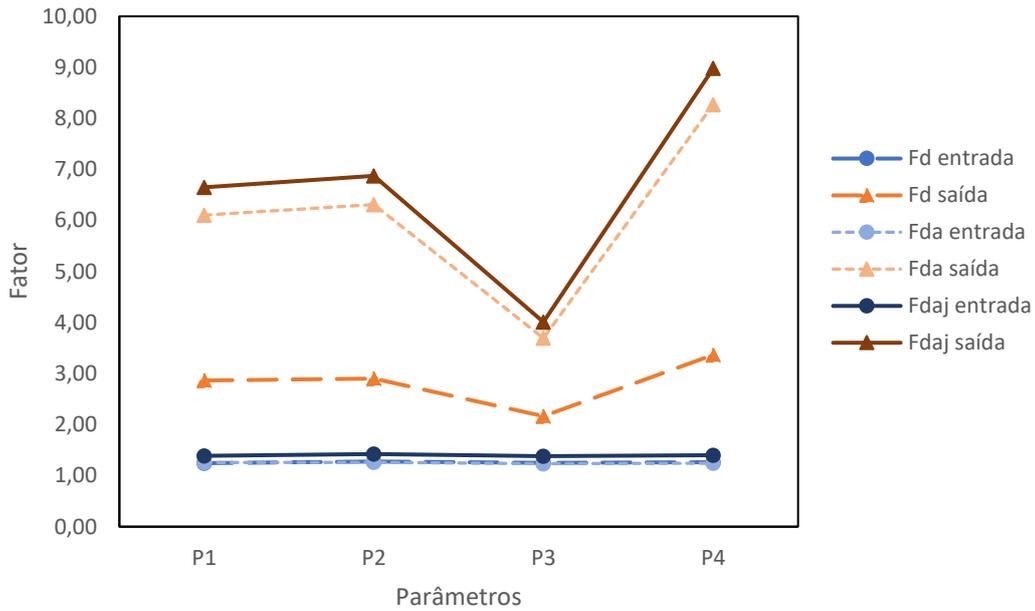


Gráfico 5 - Variação do fator de dano induzido pelos diferentes parâmetros de furação (ver Tabela 5) na placa 10B com a ferramenta BZT03.

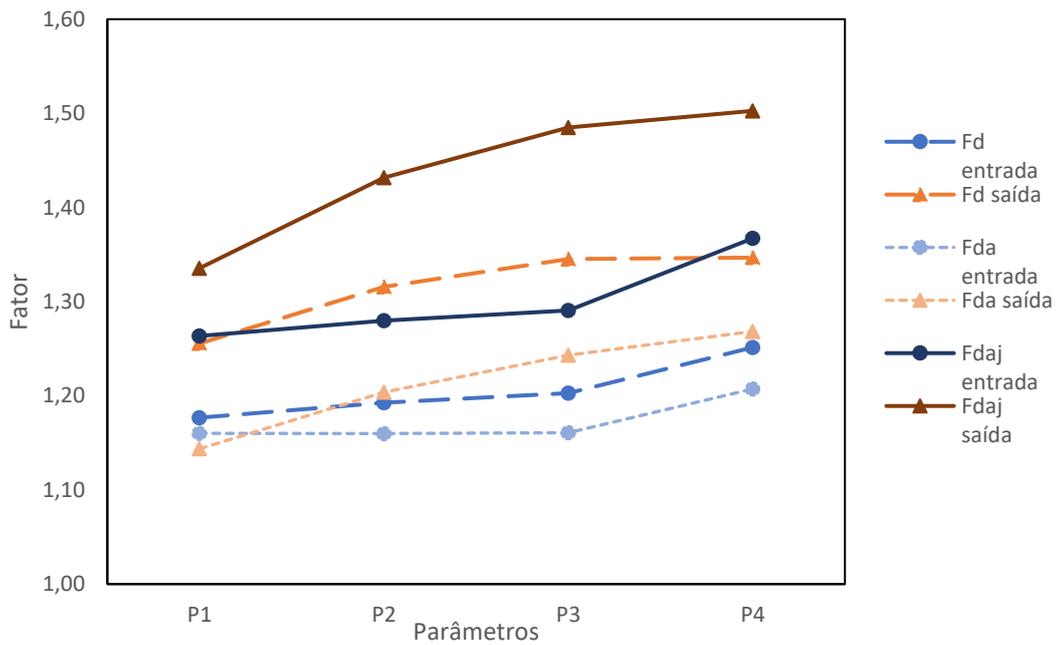
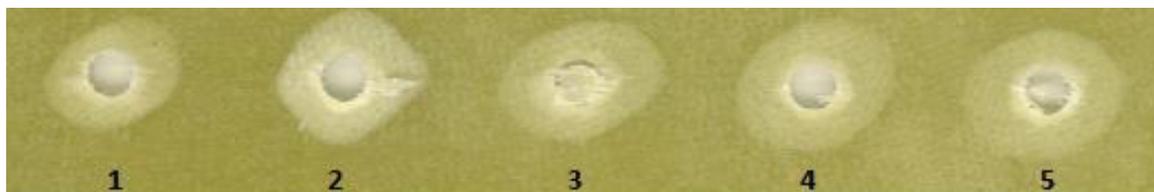


Gráfico 6 - Variação do fator de dano induzido pelos diferentes parâmetros de furação (ver Tabela 5) na placa 10C com a ferramenta Dagger.



(a)



(b)

*Figura 56 - Furos obtidos com os parâmetros P4 (a) À entrada do furo; (b) À saída do furo com a ferramenta BZT03 na placa 10B.*



(a)



(b)

*Figura 57 - Furos obtidos com os parâmetros P4 (ver Tabela 5) (a) À entrada do furo; (b) À saída do furo com a ferramenta Dagger na placa 10C.*

O Gráfico 7 permite a comparação da qualidade dos furos efetuados na placa 10M com as ferramentas BZT03 e *Dagger*. Os fatores utilizados para a elaboração deste gráfico encontram-se no Anexo F.

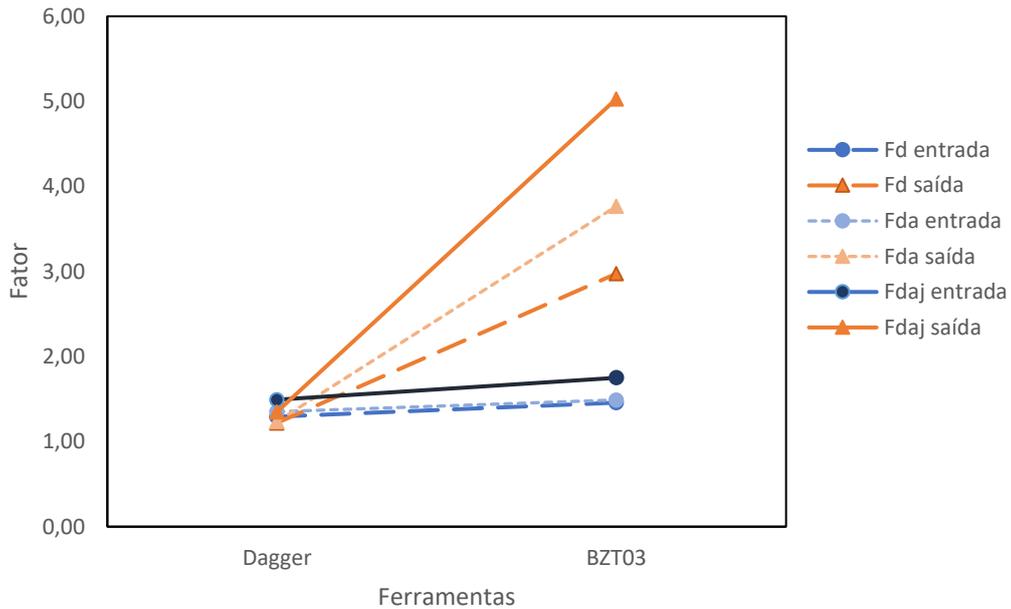


Gráfico 7 - Variação dos fatores de dano com diferentes ferramentas numa placa de fibra curta.

Pela análise do Gráfico 7 verifica-se que os furos realizados com a ferramenta *Dagger* na placa de fibra curta apresentam uma melhor qualidade à saída do furo como se pode observar através da Figura 58, sendo basicamente o oposto do que se obteve com as restantes ferramentas tanto na furação de fibra curta como na de fibra longa.



(a)



(b)

Figura 58 - Furos obtidos com os parâmetros iniciais, P0, (a) à entrada do furo; (b) à saída do furo com a ferramenta *Dagger* na placa 10M.

Após terem sido efetuados todos os furos com a ferramenta *Dagger*, com o objetivo de analisar qual a influência do desgaste desta ferramenta após ter-se efetuado um total de 30 furos (5 na placa 10A, 5 na placa 10M e 20 na placa 10C) com parâmetros de furação distintos, realizaram-se dois furos na placa 10C com os parâmetros iniciais (P0 da Tabela

5), os quais se irá comparar com os furos 2 e 3 efetuados com a mesma ferramenta e com os mesmos parâmetros (P0 da Tabela 5) na placa 10A.

Na Figura 59 apresentam-se o *scan* obtido dos furos 2 e 3 efetuados na placa 10A e os dois últimos dois furos realizados na placa 10C com a ferramenta *Dagger* à entrada e saída da ferramenta com os mesmos parâmetros. Através desta imagem observa-se que a delaminação, tanto à saída como à entrada da ferramenta, dos dois primeiros furos (Figura 59 (a) e (b)) efetuados é menor que a delaminação dos últimos (Figura 59 (c) e (d)).



(a)



(b)



(c)



(d)

*Figura 59 - Furos efetuados com a ferramenta Dagger (a) Furos 2 e 3 da placa 10A à entrada da ferramenta; (b) Furos 2 e 3 da placa 10A à saída da ferramenta; (c) Furos 1 e 2 da placa 10C à entrada da ferramenta; (d) Furos 1 e 2 da placa 10C à saída da ferramenta.*

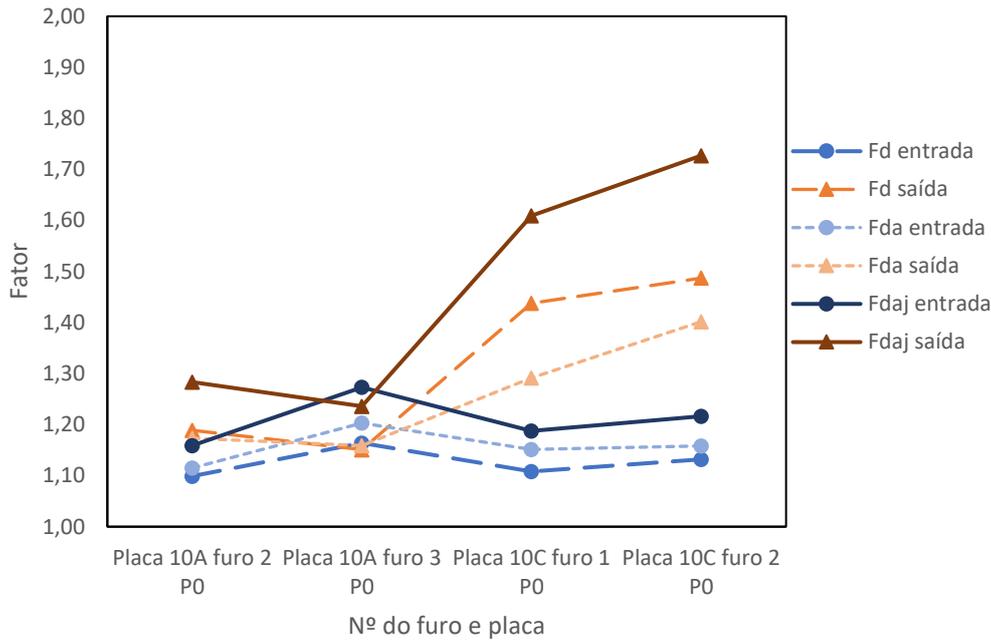


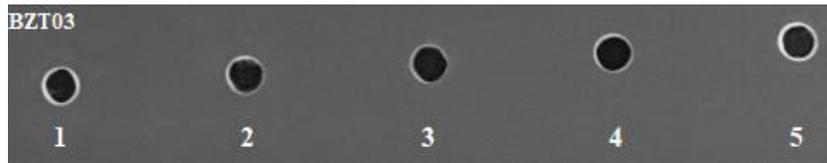
Gráfico 8 - Comparação dos fatores de dano nos dois primeiros e últimos furos efetuados com a ferramenta Dagger.

A análise dos fatores de dano associados a estes furos apresenta-se no Gráfico 8, através do qual se pode afirmar que após efetuar 30 furos com esta ferramenta (*Dagger*) e com diferentes parâmetros de furação a qualidade dos últimos furos efetuados é menor e consequentemente apresentam fatores de dano superiores aos do primeiro furo efetuado, como seria espetável, uma vez que as arestas de corte vão sofrendo desgaste a cada furo efetuado.

Os fatores utilizados para a elaboração do Gráfico 8 encontram-se no Anexo G.

### 5.3 Raio-X

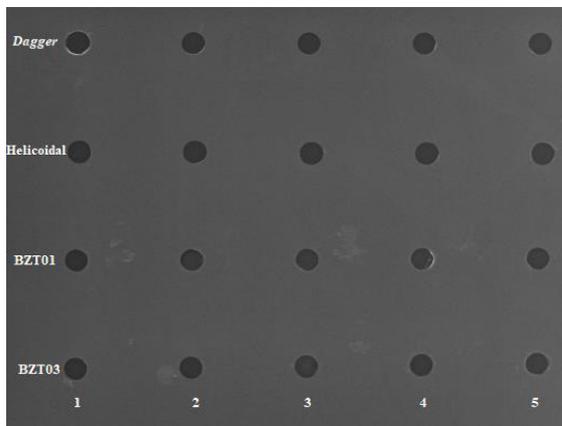
Efetuuou-se o raio-X na face superior da placa, à entrada da ferramenta, os quais se apresentam na Figura 60. Através da análise destas figuras determinou-se o diâmetro máximo de dano bem como a área de dano e os respetivos fatores expressos matematicamente pelas equações (17), (19) e (22).



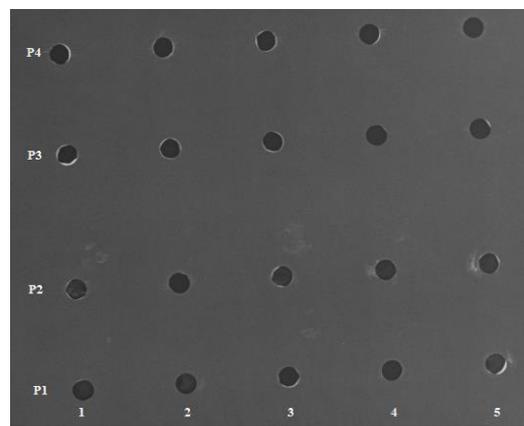
(a)



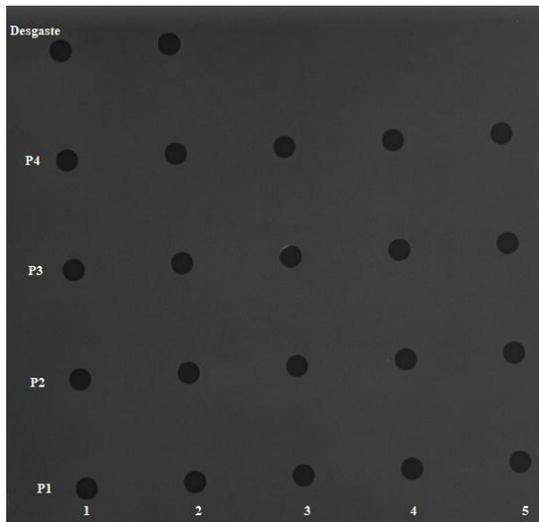
(b)



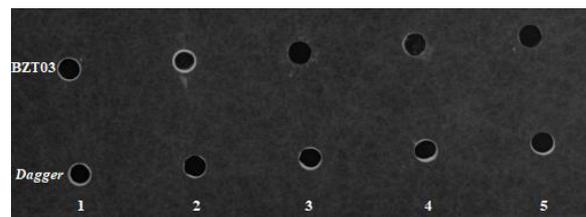
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 60 - Imagens raio-X: (a) Placa 30A à entrada da ferramenta; (b) Placa 20A à entrada da ferramenta; (c) Placa 10A à entrada da ferramenta; (d) Placa 10B à entrada da ferramenta; (e) Placa 10C à entrada da ferramenta; (f) Placa 10M à entrada da ferramenta.

O fluido de contraste utilizado foi sulfato de bário. O procedimento experimental consistiu em:

- Colocação de uma barreira impermeável na parte inferior da placa para que o fluido não seja absorvido pela base de suporte da placa;
- Cada furo fora preenchido no seu interior com fluido de contraste;
- Eliminação do excesso de fluido presente na placa após esta repousar durante um intervalo de tempo de aproximadamente 24 horas;
- Realização do raio-X à face de entrada da broca.

Os resultados, da análise das imagens raio-X, referentes à área de dano causado na face superior da placa pela ferramenta BZT03 e respectivos fatores de dano, aquando da furação com os parâmetros P0 da Tabela 5, nas placas de 30, 20 e 10 camadas de tecido de fibra de vidro e na placa de 10 camadas de manto de fibra de vidro encontram-se no Anexo H.

Através da análise destes fatores, tal como na análise das imagens *scan*, utilizou-se o valor médio dos fatores de dano associados a cada conjunto de cinco furos efetuados com os mesmos parâmetros, o qual se utilizou na construção dos gráficos apresentados abaixo.

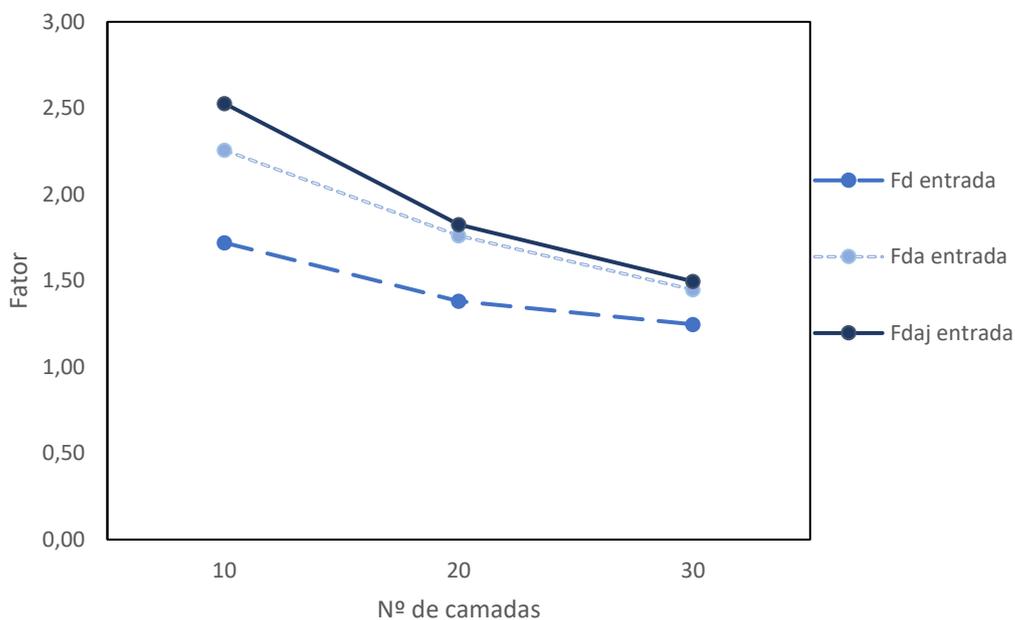


Gráfico 9 – Variação dos fatores de dano com o aumento de espessura a furar.

Através da análise do Gráfico 9, verifica-se que os fatores de dano à entrada são maiores quanto menor for a espessura a furar, bem como é evidente que o fator de dano ajustado ( $F_{daj}$ ) é o fator mais conservativo como se concluiu com a análise das imagens *scan*.

O Gráfico 10 e o Gráfico 11 apresentam os fatores de dano obtidos através da análise das imagens raio-X após a furação das placas 10A (presentes no Anexo H) e 10M (presentes no Anexo L.) com as ferramentas BZT03 e *Dagger*, respetivamente, com os parâmetros P0 presentes na Tabela 5, para que se possa verificar a influência do tipo de fibra (longa e curta) na qualidade dos furos realizados com estas ferramentas.

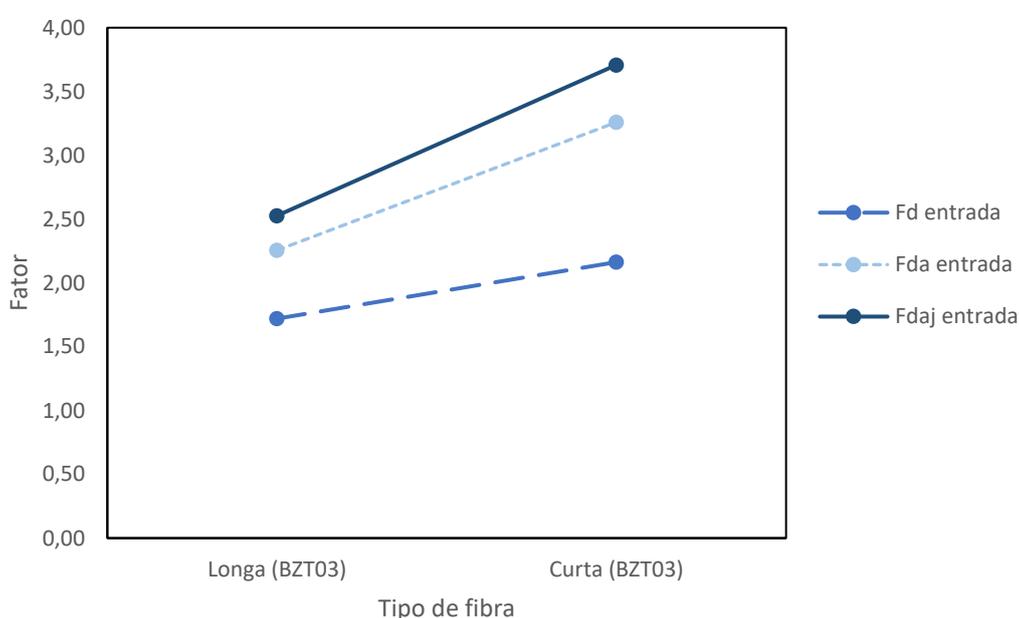
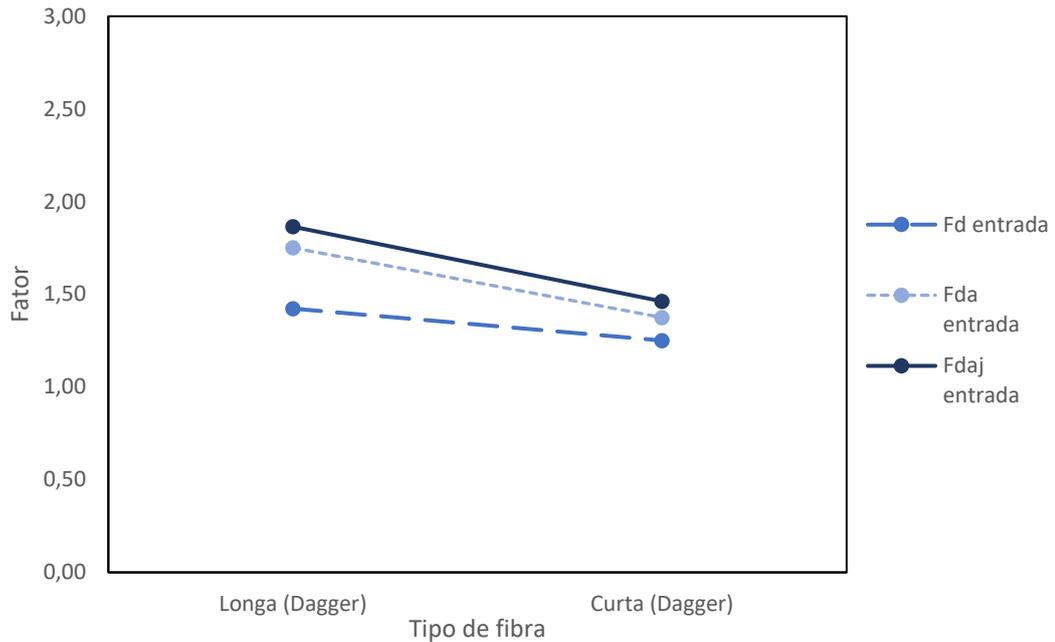


Gráfico 10 - Variação dos fatores de dano induzido pela furação com a ferramenta BZT03 em placas com diferentes tamanhos de fibra.

É facilmente perceptível, através do Gráfico 10, que a qualidade dos furos realizados com a broca BZT03 é maior quando se trata de um compósito de fibra longa, uma vez que os fatores de dano associados à placa de manto de fibra de vidro (fibra curta) são mais elevados.

Através do Gráfico 11 conclui-se que a ferramenta *Dagger* apresenta furos de melhor qualidade aquando da furação de material compósito com fibras curtas, tal fato poderá dever-se ao fato desta ferramenta possuir somente duas arestas de corte, o que diminui a probabilidade de arrancamento de fibras.



*Gráfico 11 - Variação dos fatores de dano induzido pela furação com a ferramenta Dagger em placas com diferentes tamanhos de fibra.*

Ainda sobre a placa 10A foram realizados mais três ensaios de furação utilizando ferramentas distintas mantendo os parâmetros de furação constantes (P0 da Tabela 5). Os fatores de dano obtidos com cada ferramenta apresentam-se no Anexo I. Com base nos valores médios de cada fator construiu-se o Gráfico 12 através do qual se verifica que, segundo a análise raio-X, a ferramenta que induz menos dano à entrada do furo é a ferramenta BZT01. Os fatores de dano associados a esta ferramenta são menores embora sejam próximos dos fatores de dano obtidos com a ferramenta.

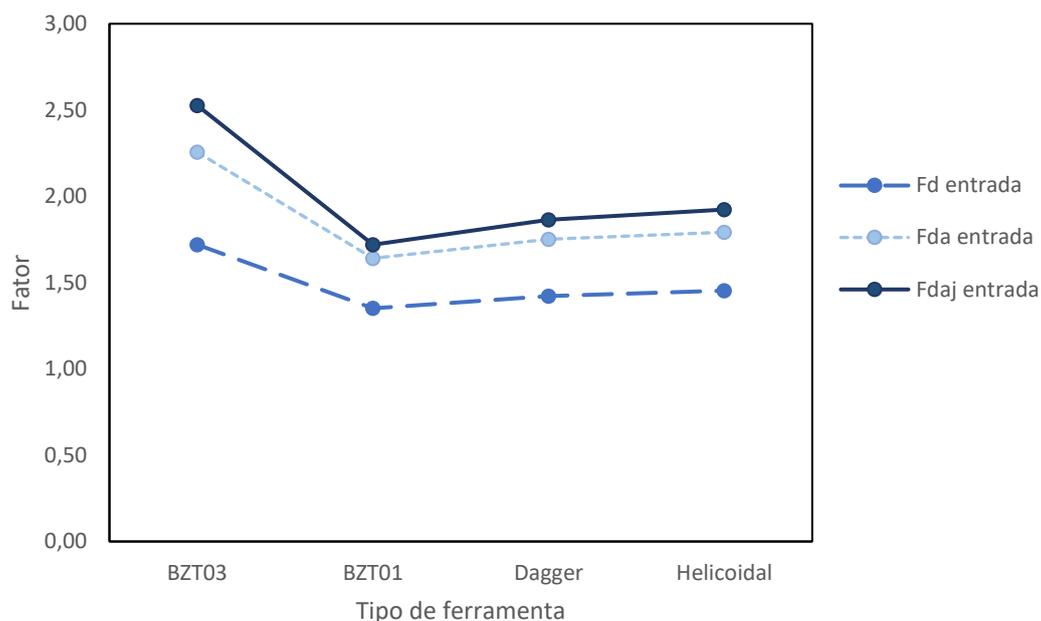


Gráfico 12 - Variação do fator de dano induzido pelas diferentes ferramentas na placa 10A.

Quanto à placa 10B e 10C, como já foi referido, fez-se variar os parâmetros de furação utilizando ferramentas diferentes em cada placa, sendo que na placa 10B utilizou-se a ferramenta BZT03 e na placa 10C utilizou-se a ferramenta *Dagger*. Os parâmetros utilizados foram os parâmetros P1, P2, P3 e P4 presentes na Tabela 5. No Anexo J e no Anexo K apresentam-se os fatores correspondentes aos ensaios de furação da placa 10B e 10 C respetivamente, determinados a partir da imagem raio-X.

Com os valores médios dos fatores de dano contruiu-se o Gráfico 13 e Gráfico 14. Através da análise destes gráficos constata-se que a ferramenta BZT03 induz menor dano com os parâmetros P3 uma vez que os fatores de dano são menores aquando da furação com estes parâmetros.

No que diz respeito à ferramenta *Dagger*, não há grande alteração na qualidade do furo com a utilização de diferentes parâmetros, sendo que os fatores de dano associados a cada parâmetro de furação são próximos embora o fator de dano menor seja obtido com os parâmetros P3 à semelhança do que se obteve com a ferramenta BZT03.

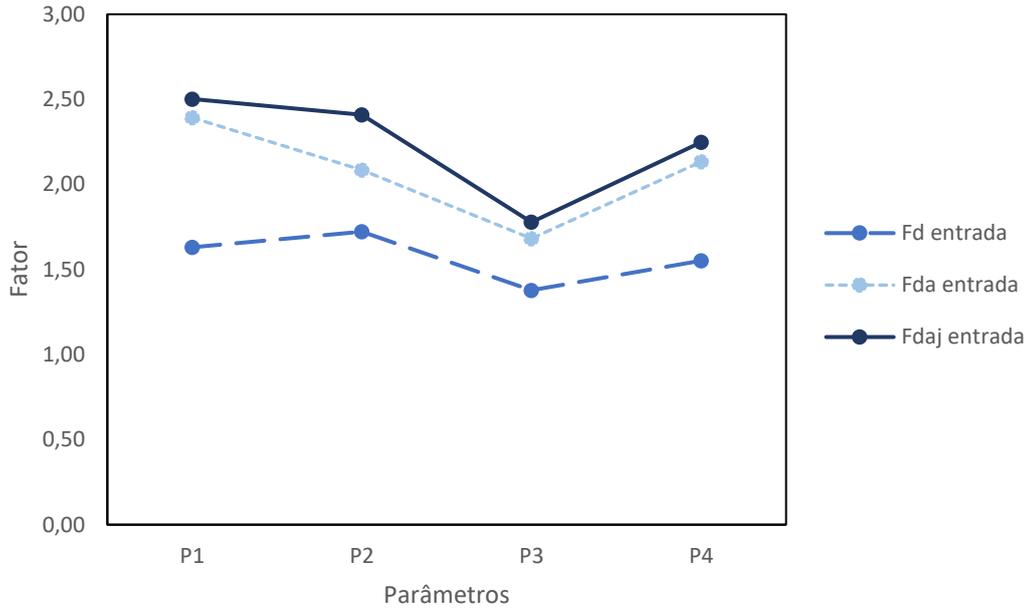


Gráfico 13 - Variação do fator de dano induzido pelos diferentes parâmetros de furação na 10B com a ferramenta BZT03.

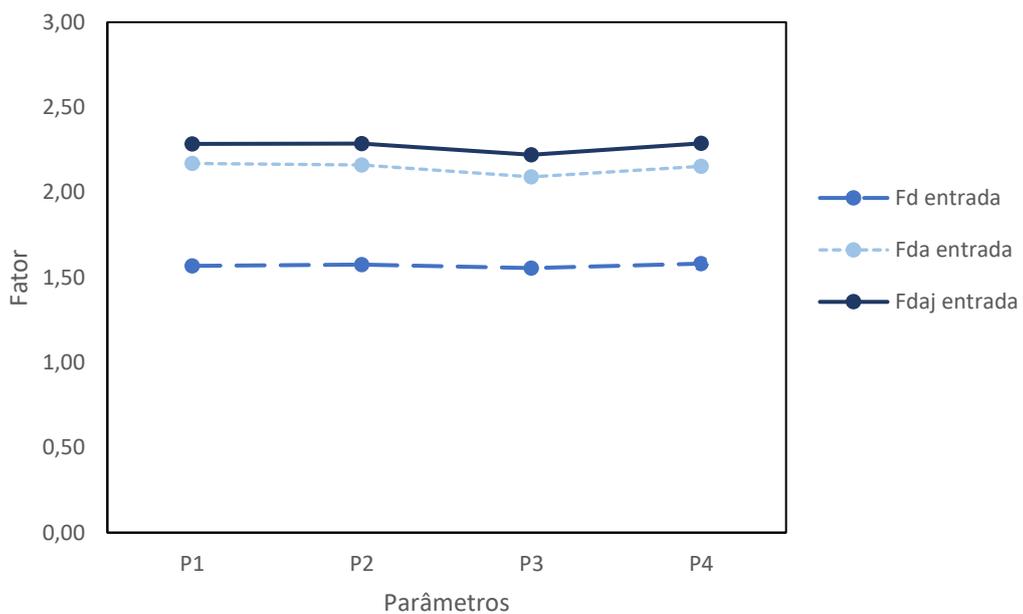


Gráfico 14 - Variação do fator de dano induzido pelos diferentes parâmetros de furação na 10C com a ferramenta Dagger.

Por fim, realizaram-se dois furos na placa 10C utilizando os parâmetros de furação P0 da Tabela 5. Os fatores de dano associados a estes dois últimos furos comparam-se com os dois primeiros furos úteis realizados na placa 10A com esta ferramenta através do Gráfico 15.

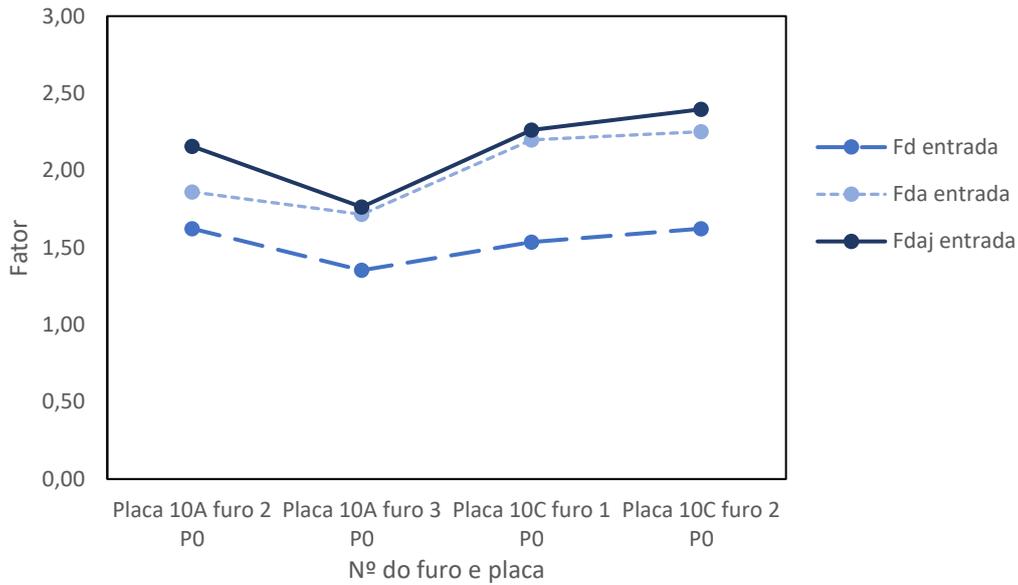


Gráfico 15 - Comparação dos fatores de dano induzidos nos dois primeiros e últimos furos efetuados com a ferramenta *Dagger*.

Através do gráfico acima apresentado, verifica-se que o fator de dano do último furo realizado com a ferramenta *Dagger* na placa 10C é maior que o fator de dano do primeiro furo efetuado com esta ferramenta, pelo que é evidente o desgaste da ferramenta.

Os fatores utilizados para a elaboração do Gráfico 15 encontram-se no Anexo M.

## 5.4 Termografia

A partir dos vídeos provenientes das câmaras termográficas, superior e inferior, captados durante o processo de furação, analisou-se o *frame* correspondente ao instante em que a temperatura máxima é atingida. Esta é detetada através da cor que é exibida na imagem tendo em conta a escala de cores exibida nas câmaras termográficas, como se pode observar através da Figura 61.

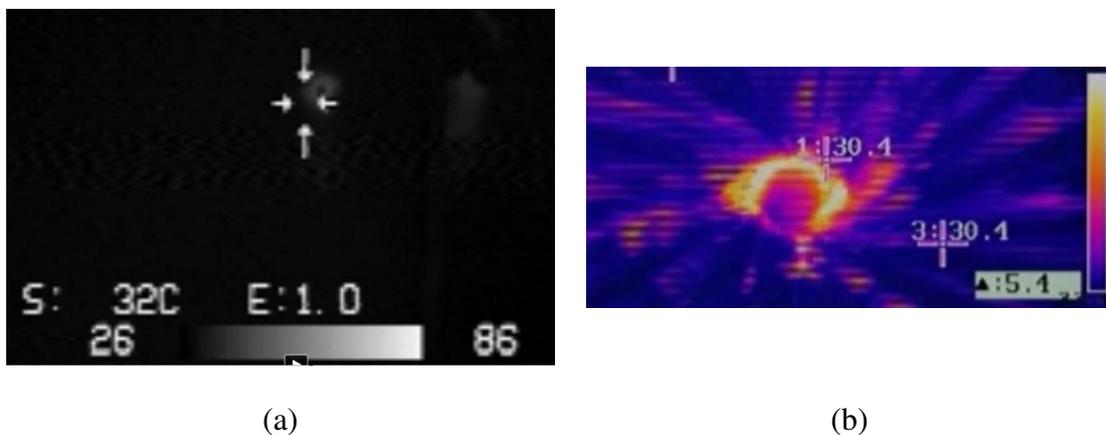


Figura 61 – Frame captado pela (a) Câmara superior; (b) Câmara inferior.

Devido aos problemas de colocação da câmara superior que já foram referidos no ponto 5.1, determinou-se somente a temperatura máxima após o recuo da ferramenta. Por vezes, a temperatura máxima medida não se trata efetivamente da temperatura da placa naquele ponto mas sim da temperatura das aparas que se depositaram em torno do furo, como se pode observar na Figura 62.

Para cada *frame* obtido dos vídeos da câmara inferior, determinou-se as gamas de temperatura existentes em torno do furo e a respetiva distância ao centro.



*Figura 62 – Aparas que se acumulam em torno do furo durante o processo de furação.*

Na Tabela 16 apresentam-se as temperaturas máximas determinadas através de cada câmara que dizem respeito a cada ensaio realizado com a ferramenta BZT03 nas placas de 30, 20 e 10 camadas de tecido de fibra de vidro e na placa 10M de manto de fibra de vidro com os parâmetros P0 da Tabela 5.

*Tabela 16 – Temperatura máxima atingida na face superior e inferior de placas com diferentes espessuras e diferentes tamanhos de fibra com a ferramenta BZT03.*

<b>Placa</b>	<b>Nº furo</b>	<b>Temperatura Máxima CS [°C]</b>	<b>Temperatura Máxima CI [°C]</b>
<b>30A</b>	1	76,17	88
	2	73,95	87,982
	3	88	87,982
	4	88	88
	5	-	88
<b>Média</b>	-	81.53	87.993
<b>20A</b>	1	54,55	119,338
	2	56,8	122
	3	82,66	88
	4	56,61	121
	5	57,24	121
<b>Média</b>	-	61,572	120,8345
<b>10A</b>	1	48,48	250
	2	45,94	250
	3	47,29	250
	4	43,34	241,6
	5	42,8	233
<b>Média</b>	-	45,57	244,9
<b>10M</b>	1	62,42	222,7
	2	61,87	214,5
	3	61,73	229
	4	85,71	223,5
	5	58,74	224,9
<b>Média</b>	-	66.094	222.9

Embora a câmara superior tenha a limitação de que a temperatura máxima, por esta detetada, tenha sido atingida ou até mesmo excedida na maior parte dos ensaios bem como a imagem adquirida por esta câmara durante o processo de furação foi obstruída, uma vez que quando o cabeçote da máquina descia tapava a imagem adquirida pela mesma.

Determinou-se a temperatura através das imagens desta câmara imediatamente após o recuo da ferramenta, pelo que, estes dados não são precisos.

Devido ao fato da parametrização das câmaras termográficas na realização dos primeiros ensaios (placa 30A e placa 20A) não ter sido correta, uma vez que a temperatura máxima definida foi ultrapassada em ambos os ensaios de furação, não nos é possível aferir que espessura de placa envolve temperaturas mais elevadas no processo de furação.

De modo a sintetizar a informação referente à temperatura máxima atingida durante o processo de furação presente no Anexo N, elaborou-se diferentes gráficos de análise.

O Gráfico 16 permite-nos de uma forma clara analisar a influência do tamanho da fibra utilizado na temperatura máxima atingida no processo de furação tendo em conta as temperaturas medidas pela câmara inferior, uma vez que são mais precisas que as temperaturas determinadas pela câmara superior.

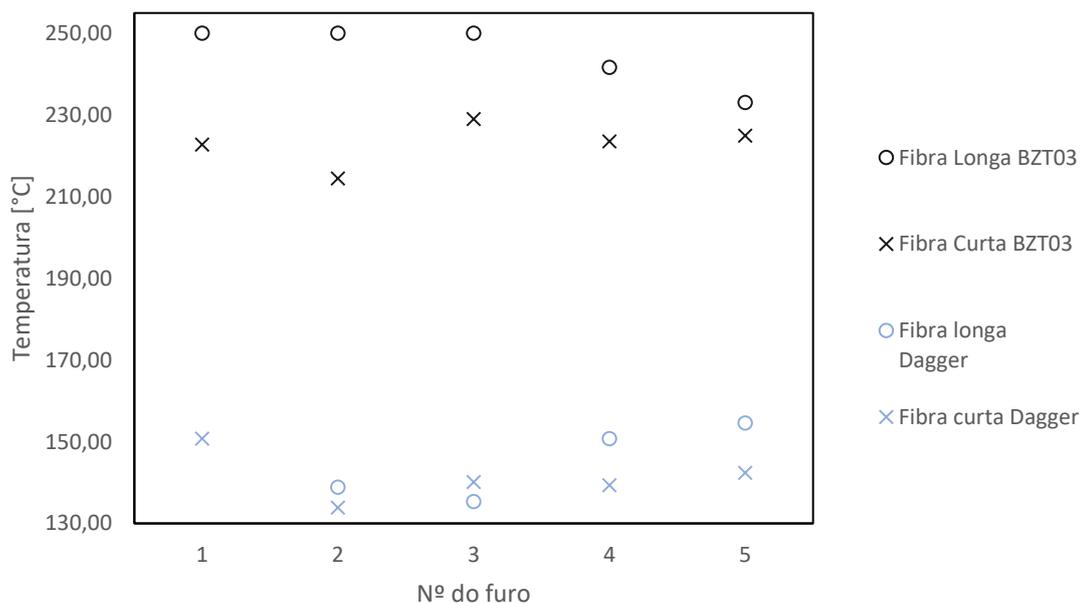


Gráfico 16 - Temperatura máxima atingida durante a furação de fibra curta e fibra longa com a ferramenta BZT03 e Dagger.

Embora a temperatura máxima definida na câmara inferior seja atingida na furação da placa 10A de fibra longa com a ferramenta BZT03, o que é indicativo de que possivelmente foram atingidas temperaturas superiores a 250°C.

Através do Gráfico 16, observa-se que na placa de fibra curta são atingidas temperaturas menores que na placa de fibra longa, tanto com a ferramenta BZT03 como com a ferramenta *Dagger* quando o processo de furação é efetuado com os parâmetros P0 da Tabela 5.

As temperaturas atingidas com a ferramenta *Dagger* no processo de furação de fibra curta e de fibra longa são semelhantes.

No Gráfico 17, encontram-se representadas as temperaturas atingidas em ensaios de furação efetuados na placa 10A com as diferentes ferramentas utilizando os mesmos parâmetros de furação. Com este mesmo gráfico pode-se afirmar que com a broca helicoidal são atingidas temperaturas menores bem como que com as ferramentas BZT03 e BZT01 são atingidas temperaturas superiores e que estas têm um comportamento semelhante no que diz respeito à gama de temperaturas com elas atingidas.

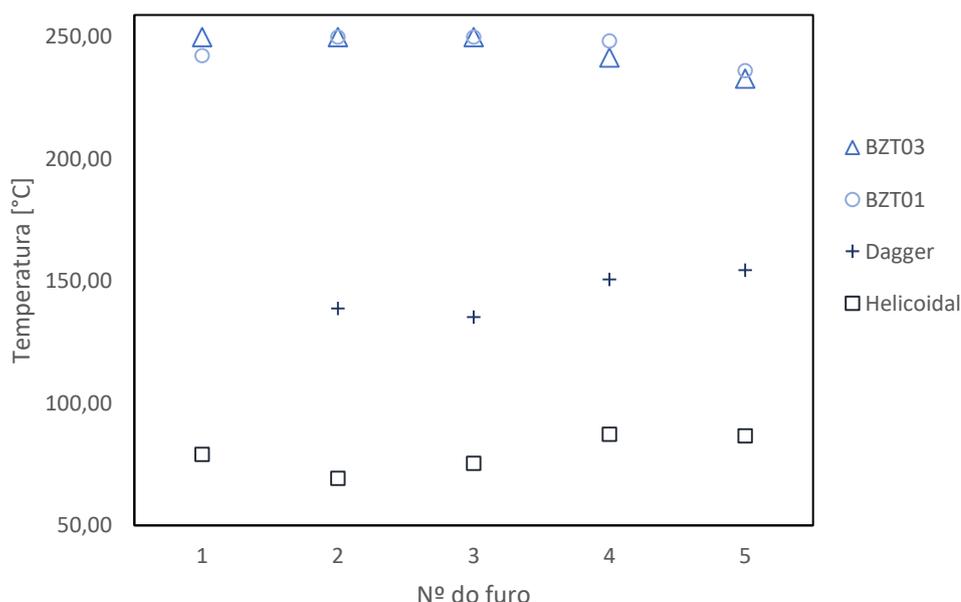


Gráfico 17 - Temperatura máxima atingida durante a furação de fibra curta e fibra longa com as diferentes ferramentas.

Com o objetivo de se avaliar a influência da utilização de diferentes parâmetros na temperatura máxima atingida durante o processo de furação, fez-se variar os parâmetros conforme os parâmetros apresentados na Tabela 5 utilizando a ferramenta BZT03 na placa 10B e a ferramenta *Dagger* na placa 10C.

As temperaturas atingidas na placa 10B e 10C com cada conjunto de parâmetros encontram-se representadas no Gráfico 18 e no Gráfico 19, respetivamente.

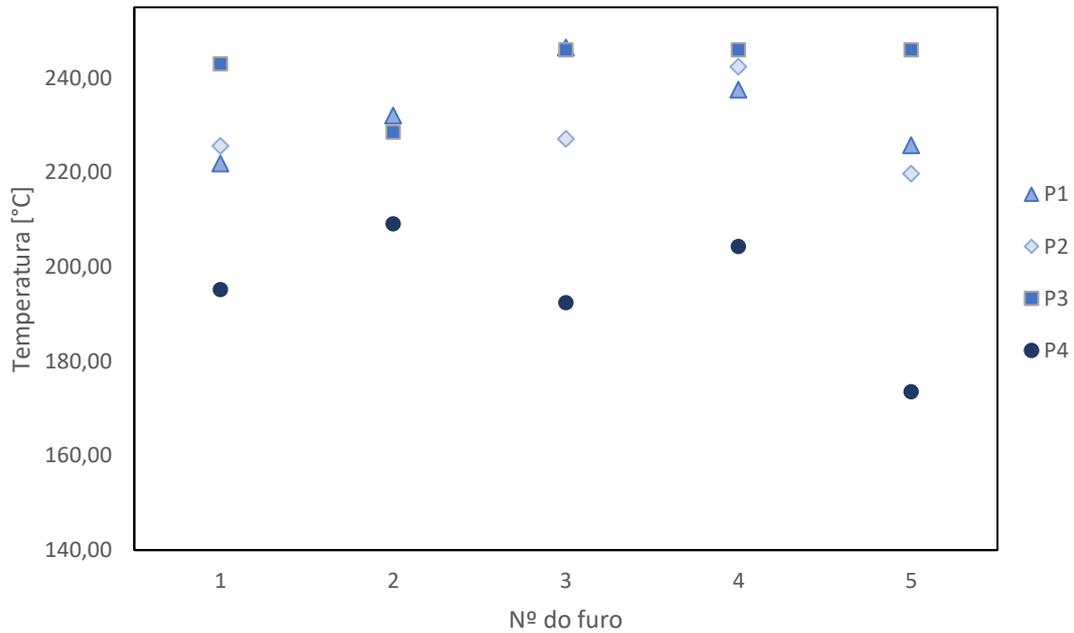


Gráfico 18 - Temperatura máxima atingida no processo de furação da placa 10B com a ferramenta BZT03 utilizando diferentes parâmetros de furação (ver Tabela 5).

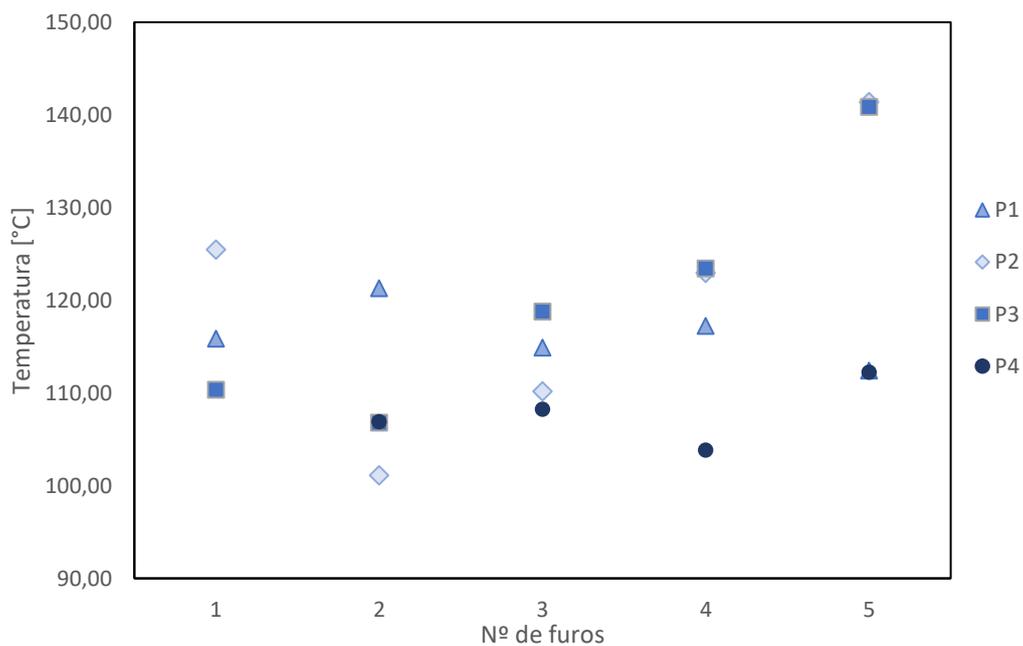


Gráfico 19 - Temperatura máxima atingida no processo de furação da placa 10B com a ferramenta Dagger utilizando diferentes parâmetros de furação (ver Tabela 5).

Os parâmetros que conduzem a ensaios de furação com temperaturas mais baixas com a ferramenta BZT03 são os parâmetros P4 (ver Tabela 5), tal como é evidente no Gráfico 18. Quanto ao Gráfico 19, neste observa-se uma grande oscilação dos valores de temperatura obtidos entre os furos realizados com os mesmos parâmetros, sendo que os furos realizados com os parâmetros P1 e P4 (ver Tabela 5) são os que apresentam valores

de temperatura máxima mais próximos. Pode-se também observar que, à semelhança dos ensaios realizados na placa 10B, os parâmetros que permitem realizar ensaios de furação com temperaturas menores utilizando a ferramenta *Dagger* são os parâmetros P4 (ver Tabela 5).

## 5.5 Combinação das três técnicas

Tendo presente a análise efetuada com recurso às imagens *scan*, raio-X e termográficas, procedem-se ao estudo combinado destas três técnicas não destrutivas.

Através do *scan* é possível uma análise meramente superficial, o raio-X permite uma análise em profundidade (embora que não tenha grande precisão em grandes profundidades) e a análise termográfica permite conhecer a gama de temperaturas atingida no processo.

De modo a sintetizar o que se concluiu com a análise de cada uma destas técnicas em individual e para que se possa prosseguir com uma análise conjunta, apresenta-se na Tabela 17 as conclusões retiradas de cada análise relativas às condições em que se obteve menores danos e temperaturas.

Tabela 17 – Condições em que se obteve menores danos e temperaturas segundo cada técnica de análise não destrutiva.

	<b>Scan</b>	<b>Raio-X</b>	<b>Termografia</b>
<b>Número de camadas</b>	10	30	-
<b>Tipo de fibra com BZT03</b>	Longa	Longa	Curta
<b>Tipo de fibra com <i>Dagger</i></b>	Longa	Curta	Curta
<b>Tipo de ferramenta</b>	<i>Dagger</i>	BZT01	Helicoidal
<b>Parâmetros de furação BZT03</b>	P3	P3	P4
<b>Parâmetros de furação <i>Dagger</i></b>	P1	P3	P4

Com a Tabela 17 verifica-se que existem conclusões dispares em determinados aspetos entre cada técnica de análise não destrutiva, tal fato deve-se principalmente ao fato de que cada técnica possui campos de análise diferente, ou seja, uma vez que a técnica raio-X permite uma análise em profundidade, é normal que a área de dano determinada a partir de uma imagem raio-X seja superior à área de dano que é determinada a partir de uma imagem *scan*, que nos fornece meramente informação superficial.

Por exemplo, as áreas de dano correspondentes aos furos efetuados na placa 10A com a ferramenta BZT03 presentes na Tabela 18. Assim sendo, justifica-se facilmente o fato da conclusão referente ao número de camadas a furar com melhor qualidade ser diferente entre a análise *scan* e raio-X.

No Anexo 0. constam as áreas de dano correspondentes a cada furo determinadas segundo a análise *scan* e a análise raio-X.

Tabela 18 – Área de dano à entrada do furo determinada a partir das imagens e raio-X.

Furo	Área de dano [ $mm^2$ ]	
	Scan	Raio-X
1	6,233	23,536
2	6,194	62,776
3	8,641	27,826
4	10,031	25,466
5	5,800	37,996

No que diz respeito ao tamanho da fibra quando maquinado com a ferramenta BZT03, tanto segundo a análise raio-X como pela análise *scan*, concluiu-se que a fibra longa é a que sofre menos dano, o que se deve principalmente à geometria da ferramenta visto que esta possui 10 arestas de corte. Ao maquinar placas de fibras longas, estas possuem maior resistência ao arrancamento e, conseqüentemente, o dano induzido nestas é menor que o dano induzido nas placas de fibra curta. O oposto acontece quando a ferramenta utilizada é a ferramenta *Dagger*, que pelo fato de ao longo do seu curso não possuir arestas de corte induzido menor dano aquando da maquinação de fibra curta. No entanto, através da análise das imagens *scan* é a placa de fibra longa que apresenta menor dano. Tal conclusão deve-se ao fato da análise das imagens *scan* ser de caráter superficial.

Quanto ao estudo do tipo de ferramenta que induz menor dano e temperatura na furação da placa 10A de fibra longa, através da análise superficial da qualidade do furo, conforme os resultados obtidos é a ferramenta *Dagger* que induz menor dano utilizando os parâmetros de furação P0. No que toca à qualidade interlaminar os resultados da análise do raio-X indicam que a ferramenta BZT01 promove um furo com maior qualidade tanto superficial como interlaminar que as restantes ferramentas ensaiadas.

Segundo a técnica de termografia, a ferramenta que promove a ocorrência de temperaturas menores no processo de furação é a ferramenta helicoidal. Este resultado é espetável, uma vez que, de entre as ferramentas ensaiadas, esta é a que possui mais espaço para a expulsão da aparada da zona de furação e, conseqüentemente, a temperatura atingida é menor pois as

aparas não ficam acumuladas no furo ou presas à ferramenta durante o processo de furação, como ocorre com a ferramenta BZT03 e BZT01, que apresentam aparas aprisionadas no seu curso, tal como se mostra na Figura 63.



Figura 63 – Aprisionamento de aparas ao longo do curso da ferramenta BZT03.

Com a variação dos parâmetros de furação conclui-se que a ferramenta *Dagger* permite a obtenção de furos com maior qualidade superficial (pela análise das imagens *scan*). Isto pode ser verificado através da utilização dos parâmetros mais elevados que se analisou, P1, (velocidade de rotação de  $2650rpm$  e velocidade de avanço de  $640mm/min$ ). Tendo por base a análise das imagens raio-X, os parâmetros que com esta ferramenta permitiram a obtenção de furos de melhor qualidade foram os parâmetros de furação mais baixos ensaiados, parâmetros P3 (velocidade de rotação  $1300rpm$  e velocidade de avanço  $78mm/min$ ).

Utilizando a ferramenta BZT03, são também os parâmetros P3 que induzem furos de melhor qualidade tanto segundo a análise superficial (*scan*) como segundo a análise em profundidade (raio-X). No entanto, os parâmetros de furação P4 (velocidade de rotação de  $1300rpm$  e velocidade de avanço de  $234mm/min$ ) foram os que tanto com a ferramenta *Dagger* como com a ferramenta BZT03 se obteve temperaturas menores durante o processo de furação.

Visto que as imagens termográficas obtidas pela câmara inferior nos permitem uma análise mais pormenorizada das temperaturas atingidas durante o processo de furação, segue-se coma análise da gama de temperaturas atingidas à distância do raio máximo de dano determinado através das imagens *scan*, para que seja possível se relacionar as gamas de temperatura atingidas com as áreas de dano induzidas.

As análises apresentadas em seguida têm por base as conclusões presentes na Tabela 17.

Nos gráficos abaixo, encontram-se representadas as temperaturas máximas e mínimas atingidas ao longo do raio máximo de dano, na face inferior da placa, de cada furo, determinado através das imagens *scan*, bem como a representação da temperatura máxima atingida em cada furo, a qual é atingida junto ao perímetro do mesmo ou no centro aquando da furação das últimas camadas.

Constata-se, através da análise do Gráfico 20, que o furo cujo o raio de dano máximo é maior (furo 3) é o furo em que a temperatura máxima atingida durante a furação foi mais elevada. Esta ocorreu a 5,157 mm do cento do furo, conforme consta no Anexo N. Verifica-se ainda que o furo que apresenta um menor raio máximo de dano corresponde ao furo em que a gama de temperaturas atingida a essa distância é mais baixa. Ainda sobre o mesmo gráfico, observa-se que a gama de temperaturas atingidas pelo furo 1 encontram-se claramente fora da gama de valores atingidos pelos restantes furos, pelo que se pode afirmar que aquando da realização deste furo houve algum fator inerente à placa que influenciou a temperatura neste atingida.

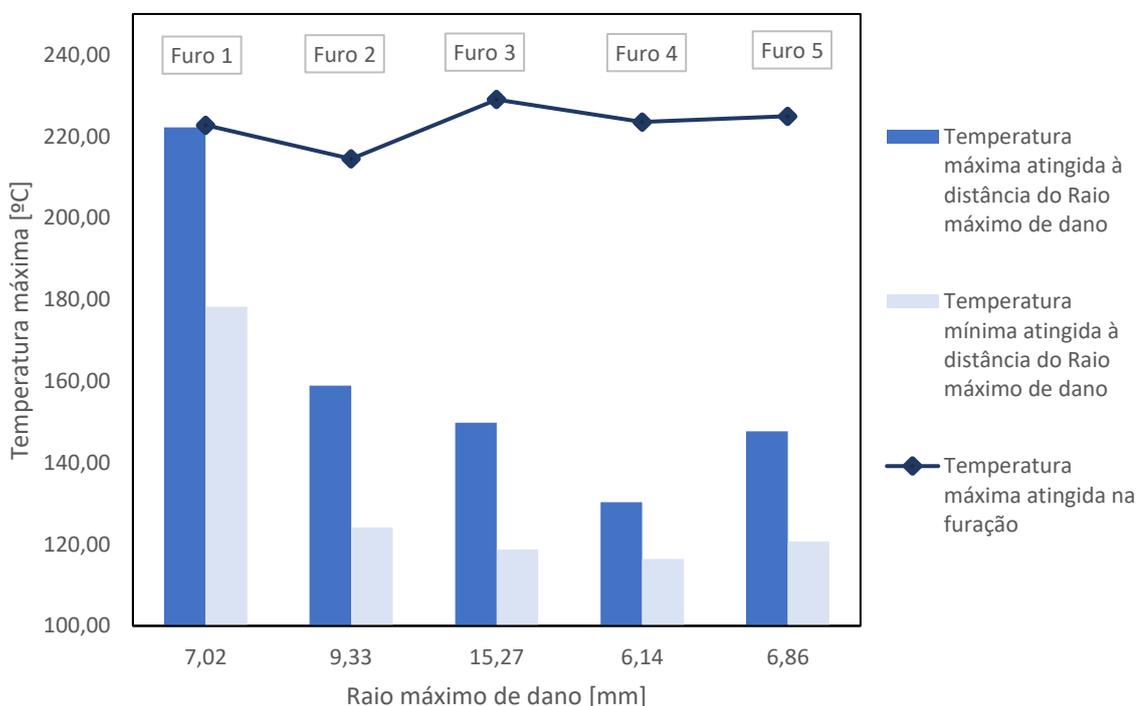


Gráfico 20 - Temperaturas atingidas á distância do raio máximo de dano e temperatura máxima atingida no processo de furação de cada furo na placa 10M com a ferramenta BZT03.

A temperatura atingida pela ferramenta *Dagger* é visivelmente menor que as temperaturas atingidas com a ferramenta BZT03, como se pode observar no Gráfico 21. É também perceptível a proximidade entre as gamas de temperaturas atingidas à distância do raio máximo de dano, embora ainda assim, o furo que apresenta maior dano é o que apresenta temperaturas mais altas à distância do raio máximo de dano. Verificando-se ainda que o furo cuja temperatura máxima atingida durante o processo de furação não é necessariamente o furo que apresenta maior dano segundo a análise superficial efetuada a partir das imagens *scan*.

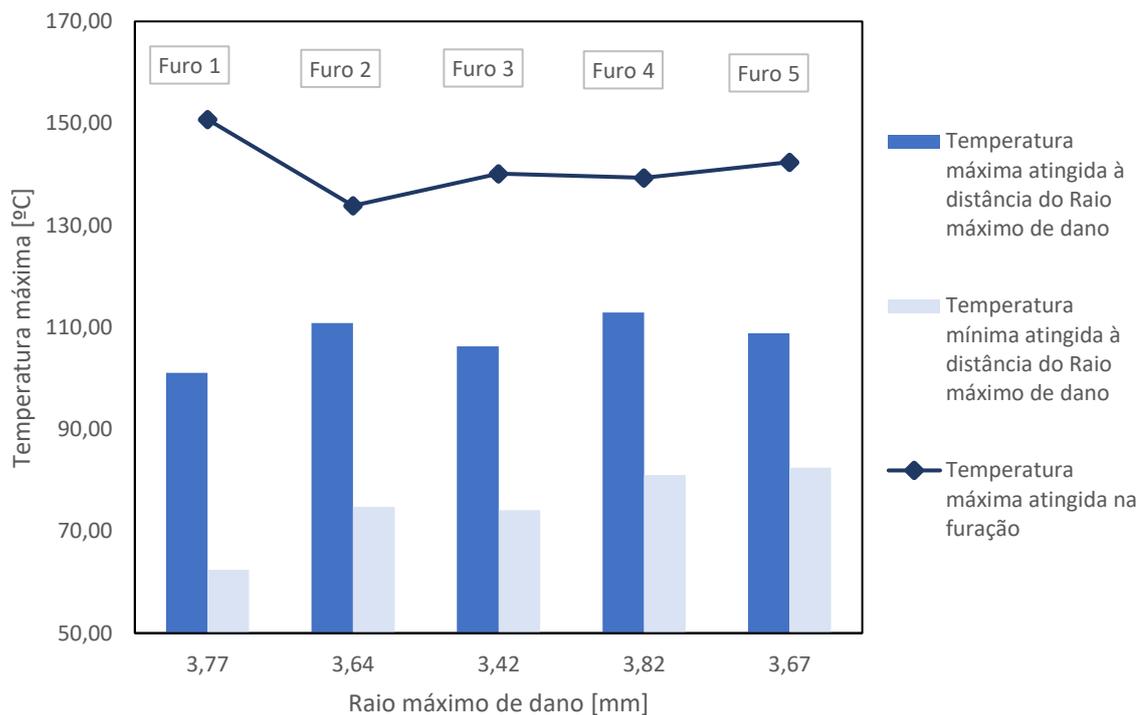


Gráfico 21 - Temperaturas atingidas à distância do raio máximo de dano e temperatura máxima atingida no processo de furação de cada furo na placa 10M com a ferramenta *Dagger*.

A ferramenta com a qual se conseguiu efetuar furos com temperaturas mais baixas foi a ferramenta helicoidal, o que pode ser observado através da comparação do Gráfico 22 com os restantes gráficos de análise de temperatura.

No Gráfico 22, é igualmente verificada a semelhança de gamas de temperatura obtidas à distância do raio máximo de dano e, uma vez mais, verifica-se que o furo que apresenta maior dano é o que durante o processo de furação atingiu temperaturas mais altas à distância do raio máximo de dano (furo 5).

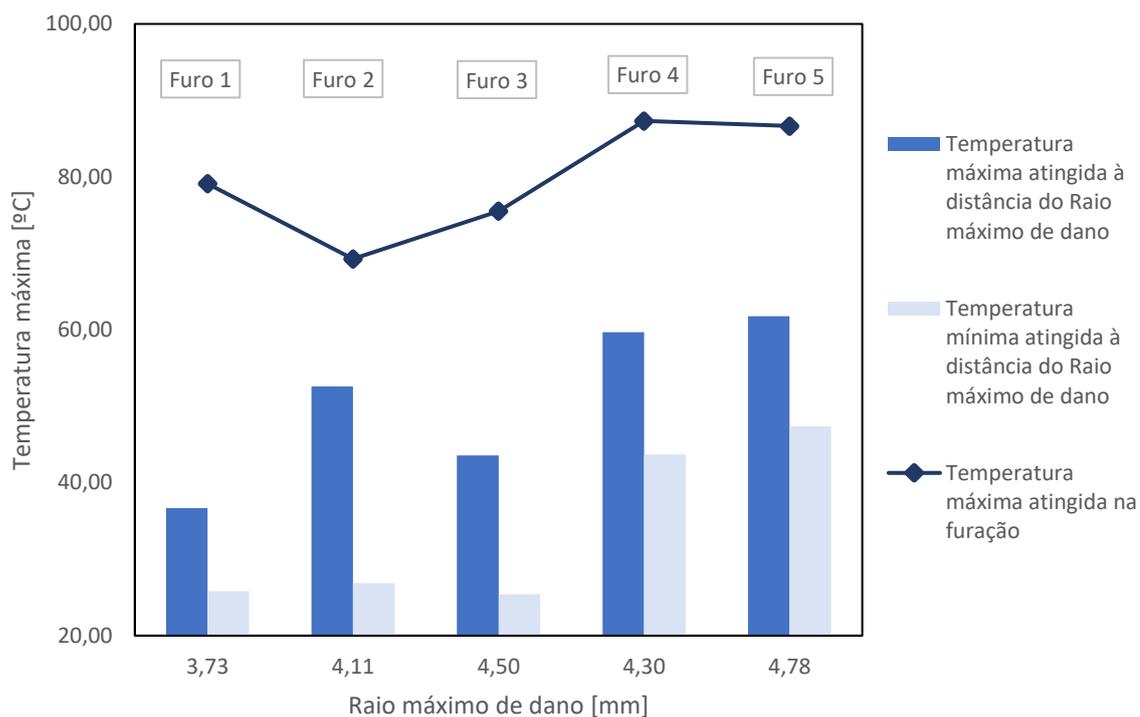


Gráfico 22 - Temperaturas atingidas á distância do raio máximo de dano e temperatura máxima atingida no processo de furação de cada furo na placa 10A com a ferramenta Helicoidal.

As temperaturas máximas atingidas pela ferramenta BZT03 durante a furação da placa de fibra longa (Gráfico 23) são ligeiramente mais baixas que as temperaturas máximas atingidas por esta ferramenta na furação de fibra curta (Gráfico 20) uma vez que não só o tipo de fibra a furar é diferente bem como os parâmetros de furação utilizados na furação de fibra longa em questão foram mais baixos que os parâmetros utilizados na furação da placa de fibra curta. No entanto, o dano causado por esta ferramenta na fibra longa com os parâmetros P4 (ver Tabela 5) é, em média, superior ao dano causado na furação de fibra curta com os parâmetros P0 (ver Tabela 5).

Contrariamente ao sucedido com as análises anteriores, segundo o Gráfico 23, o furo em que o dano é maior (furo 3) não coincide com o furo cujas temperaturas nele atingidas são mais elevadas nem o furo com menor dano coincide com o furo em que as temperaturas atingidas são as mais baixas. Tal fato justifica-se com a possibilidade de existirem, na zona em que o furo 3 fora efetuado, defeitos residuais na placa.

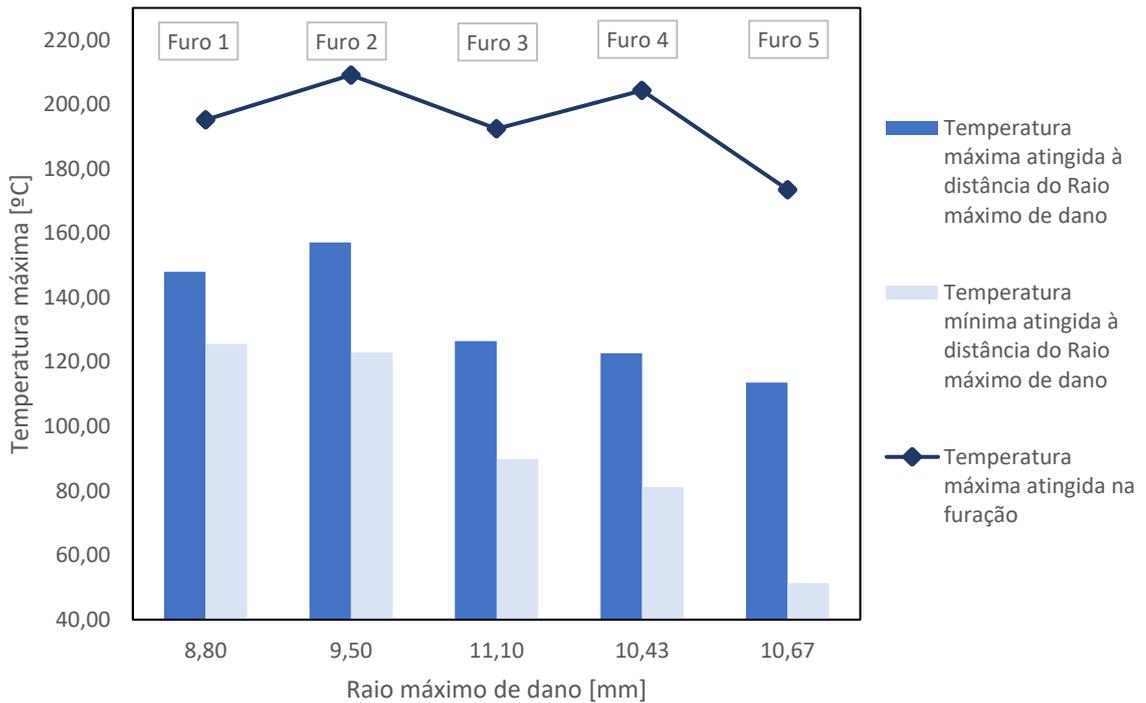


Gráfico 23 - Temperaturas atingidas à distância do raio máximo de dano e temperatura máxima atingida no processo de furação de cada furo na placa 10B com a ferramenta BZT03 e com os parâmetros P4 (ver Tabela 5).

No Gráfico 24, é possível verificar uma vez mais que as temperaturas atingidas com a ferramenta *Dagger* são inferiores às que se atinge com a ferramenta BZT03 tanto em fibra longa (Gráfico 20) como em fibra curta (Gráfico 23). De igual modo, o dano induzido por esta ferramenta em fibra longa com os parâmetros P4 (ver Tabela 5) é em média menor que nas restantes condições de furação analisadas embora a gama de temperaturas à distância do raio máximo de dano seja mais elevada que na furação com a ferramenta helicoidal. Uma vez mais, no Gráfico 24, o furo com dano maior não coincide com o furo cuja gama de temperaturas atingida à distância do raio de dano máximo é mais elevada.

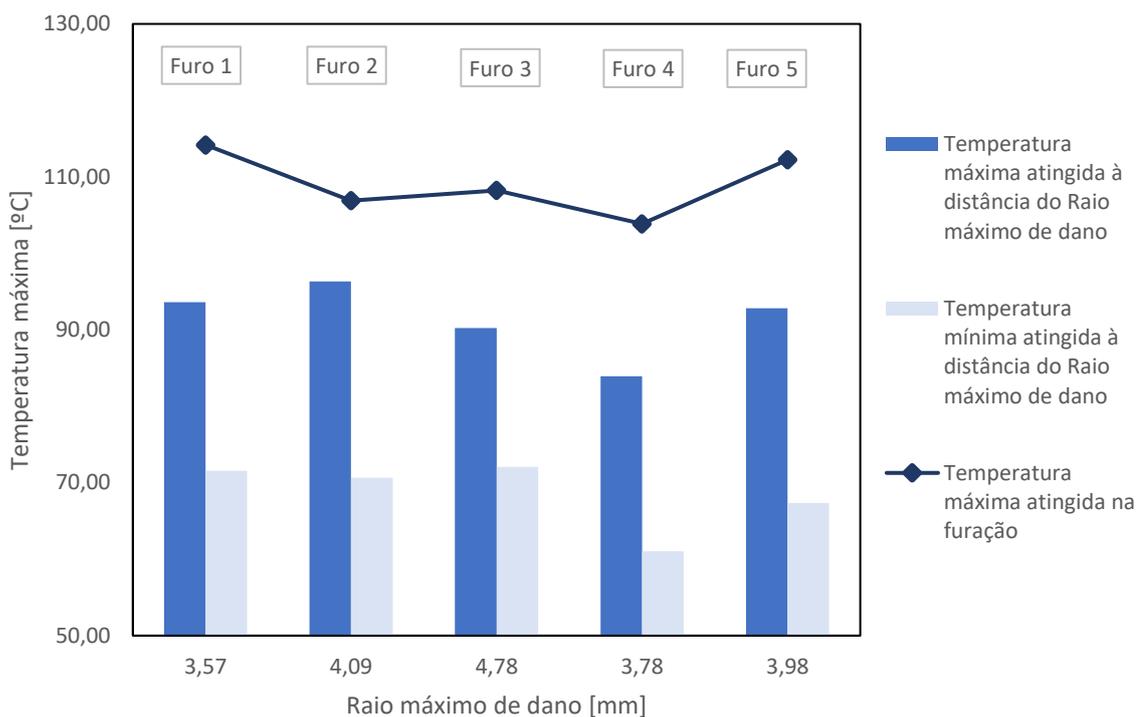


Gráfico 24 - Temperaturas atingidas à distância do raio máximo de dano e temperatura máxima atingida no processo de furação de cada furo na placa 10B com a ferramenta Dagger e com os parâmetros P4 (ver Tabela 5).

Tendo em conta a análise combinada das três técnicas utilizadas verifica-se que entre a análise *scan* e a imagem raio-X o dano é maior através da segunda técnica uma vez que esta tem a capacidade de análise em profundidade.

No que diz respeito à comparação entre as técnicas *scan* e termografia, conclui-se que nem sempre se pode afirmar que o furo cujas temperaturas atingidas durante o processo de furação foram mais elevadas é o furo que exibirá maior dano a partir de uma análise *scan*.

Através da comparação entre imagens raio-X e termográficas possivelmente se pudesse obter conclusões distintas daquelas que se obteve através da comparação entre as imagens *scan* e termografia. Esta comparação não foi feita uma vez que as imagens termográficas adquiridas com maior precisão/qualidade foram as que dizem respeito à face inferior da placa (à saída da ferramenta) e o raio-X foi efetuado à face oposta da placa com a qual, não é possível estabelecer-se uma análise comparativa.

## Capítulo 6. Conclusões e Desenvolvimentos futuros

O interesse na utilização dos materiais compósitos associado ao processo de furação que é o processo mais utilizado para que, posteriormente possa ser efetuada a montagem de componentes, faz com que a delaminação causada pelo processo de furação nestes materiais seja um aspeto de estudo com grande relevância. A delaminação influencia a capacidade de resistência estrutural, reduzindo-a a longo prazo consoante a severidade do dano das fibras no compósito.

Deste modo, é necessário ter-se em atenção os seguintes aspetos: o tipo de compósito a maquinar, a geometria mais adequada para o tipo de compósito a furar e os parâmetros de furação mais adequados.

Neste estudo, teve-se como principal objetivo a caracterização do dano induzido pelo processo furação em placas de materiais compósitos com a variação de determinados parâmetros desde os parâmetros operacionais bem como a utilização de diferentes geometrias de ferramenta, tamanhos de fibra e espessuras de furação. Para efetuar a caracterização do dano recorreu-se a três técnicas não destrutivas, sendo elas: *scan*, raio-X e termografia passiva.

Verificou-se que, segundo as diferentes técnicas de análise efetuadas são retiradas ilações distintas uma vez que cada uma delas tem um campo de análise distinto. Tendo em conta que a análise *scan* não tem capacidade de evidenciar o dano interlaminar, esta técnica de avaliação não destrutiva não é a mais adequada para determinar o dano induzido por processos de furação. Visto que a técnica de raio-X permite uma análise tanto superficial como em profundidade, embora esteja limitada até determinadas espessuras, esta é a técnica que maximiza a quantificação do dano. Assim sendo, através desta técnica observa-se que:

1. Quanto maior for a espessura a furar menor é o dano uma vez que a coesão do material é maior e por sua vez a deformada transversal da placa durante o processo de furação é também menor, contribuindo para a obtenção de um furo com menor dano.
2. De entre as ferramentas ensaiadas verifica-se que, induzem furos com fatores de dano distintos mesmo quando operam com os mesmos parâmetros. A ferramenta

que permitiu obter-se furos com melhor qualidade à entrada da ferramenta é a ferramenta BZT01.

3. No que diz respeito ao tamanho de fibra a maquinar, utilizando a ferramenta BZT03, obtiveram-se furos de melhor qualidade na furação da placa de fibra longa. Uma vez que esta ferramenta possui 10 arestas de corte ao longo do seu curso, o arrancamento de fibras aquando da furação em materiais compósitos de fibra longa é menor visto que a ligação entre as fibras é mais coesa. Já aquando da furação de fibra curta, a ferramenta que permite a obtenção de furos de melhor qualidade é a ferramenta *Dagger* uma vez que esta possui somente duas arestas de corte na ponta da ferramenta, sendo o seu curso livre de arestas.
4. Os parâmetros de corte a utilizar na furação de placas de fibra longa com a ferramenta BZT03 devem ser velocidades de avanço e de rotação baixas, uma vez que foi nestas condições que se obtiveram furos de melhor qualidade.

De referir ainda que a ferramenta *Dagger* apresenta um comportamento diferente das restantes ferramentas aquando da furação de compósitos de fibra curta uma vez que o dano à saída desta é menor que o dano a entrada da ferramenta.

O fator de dano que demonstrou quantificar o dano de melhor forma foi o fator de dano ajustado, uma vez que na sua formulação tem em conta não só o diâmetro máximo de dano bem como a área de dano, sendo por isso o fator que maximiza o dano e por sua vez o mais conservativo.

Numa etapa futura seria importante:

1. Criar um sistema alternativo de montagem da câmara superior de modo a que se possa analisar de forma correta a temperatura desenvolvida durante o processo de furação na face superior da placa;
2. Efetuar-se o raio-X às placas em ambas as faces antes e após o processo de furação, de modo a que se possa eliminar a presença de danos residuais existentes nas placas bem como comparar as imagens obtidas com esta técnica com as imagens termográficas e perceber efetivamente se há uma relação concreta entre a temperatura máxima atingida no processo de furação e o dano induzido;
3. Desenvolver um estudo semelhante a este mas, utilizando outro tipo de material compósito e perceber as principais diferenças comportamentais de cada material aquando do processo de furação;

4. Monitorizar a força axial exercida durante o processo de furação e relacionar com o dano induzido.
5. Utilizar uma proteção para a lente da câmara adequada que não influencie na medição de temperatura.



## Bibliografia

- Ahn, D., Choi, J. & Kweon, J., 2014. Relationship between the drilling condition and the damage (delamination) zone of glass-fiber-reinforced plastic composites. *Advanced Composite Materials*, 24(3), pp.297–305. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84925714054&partnerID=tZOtx3y1>.
- Almeida, N.M.B. de, 2012. Estudo estrutural de compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras de juta. Available at: <http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/68248>.
- Amaro, A.M., Reis, P. N. B., Moura, M. F. S. F., Santos, J. B., 2012. Damage detection on laminated composite materials using several NDT techniques. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 54(1), pp.14–20.
- Anon, 1997. *Mechanics of Laminated Composite*,
- ASTM D 3039/D 3039M – Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.
- ASTM D 3518/D 3518M - Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a  $\pm 45^\circ$  Laminate.
- Avdelidis, N.P., Hawtin, B.C. & Almond, D.P., 2003. Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites. *NDT and E International*, 36(6), pp.433–439.
- Bhatnagar, N., Singh, I. & Nayak, D., 2004. Damage Investigation in Drilling of Glass Fiber Reinforced Plastic Composite Laminates. *Materials and Manufacturing Processes*, 19(6), pp.995–1007. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-9944242162&partnerID=tZOtx3y1>.
- Capello, E., 2004. Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates. *Journal of Materials Processing Technology*, 148(2), pp.186–195.
- Chaki, S., Harizi, W., Bourse G., Ourak, M., 2015. Multi-technique approach for non destructive diagnostic of structural composite materials using bulk ultrasonic waves, guided waves, acoustic emission and infrared thermography. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 78, pp.358–361. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.033>.
- Compósitos, C.M.D.E., 2014. De Fibra De Vidro / Epoxy Nano-Reforçados.
- Davim, J.P., 2007. SCIENCE AND A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. , 67, pp.1939–1945.
- Durão, L.M.P., Tavares, J. M. R. S., Marques, A. T., Freitas M., Mafalhães, A. T., 2004. COMPÓSITAS. , pp.1–11.
- Gay, D., Hoa, S. V & Tsai, S.W., 2003. *COMPOSITE MATERIALS COMPOSITE MATERIALS*,
- Gonçalves, D.J.S., 2011. Avaliação de Ferramentas na Furação de Laminados Compósitos. , 23(figura 1), pp.109–113.

- “ImageJ.” [Online]. Available: <https://imagej.net/Welcome>.
- Işık, B. & Ekici, E., 2010. Experimental investigations of damage analysis in drilling of woven glass fiber-reinforced plastic composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(9–12), pp.861–869.
- Ismail, S.O., Ojo, S.O. & Dhakal, H.N., 2017. Thermo-mechanical modelling of FRP cross-ply composite laminates drilling: Delamination damage analysis. *Composites Part B: Engineering*, 108, pp.45–52. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.100>.
- Jones, R.M., 2010. *Mechanics of composite materials* Second Edi., Cap. 1 pp. 3; Cap. 4 pp. 203-220.
- Juan C. Campos, R. Abrão M. A., Faria P. E., Davim J. P., 2007. Análise digital de dano na furação de materiais compósitos laminados. *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, pp.19–24. Available at: [http://www.scielo.gpeari.mctes.pt/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0870-83122007000100005&lang=pt](http://www.scielo.gpeari.mctes.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0870-83122007000100005&lang=pt).
- Kortschot, M.T. & Zhang, C.J., 1995. Characterization of composite mesostructures and damage by de-ply radiography. *Composites Science and Technology*, 53(2), pp.175–181.
- Lachaud, F., Piquet F., Collombet F., Surcin L., 2001. Drilling of composite structures. *Composite Structures*, 52(3–4), pp.511–516.
- Makwana. A., K.L., 2015. Engineering Science and Futuristic Technology Review : Potential applications of Liquid Desiccant technology in dehumidification and cooling the process air . A B S T R A C T : Keywords : , 1(1), pp.1–8.
- Martin, P., 1999. *Electronic failure analysis handbook* MCGraw-Hil., United States of America.
- Materials, T. & Company, I., The Materials Information Company.
- Nicolau, O. & Andrade, G., 2013. Estudo de Delaminação em Compósitos de Matriz Polimérica.
- Qi, Z., Zhang K., Li Y., Liu S., Cheng H., 2014. Critical thrust force predicting modeling for delamination-free drilling of metal-FRP stacks. *Composite Structures*, 107, pp.604–609. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.07.036>.
- Ramesh, B., Elayaperumal A., Satishkumar S., Kumar A., Jayakumar T., Dinakaran D., 2015. ScienceDirect Influence of cooling on the performance of the drilling process of glass fibre reinforced epoxy composites. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16(1), pp.135–146. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2015.03.001>.
- Reddy, J.N., 1997. *Mechanics of Laminated Composite* 2nd ed. CRC, ed., USA. Cap. 2 pp.85-88.
- Rezende, B.A., Silveira M. L., Vieira L. M. G., Abrão A. M., Faria P. E., Rubio J. C. C., 2016. Investigation on the effect of drill geometry and pilot holes on thrust force and

- burr height when drilling an aluminium/PE sandwich material. *Materials*, 9(9).
- Rique, A.M., Machado A. C., Oliveira D. F., Lopes R. T., Lima I., 2015. X-ray imaging inspection of fiberglass reinforced by epoxy composite. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 349, pp.184–191. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2015.03{Bibliography}.003>.
- Samy, G.S. & Kumaran, S.T., 2017. Measurement and analysis of temperature, thrust force and surface roughness in drilling of AA (6351)-B4C composite. *Measurement*, 103, pp.1–9. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224117301124>.
- Sandvik Coromant, 2010. User's Guide: Machining carbon fibre materials. , pp.1–62.
- Silva, D., Pamies Teixeira, J. & Machado, C.M., 2014. Methodology analysis for evaluation of drilling-induced damage in composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(9–12), pp.1919–1928.
- Singh, I. & Bhatnagar, N., 2006. Drilling-induced damage in uni-directional glass fiber reinforced plastic (UD-GFRP) composite laminates. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27(9–10), pp.877–882.
- Sicomin Epoxy Systems, 2014. Sr 1500. , 33(0), pp.1–8.
- Tavares, M.R.S., Durão L. M. P., Gonçalves D. J. S., Albuquerque V. H. C., 2010. Avaliação da delaminação após furação em compósitos laminados.
- Vieira, A.A., 2011. COMPÓSITOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO E DE SISAL.
- Wang, H., Sun J., Li J., Li W., 2014. Investigation on delamination morphology during drilling composite laminates. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74(1–4), pp.257–266.
- Yang, R. & He, Y., 2016. Optically and non-optically excited thermography for composites: A review. *Infrared Physics and Technology*, 75, pp.26–50. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2015.12.026>.
- Zuo, H., Yang Z., Chen X., Xie Y., Miao H., 2015. Analysis of laminated composite plates using wavelet finite element method and higher-order plate theory. *Composite Structures*, 131, pp.248–258. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.04.064>.

**Anexo A.**

**Cálculo das propriedades mecânicas das Placas:**

```

> restart
>
> #Placa 10 A
> #Numero de camadas
> Ncamadas := 10 :
> #mássa volumica da fibra  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ :
> rófibra := 2550 :
> #Módulo de Young fibra
> Ef := 74·109 :
> #Módulo de Young matriz
> Em := 4.5·109 :
> #Poisson fibra
> vf := 0.25 :
> #Poisson matriz
> vm := 0.3 :
>
> #Espessura da placa [m] :
> emedia := 2.88·10-3 :
>
> #largura da placa [m] :
> l := 250·10-3 :
> #comprimento [m]:
> c := 250·10-3 :
> # Gramagem kg / m2, retangulo pesado com as seguintes dimensões 25 x30 cm
> gramagem := evalf $\left( \frac{(20 \cdot 10^{-3})}{(25 \cdot 10^{-2} \cdot 30 \cdot 10^{-2})} \right)$ 
                                     gramagem := 0.2666666667 (1)
> #Volume da placa [m3] :
> V := c·l·emedia
                                     V := 0.0001800000000 (2)
> #Espessura por camada:
> hcamada :=  $\frac{\text{emedia}}{\text{Ncamadas}}$ 
                                     hcamada := 0.0002880000000 (3)
> #Percentagem de fibra na placa
> Vf :=  $\frac{\text{gramagem}}{\text{hcamada} \cdot \text{rófibra}}$ 
                                     Vf := 0.3631082063 (4)
> #Percentagem de matriz na placa
> Vm := 1 - Vf

```

$$Vm := 0.6368917937 \quad (5)$$

> #Cálculo de EL

$$EL := Ef \cdot Vf + Em \cdot Vm$$

$$EL := 2.973602034 \cdot 10^{10} \quad (6)$$

> #Cálculo de ET

$$ET := \frac{(Ef \cdot Em)}{Ef \cdot Vm + Em \cdot Vf}$$

$$ET := 6.828810986 \cdot 10^9 \quad (7)$$

> #Cálculo de vLT

$$vLT := Vf \cdot vf + Vm \cdot vm$$

$$vLT := 0.2818445897 \quad (8)$$

> #Cálculo de Gf

$$Gf := \frac{Ef}{2 \cdot (1 - vf)}$$

$$Gf := 4.933333333 \cdot 10^{10} \quad (9)$$

> #Cálculo de Gm

$$Gm := \frac{Em}{2 \cdot (1 - vm)}$$

$$Gm := 3.214285714 \cdot 10^9 \quad (10)$$

> #Cálculo de GLT

$$GLT := \frac{(Gm \cdot Gf)}{Gf \cdot Vm + Gm \cdot Vf}$$

$$GLT := 4.866075502 \cdot 10^9 \quad (11)$$

>

```

> restart
>
> #Placa 10 B
> #Numero de camadas
> Ncamadas := 10 :
> #mássa volumica da fibra  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$  :
> rófibra := 2550 :
> #Módulo de Young fibra
> Ef := 74·109 :
> #Módulo de Young matriz
> Em := 4.5·109 :
> #Poisson fibra
> vf := 0.25 :
> #Poisson matriz
> vm := 0.3 :
>
> #Espessura da placa [m] :
> emedia := 3·10-3 :
>
> #largura da placa [m] :
> l := 250·10-3 :
> #comprimento [m]:
> c := 250·10-3 :
> # Gramagem kg
>  $\frac{\text{m}^2}{\text{m}^2}$ 
> gramagem := evalf $\left( \frac{(20 \cdot 10^{-3})}{(25 \cdot 10^{-2} \cdot 30 \cdot 10^{-2})} \right)$ 
>  $\text{gramagem} := 0.2666666667$  (1)
> #Volume da placa [m3] :
> V := c·l·emedia
>  $V := \frac{3}{16000}$  (2)
> #Espessura por camada:
> hcamada :=  $\frac{\text{emedia}}{\text{Ncamadas}}$ 
>  $hcamada := \frac{3}{10000}$  (3)
> #Porcentagem de fibra na placa
> Vf :=  $\frac{\text{gramagem}}{\text{hcamada} \cdot \text{rófibra}}$ 
>  $Vf := 0.3485838780$  (4)

```

<b>&gt; #Percentagem de matriz na placa</b>			
<b>&gt;</b>	$V_m := 1 - V_f$	$V_m := 0.6514161220$	<b>(5)</b>
<b>&gt; #Cálculo de EL</b>			
<b>&gt;</b>	$EL := E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m$	$EL := 2.872657952 \cdot 10^{10}$	<b>(6)</b>
<b>&gt; #Cálculo de ET</b>			
<b>&gt;</b>	$ET := \frac{(E_f \cdot E_m)}{E_f \cdot V_m + E_m \cdot V_f}$	$ET := 6.690317780 \cdot 10^9$	<b>(7)</b>
<b>&gt; #Cálculo de vLT</b>			
<b>&gt;</b>	$vLT := V_f \cdot v_f + V_m \cdot v_m$	$vLT := 0.2825708061$	<b>(8)</b>
<b>&gt; #Cálculo de Gf</b>			
<b>&gt;</b>	$G_f := \frac{E_f}{2 \cdot (1 - v_f)}$	$G_f := 4.933333333 \cdot 10^{10}$	<b>(9)</b>
<b>&gt; #Cálculo de Gm</b>			
<b>&gt;</b>	$G_m := \frac{E_m}{2 \cdot (1 - v_m)}$	$G_m := 3.214285714 \cdot 10^9$	<b>(10)</b>
<b>&gt; #Cálculo de GLT</b>			
<b>&gt;</b>	$GLT := \frac{(G_m \cdot G_f)}{G_f \cdot V_m + G_m \cdot V_f}$	$GLT := 4.768065034 \cdot 10^9$	<b>(11)</b>
<b>&gt;</b>			

```

> restart
>
> #Placa 10C
> #Numero de camadas
> Ncamadas := 10 :
> #mássa volumica da fibra  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ :
> rófibra := 2550 :
> #Módulo de Young fibra
> Ef :=  $74 \cdot 10^9$  :
> #Módulo de Young matriz
> Em :=  $4.5 \cdot 10^9$  :
> #Poisson fibra
> vf := 0.25 :
> #Poisson matriz
> vm := 0.3 :
>
> #Espessura da placa [m] :
> emedia :=  $2.945 \cdot 10^{-3}$  :
>
> #largura da placa [m] :
> l :=  $250 \cdot 10^{-3}$  :
> #comprimento [m]:
> c :=  $250 \cdot 10^{-3}$  :
> # Gramagem g
>  $\frac{\text{m}^2}{\text{m}^2}$ 
> gramagem := evalf $\left( \frac{(20 \cdot 10^{-3})}{(25 \cdot 10^{-2} \cdot 30 \cdot 10^{-2})} \right)$ 
>  $\text{gramagem} := 0.2666666667$  (1)
> #Volume da placa [m3] :
> V := c · l · emedia
>  $V := 0.0001840625000$  (2)
> #Espessura por camada:
> hcamada :=  $\frac{\text{emedia}}{\text{Ncamadas}}$ 
>  $\text{hcamada} := 0.0002945000000$  (3)
> #Percentagem de fibra na placa
> Vf :=  $\frac{\text{gramagem}}{\text{hcamada} \cdot \text{rófibra}}$ 
>  $Vf := 0.3550939335$  (4)
> #Percentagem de matriz na placa
> Vm := 1 - Vf

```

$$Vm := 0.6449060665 \quad (5)$$

> #Cálculo de EL

$$EL := Ef \cdot Vf + Em \cdot Vm$$

$$EL := 2.917902838 \cdot 10^{10} \quad (6)$$

> #Cálculo de ET

$$ET := \frac{(Ef \cdot Em)}{Ef \cdot Vm + Em \cdot Vf}$$

$$ET := 6.751691807 \cdot 10^9 \quad (7)$$

> #Cálculo de vLT

$$vLT := Vf \cdot vf + Vm \cdot vm$$

$$vLT := 0.2822453034 \quad (8)$$

> #Cálculo de Gf

$$Gf := \frac{Ef}{2 \cdot (1 - vf)}$$

$$Gf := 4.933333333 \cdot 10^{10} \quad (9)$$

> #Cálculo de Gm

$$Gm := \frac{Em}{2 \cdot (1 - vm)}$$

$$Gm := 3.214285714 \cdot 10^9 \quad (10)$$

> #Cálculo de GLT

$$GLT := \frac{(Gm \cdot Gf)}{Gf \cdot Vm + Gm \cdot Vf}$$

$$GLT := 4.811502346 \cdot 10^9 \quad (11)$$

>

```

> restart
>
> #Placa 10 M
> #Numero de camadas
> Ncamadas := 10 :
> #mássa volumica da fibra  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$  :
> rófibra := 2000 :
> #Módulo de Young fibra
> Ef := 7.8·109 :
> #Módulo de Young matriz
> Em := 4.5·109 :
> #Poisson fibra
> vf := 0.3 :
> #Poisson matriz
> vm := 0.3 :
>
> #Espessura da placa [m] :
> emedia := 2.88·10-3 :
>
> #largura da placa [m] :
> l := 250·10-3 :
> #comprimento [m]:
> c := 250·10-3 :
> #Gramagem kg / m2, retangulo pesado com as seguintes dimensões 30 x30 cm
> gramagem := evalf $\left( \frac{(33 \cdot 10^{-3})}{(30 \cdot 10^{-2} \cdot 30 \cdot 10^{-2})} \right)$ 
gramagem := 0.3666666667 (1)
> #Volume da placa [m3] :
> V := c·l·emedia
V := 0.0001800000000 (2)
> #Espessura por camada:
> hcamada :=  $\frac{emedia}{Ncamadas}$ 
hcamada := 0.0002880000000 (3)
> #Percentagem de fibra na placa
> Vf :=  $\frac{gramagem}{hcamada \cdot rófibra}$ 
Vf := 0.6365740740 (4)
> #Percentagem de matriz na placa
> Vm := 1 - Vf

```

$$Vm := 0.3634259260 \quad (5)$$

> #Cálculo de EL

$$EL := Ef \cdot Vf + Em \cdot Vm$$

$$EL := 6.600694444 \cdot 10^9 \quad (6)$$

> #Cálculo de ET

$$ET := \frac{(Ef \cdot Em)}{Ef \cdot Vm + Em \cdot Vf}$$

$$ET := 6.158645059 \cdot 10^9 \quad (7)$$

> #Cálculo de vLT

$$vLT := Vf \cdot vf + Vm \cdot vm$$

$$vLT := 0.3000000000 \quad (8)$$

> #Cálculo de Gf

$$Gf := \frac{Ef}{2 \cdot (1 - vf)}$$

$$Gf := 5.571428571 \cdot 10^9 \quad (9)$$

> #Cálculo de Gm

$$Gm := \frac{Em}{2 \cdot (1 - vm)}$$

$$Gm := 3.214285714 \cdot 10^9 \quad (10)$$

> #Cálculo de GLT

$$GLT := \frac{(Gm \cdot Gf)}{Gf \cdot Vm + Gm \cdot Vf}$$

$$GLT := 4.399032183 \cdot 10^9 \quad (11)$$

>

```

> restart
>
> #Placa 20A
> #Numero de camadas
> Ncamadas := 20 :
> #mássa volumica da fibra  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ :
> rófibra := 2550 :
> #Módulo de Young fibra
> Ef := 74·109 :
> #Módulo de Young matriz
> Em := 4.5·109 :
> #Poisson fibra
> vf := 0.25 :
> #Poisson matriz
> vm := 0.3 :
>
> #Espessura da placa [m] :
> emedia := 5.54·10-3 :
>
> #largura da placa [m] :
> l := 250·10-3 :
> #comprimento [m]:
> c := 250·10-3 :
> # Gramagem kg
>  $\frac{\text{m}^2}$ 
> gramagem := evalf(20 * 10^(-3) / ((25 * 10^(-2)) * 30) * 10^(-2)))
>  $\text{gramagem} := 0.2666666667$  (1)
> #Volume da placa [m3]:
> V := c·l·emedia
>  $V := 0.0003462500000$  (2)
> #Espessura por camada:
> hcamada :=  $\frac{\text{emedia}}{\text{Ncamadas}}$ 
>  $\text{hcamada} := 0.0002770000000$  (3)
> #Percentagem de fibra na placa
> Vf :=  $\frac{\text{gramagem}}{\text{hcamada} \cdot \text{rófibra}}$ 
>  $Vf := 0.3775276658$  (4)
> #Percentagem de matriz na placa
> Vm := 1 - Vf
>  $Vm := 0.6224723342$  (5)

```

<p>&gt; <b>#Cálculo de EL</b></p> <p>&gt; <math>EL := Ef \cdot Vf + Em \cdot Vm</math></p>	<p><math>EL := 3.073817277 \cdot 10^{10}</math></p>	<p><b>(6)</b></p>
<p>&gt; <b>#Cálculo de ET</b></p> <p>&gt; <math>ET := \frac{(Ef \cdot Em)}{Ef \cdot Vm + Em \cdot Vf}</math></p>	<p><math>ET := 6.972095067 \cdot 10^9</math></p>	<p><b>(7)</b></p>
<p>&gt; <b>#Cálculo de vLT</b></p> <p>&gt; <math>vLT := Vf \cdot vf + Vm \cdot vm</math></p>	<p><math>vLT := 0.2811236168</math></p>	<p><b>(8)</b></p>
<p>&gt; <b>#Cálculo de Gf</b></p> <p>&gt; <math>Gf := \frac{Ef}{2 \cdot (1 - vf)}</math></p>	<p><math>Gf := 4.933333333 \cdot 10^{10}</math></p>	<p><b>(9)</b></p>
<p>&gt; <b>#Cálculo de Gm</b></p> <p>&gt; <math>Gm := \frac{Em}{2 \cdot (1 - vm)}</math></p>	<p><math>Gm := 3.214285714 \cdot 10^9</math></p>	<p><b>(10)</b></p>
<p>&gt; <b>#Cálculo de GLT</b></p> <p>&gt; <math>GLT := \frac{(Gm \cdot Gf)}{Gf \cdot Vm + Gm \cdot Vf}</math></p>	<p><math>GLT := 4.967447142 \cdot 10^9</math></p>	<p><b>(11)</b></p>

```

> restart
>
> #Placa 30A
> #Numero de camadas
> Ncamadas := 30 :
> #mássa volumica da fibra  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ :
> rófibra := 2550 :
> #Módulo de Young fibra
> Ef := 74·109 :
> #Módulo de Young matriz
> Em := 4.5·109 :
> #Poisson fibra
> vf := 0.25 :
> #Poisson matriz
> vm := 0.3 :
>
> #Espessura da placa [m] :
> emedia := 8.36·10-3 :
>
> #largura da placa [m] :
> l := 250·10-3 :
> #comprimento [m]:
> c := 250·10-3 :
> # Gramagem kg
>  $\frac{\text{m}^2}$ 
> gramagem := evalf(20 * 10^(-3) / ((25 * 10^(-2) * 30) * 10^(-2)))
>  $\text{gramagem} := 0.2666666667$  (1)
> #Volume da placa [m3]:
> V := c·l·emedia
>  $V := 0.0005225000000$  (2)
> #Espessura por camada:
> hcamada :=  $\frac{\text{emedia}}{\text{Ncamadas}}$ 
>  $\text{hcamada} := 0.0002786666667$  (3)
> #Percentagem de fibra na placa
> Vf :=  $\frac{\text{gramagem}}{\text{hcamada} \cdot \text{rófibra}}$ 
>  $Vf := 0.3752697251$  (4)
> #Percentagem de matriz na placa
> Vm := 1 - Vf
>  $Vm := 0.6247302749$  (5)

```

<p>&gt; <b>#Cálculo de EL</b></p> <p>&gt; <math>EL := Ef \cdot Vf + Em \cdot Vm</math></p>	<p><math>EL := 3.058124590 \cdot 10^{10}</math></p>	<p><b>(6)</b></p>
<p>&gt; <b>#Cálculo de ET</b></p> <p>&gt; <math>ET := \frac{(Ef \cdot Em)}{Ef \cdot Vm + Em \cdot Vf}</math></p>	<p><math>ET := 6.949262481 \cdot 10^9</math></p>	<p><b>(7)</b></p>
<p>&gt; <b>#Cálculo de vLT</b></p> <p>&gt; <math>vLT := Vf \cdot vf + Vm \cdot vm</math></p>	<p><math>vLT := 0.2812365138</math></p>	<p><b>(8)</b></p>
<p>&gt; <b>#Cálculo de Gf</b></p> <p>&gt; <math>Gf := \frac{Ef}{2 \cdot (1 - vf)}</math></p>	<p><math>Gf := 4.933333333 \cdot 10^{10}</math></p>	<p><b>(9)</b></p>
<p>&gt; <b>#Cálculo de Gm</b></p> <p>&gt; <math>Gm := \frac{Em}{2 \cdot (1 - vm)}</math></p>	<p><math>Gm := 3.214285714 \cdot 10^9</math></p>	<p><b>(10)</b></p>
<p>&gt; <b>#Cálculo de GLT</b></p> <p>&gt; <math>GLT := \frac{(Gm \cdot Gf)}{Gf \cdot Vm + Gm \cdot Vf}</math></p>	<p><math>GLT := 4.951295375 \cdot 10^9</math></p>	<p><b>(11)</b></p>

**Anexo B.**

**Diâmetros máximos de dano e respectivos fatores da  
placa 10M a partir da análise *scan***

Análise da área de dano à entrada e saída dos furos realizados com a ferramenta Dagger e BZT03 na placa 10M.

Ferramenta	Nº furo	Diâmetro máximo à entrada [mm]	Diâmetro máximo à saída [mm]	Área máxima à entrada [mm <sup>2</sup> ]	Área máxima à saída [mm <sup>2</sup> ]	Área de dano à entrada [mm <sup>2</sup> ]	Área de dano à saída [mm <sup>2</sup> ]
<i>Dagger</i>	1	8,581	7,540	57,832	44,651	11,893	8,039
	2	7,474	7,270	43,873	41,511	9,912	5,521
	3	7,674	6,835	46,252	36,692	10,226	5,072
	4	7,520	7,633	44,415	45,759	8,916	7,275
	5	7,572	7,336	45,031	42,268	8,777	7,640
<b>BZT03</b>	1	8,581	7,540	57,832	44,651	11,893	8,039
	2	7,474	7,270	43,873	41,511	9,912	5,521
	3	7,674	6,835	46,252	36,692	10,226	5,072
	4	7,520	7,633	44,415	45,759	8,916	7,275
	5	7,572	7,336	45,031	42,268	8,777	7,640

Fatores de dano à entrada da ferramenta Dagger e BZT03 na placa 10M.

Placa	Nº furo	Fator de dano ( $F_d$ )	Fator de área delaminada ( $F_{da}$ )	Fator de dano ajustado ( $F_{daj}$ )
<i>Dagger</i>	1	1,430	1,421	1,678
	2	1,246	1,351	1,440
	3	1,279	1,362	1,482
	4	1,253	1,315	1,429
	5	1,262	1,310	1,435
<b>Média</b>	-	1,294	1,352	1,493
<b>BZT03</b>	1	1,289	1,364	1,494
	2	1,242	1,365	1,444
	3	1,922	1,633	2,338
	4	1,461	1,578	1,804
	5	1,375	1,510	1,670
<b>Média</b>	-	1,458	1,490	1,750

Fatores de dano à saída da ferramenta Dagger e BZT03 na placa 10M.

Placa	Nº furo	Fator de dano ( $F_d$ )	Fator de área delaminada ( $F_{da}$ )	Fator de dano ajustado ( $F_{daj}$ )
<i>Dagger</i>	1	1,257	1,284	1,415
	2	1,212	1,195	1,319
	3	1,139	1,179	1,235
	4	1,272	1,257	1,416
	5	1,223	1,270	1,371
<b>Média</b>	-	1,221	1,237	1,351
<b>BZT03</b>	1	2,341	3,918	4,385
	2	3,110	4,198	5,529
	3	5,090	4,370	7,907
	4	2,046	2,402	2,988
	5	2,288	3,949	4,340
<b>Média</b>	-	2,975	3,767	5,030



**Anexo C.**

**Diâmetros máximos de dano e respectivos fatores da  
placa 10A a partir da análise *scan*.**

Análise da área de dano à entrada e saída dos furos realizados com as diferentes ferramentas na placa 10A.

Ferramenta	Nº furo	Diâmetro máximo à entrada [mm]	Diâmetro máximo à saída [mm]	Área máxima à entrada [mm <sup>2</sup> ]	Área máxima à saída [mm <sup>2</sup> ]	Área de dano à entrada [mm <sup>2</sup> ]	Área de dano à saída [mm <sup>2</sup> ]
<b>BZT01</b>	1	7,894	12,675	48,942	126,18	10,9	61,76
	2	7,363	12,598	42,579	124,65	7,74	57,66
	3	7,285	12,669	41,682	126,06	11,3	66,16
	4	7,213	13,169	40,862	136,21	15,19	64,77
	5	7,711	13,311	46,699	139,16	11,44	43,43
<b>BZT03</b>	1	6,769	11,589	35,986	105,483	6,233	73,626
	2	7,041	12,663	38,937	125,940	6,194	64,263
	3	7,238	12,458	41,146	121,895	8,641	55,221
	4	7,696	11,980	46,518	112,721	10,031	93,460
	5	6,489	10,139	33,071	80,738	5,800	100,409
<b>Dagger</b>	1	-	-	-	-	-	-
	2	6,595	7,135	34,16	39,983	3,245	4,887
	3	6,983	6,908	38,298	37,48	5,742	4,49
	4	6,835	7,383	36,692	42,811	5,878	4,626
	5	7,848	7,494	48,374	44,108	12,587	5,231
<b>Helicoidal</b>	1	6,857	7,452	32,766	43,165	4,407	9,786
	2	6,725	8,219	35,5201	53,055	5,209	21,163
	3	6,799	8,996	36,3061	63,561	5,509	20,454
	4	7,003	8,592	38,5175	57,98	5,16	18,533
	5	6,814	9,569	36,4665	71,916	5,647	19,85

Fatores de dano à entrada das ferramentas na placa 10A.

Ferramenta	Nº furo	Fator de dano ( $F_d$ )	Fator de área delaminada ( $F_{da}$ )	Fator de dano ajustado ( $F_{daj}$ )
<b>BZT01</b>	1	1.320	1,385	1,535
	2	1.230	1,274	1,378
	3	1.210	1,4	1,433
	4	1.200	1,537	1,496
	5	1.290	1,404	1,513
<b>Média</b>	-	1.25	1,4	1,471
<b>BZT03</b>	1	1.128	1.220	1.245
	2	1.174	1.219	1.292
	3	1.206	1.306	1.373
	4	1.283	1.355	1.482
	5	1.082	1.205	1.188
<b>Média</b>	-	1.174	1.261	1.316
<b>Dagger</b>	1	-	-	-
	2	1,099	1,115	1,159
	3	1,164	1,203	1,273
	4	1,139	1,208	1,25
	5	1,308	1,445	1,56
<b>Média</b>	-	1,178	1,243	1,311
<b>Helicoidal</b>	1	1,143	1,156	1,303
	2	1,121	1,184	1,218
	3	1,133	1,194	1,237
	4	1,167	1,182	1,265
	5	1,136	1,199	1,242
<b>Média</b>	-	1,14	1,183	1,253

Fatores de dano à saída das ferramentas na placa 10A.

Ferramenta	Nº furo	Fator de dano ( $F_d$ )	Fator de área delaminada ( $F_{da}$ )	Fator de dano ajustado ( $F_{daj}$ )
<b>BZT01</b>	1	2,11	3,184	3,595
	2	2,1	3,039	3,481
	3	2,11	3,34	3,699
	4	2,19	3,291	3,769
	5	2,22	2,536	3,277
<b>Média</b>	-	2,146	3,078	3,564
<b>BZT03</b>	1	1,932	3,604	3,647
	2	2,111	3,273	3,653
	3	2,076	2,953	3,395
	4	1,997	4,305	4,199
	5	1,690	4,551	3,921
<b>Média</b>	-	1,961	3,737	3,763
<b>Dagger</b>	1	-	-	-
	2	1,189	1,173	1,283
	3	1,151	1,159	1,236
	4	1,231	1,164	1,321
	5	1,249	1,185	1,352
<b>Média</b>	-	1,205	1,170	1,298
<b>Helicoidal</b>	1	1,242	1,346	1,434
	2	1,370	1,748	1,802
	3	1,499	1,723	1,933
	4	1,432	1,655	1,818
	5	1,595	1,702	2,026
<b>Média</b>	-	1,428	1,635	1,803

**Anexo D.**

**Diâmetros máximos de dano e respectivos fatores da  
placa 10B a partir da análise *scan*.**

*Análise da área de dano à entrada e saída dos furos realizados com a ferramenta BZT03 na placa 10B.*

<b>Parâmetro</b>	<b>Nº furo</b>	<b>Diâmetro máximo à entrada [mm]</b>	<b>Diâmetro máximo à saída [mm]</b>	<b>Área máxima à entrada [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Área máxima à saída [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Área de dano à entrada [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Área de dano à saída [mm<sup>2</sup>]</b>
<b>P1</b>	1	6,982	10,928	38,287	93,793	6,673	50,457
	2	7,751	17,418	47,185	238,279	8,300	153,257
	3	7,179	17,421	40,478	238,361	6,371	148,827
	4	7,599	18,969	45,353	282,604	7,031	162,480
	5	7,337	14,871	42,279	173,688	7,138	112,596
<b>P2</b>	1	7,111	16,706	39,175	219,197	6,724	119,582
	2	7,505	18,470	44,238	267,931	7,562	185,418
	3	8,190	20,471	52,681	329,130	8,144	229,521
	4	7,515	15,366	44,356	185,443	7,038	104,034
	5	7,992	16,023	50,165	201,640	7,357	112,149
<b>P3</b>	1	7,150	12,971	40,152	132,141	5,808	79,348
	2	7,409	13,594	43,113	145,139	7,454	9,074
	3	7,742	12,897	47,076	130,637	7,265	73,110
	4	7,605	12,609	45,424	124,868	6,414	59,279
	5	7,646	12,877	45,915	130,232	6,222	73,032
<b>P4</b>	1	7,449	17,596	43,580	243,174	6,375	149,743
	2	7,207	18,992	40,794	283,290	6,768	193,456
	3	7,550	22,200	44,770	387,076	8,402	208,074
	4	7,994	20,865	50,190	341,922	6,957	222,382
	5	7,700	21,338	46,566	357,600	6,247	253,958

*Fatores de dano à entrada da ferramenta BZT03 na placa 10B*

<b>Parâmetros</b>	<b>Nº furo</b>	<b>Fator de dano (<math>F_d</math>)</b>	<b>Fator de área delaminada (<math>F_{da}</math>)</b>	<b>Fator de dano ajustado (<math>F_{daj}</math>)</b>
<b>P1</b>	1	1,164	1,236	1,291
	2	1,292	1,294	1,457
	3	1,197	1,225	1,319
	4	1,267	1,249	1,405
	5	1,223	1,252	1,362
<b>Média</b>	-	1,245	1,255	1,386
<b>P2</b>	1	1,185	1,238	1,314
	2	1,251	1,267	1,399
	3	1,365	1,288	1,531
	4	1,253	1,249	1,391
	5	1,332	1,260	1,481
<b>Média</b>	-	1,277	1,260	1,423
<b>P3</b>	1	1,192	1,205	1,303
	2	1,235	1,264	1,380
	3	1,290	1,257	1,435
	4	1,268	1,227	1,394
	5	1,274	1,220	1,398
<b>Média</b>	-	1,252	1,235	1,382
<b>P4</b>	1	1,242	1,225	1,366
	2	1,201	1,239	1,332
	3	1,258	1,297	1,424
	4	1,332	1,246	1,473
	5	1,283	1,221	1,408
<b>Média</b>	-	1,263	1,246	1,400

Fatores de dano à saída da ferramenta BZT03 na placa 10B

Parâmetros	Nº furo	Fator de dano ( $F_d$ )	Fator de área delaminada ( $F_{da}$ )	Fator de dano ajustado ( $F_{daj}$ )
<b>P1</b>	1	1,821	2,785	2,973
	2	2,903	6,420	6,935
	3	2,904	6,264	6,819
	4	3,162	6,747	7,527
	5	2,479	4,982	5,316
<b>Média</b>	-	2,862	6.103	6.649
<b>P2</b>	1	2,784	5,229	5,896
	2	3,078	7,558	8,028
	3	3,412	9,118	9,689
	4	2,561	4,679	5,207
	5	2,671	4,966	5,556
<b>Média</b>	-	2,901	6,310	6,875
<b>P3</b>	1	2,162	3,806	4,081
	2	2,266	4,398	4,623
	3	2,150	3,586	3,914
	4	2,102	3,097	3,522
	5	2,146	3,583	3,908
<b>Média</b>	-	2,165	3,694	4,010
<b>P4</b>	1	2,933	6,296	6,882
	2	3,165	7,842	8,365
	3	3,700	8,359	9,493
	4	3,478	8,865	9,586
	5	3,556	9,982	10,567
<b>Média</b>	-	3,366	8,269	8,979

**Anexo E.**

**Diâmetros máximos de dano e respectivos fatores da  
placa 10C a partir da análise *Scan*.**

*Análise da área de dano à entrada e saída dos furos realizados com a ferramenta Dagger na placa 10C.*

<b>Parâmetro</b>	<b>Nº furo</b>	<b>Diâmetro máximo à entrada [mm]</b>	<b>Diâmetro máximo à saída [mm]</b>	<b>Área máxima à entrada [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Área máxima à saída [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Área de dano à entrada [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Área de dano à saída [mm<sup>2</sup>]</b>
<b>P1</b>	1	6,614	7,689	34,357	46,433	3,016	4,354
	2	7,122	7,349	39,838	42,418	4,797	4,295
	3	7,229	7,093	41,044	39,514	4,646	2,927
	4	7,023	7,500	38,738	44,179	5,236	3,740
	5	7,314	8,031	42,015	50,656	4,961	4,997
<b>P2</b>	1	6,866	7,572	37,025	45,031	3,123	4,283
	2	7,050	7,547	39,036	44,734	3,620	4,050
	3	7,161	8,642	40,275	58,657	4,951	7,223
	4	7,505	7,762	44,238	47,319	6,081	7,786
	5	7,192	7,946	40,625	49,589	4,833	5,492
<b>P3</b>	1	6,586	9,114	34,067	65,239	3,375	6,371
	2	7,714	7,882	46,736	48,794	4,023	7,981
	3	7,365	8,697	42,603	59,406	5,343	9,284
	4	6,842	6,966	36,767	38,112	4,040	4,240
	5	7,577	7,690	45,090	46,445	5,930	6,492
<b>P4</b>	1	7,084	7,139	39,414	40,028	2,670	2,977
	2	7,207	8,176	40,794	52,501	5,776	6,454
	3	7,188	9,563	40,579	71,825	4,576	12,869
	4	8,001	7,551	50,278	44,782	7,342	6,634
	5	8,055	7,965	50,959	49,827	8,938	9,013

*Fatores de dano à entrada da ferramenta Dagger na placa 10C.*

<b>Parâmetros</b>	<b>Nº furo</b>	<b>Fator de dano (<math>F_d</math>)</b>	<b>Fator de área delaminada (<math>F_{da}</math>)</b>	<b>Fator de dano ajustado (<math>F_{daj}</math>)</b>
<b>P1</b>	1	1,102	1,107	1,158
	2	1,187	1,170	1,279
	3	1,205	1,164	1,295
	4	1,171	1,185	1,270
	5	1,219	1,175	1,315
<b>Média</b>	-	1,177	1,160	1,264
<b>P2</b>	1	1,144	1,110	1,203
	2	1,175	1,128	1,244
	3	1,194	1,175	1,289
	4	1,251	1,215	1,370
	5	1,199	1,171	1,292
<b>Média</b>	-	1,193	1,160	1,280
<b>P3</b>	1	1,098	1,119	1,160
	2	1,286	1,142	1,366
	3	1,228	1,189	1,332
	4	1,140	1,143	1,216
	5	1,263	1,210	1,380
<b>Média</b>	-	1,203	1,161	1,291
<b>P4</b>	1	1,181	1,094	1,232
	2	1,201	1,204	1,313
	3	1,198	1,162	1,286
	4	1,334	1,260	1,482
	5	1,343	1,316	1,524
<b>Média</b>	-	1,251	1,207	1,367

Fatores de dano à saída da ferramenta Dagger na placa 10C.

Parâmetros	Nº furo	Fator de dano ( $F_d$ )	Fator de área delaminada ( $F_{da}$ )	Fator de dano ajustado ( $F_{daj}$ )
<b>P1</b>	1	1,282	1,154	1,368
	2	1,225	1,152	1,308
	3	1,182	1,104	1,238
	4	1,250	1,132	1,323
	5	1,339	1,177	1,440
<b>Média</b>	-	1,256	1,144	1,336
<b>P2</b>	1	1,262	1,151	1,347
	2	1,258	1,143	1,338
	3	1,440	1,255	1,591
	4	1,294	1,275	1,449
	5	1,324	1,194	1,435
<b>Média</b>	-	1,316	1,204	1,432
<b>P3</b>	1	1,519	1,225	1,655
	2	1,314	1,282	1,474
	3	1,450	1,328	1,644
	4	1,161	1,150	1,242
	5	1,282	1,230	1,411
<b>Média</b>	-	1,345	1,243	1,485
<b>P4</b>	1	1,190	1,105	1,247
	2	1,363	1,228	1,494
	3	1,594	1,455	1,874
	4	1,259	1,235	1,389
	5	1,328	1,319	1,509
<b>Média</b>	-	1,347	1,268	1,503

**Anexo F.**

**Diâmetros máximos de dano e respectivos fatores da  
placa 10M a partir da análise *Scan*.**

Análise da área de dano à entrada e saída dos furos realizados com a ferramenta Dagger e BZT03 na placa 10M.

Ferramenta	Nº furo	Diâmetro máximo à entrada [mm]	Diâmetro máximo à saída [mm]	Área máxima à entrada [mm <sup>2</sup> ]	Área máxima à saída [mm <sup>2</sup> ]	Área de dano à entrada [mm <sup>2</sup> ]	Área de dano à saída [mm <sup>2</sup> ]
<b>Dagger</b>	1	8,581	7,540	57,832	44,651	11,893	8,039
	2	7,474	7,270	43,873	41,511	9,912	5,521
	3	7,674	6,835	46,252	36,692	10,226	5,072
	4	7,520	7,633	44,415	45,759	8,916	7,275
	5	7,572	7,336	45,031	42,268	8,777	7,640
<b>BZT03</b>	1	8,581	7,540	57,832	44,651	11,893	8,039
	2	7,474	7,270	43,873	41,511	9,912	5,521
	3	7,674	6,835	46,252	36,692	10,226	5,072
	4	7,520	7,633	44,415	45,759	8,916	7,275
	5	7,572	7,336	45,031	42,268	8,777	7,640

Fatores de dano à entrada da ferramenta Dagger e BZT03 na placa 10M.

<b>Placa</b>	<b>Nº furo</b>	<b>Fator de dano (<math>F_d</math>)</b>	<b>Fator de área delaminada (<math>F_{da}</math>)</b>	<b>Fator de dano ajustado (<math>F_{daj}</math>)</b>
<b>Dagger</b>	1	1,430	1,421	1,678
	2	1,246	1,351	1,440
	3	1,279	1,362	1,482
	4	1,253	1,315	1,429
	5	1,262	1,310	1,435
<b>Média</b>	-	1,294	1,352	1,493
<b>BZT03</b>	1	1,289	1,364	1,494
	2	1,242	1,365	1,444
	3	1,922	1,633	2,338
	4	1,461	1,578	1,804
	5	1,375	1,510	1,670
<b>Média</b>	-	1,458	1,490	1,750

<b>Placa</b>	<b>Nº furo</b>	<b>Fator de dano (<math>F_d</math>)</b>	<b>Fator de área delaminada (<math>F_{da}</math>)</b>	<b>Fator de dano ajustado (<math>F_{daj}</math>)</b>
<b>Dagger</b>	1	1,257	1,284	1,415
	2	1,212	1,195	1,319
	3	1,139	1,179	1,235
	4	1,272	1,257	1,416
	5	1,223	1,270	1,371
<b>Média</b>	-	1,221	1,237	1,351
<b>BZT03</b>	1	2,341	3,918	4,385
	2	3,110	4,198	5,529
	3	5,090	4,370	7,907
	4	2,046	2,402	2,988
	5	2,288	3,949	4,340
<b>Média</b>	-	2,975	3,767	5,030

**Anexo G.**

**Diâmetros máximos de dano e respectivos fatores dos dois primeiros furos efetuados com a ferramenta *Dagger* na placa 10A e os dois últimos furos efetuados com a mesma ferramenta na placa 10C a partir da análise *scan*.**

Análise da área de dano à entrada e saída dos primeiros furos realizados com a ferramenta Dagger na placa 10A e últimos furos efetuados com a mesma ferramenta na placa 10C.

Ferramenta	Nº furo	Diâmetro máximo à entrada [mm]	Diâmetro máximo à saída [mm]	Área máxima à entrada [mm <sup>2</sup> ]	Área máxima à saída [mm <sup>2</sup> ]	Área de dano à entrada [mm <sup>2</sup> ]	Área de dano à saída [mm <sup>2</sup> ]
<b>10A Dagger</b>	2	6,595	7,135	34,16	39,983	3,245	4,887
	3	6,983	6,908	38,298	37,48	5,742	4,49
<b>10C Dagger</b>	1	6,647	8,625	34,701	58,426	4,283	8,246
	2	6,793	8,921	36,242	62,505	4,475	11,359

Fatores de dano à entrada dos dois primeiros furos efetuados com a ferramenta Dagger na placa 10A e dos dois últimos dois furos efetuados com a mesma ferramenta na placa 10C.

Ferramenta	Nº furo	Fator de dano ( $F_d$ )	Fator de área delaminada ( $F_{da}$ )	Fator de dano ajustado ( $F_{daj}$ )
<b>10A Dagger</b>	2	1,099	1,115	1,159
	3	1,164	1,203	1,273
<b>10C Dagger</b>	1	1,108	1,151	1,187
	2	1,132	1,158	1,216

Fatores de dano à saída dos dois primeiros furos efetuados com a ferramenta Dagger na placa 10A e dos dois últimos dois furos efetuados com a mesma ferramenta na placa 10C.

Ferramenta	Nº furo	Fator de dano ( $F_d$ )	Fator de área delaminada ( $F_{da}$ )	Fator de dano ajustado ( $F_{daj}$ )
<b>10A Dagger</b>	2	1.189	1.173	1.283
	3	1.151	1.159	1.236
<b>10C Dagger</b>	1	1.438	1.292	1.609
	2	1.487	1.402	1.727

**Anexo H.**

**Diâmetros máximos de dano e respectivos fatores obtidos pela furação das placas 10A, 20A e 30A com a ferramenta BZT03 a partir da análise raio-X.**

Análise da área de dano à entrada dos furos realizados com a ferramenta BZT03 determinados a partir das imagens raio-X

	Nº furo	Diâmetro máximo à entrada [mm]	Área máxima à entrada [ $mm^2$ ]	Área de dano à entrada [ $mm^2$ ]
<b>30A</b>	1	6,829	36,627	7,686
	2	7,056	39,103	10,676
	3	8,175	52,489	16,566
	4	7,15	40,152	11,596
	5	7,116	39,771	9,816
<b>20A</b>	1	7,996	50,215	18,426
	2	8,419	55,669	21,886
	3	7,418	43,218	12,266
	4	8,914	62,407	28,236
	5	8,691	59,324	26,646
<b>10A</b>	1	9,143	65,655	23,536
	2	13,312	139,180	62,776
	3	9,152	65,784	27,826
	4	9,056	64,411	25,466
	5	10,931	93,845	37,996
<b>10M</b>	1	7,055	39,092	10,126
	2	6,84	36,745	7,926
	3	12,978	132,283	63,866
	4	9,83	75,892	27,166
	5	10,854	92,527	26,566

*Fatores de dano à entrada da ferramenta BZT03 determinados a partir das imagens raio-X.*

<b>Placa</b>	<b>Nº furo</b>	<b>Fator de dano (<math>F_d</math>)</b>	<b>Fator de área delaminada (<math>F_{da}</math>)</b>	<b>Fator de dano ajustado (<math>F_{daj}</math>)</b>
<b>30A BZT03</b>	1	1,138	1,272	1,283
	2	1,176	1,378	1,380
	3	1,363	1,586	1,700
	4	1,192	1,410	1,415
	5	1,186	1,347	1,374
<b>Média</b>	-	1,247	1,448	1,496
<b>20A BZT03</b>	1	1,333	1,652	1,705
	2	1,403	1,774	1,855
	3	1,236	1,434	1,476
	4	1,486	1,999	2,083
	5	1,449	1,942	2,006
<b>Média</b>	-	1,381	1,760	1,825
<b>10A BZT03</b>	1	1,524	1,832	2,026
	2	2,219	3,220	3,749
	3	1,525	1,984	2,120
	4	1,509	1,901	2,051
	5	1,822	2,344	2,689
<b>Média</b>	-	1,720	2,256	2,527
<b>10M BZT03</b>	1	1,176	1,358	1,369
	2	1,140	1,280	1,289
	3	2,163	3,259	3,708
	4	1,638	1,961	2,235
	5	1,809	1,940	2,414
<b>Média</b>	-	1,585	1,960	2,203



**Anexo I.**

**Diâmetros máximos de dano e respectivos fatores da  
placa 10A a partir da análise raio-X.**

Análise da área de dano à entrada das ferramentas na placa 10A a partir das imagens raio-X.

	Nº furo	Diâmetro máximo à entrada [mm]	Área máxima à entrada [ $mm^2$ ]	Área de dano à entrada [ $mm^2$ ]
<b>BZT01</b>	1	8,44	55,947	20,226
	2	8,424	55,735	18,066
	3	8,119	51,772	17,716
	4	7,407	43,090	14,586
	5	8,146	52,117	20,046
<b>BZT03</b>	1	9,143	65,655	23,536
	2	13,312	139,180	62,776
	3	9,152	65,784	27,826
	4	9,056	64,411	25,466
	5	10,931	93,845	37,996
<b>Dagger</b>	1	-	-	-
	2	9,74	74,509	24,326
	3	8,115	51,721	20,206
	4	8,202	52,836	20,366
	5	8,103	51,568	19,996
<b>Helicoidal</b>	1	9,055	64,397	26,186
	2	8,236	53,275	18,616
	3	8,831	61,251	22,266
	4	8,593	57,994	21,776
	5	8,873	61,834	23,186

Fatores de dano à entrada das ferramentas na placa 10A a partir das imagens raio-X.

Ferramenta	Nº furo	Fator de dano ( $F_d$ )	Fator de área delaminada ( $F_{da}$ )	Fator de dano ajustado ( $F_{daj}$ )
<b>BZT01</b>	1	1,407	1,715	1,825
	2	1,404	1,639	1,777
	3	1,353	1,627	1,713
	4	1,235	1,516	1,519
	5	1,358	1,709	1,766
<b>Média</b>	-	1,351	1,641	1,720
<b>BZT03</b>	1	1,524	1,832	2,026
	2	2,219	3,220	3,749
	3	1,525	1,984	2,120
	4	1,509	1,901	2,051
	5	1,822	2,344	2,689
<b>Média</b>	-	1,720	2,256	2,527
<b>Dagger</b>	1	-	-	-
	2	1,623	1,860	2,156
	3	1,353	1,715	1,763
	4	1,367	1,720	1,783
	5	1,351	1,707	1,757
<b>Média</b>	-	1,423	1,751	1,865
<b>Helicoidal</b>	1	1,509	1,926	2,066
	2	1,373	1,658	1,754
	3	1,472	1,787	1,941
	4	1,432	1,770	1,886
	5	1,479	1,820	1,968
<b>Média</b>	-	1,453	1,792	1,923



**Anexo J.**

**Diâmetros máximos de dano e respectivos fatores da  
placa 10B a partir da análise raio-X.**

*Análise da área de dano à entrada da ferramenta BZT03 com diferentes parâmetros na placa 10B a partir das imagens raio-X*

<b>Nº furo</b>	<b>Diâmetro máximo à entrada [mm]</b>	<b>Área máxima à entrada [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Área de dano à entrada [mm<sup>2</sup>]</b>	
<b>P1</b>	1	8,467	56,305	22,366
	2	10,054	79,390	32,876
	3	8,35	54,760	19,736
	4	10,103	80,166	40,696
	5	10,607	88,364	64,18
<b>P2</b>	1	9,414	69,605	28,446
	2	10,165	81,153	38,276
	3	9,159	65,885	24,286
	4	12,598	124,650	33,716
	5	10,325	83,728	28,706
<b>P3</b>	1	7,746	47,124	13,496
	2	7,269	41,499	12,436
	3	7,892	48,917	14,806
	4	8,734	59,912	22,316
	5	9,688	73,715	33,356
<b>P4</b>	1	10,071	79,659	23,146
	2	9,277	67,594	24,086
	3	7,621	45,616	14,436
	4	9,556	71,720	30,946
	5	10,003	78,587	67,56

*Fatores de dano à entrada da ferramenta BZT03 na placa 10B.*

<b>Parâmetros</b>	<b>Nº furo</b>	<b>Fator de dano (<math>F_d</math>)</b>	<b>Fator de área delaminada (<math>F_{da}</math>)</b>	<b>Fator de dano ajustado (<math>F_{daj}</math>)</b>
<b>P1</b>	1	1,411	1,791	1,874
	2	1,676	2,163	2,404
	3	1,392	1,698	1,798
	4	1,684	2,439	2,587
	5	1,768	3,270	3,218
<b>Média</b>	-	1,630	2,392	2,502
<b>P2</b>	1	1,569	2,006	2,183
	2	1,694	2,354	2,545
	3	1,527	1,859	2,045
	4	2,100	2,192	2,907
	5	1,721	2,015	2,363
<b>Média</b>	-	1,722	2,085	2,409
<b>P3</b>	1	1,291	1,477	1,560
	2	1,212	1,440	1,452
	3	1,315	1,524	1,613
	4	1,456	1,789	1,924
	5	1,615	2,180	2,343
<b>Média</b>	-	1,378	1,682	1,778
<b>P4</b>	1	1,679	1,819	2,191
	2	1,546	1,852	2,063
	3	1,270	1,511	1,556
	4	1,593	2,094	2,265
	5	1,667	3,389	3,161
<b>Média</b>	-	1,551	2,133	2,247



**Anexo K.**

**Diâmetros máximos de dano e respectivos fatores da  
placa 10C a partir da análise raio-X.**

*Análise da área de dano à entrada da ferramenta Dagger com diferentes parâmetros na placa 10C a partir das imagens raio-X*

	<b>Nº furo</b>	<b>Diâmetro máximo à entrada [mm]</b>	<b>Área máxima à entrada [mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Área de dano à entrada [mm<sup>2</sup>]</b>
<b>P1</b>	1	9,398	69,368	30,666
	2	9,898	76,946	39,386
	3	10,302	83,355	41,216
	4	9,047	64,283	29,056
	5	8,376	55,101	25,096
<b>P2</b>	1	9,5	70,882	34,186
	2	9,589	72,217	32,246
	3	9,414	69,605	32,986
	4	9,378	69,073	32,066
	5	9,412	69,575	32,686
<b>P3</b>	1	9,703	73,944	35,366
	2	9,487	70,688	32,366
	3	8,529	57,133	22,766
	4	9,576	72,021	30,926
	5	9,367	68,911	32,876
<b>P4</b>	1	9,233	66,954	33,406
	2	9,593	72,277	32,266
	3	9,467	70,391	31,206
	4	9,573	71,976	33,706
	5	9,569	71,916	32,496

*Fatores de dano à entrada da ferramenta Dagger na placa 10C.*

<b>Parâmetros</b>	<b>Nº furo</b>	<b>Fator de dano (<math>F_d</math>)</b>	<b>Fator de área delaminada (<math>F_{da}</math>)</b>	<b>Fator de dano ajustado (<math>F_{daj}</math>)</b>
<b>P1</b>	1	1,566	2,085	2,228
	2	1,650	2,393	2,517
	3	1,717	2,458	2,638
	4	1,508	2,028	2,126
	5	1,396	1,888	1,913
<b>Média</b>	-	1,567	2,170	2,284
<b>P2</b>	1	1,583	2,209	2,324
	2	1,598	2,140	2,300
	3	1,569	2,167	2,282
	4	1,563	2,134	2,255
	5	1,569	2,156	2,275
<b>Média</b>	-	1,576	2,161	2,287
<b>P3</b>	1	1,617	2,251	2,390
	2	1,581	2,145	2,282
	3	1,422	1,805	1,894
	4	1,596	2,094	2,268
	5	1,561	2,163	2,270
<b>Média</b>	-	1,555	2,091	2,221
<b>P4</b>	1	1,539	2,181	2,255
	2	1,599	2,141	2,301
	3	1,578	2,104	2,253
	4	1,596	2,192	2,328
	5	1,595	2,149	2,301
<b>Média</b>	-	1,581	2,154	2,288



**Anexo L.**

**Diâmetros máximos de dano e respectivos fatores da  
placa 10M a partir da análise raio-X**

Análise da área de dano à entrada das ferramentas Dagger e BZT03 na placa 10M a partir das imagens raio-X.

	Nº furo	Diâmetro máximo à entrada [mm]	Área máxima à entrada [mm <sup>2</sup> ]	Área de dano à entrada [mm <sup>2</sup> ]
<b>Dagger</b>	1	6,823	36,563	7,076
	2	7,29	41,739	11,256
	3	6,953	37,969	8,236
	4	7,81	47,906	9,576
	5	8,66	58,901	16,906
<b>BZT03</b>	1	7,055	39,092	10,126
	2	6,84	36,745	7,926
	3	12,978	132,283	63,866
	4	9,83	75,892	27,166
	5	10,854	92,527	26,566

Fatores de dano à entrada das ferramentas Dagger e BZT03 na placa 10M.

<b>Placa</b>	<b>Nº furo</b>	<b>Fator de dano (<math>F_d</math>)</b>	<b>Fator de área delaminada (<math>F_{da}</math>)</b>	<b>Fator de dano ajustado (<math>F_{daj}</math>)</b>
<b>Dagger</b>	1	1,137	1,250	1,270
	2	1,215	1,398	1,433
	3	1,159	1,291	1,315
	4	1,302	1,339	1,493
	5	1,443	1,598	1,797
<b>Média</b>	-	1,251	1,375	1,462
<b>BZT03</b>	1	1,176	1,358	1,369
	2	1,140	1,280	1,289
	3	2,163	3,259	3,708
	4	1,638	1,961	2,235
	5	1,809	1,940	2,414
<b>Média</b>	-	1.585	1.960	2.203



**Anexo M.**

**Diâmetros máximos de dano e respectivos fatores dos dois primeiros furos efetuados com a ferramenta *Dagger* na placa 10A e os dois últimos furos efetuados com a mesma ferramenta na placa 10C a partir da análise raio-X.**

*Análise da área de dano à entrada e saída dos primeiros furos realizados com a ferramenta Dagger na placa 10A e últimos furos efetuados com a mesma ferramenta na placa 10C a partir das imagens raio-X.*

	Nº furo	Diâmetro máximo à entrada [mm]	Área máxima à entrada [ $mm^2$ ]	Área de dano à entrada [ $mm^2$ ]
<b>10A Dagger</b>	2	9,74	74,509	24,326
	3	8,115	51,721	20,206
<b>10C Dagger</b>	1	9,218	66,736	33,896
	2	9,731	74,371	35,376

*Fatores de dano à entrada dos dois primeiros furos efetuados com a ferramenta Dagger na placa 10A e dos dois últimos dois furos efetuados com a mesma ferramenta na placa 10C a partir das imagens raio-X.*

Placa	Nº furo	Fator de dano ( $F_d$ )	Fator de área delaminada ( $F_{da}$ )	Fator de dano ajustado ( $F_{daj}$ )
<b>10A Dagger</b>	2	1,623	1,860	2,156
	3	1,353	1,715	1,763
<b>10C Dagger</b>	1	1,536	2,199	2,262
	2	1,622	2,251	2,396

**Anexo N.**

**Temperaturas atingidas á distância do raio máximo de dano e temperaturas máximas atingidas durante o processo de furação e respectivas distâncias ao centro.**

*Gamas de temperatura à distância do raio máximo de dano e gamas de temperatura máximas e respetiva distância ao centro.*

<b>Placa</b>	<b>Furo</b>	<b>Rmax scan</b>	<b>Temperatura junto ao Rmax</b>	<b>Gama Tmax</b>	<b>Distância da Gama Tmax ao centro</b>
<b>30A</b>	1	5,5825	53,930	[70,993;88]	5,364
	2	7,8565	87,982	[80,210;87,982]	5,091
	3	10,76	88,88	[79,9;88;88]	5,573
	4	12,773	88	[80,248;88]	10,01
	5	14,988	77,317	[80,470;88]	4,53
<b>20A</b>	1	7,0615	63,741	[102,759;119,338]	3,255
	2	7,405	122	[103,351;122]	6,587
	3	11,6215	77,317	[75,963;88]	3,038
	4	6,5155	81,195	[108,744;121]	3,34
	5	7,4545	69,195	[108,433;121]	3,128
<b>10A BZT03</b>	1	5,7945	205,015	[128,109;205,015]	3,268
	2	6,3315	119,890	[216,867;250]	3,161
	3	6,229	123,264	[191,75;250]	3,308
	4	5,99	123,870	[210,494;241,638]	3,713
	5	5,0695	122,053	[177,505;233,044]	4,161
<b>10ABZT01</b>	1	6,3375	124,043	[221,712;242,387]	3,118
	2	6,299	186,329	[209,052;250]	2,676
	3	6,3345	228,085	[219,575;250]	3,976
	4	6,5845	214,820	[218,684;248,443]	5,372
	5	6,6555	119,314	[208,130;236,274]	4,956
<b>10ADagger</b>	1	0	-	-	-
	2	3,5675	122,880	[116,071;138,867]	1,802
	3	3,454	117,319	[121,402;135,305]	0,075
	4	3,6915	104,83	[119,491;150,771]	1,412
	5	3,747	90,759	[111,207;154,595]	1
<b>10A seco</b>	1	3,726	36,667	[47,488;79,116]	3,475
	2	4,1095	52,585	[49,110;69,268]	3,777
	3	4,498	43,549	[40,189;75,524]	3,443
	4	4,296	59,698	[76,204;87,314]	3,613
	5	4,7845	61,775	[77,095;86,646]	3,66
<b>10B BZT03 P1</b>	1	5,464	135,421	[150,598;221,966]	6,248
	2	8,709	190,133	[185,962;232,101]	5,445
	3	8,7105	246,467	[207,540;246,467]	8,08
	4	9,4845	152,567	[181,878;237,575]	6,233
	5	7,4355	225,816	[176,752;225,816]	5,36
<b>10B BZT03 P2</b>	1	8,353	151,4639	[209,072;225,668]	4,835
	2	9,235	-	-	-
	3	10,2355	153,606	[214,198;227,145]	4,163

	4	7,683	242,438	[198,645;242,438]	6,473
	5	8,0115	125,268	[185,872;219,759]	1,833
<b>10B BZT03 P3</b>	1	6,4855	161,065	[167,364;243,046]	4,477
	2	6,797	114,506	[184,714;228,579]	4,29
	3	6,4485	106,194	[214,067;246]	5,722
	4	6,3045	246	[216,689;246]	6,838
	5	6,4385	207,044	[170,232;246]	5,655
<b>10B BZT03 P4</b>	1	8,798	147,988	[154,896;195,256]	5,527
	2	9,496	157,198	[168,146;209,159]	3,861
	3	11,1	126,555	[162,122;192,476]	4,965
	4	10,4325	122,790	[166,061;204,380]	2,426
	5	10,669	113,579	[210,549;159,718]	2,512
<b>10C Dagger P1</b>	1	3,8445	115,851	[72,831;115,851]	2,282
	2	3,6745	121,286	[89,601;121,286]	1,122
	3	3,5465	51,890	[97,884;114,886]	0,768
	4	3,75	47,720	[100,549;117,232]	0,569
	5	4,0155	105,415	[103,213;112,424]	0,757
<b>10C Dagger P2</b>	1	3,786	113,698	[116,537;125,457]	0,62
	2	3,7735	88,037	[71,962;101,128]	1,321
	3	4,321	87,341	[82,389;110,194]	1,218
	4	3,881	106,023	[108,803;122,966]	1,772
	5	3,973	141,387	[120,070;141,387]	0,782
<b>10C Dagger P3</b>	1	4,557	104,633	[85,256;110,338]	0,992
	2	3,941	89,601	[79,579;106,805]	0,882
	3	4,3485	79,579	[87,399;118,796]	0,619
	4	3,483	101,244	[104,024;123,43]	0,779
	5	3,845	83,258	[127,775;140,866]	0,628
<b>10C Dagger P4</b>	1	3,5695	93,622	[59,593;114,181]	1,552
	2	4,088	96,335	[74,221;106,892]	1,387
	3	4,7815	90,209	[96,291;108,239]	0,724
	4	3,7755	83,902	[61,872;103,857]	1,437
	5	3,9825	92,816	[90,296;112,236]	0,843
<b>10M Dagger</b>	1	3,77	101,070	[120,591;150,771]	0,655
	2	3,635	110,845	[114,394;133,857]	0,885
	3	3,4175	106,284	[120,070;140,142]	0,78
	4	3,8165	112,887	[116,493;135,870]	1,209
	5	3,668	108,803	[121,634;142,372]	0,9
<b>10M BZT03</b>	1	7,0225	222,716	[178,229;222,716]	7,953
	2	9,329	158,910	[163,067;214,491]	6,668
	3	15,27	149,816	[189,655;229,016]	5,157
	4	6,1385	130,324	[188,713;223,528]	4,494
	5	6,864	147,730	[196,389;224,933]	5,912
<b>Desgaste Dagger</b>	1	4,3125	104,140	[95,640;122,793]	1,101
	2	4,4605	109,354	[111,149;129,57]	0,878



**Anexo O.**

**Áreas de dano obtidas pela análise *scan* e raio-X.**

10A BZT03	Scan	Raio-X
Área de dano	6,233	23,536
	6,194	62,776
	8,641	27,826
	10,031	25,466
	5,800	37,996
Média	7,379	35,520
Fator de dano Fd	1,128	1,524
	1,174	2,219
	1,206	1,525
	1,283	1,509
	1,082	1,822
Média	1,174	1,720
Fator de área delaminada Fda	1,220	1,832
	1,219	3,220
	1,306	1,984
	1,355	1,901
	1,205	2,344
Média	1,261	2,256
Fator de Davim Fdaj	1,245	2,026
	1,292	3,749
	1,373	2,120
	1,482	2,051
	1,188	2,689
Média	1,316	2,527

10ABZT01	Scan	Raio-X
Área de dano	10,896	20,226
	7,737	18,066
	11,301	17,716
	15,194	14,586
	11,435	20,046
Média	11,313	18,128
Fator de dano Fd	1,316	1,407
	1,227	1,404
	1,214	1,353
	1,202	1,235
	1,285	1,358
Média	1,249	1,351
Fator de área delaminada Fda	1,385	1,715
	1,274	1,639
	1,400	1,627
	1,537	1,516
	1,404	1,709
Média	1,400	1,641
Fator de Davim Fdaj	1,535	1,825
	1,378	1,777
	1,433	1,713
	1,496	1,519
	1,513	1,766
Média	1,471	1,720

10AHelicoidal	Scan	Raio-X
Área de dano	4,407	26,186
	5,209	18,616
	5,509	22,266
	5,160	21,776
	5,647	23,186
Média	5,186	22,406
Fator de dano Fd	1,143	1,509
	1,121	1,373
	1,133	1,472
	1,167	1,432
	1,136	1,479
Média	1,140	1,453
Fator de área delaminada Fda	1,156	1,926
	1,184	1,658
	1,195	1,787
	1,182	1,770
	1,200	1,820
Média	1,183	1,792
Fator de Davim Fdaj	1,303	2,066
	1,218	1,754
	1,237	1,941
	1,265	1,886
	1,242	1,968
Média	1,253	1,923

10A Dagger	Scan	Raio-X
Área de dano	-	-
	24,326	3,245
	20,206	5,742
	20,366	5,878
	19,996	12,587
Média	21,223	6,863
Fator de dano Fd	-	-
	1,623	1,099167
	1,353	1,163833
	1,367	1,139167
	1,351	1,308
Média	1,423	1,178
Fator de área delaminada Fda	-	-
	1,860	1,115
	1,715	1,203
	1,720	1,208
	1,707	1,445
Média	1,751	1,243
Fator de Davim Fdaj	-	-
	2,156	1,159
	1,763	1,273
	1,783	1,250
	1,757	1,560
Média	1,865	1,311

10C Dagger P1	Scan	Raio-X
Área de dano	3,016	30,666
	4,797	39,386
	4,646	41,216
	5,236	29,056
	4,961	25,096
Média	4,531	33,084
Fator de dano Fd	1,102	1,566
	1,187	1,650
	1,205	1,717
	1,171	1,508
	1,219	1,396
Média	1,177	1,567
Fator de área delaminada Fda	1,107	2,085
	1,170	2,393
	1,164	2,458
	1,185	2,028
	1,175	1,888
Média	1,160	2,170
Fator de Davim Fdaj	1,158	2,228
	1,279	2,517
	1,295	2,638
	1,270	2,126
	1,315	1,913
Média	1,264	2,284

10C Dagger P2	Scan	Raio-X
Área de dano	3,123	34,186
	3,620	32,246
	4,951	32,986
	6,081	32,066
	4,833	32,686
Média	4,521	32,834
Fator de dano Fd	1,144	1,583
	1,175	1,598
	1,194	1,569
	1,251	1,563
	1,199	1,569
Média	1,192	1,576
Fator de área delaminada Fda	1,110	2,209
	1,128	2,140
	1,175	2,167
	1,215	2,134
	1,171	2,156
Média	1,160	2,161
Fator de Davim Fdaj	1,203	2,324
	1,244	2,300
	1,289	2,282
	1,370	2,255
	1,292	2,275
Média	1,280	2,287

10C Dagger P3	Scan	Raio-X
Área de dano	3,375	35,366
	4,023	32,366
	5,343	22,766
	4,040	30,926
	5,930	32,876
Média	4,542	30,860
Fator de dano Fd	1,098	1,617
	1,286	1,581
	1,228	1,422
	1,140	1,596
	1,263	1,561
Média	1,203	1,555
Fator de área delaminada Fda	1,119	2,251
	1,142	2,145
	1,189	1,805
	1,143	2,094
	1,210	2,163
Média	1,161	2,091
Fator de Davim Fdaj	1,160	2,390
	1,366	2,282
	1,332	1,894
	1,216	2,268
	1,380	2,270
Média	1,291	2,221

10C Dagger P4	Scan	Raio-X
Área de dano	2,670	33,406
	5,776	32,266
	4,576	31,206
	7,342	33,706
	8,938	32,496
Média	5,860	32,616
Fator de dano Fd	1,181	1,539
	1,201	1,599
	1,198	1,578
	1,334	1,596
	1,343	1,595
Média	1,251	1,581
Fator de área delaminada Fda	1,094	2,181
	1,204	2,141
	1,162	2,104
	1,260	2,192
	1,316	2,149
Média	1,207	2,154
Fator de Davim Fdaj	1,232	2,255
	1,313	2,301
	1,286	2,253
	1,482	2,328
	1,524	2,301
Média	1,367	2,288

20A BZT03	Scan	Raio-X
Área de dano	7,438	18,426
	5,272	21,886
	5,412	12,266
	6,697	28,236
	4,380	26,646
Média	5,839	21,492
Fator de dano Fd	1,177	1,333
	1,145	1,403
	1,115	1,236
	1,235	1,486
	1,062	1,449
Média	1,147	1,381
Fator de área delaminada Fda	1,263	1,652
	1,186	1,774
	1,191	1,434
	1,237	1,999
	1,155	1,942
Média	1,207	1,760
Fator de Davim Fdaj	1,319	1,705
	1,245	1,855
	1,216	1,476
	1,366	2,083
	1,142	2,006
Média	1,257	1,825

30A BZT03	Scan	Raio-X
Área de dano	16,464	7,686
	17,274	10,676
	15,802	16,566
	15,307	11,596
	22,266	9,816
	Média	17,423
Fator de dano Fd	1,250	1,138
	1,313	1,176
	1,232	1,363
	1,210	1,192
	1,384	1,186
	Média	1,278
Fator de área delaminada Fda	1,582	1,272
	1,611	1,378
	1,559	1,586
	1,541	1,410
	1,787	1,347
	Média	1,616
Fator de Davim Fdaj	1,573	1,283
	1,660	1,380
	1,541	1,700
	1,506	1,415
	1,841	1,374
	Média	1,624

10M BZT03	Scan	Raio-X
Área de dano	10,299	10,126
	10,307	7,926
	17,900	63,866
	16,343	27,166
	14,418	26,566
	Média	13,853
Fator de dano Fd	1,289	1,176
	1,242	1,140
	1,922	2,163
	1,461	1,638
	1,375	1,809
	Média	1,458
Fator de área delaminada Fda	1,364	1,358
	1,365	1,280
	1,633	3,259
	1,578	1,961
	1,510	1,940
	Média	1,490
Fator de Davim Fdaj	1,494	1,369
	1,444	1,289
	2,338	3,708
	1,804	2,235
	1,670	2,414
	Média	1,750

10M Dagger	Scan	Raio-X
Área de dano	11,893	7,076
	9,912	11,256
	10,226	8,236
	8,916	9,576
	8,777	16,906
	Média	9,944
Fator de dano Fd	1,430	1,137
	1,246	1,215
	1,279	1,159
	1,253	1,302
	1,262	1,443
	Média	1,294
Fator de área delaminada Fda	1,421	1,250
	1,351	1,398
	1,362	1,291
	1,315	1,339
	1,310	1,598
	Média	1,352
Fator de Davim Fdaj	1,678	1,270
	1,440	1,433
	1,482	1,315
	1,429	1,493
	1,435	1,797
	Média	1,493