

Estudo de Delaminação em Compósitos de Matriz Polimérica

Oscar Nicolau Gomes Andrade

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica
Ramo: Materiais e Tecnologias de Fabrico

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



18 de novembro de 2013

Relatório da Unidade Curricular de Dissertação do 2º ano do Mestrado em Engenharia
Mecânica - Materiais e Tecnologias de Fabrico

Candidato: Oscar Nicolau Gomes Andrade, N° 1110977, 1110977@isep.ipp.pt

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

Mestrado em Engenharia Mecânica
Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



18 de novembro de 2013

Em memória do meu pai e em homenagem à minha mãe.

Agradecimentos

Quero aproveitar este tópico para deixar os meus sinceros agradecimentos à minha família pelo apoio moral e suporte durante todo o curso, assim como durante a realização deste trabalho e por me terem possibilitado chegar até aqui.

Ao meu orientador, Professor Luís Durão, pelas sugestões, pela atenção e disponibilidade mostrada sempre durante a realização deste trabalho, pelo apoio na realização dos ensaios e pela partilha de conhecimento sem os quais não seria possível a realização deste trabalho, gostaria de deixar aqui um muito obrigado.

Um obrigado especial é também dirigido ao colega Jorge Marques pelo projeto do dispositivo de ensaio *pin-bearing*, pelo apoio na realização dos ensaios e pela disponibilidade na discussão de alguns pontos do trabalho.

Agradeço também, ao Laboratório de Ensaios Mecânicos, na pessoa da Engenheira Fátima Andrade, e pela disponibilidade e apoio na realização dos ensaios mecânicos, às Oficinas Mecânicas, na pessoa do Eng. Victor Moreira, e pelo apoio na maquinagem dos furos e ao Professor Arnaldo Pinto pela disponibilidade e ajuda nas colagens dos *tabs* para os ensaios de tração.

Por fim, quero agradecer também a todos aqueles não referenciados atrás e que de forma direta ou indireta também apoiaram ou tornaram mais fácil a realização deste trabalho.

Resumo

A aplicação do material compósito é neste momento bastante vasta, graças à combinação das suas características específicas, tais como, maior resistência específica e módulos específicos e melhor resistência à fadiga, quando comparados com os metais convencionais. Tais características, quando requeridas, tornam este material ideal para aplicações estruturais. Esta caminhada de sucesso iniciou desde muito cedo, quando o material compósito já era utilizado para fabrico de armas pelos mongóis e na construção civil pelos hebreus e egípcios, contudo, só a partir dos meados do século XX é que despertou interesses para aplicações mais modernas. Atualmente os materiais compósitos são utilizados em equipamentos domésticos, componentes elétricos e eletrónicos, passando por materiais desportivos, pela indústria automóvel e construção civil, até indústrias de grande exigência e visibilidade tecnológica como a aeronáutica, espacial e de defesa.

Apesar das boas características apresentadas pelos materiais compósitos, no entanto, estes materiais têm tendência a perderem as suas propriedades quando submetidas a algumas operações de acabamento como a furação. A furação surge da necessidade de ligação de peças de um mesmo mecanismo. Os furos obtidos por este processo devem ser precisos e sem danos para garantir ligações de alta resistência e também precisas.

A furação nos materiais compósitos é bastante complexa devido à sua heterogeneidade, anisotropia, sensibilidade ao calor e pelo facto de os reforços serem extremamente abrasivos. A operação de furação pode causar grandes danos na peça, como a delaminação a entrada, defeitos de circularidade do furo, danos de origem térmica e a delaminação à saída que se apresenta como o mais frequente e indesejável.

Com base nesses pressupostos é que este trabalho foi desenvolvido de forma a tentar obter processos simples para determinação e previsão de danos em polímeros reforçados com fibras (de carbono neste caso) de forma a precavê-los. De forma a conseguir estes objetivos, foram realizados ensaios de início de delaminação segundo a proposta de Lachaud et al. e ensaios de pin-bearing segundo a proposta de Khashaba et al. Foram também examinadas extensões de danos de acordo com o modelo de Fator de delaminação ajustado apresentado por Davim et al.

A partir dos ensaios, de pin-bearing, realizados foram analisadas influências do material e geometria da broca, do avanço utilizado na furação e de diferentes orientações de empilhamentos de placas na delaminação de laminados compósitos e ainda a influências dessas variáveis na força de rutura por pin-bearing.

As principais conclusões tiradas daqui são que a delaminação aumenta com o aumento do avanço, o que já era esperado, as brocas em carboneto de tungstênio são as mais recomendadas para a furação do material em causa e que a delaminação é superior para a placa *cross-ply* quando comparada com placas unidirecionais.

Para a situação de ensaios de início de delaminação foram analisadas as influências da variação da espessura não cortada por baixo da broca/punção, de diferentes geometrias de brocas, da alteração de velocidade de ensaio e diferentes orientações de empilhamentos de placas na força de início de delaminação.

Deste ensaio as principais conclusões são que a força de início de delaminação aumenta com o aumento da espessura não cortada e a influência da velocidade de ensaio altera com a variação das orientações de empilhamento.

Palavras-Chave

Início de delaminação; Furação; Laminados compósitos; Pin-bearing; Força de início de delaminação.

Abstract

The use of the composite materials in the present day are very large due to the combination of their specific properties, like higher specific strength and modulus, and improved fatigue strength when compared with conventional metals. These characteristics, when required make this an ideal material for structural applications. This journey of success began very early, when the composite material was already used for the manufacture of weapons by the Mongols and building construction by the Hebrews and Egyptians. Mid-twentieth century, there became a vast interest in modern applications such as, composites used in household appliances, electrical and electronic components, sporting goods. Also, in the automobile industry, civil construction and in large industrial requirement and visibility technology, such as aeronautics, aerospace and defense.

When composite materials are headed to the finishing stages, like drilling, they lose their properties. This operation arises from the need to link parts of the same mechanism. The holes produced by this process must be accurate and without damage to guarantee high strength and accurate bonds. Drilling composite material is very complex, due to their heterogeneity, anisotropy, heat sensitivity, and the fact that the reinforcements are extremely abrasive. The drilling operation can cause major damage to the piece, delamination at drill entry, geometric defects, temperature-related damages, and delamination at drill exit that presents itself as the most frequent and undesirable.

This work was carried based on these assumptions in order to try to establish simple processes to predict and detect damage in fiber reinforced polymers (carbon in this study) in order to be avoided. To achieve these goals, tests were performed to obtain the onset delamination as proposed by Lachaud et al. and tests were performed with pin-bearing model were also performed as proposed by Khashaba et al. To characterize the level of damage on the work material the adjusted delamination factor presented by Davim et al. was applied.

With the pin-bearing tests analyzed, influences of the material and geometry of the drill showed, the feed-rate used on the drilling process and the effect of the stacking sequences in the delamination of composite laminates and also the influence of these variables on the bearing failure load.

Test revealed that the delamination increases with the increases of the feed-rate, which was expected. The tungsten carbide drill bits are the highly recommended for drilling the Carbon Fiber Reinforced Polymers and that the delamination is superior to the plate cross-ply compared with unidirectional plies.

The onset delamination tests were examined. The influences of the variation in the uncut thickness beneath the punch (drill) of different drill bit geometries, the variations of speed test, and effect of the stacking sequences of plies on the delamination onset load were analyzed.

In this case, the conclusions of this test are: when the uncut thickness increases and the delamination onset load also increase; the influence of the test speed changes with the variation of stacking sequences plies.

Keywords

Onset delamination; Drilling; Composite laminates; Pin-bearing; Delamination onset load.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract.....	iv
Índice	vii
Índice de Figuras	x
Índice de Tabelas	xiii
Lista de Símbolos	xv
Lista de Abreviaturas.....	xvii
Capítulo 1 Enquadramento	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Guia de leitura.....	3
Capítulo 2 Materiais compósitos - generalidades	4
2.1 Introdução	4
2.2 Constituintes do material compósito.....	7
2.2.1 Reforço - fase dispersa.....	7
2.2.2 Matriz - fase contínua	8
2.3 Classificação dos compósitos	9
2.4 Processamento de materiais compósitos.....	12
2.4.1 Moldação manual.....	12
2.4.2 Moldação por compressão a quente.....	13
2.4.3 Moldação em autoclave	13
Capítulo 3 Processo de corte – furação.....	14
3.1 Introdução	14
3.2 Cinemática do processo de furação.....	14
3.3 Maquinagem não convencional	17
Capítulo 4 Furação de materiais compósitos – análise de danos.....	18

4.1	Introdução	18
4.2	Furação em materiais compósitos	18
4.3	Delaminação induzida pela furação	20
4.4	Avaliação da delaminação	22
4.5	Efeito das diferentes variáveis na delaminação	23
Capítulo 5 Trabalho experimental		27
5.1	Introdução	27
5.2	Descrição dos ensaios experimentais	28
5.2.1	Ensaio <i>pin-bearing</i>	28
5.2.2	Ensaio de início de delaminação	30
5.3	Materiais utilizados	33
5.4	Preparação de provetes	34
5.4.1	Ensaio de caracterização dos compósitos	34
5.4.2	Ensaio <i>pin-bearing</i>	35
5.4.3	Ensaio de início de delaminação	36
5.5	Resultados experimentais	38
5.5.1	Ensaio de caracterização dos compósitos	38
5.5.1.1	Ensaio de tração	38
5.5.1.2	Ensaio de flexão	39
5.5.2	Ensaio <i>pin-bearing</i>	40
5.5.2.1	Placa unidirecional	41
5.5.2.2	Placa <i>cross-ply</i>	46
5.5.2.3	Comparação das placas	52
5.5.3	Ensaio de início de delaminação	52
5.5.3.1	Placa unidirecional	53
5.5.3.2	Placa <i>cross-ply</i>	55
5.5.3.3	Placa quasi-isotrópica	57
5.5.3.4	Comparação das placas	59
Capítulo 6 Conclusões e recomendações para trabalhos futuros		63
6.1	Introdução	63
6.2	Ensaio <i>pin-bearing</i>	63
6.3	Ensaio de início de delaminação	64

Capítulo 7 Referências	66
Anexo A Código CNC para execução de furos	74
Anexo B Procedimentos para ensaio <i>pin-bearing</i>	76
Anexo B.1 Descrição do procedimento	76
Anexo B.2 Desenho do dispositivo de fixação para ensaio <i>pin-bearing</i>	80
Anexo C Procedimentos para ensaio de início de delaminação	83
Anexo C.1 Descrição do procedimento	83
Anexo C.2 Dispositivo de fixação para ensaio de início de delaminação	87
Anexo D Dados do pré-impregnado TEXIPREG® HS160REM	90
Anexo D.1 Data Sheet do pré-impregnado	90
Anexo D.2 Ordem de fabrico do pré-impregnado	92
Anexo E Resultados dos ensaios de <i>pin-bearing</i>	93
Anexo E.1 Resultados para as placas unidirecionais.....	93
Anexo E.2 Resultados para as placas <i>cross-ply</i>	95
Anexo F Resultados dos ensaios de esmagamento	97

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Modelo experimental de furacão [6,7]	2
Figura 2.1 – Exemplo de aplicações de materiais compósitos em vários setores industriais [16].	5
Figura 2.2 – Exemplo de aplicação de materiais compósitos na aviação civil: a) Boeing 787 [19]; b) Airbus A380 [20].	6
Figura 2.3 - Uso de materiais compósitos na aeronave EMB 170 [21].....	6
Figura 2.4 – Os tipos de matrizes dos materiais compósitos [24].....	8
Figura 2.5 – Classificação dos compósitos segundo à natureza do seu reforço [24].....	10
Figura 2.6 – Desenho esquemático de um laminado produzido com várias orientações camadas [26]	11
Figura 3.1 – Esquemática da operação de furação [28].....	15
Figura 3.2 – Tipos de furos: a) passante e b) cego [28]	15
Figura 3.3 – Gráfico de conversão de velocidades de corte e de rotação em função do diâmetro da broca [29].....	16
Figura 4.1 - Principais aspetos a ter em conta para a furação de PRF's (Tradução: [64] de [58])	20
Figura 4.2 - Delaminação durante o processo de furação numa placa em PRFC [63]: a) à entrada e b) à saída	21
Figura 4.3 – Imagens SEM da delaminação induzida pela furação em placas em PRFC: a) pela entrada da broca [10]; b) pela saída da broca [10] e c) imagem superficial [73]	21
Figura 4.4 – Representação esquemática da delaminação com várias geometrias de broca [27]	25
Figura 4.5 – Operação de furação com e sem placas de apoio [27]	26
Figura 5.1 – Curva força-deslocamento resultante do ensaio <i>pin-bearing</i> de acordo com Khashaba [10].....	28
Figura 5.2 – Imagem SEM, da rugosidade superficial na zona de contacto indentedor/provete [10]	29
Figura 5.3 – Brocas utilizadas nos ensaios de <i>pin-bearing</i> : a) Broca Helicoidal; b) Broca <i>Brad</i> ; c) broca Bidiametral.....	30
Figura 5.4 – Desenho ilustrativo do provete, onde se pode observar a espessura não cortada, h (Adaptado de [7]).....	31
Figura 5.5 – Resultados experimentais e analíticos obtidos por Lachaud et al. [6].....	31
Figura 5.6 – Broca <i>Dagger</i>	32
Figura 5.7 - Configuração de provete para ensaio <i>pin-bearing</i>	35
Figura 5.8 – Sistema de ensaio de ensaio <i>pin-bearing</i>	36
Figura 5.9 - Configuração de provete para ensaio de início de delaminação	37
Figura 5.10 – Sistema de ensaio de início de delaminação	37

Figura 5.11 – Curva força-deslocamento resultante do ensaio de <i>pin-bearing</i>	40
Figura 5.12 – Evolução do Fator de delaminação ajustado (Fda) com o avanço para todas as brocas testadas na placa unidirecional.....	41
Figura 5.13 – Força de rutura dos ensaios de <i>pin-bearing</i> para a placa unidirecional e para as brocas: a) Helicoidal (HSS); b) Helicoidal (WC); c) Brad (WC); d) Bidiametral (WC).....	43
Figura 5.14 – Tensão de rutura dos ensaios de <i>pin-bearing</i> para a placa unidirecional e para as brocas: a) Helicoidal (HSS); b) Helicoidal (WC); c) Brad (WC); d) Bidiametral (WC).....	44
Figura 5.15 – Comparação das forças de rutura e de esmagamento entre as brocas para a placa unidirecional e para os avanços: a) 0,03 mm/rot b) 0,08 mm/rot; c) 0,19 mm/rot ..	45
Figura 5.16 – Evolução do Fator de delaminação ajustado (Fda) com o avanço para todas as brocas testadas na placa cross-ply	47
Figura 5.17 – Força de rutura dos ensaios de <i>pin-bearing</i> para a placa <i>cross-ply</i> e para as brocas: a) Helicoidal (HSS); b) Helicoidal (WC); c) Brad (WC); d) Bidiametral (WC).....	48
Figura 5.18 – Tensão de rutura dos ensaios de <i>pin-bearing</i> para a placa <i>cross-ply</i> e para as brocas: a) Helicoidal (HSS); b) Helicoidal (WC); c) Brad (WC); d) Bidiametral (WC).....	49
Figura 5.19 – Comparação das forças de rutura e de esmagamento entre as brocas para a placa <i>cross-ply</i> e para os avanços: a) 0,03 mm/rot b) 0,08 mm/rot; c) 0,19 mm/rot	51
Figura 5.20 – Curva força-deslocamento resultante do ensaio de início de delaminação	52
Figura 5.21 – Comparação dos valores da força de início de delaminação para as diferentes velocidades de ensaio para cada espessura não cortada.....	53
Figura 5.22 – Curva da evolução da força de início de delaminação numa placa <i>cross-ply</i> em função da espessura não cortada (Broca: Helicoidal; $v = 1$ mm/min)	55
Figura 5.23 – Comparação dos valores da força de início de delaminação na placa <i>cross-ply</i> para as diferentes geometrias de broca e para cada espessura não cortada ($v = 6$ mm/min)	56
Figura 5.24 – Curva da evolução da força de início de delaminação numa placa quasi-isotrópica em função da espessura não cortada (Broca: Bidiametral; $v = 3$ mm/min)	58
Figura 5.25 – Comparação dos valores da força de início de delaminação na placa quasi-isotrópica para as diferentes geometrias de broca, para cada espessura não cortada e para $v = 6$ mm/min.....	58
Figura 5.26 – Comparação dos valores da força de início de delaminação entre as diferentes configurações de placas para cada velocidade de ensaio (Broca: Helicoidal)	60
Figura 5.27 – Comparação dos valores da força de início de delaminação entre as diferentes configurações de placas para cada espessura não cortada (Broca: Helicoidal)	61
Figura 5.28 – Comparação dos valores da força de início de delaminação entre as placas cross-ply e quasi-isotrópicas para as diferentes geometrias de broca.....	62
Figura B.1 – Desenho exemplificativo do provete para ensaios <i>pin-bearing</i>	77
Figura B.2 – Sistema de ensaio <i>pin-bearing</i> montado	79

Figura B.3 – Base para o dispositivo de ensaio pin-bearing	80
Figura B.4 - Peça de aperto com ligação à base	81
Figura B.5 - Peça de aperto sem ligação à base	82
Figura C.1 – Exemplo de configuração de provete com 7 furos para ensaio de início de delaminação	84
Figura C.2 - Desenho técnico do provete de exemplo para ensaio de início de delaminação	84
Figura C.3 – Calcador Destaco modelo 2002-U (Fornecedor: Destaco).....	87
Figura C.4 - Base para o dispositivo de ensaio de início de delaminação.....	88
Figura C.5 – Dispositivo de suporte da broca para ensaio de início de delaminação	89

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades de algumas fibras utilizadas como reforços em compósitos de elevado desempenho mecânico [12].....	7
Tabela 2.2 – Propriedades de resinas termoendurecíveis [12]	9
Tabela 2.3 - Comparação de pré-impregnados com matriz termoplástica e termoendurecível [25]	11
Tabela 5.1 – Detalhe das variáveis utilizadas no ensaio de início de delaminação	32
Tabela 5.2 – Propriedades do pré-impregnado HS160REM após cura (Fonte: SEAL - Anexo D)	33
Tabela 5.3 – Sequência de empilhamento, espessura e número de camadas das placas utilizadas no ensaio de início de delaminação	34
Tabela 5.4 – Dimensões dos provetes utilizados nos ensaios de tração e flexão	34
Tabela 5.5 – Dimensões dos provetes utilizados nos ensaios <i>pin-bearing</i>	35
Tabela 5.6 – Parâmetros de corte para execução dos furos para o ensaio de início de delaminação	36
Tabela 5.7 – Propriedades obtidas do ensaio de tração para placas unidirecionais	38
Tabela 5.8 – Propriedades obtidas do ensaio de tração para placas <i>cross-ply</i>	38
Tabela 5.9 – Propriedades obtidas do ensaio de tração para placas quasi-isotrópicas	39
Tabela 5.10 – Propriedades obtidas do ensaio de flexão para placas unidirecionais.....	39
Tabela 5.11 – Valores médios do Fator de delaminação ajustado (F_{da}) para cada broca e para a placa unidirecional	42
Tabela 5.12 – Valores médios do Fator de delaminação ajustado (F_{da}) para os diferentes avanços e para a placa unidirecional.....	42
Tabela 5.13 – Valores médios da força de rutura e da tensão de rutura para a placa unidirecional e para os diferentes avanços de furação	44
Tabela 5.14 – Valores médios do Fator de delaminação ajustado (F_{da}) para cada broca e para a placa <i>cross-ply</i>	47
Tabela 5.15 – Valores médios do Fator de delaminação ajustado (F_{da}) para os diferentes avanços e para a placa <i>cross-ply</i>	48
Tabela 5.16 – Valores médios da força de rutura e da tensão de rutura para a placa <i>cross-ply</i> e para os diferentes avanços de furação	50
Tabela 5.17 – Média ilustrativa da evolução da força de início de delaminação com o aumento da velocidade de ensaio para a placa unidirecional	54
Tabela 5.18 – Evolução da força de início de delaminação para a velocidade de ensaio 3 mm /min.....	54
Tabela 5.19 – Média ilustrativa da evolução da força de início de delaminação com o aumento da espessura não cortada para a placa unidirecional.....	55

Tabela 5.20 – Resultados do ensaio de início de delaminação para diferentes brocas na placa <i>cross-ply</i> (h: 0,45; v = 3 mm/min).....	56
Tabela 5.21 – Média ilustrativa da evolução da força de início de delaminação com o aumento da velocidade de ensaio para a placa <i>cross-ply</i>	57
Tabela 5.22 – Média ilustrativa da evolução da força de início de delaminação com o aumento da velocidade de ensaio para a placa quasi-isotrópica.....	59
Tabela E.1 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para placas unidirecionais furadas com a broca Helicoidal em aço rápido.....	93
Tabela E.2 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para as placas unidirecionais furadas com a broca Helicoidal em carbeto de tungstênio.....	93
Tabela E.3 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para as placas unidirecionais furadas com a broca Brad em carbeto de tungstênio	93
Tabela E.4 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para as placas unidirecionais furadas com a broca Bidiametral em carbeto de tungstênio	94
Tabela E.5 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para as placas unidirecionais furadas com o avanço de 0,03 mm/rot.....	94
Tabela E.6 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para as placas unidirecionais furadas com o avanço de 0,08 mm/rot.....	94
Tabela E.7 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para as placas unidirecionais furadas com o avanço de 0,19 mm/rot.....	94
Tabela E.8 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para placas <i>cross-ply</i> furadas com a broca Helicoidal em aço rápido	95
Tabela E.9 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para placas <i>cross-ply</i> furadas com a broca Helicoidal em carboneto de tungstênio	95
Tabela E.10 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para as placas <i>cross-ply</i> furadas com a broca Brad em carbeto de tungstênio	95
Tabela E.11 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para as placas <i>cross-ply</i> furadas com a broca Bidiametral em carbeto de tungstênio	95
Tabela E.12 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para as placas <i>cross-ply</i> furadas com o avanço de 0,03 mm/rot.....	96
Tabela E.13 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para as placas <i>cross-ply</i> furadas com o avanço de 0,08 mm/rot.....	96
Tabela E.14 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para as placas <i>cross-ply</i> furadas com o avanço de 0,19 mm/rot.....	96
Tabela F.1 – Resultados dos ensaios de esmagamento para as placas unidirecionais furadas com o avanço de 0,03 mm/rot.....	97
Tabela F.2 – Resultados dos ensaios de esmagamento para as placas unidirecionais furadas com o avanço de 0,08 mm/rot.....	97
Tabela F.3 – Resultados dos ensaios de esmagamento para as placas unidirecionais furadas com o avanço de 0,19 mm/rot.....	97

Lista de Símbolos

A_{AVG}	Área nominal do furo
A_{max}	Área máxima
A_0	Área nominal
D	Diâmetro / Diâmetro nominal
D_{MAR}	Área delaminada
D_{max}	Diâmetro máximo
D_{RAT}	Rácio de Dano
E	Módulo de elasticidade
E_1	Módulo de elasticidade longitudinal
E_2	Módulo de elasticidade transversal
E_f	Módulo de flexão
ε_u	Extensão na rotura
f	Velocidade do avanço
F_d	Fator de delaminação
F_{da}	Fator de delaminação ajustado
F_{id}	Força início da delaminação
f_r	Taxa de avanço
F_z / F_{CT}	Força crítica
G_{Ic}	Taxa crítica de libertação de energia em modo I
h	Espessura não cortada
N ou n	Velocidade de rotação
T_c	Temperatura crítica

v	Velocidade de ensaio
V_c	Velocidade de corte
ν_{12}	Coefficiente de Poisson
σ ou σ_u	Resistência à tração
σ_{uf}	Resistência à flexão
σ_{ut1}	Resistência à tração longitudinal

Lista de Abreviaturas

CNC	Controlo numérico computadorizado
DGEBA	Diglicidil éter de bisfenol A
DGEBF	Diglicidil éter de bisfenol F
HDT	Temperatura de deflexão pelo calor (Heat deflection temperature)
HSS	Aço rápido (High-speed steel)
PAN	Poliacrilonitrilo
PEEK	Poli-éter-éter-cetona
PRF	Polímero Reforçado com Fibras
PRFC	Polímero Reforçado com Fibras de Carbono
PRFV	Polímero Reforçado com Fibras de Vidro
SEM	Microscopia eletrónica de varrimento (Scanning Electron Microscope)
WC	Carboneto de tungsténio (Tungsten carbide)

Capítulo 1

Enquadramento

Apresenta-se aqui uma breve introdução do trabalho, dando ênfase aos aspetos que justificam a sua realização, desde a motivação do autor aos principais objetivos que foram traçados. Descreve-se também o conteúdo da presente dissertação que serve como guia de leitura.

1.1 Introdução

A aplicação do material compósito é neste momento bastante vasta, graças à combinação das suas características específicas. Aliás, os materiais compósitos possuem várias propriedades bastante desejáveis na engenharia, tais como, maior resistência específica e módulos específicos e melhor resistência à fadiga, quando comparados com os metais convencionais [1]. Contudo, estes materiais têm tendência a perder as suas propriedades quando submetidos à maquinagem. A furação é um dos processos de maquinagem mais importantes e utilizados na fase de acabamento das peças [2]. Ela é um processo normalmente aplicada nessa fase para permitir a montagem dos vários componentes de uma estrutura final, por isso qualquer defeito por ela induzido pode implicar a rejeição, o que muitas vezes tem grande impacto no seu custo final [2–4].

Kassapoglou [5] num projeto de fuselagem de helicópteros com baixo peso e/ou baixo custo mostrou que as operações de furação representam cerca de 8,3 % do custo final do componente entre as várias operações aplicadas no seu fabrico.

Os danos causados pela furação, e em particular, a delaminação, nos laminados compósitos têm sido bases de estudos de vários autores nos últimos anos tendo em conta o impacto que esta tem na qualidade da peça final, quando submetida a este processo.

Lachaud e Piquet em trabalhos em conjunto com outros autores [6,7] apresentaram uma proposta interessante para realização de ensaio de início de delaminação em laminados compósitos que foi também referenciada por Durão na sua tese de doutoramento [8] e Durão et al. em [9]. Esta proposta, aqui designada por proposta de Lachaud et al. [6] supõe que a força máxima que se atinge durante o ensaio é a força responsável pela delaminação e utiliza o modelo experimental apresentado na

Figura 1.1. Os mecanismos de delaminação e a descrição do modelo experimental serão apresentados mais adiante.

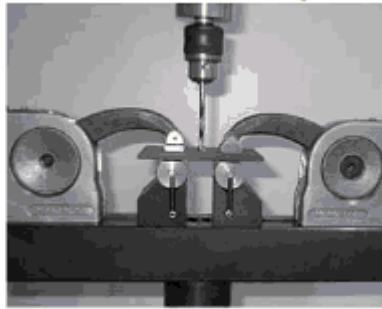


Figura 1.1 - Modelo experimental de furacão [6,7]

É com base nessa proposta e na importância do material compósito em aplicações industriais nos dias de hoje é que este trabalho é desenvolvido. A outra parte do trabalho assenta em determinação de forças com ensaio de *pin-bearing* à compressão de acordo com Khashaba et al. [10] como continuação de um estudo iniciado por Chita [11].

1.2 Objetivos

Os objetivos principais deste trabalho foram previamente caracterizados pela pequena introdução atrás feita. Portanto, este estudo tem como principal propósito a definição de um método de análise simples que pode servir para a obtenção de parâmetros que podem servir como base para um processo de furacão em laminados compósitos em polímero reforçado com fibras [PRF] de forma a minimizar eventuais danos que possam surgir desse processo, apesar de que neste trabalho o estudo limitou-se a laminados compósitos em polímero reforçado com fibras de carbono [PRFC].

É desta forma que os objetivos específicos foram definidos e estão diretamente relacionados com os ensaios realizados. Os objetivos específicos podem ser subdivididos em:

- Determinação de força de início de delaminação em laminados compósitos de acordo com a proposta de Lachaud et al. [6];
- Determinação de força de rutura em laminados compósitos pelo ensaio de *pin-bearing* à compressão de acordo com Khashaba et al. [10] e comparar esses resultados com os obtidos à tração (nos ensaios de esmagamento) por Chita [11];

- Definir dispositivos e procedimentos para a realização dos diferentes ensaios que servirão também para trabalhos futuros;
- Comparação da força de início de delaminação para diferentes valores das variáveis como: espessuras não cortadas das placas, geometria de broca, velocidades de ensaio e tipos de configurações de placas;
- Correlação dos resultados obtidos com resultados apresentados em publicações científicas.

1.3 Guia de leitura

A presente dissertação está organizada em 5 capítulos distintos, mais o capítulo de referências e uma área reservada para os anexos utilizados.

Capítulos 1, Enquadramento, apresentam-se uma breve introdução do trabalho, dando ênfase a aspetos que justificam a sua realização, desde a motivação do autor aos principais objetivos que foram traçados. Descreve-se também o conteúdo da presente dissertação que serve como guia de leitura.

Capítulo 2, Materiais compósitos – generalidades, mostram-se algumas considerações e generalidades sobre os materiais compósitos, com especial atenção aos compósitos de matriz polimérica. Apresentam-se os principais constituintes dos compósitos, os principais processos de fabrico, as propriedades e principais aplicações.

Capítulo 3, Processo de corte – furação, descrevem-se os processos de corte importantes para os materiais compósitos, assim como as ferramentas que normalmente são utilizadas. A atenção recai especialmente sobre os mecanismos de furação.

Capítulo 4, Furação de materiais compósitos, fazem-se algumas observações sobre a investigação e desenvolvimento no âmbito da furação em materiais compósitos. Mostram-se também, o impacto que o processo de furação tem nestes materiais (danos de furação), com especial atenção à delaminação.

Capítulo 5, Trabalho experimental, apresenta-se a parte experimental deste trabalho, descrevendo os materiais e os métodos utilizados, os parâmetros utilizados nos ensaios, assim como os resultados obtidos. Faz-se também uma análise crítica desses resultados.

Capítulo 6, Conclusões e recomendações para trabalhos futuros, descrevem-se de modo geral as principais conclusões deste trabalho e são apresentadas recomendações para trabalhos futuros sobre o tema aqui tratado.

Capítulo 2

Materiais compósitos - generalidades

Mostram-se algumas considerações e generalidades sobre os materiais compósitos, com especial atenção aos compósitos de matriz polimérica. Apresentam-se os principais constituintes dos compósitos, os principais processos de fabrico, as propriedades e principais aplicações.

2.1 Introdução

Os materiais compósitos iniciaram a sua caminhada de sucesso em meados do século XX e daí em diante a sua expressão industrial não mais parou de crescer [12]. Esta caminhada de sucesso foi conseguida principalmente graças à combinação das suas características específicas, como elevada a rigidez e o baixo peso. Estas características tornam estes materiais ideais em aplicações estruturais em que são desejadas elevadas rigidez e resistência mecânica, tornando-os num dos grupos de materiais mais interessantes, atualmente.

Um material diz-se compósito quando resulta da combinação de dois ou mais materiais distintos que diferem na forma e composição à escala macroscópica [13]. Os constituintes conservam as suas identidades, ou seja, não se dissolvem ou fundem completamente entre si, no entanto atuam como um único, podendo esses constituintes serem fisicamente identificados, assim como o interface entre eles.

Existem registos de exemplos de utilização de compósitos pelo Homem, desde muito cedo, apesar desses aparentarem ser um grupo de material bastante moderno. Os mongóis, por exemplo, fizeram ainda no século XIII, arcos em materiais compósitos, a partir de combinações de madeira, tendões de animais, seda e adesivos [14]. Mesmo antes disso, os egípcios e os hebreus também já tinham utilizado tijolos feitos de argila com palhas secas, para aumentar a sua durabilidade [11,12].

Atualmente a aplicação dos compósitos é vasta e vai desde a sua utilização em equipamentos domésticos, componentes elétricos e eletrónicos, passando por materiais desportivos, pela indústria automóvel e construção civil, até indústrias de grande exigência e visibilidade tecnológica como a aeronáutica, espacial e de defesa. Alguns exemplos de aplicações de materiais compósitos nos vários setores industriais aqui

apresentados são ilustrados na Figura 2.1: a) Capô do Alfa Romeo & Coupé GTV fabricado com resina poliéster reforçada com fibra de vidro; b) cablagens em fibra ótica; c) Ponte com perfis pultrudidos de plástico reforçado com fibra de vidro; d) placa de circuito impresso de uma resina epóxido com fibra de vidro; e) aparelhos sanitários em compósitos; f) exemplo de aplicação de compósitos em desporto náutico e lazer - Jet-Ski.

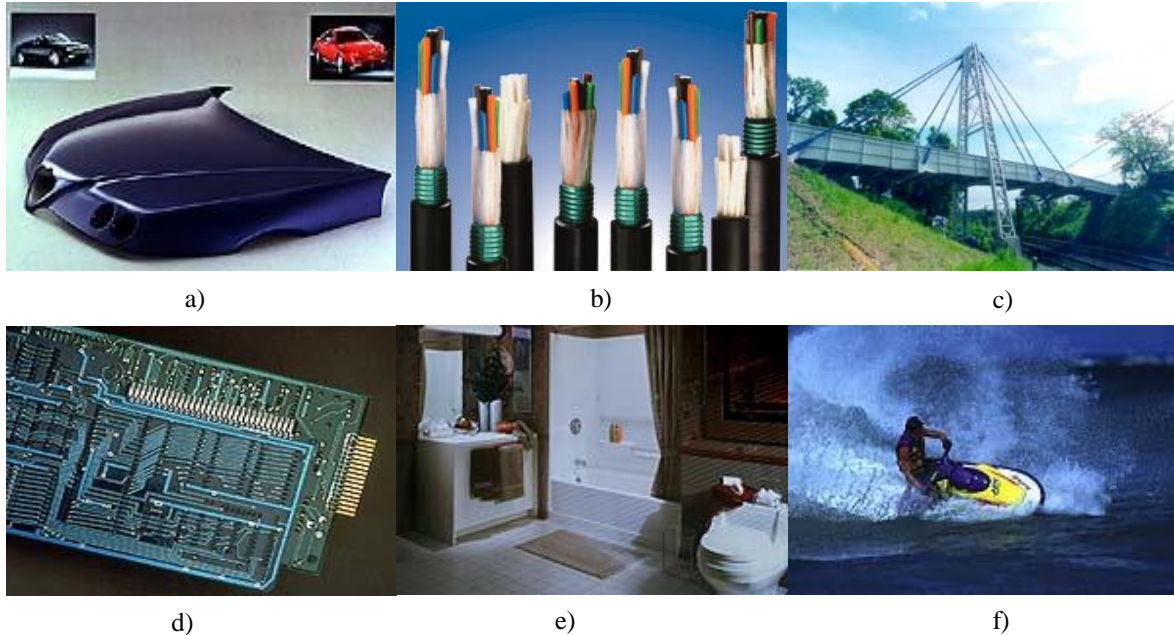


Figura 2.1 – Exemplo de aplicações de materiais compósitos em vários setores industriais [16]

Outros exemplos de aplicação de materiais compósitos podem ser encontrados na aviação civil. O Boeing 787 (Figura 2.2 a)) e o Airbus A380 (Figura 2.2 b)) são exemplos, cujos projetos estruturais incluem muitos componentes críticos feitos a partir de tais materiais como referenciam os sítios de internet [17,18]. O novo Boeing 787 Dreamliner, incorpora materiais compósitos avançados com 50% a menos de peso. Os materiais compósitos representam 25% do peso estrutural do Airbus A380.



Figura 2.2 – Exemplo de aplicação de materiais compósitos na aviação civil:
 a) Boeing 787 [19]; b) Airbus A380 [20].

O uso de materiais compósitos na indústria aeronáutica é ainda ilustrado detalhadamente na Figura 2.3 servindo a aeronave BEM 170 como exemplo.

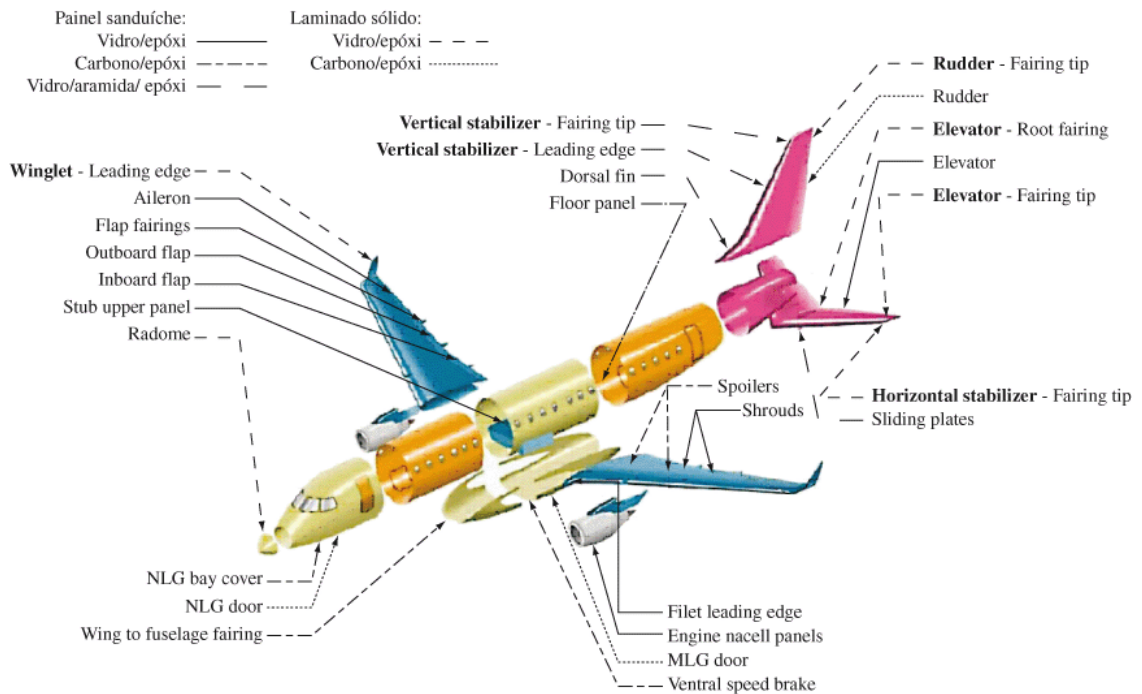


Figura 2.3 - Uso de materiais compósitos na aeronave EMB 170 [21]

2.2 Constituintes do material compósito

Os materiais compósitos são, então, combinações de dois ou mais materiais distintos, conservando uma interface clara entre eles. Estes materiais são, de um modo geral, constituídos por uma fase contínua, denominada por matriz, que é a responsável pela coesão do material, e por uma fase dispersa, denominada por reforço, que é constituída por fibras contínuas ou descontínuas ou partículas, que é responsável pelas suas elevadas resistências [2,19]. No entanto, as propriedades dos materiais compósitos dependem, quer da natureza dos materiais utilizados, quer do grau de ligação entre eles, através da interface. Aumentar o volume do reforço pode levar a um aumento de resistência mecânica e da dureza, porém se esse volume for muito elevado, poderá não haver espaço suficiente para a matriz comprometendo as propriedades finais do compósito. Da mesma forma, a geometria de cada reforço individualmente e a sua distribuição na matriz podem afetar a performance do material compósito [22].

2.2.1 Reforço - fase dispersa

A fase dispersa do compósito estrutural é geralmente constituída por fibras. As fibras apresentam-se sob a forma de finos filamentos agrupados, que confere elevada resistência mecânica aos compósitos. Alguns exemplos de fibras são: as fibras de vidro, as fibras de carbono e as de aramida. Algumas propriedades de fibras de vidro, de carbono e de aramida são apresentadas na Tabela 2.1. Estas são as fibras mais utilizadas em compósitos estruturais.

Tabela 2.1 – Propriedades de algumas fibras utilizadas como reforços em compósitos de elevado desempenho mecânico [12]

Propriedades	Fibras de Vidro		Fibras de Carbono		Fibras de Aramida	
	Vidro E	Vidro S	PAN	Alcatrão "Pitch"	Kevlar® 29	Kevlar® 49
Densidade (g/cm ³)	2,6	2,49	1,8	2,0	1,44	1,45
Módulo de Elasticidade (GPa)	73,0	85,5	200-400	300-700	60	129
Tensão de rotura (MPa)	3400	4580	2480-5600	1900-2200	3000	3000
Deformação na rotura	4,4	5,3	0,6-1,2	1-1,5	3,6	1,9
Coefficiente de expansão térmica axial (10 ⁻⁶ /°C)	5,0	2,9	-0,7 a -0,5	-1,6 a -0,9	-2,0	-2,0

2.2.2 Matriz - fase contínua

A matriz é a fase contínua de um compósito e desta forma funciona como aglomerante. Esta permite a transmissão de carga para as fibras e confere a conformabilidade necessária a um material estrutural.

Uma matriz pode ser polimérica, cerâmica ou metálica, conforme ilustrado na Figura 2.4. As matrizes poliméricas mais usadas são sobretudo de dois tipos: os termoendurecíveis e os termoplásticos, porém os termoplásticos não são aqui estudados. As matrizes poliméricas, de forma geral, devem a sua grande aplicação fundamentalmente à baixa densidade e à facilidade de processamento [23].

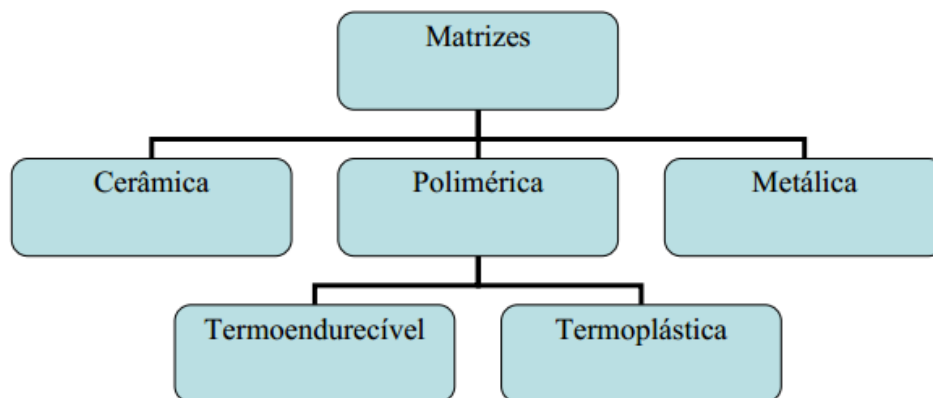


Figura 2.4 – Os tipos de matrizes dos materiais compósitos [24]

Como exemplos de matrizes termoplásticas têm-se as poliamidas, o polipropileno e os policarbonatos. No entanto, as resinas termoendurecíveis são muito mais utilizadas como matrizes de laminados compósitos, sobretudo as resinas de poliéster e de epóxido, estas últimas de melhores características [23].

A Tabela 2.2 apresenta algumas propriedades de algumas matrizes termoendurecíveis.

Tabela 2.2 – Propriedades de resinas termoendurecíveis [12]

Resina		HDT (°C)	E (GPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u (%)
Poliéster	Ortoftálica	66	3,6	55	2,0
	Ortoftálica	95	3,3	70	3,5
	Isoftálica	93	4,1	65	2,5
	Isoftálica	125	3,7	55	1,5
Fenólica	Ressol	250	2,0	32	1,8
Vinilester	Bisfenol A	102	3,5	82	6,0
	Novolac	150	3,5	68	3,5
Epóxidas DGEBA	Tc = 20°C	62	3,2	62	2,0
	Tc=120°C	121	3,0	90	8,0
Epóxida DGEBF	Tc=120°C	110	4,1	125	5,0

2.3 Classificação dos compósitos

Classificam-se os diversos tipos de materiais compósitos quanto à natureza do seu reforço, matriz ou ainda quanto ao processo de fabrico.

Quanto a forma da matriz, os materiais compósitos podem ser classificados, em: compósitos de matriz polimérica, compósitos de matriz cerâmica ou mineral e compósitos de matriz metálica. Esta classificação segue a mesma lógica da Figura 2.4 apresentada na secção anterior, na página 8.

Os compósitos de matriz polimérica, são os constituídos por matrizes termoendurecíveis, termoplásticas ou até elastoméricas e reforçados por fibras minerais, orgânicas ou metálicas. Estes constituem uma classe de compósitos particularmente interessante e que tem encontrado inúmeras aplicações no mercado.

Os de matriz mineral são os mais adequados para temperaturas elevadas e podem ser reforçados fibras metálicas como boro, por partículas metálicas ou minerais [8].

Por fim, os compósitos de matriz metálica são os constituídos por matrizes de ligas metálicas ultraleves, alumínio, magnésio ou titânio. Os seus reforços podem ser constituídos por fibras de carbono ou carboneto de silício ou fibras metálicas, por exemplo [8].

Quanto à natureza dos seus reforços, os compósitos são normalmente classificados mais concretamente de acordo com a configuração desses reforços. Estes podem ser subdivididos entre os reforçados por fibra e os que são reforçados por partículas e dependendo do número de camadas para o primeiro caso e da orientação das partículas para ao segundo caso, existem mais subdivisões possíveis de acordo com a Figura 2.5.

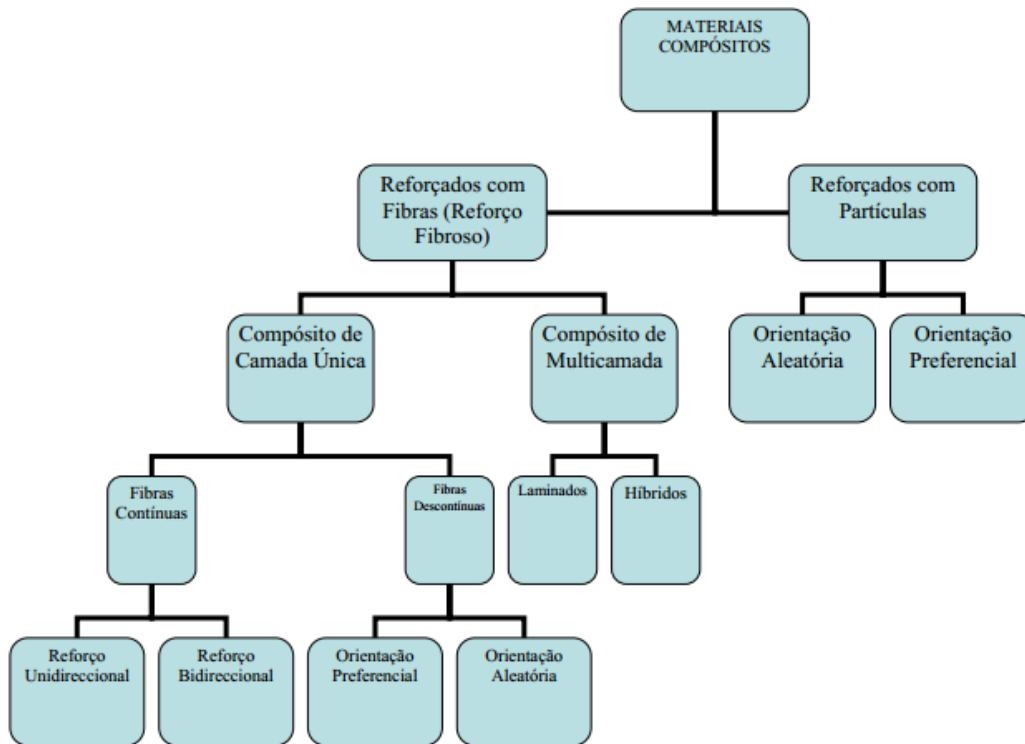


Figura 2.5 – Classificação dos compósitos segundo à natureza do seu reforço [24]

Para além dessas classificações, existem ainda os subprodutos, que são pré-combinações de fibras e matriz que são posteriormente processados para obtenção da peça fina em compósito [12]. Neste caso, convém destacar os pré-impregnados que são os de maior interesse para este trabalho.

Os pré-impregnados constituem misturas de fibra e resina para posterior consolidação, geralmente através da moldação em autoclave [12]. Estes podem ser de base termoendurecível ou de base termoplástica. Silva [25], no seu trabalho de doutoramento apresentou a Tabela 2.3 que compara, de forma qualitativa, as propriedades de transformação mais relevantes de dois pré-impregnados. Sendo um de matriz termoplástica (Fibras de carbono com PEEK) e o outro termoendurecível (Fibras de carbono com epóxido) e tendo verificado que embora as condições de armazenamento sejam mais desfavoráveis para o pré-impregnado de matriz termoendurecível, torna-se bastante mais difícil transformar o seu congénere de matriz termoplástica por este apresentar viscosidade muito mais elevada e um fluxo de resina mais baixo.

Tabela 2.3 - Comparação de pré-impregnados com matriz termoplástica e termoendurecível [25]

Propriedade	Fibras de carbono com PEEK (termoplástico)	Fibras de carbono com epóxido (termoendurecível)
Viscosidade	Muito elevada	Baixa elevada
Fluxo de resina	Baixo	Elevado
Teor de solventes residuais	Baixo	Baixo elevado
Manuseamento	Muito rígido	Flexível a mole
Flexibilidade (sem aquecimento)	Má	Boa
Condições de armazenamento	Sem condições particulares	Arca frigorífica
Armazenagem	Sem limitações	Limitada

Para qualquer um dos casos de pré-impregnados os reforços podem ser à base de fibras de carbono, vidro ou aramida na forma de fibras contínuas e unidirecionais ou tecidos. No caso dos pré-impregnados termoendurecíveis, que são os de aplicação mais generalizada, o sistema de resina mais comum é o epóxido.

Para este trabalho importam-se os compósitos de matriz polimérica com múltiplas camadas como é o caso dos laminados compósitos obtidos a partir de pré-impregnados. Os laminados compósitos são constituídos por várias camadas orientadas de forma específica de acordo com o resultado que se pretende [22]. Um laminado pode ter todas as camadas com fibras orientadas na mesma direção ou podem ter várias orientações diferentes. A orientação das fibras/camadas depende das propriedades mecânicas que se pretende em cada uma das direções do laminado. A Figura 2.6 apresenta um desenho esquemático de um laminado com várias orientações de camadas.

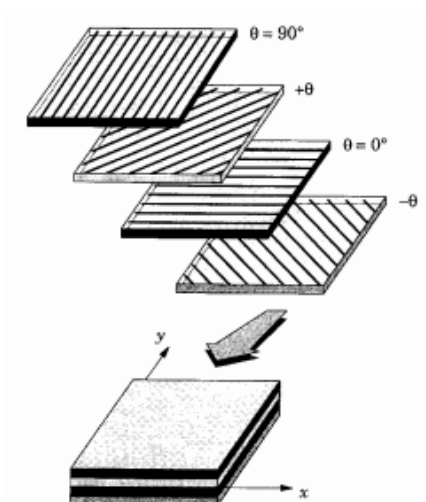


Figura 2.6 – Desenho esquemático de um laminado produzido com várias orientações camadas [26]

2.4 Processamento de materiais compósitos

Existe atualmente um leque vasto de técnicas de fabrico de peças em materiais compósitos de matriz polimérica. Estes materiais permitem uma grande flexibilidade na conceção, facto que constitui uma vantagem importante sobre os materiais tradicionais [12].

O processamento constitui um dos fatores preponderantes e com grande influência nas propriedades finais de uma peça em compósito. É nesta fase que se consegue também garantir a reprodutibilidade do produto a produzir.

Neste ponto vão se referenciar três métodos de produção de materiais compósitos que podem ser aplicados a resinas termoendurecíveis, apesar de existirem vários outros. E são eles, a moldação manual, a moldação por compressão a quente e a moldação em autoclave. A maquinagem é outro processo de fabrico muito utilizado na produção de peças em materiais compósitos e será revisto no capítulo seguinte, com especial ênfase ao processo e furação.

2.4.1 Moldação manual

Este é um dos processos mais simples para o processamento de compósitos e possivelmente um dos mais económicos e mais comum. O custo de investimento inicial e a simplicidade aparecem na verdade como sendo das principais vantagens deste processo a par das poucas restrições à geometria. A moldação manual está incluída no grupo de processos de moldação por contacto em que a moldação se dá sobre uma superfície de um molde e o empilhamento e a impregnação de sucessivas camadas de reforços é feito manualmente em molde aberto. Geralmente é necessário fazer a rebarbagem e acabamento final, que é na verdade uma das desvantagens deste processo. Outras desvantagens são a dependência da habilidade do operário, teor de fibra heterogéneo e emissão de gases voláteis. Por causa desta última exige-se que a moldação seja realizada em locais de boa ventilação.

2.4.2 Moldação por compressão a quente

A moldação por compressão permite obter peças aplicadas nas carrocerias de automóveis, ou outros componentes estruturais para a indústria automóvel, equipamentos elétricos e eletrônicos entre outros. Este método consiste em comprimir reforços, normalmente em fibra de vidro sobre os quais se deposita posteriormente a resina líquida. O processamento é feito em molde fechado.

Na sua versão a quente da moldação a quente, os moldes são pré-aquecidos a temperatura entre 80°C e 170°C e as pressões desenvolvidas na compressão podem variar entre 0,5 e 15 MPa, o que requer a utilização de moldes metálicos [12].

2.4.3 Moldação em autoclave

O processo de moldação em autoclave consiste em consolidar um componente pré-formado através de aplicação simultânea de temperatura, pressão e vácuo. Os ciclos destas variáveis dependem do material a moldar, porém implicam quase sempre uma subida gradual, estágio a valores constantes e diminuição também gradual, estando frequentemente desfasados. Numa primeira fase, procura-se baixar a viscosidade da resina para eliminação de voláteis e promover o fluxo de resina, de modo a garantir teores e fibras elevados e homogêneos. Caso não sejam usados pré-impregnados, a boa impregnação do reforço será também um objetivo fundamental. A aplicação de vácuo no molde é sempre decisiva. A etapa seguinte é a cura e consolidação do componente, na qual a pressão desempenha o papel mais relevante [12].

Este processo de moldação é frequentemente utilizado na produção de laminados.

Os laminados compósitos, por exemplo, que já foram referenciados na secção anterior são obtidos normalmente em três fases de processamento distintas. A primeira consiste na obtenção do pré-impregnado, sendo o tempo de vida útil para efeitos de armazenamento é assegurado por inibidores. Numa segunda fase cortam-se do pré-impregnado as camadas que vão constituir o laminado, sendo para tal empilhadas num molde adequado. No final procede-se à conformação e consolidação. Conforme visto anteriormente o processo mais utilizado é a moldação por autoclave visto ser o processo que garante a melhor qualidade, possibilitando o fabrico de peças de grandes dimensões e de forma complexa [12,23].

Capítulo 3

Processo de corte – furação

Descrevem-se os processos de corte importantes para os materiais compósitos, assim como as ferramentas que normalmente são utilizadas. A atenção recai especialmente sobre os mecanismos de furação.

3.1 Introdução

As técnicas de maquinagem convencionais, tais como o torneamento, fresagem e furação são aplicadas aos materiais compósitos, por causa da disponibilidade dos equipamentos, mas também por causa da experiência já existente com esses métodos [2]. Para além destas ainda são aplicadas outras técnicas de corte, tais como o corte com serra, o corte com jato de água e corte com laser [12].

A operação de maquinagem é amplamente influenciada pelas propriedades mecânicas e térmicas da matriz e reforço, pela percentagem, tipo e orientação do reforço. A influência da orientação do reforço é analisada na parte experimental deste trabalho e os resultados serão apresentados e discutidos no Capítulo 5, a influência da maquinagem nos materiais compósitos são analisadas ainda antes, no Capítulo 4, porém neste capítulo são apresentados os principais mecanismos de corte em compósitos.

3.2 Cinemática do processo de furação

A furação, Figura 3.1, é uma das operações de maquinagem mais importante e amplamente utilizada na indústria. Apesar de já existirem vários métodos de furação em laminados compósitos bastante modernos, tais como furação à laser, furação por jato de água ou furação por descarga elétrica, técnicas tradicionais de furação com brocas convencionais ou especiais continuam a ser as mais utilizadas [27]. O processo tradicional é utilizado para a abertura de furos por arranque de aparas em peças por intermédio de brocas, que são ferramentas cilíndricas com duas ou mais arestas cortantes. Ainda na Figura 3.1 é possível identificar que a operação é conseguida por intermédio de dois movimentos simultâneos da broca. Existe o movimento de rotação,

identificado na figura por v que é o movimento de corte. É com este movimento que as arestas de corte da broca atuam para remover o material “em excesso” para a abertura do furo. O outro movimento é o responsável pelo avanço ou penetração axial da ferramenta de corte à peça. Este é designado por movimento de avanço e aparece identificado na Figura 3.1 com um f .

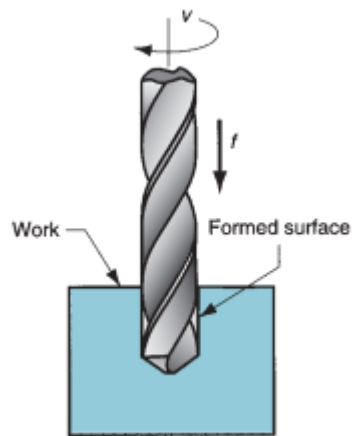


Figura 3.1 – Esquemática da operação de furação [28]

A Figura 3.2 apresenta dois tipos de furos que podem ser obtidos desta operação.

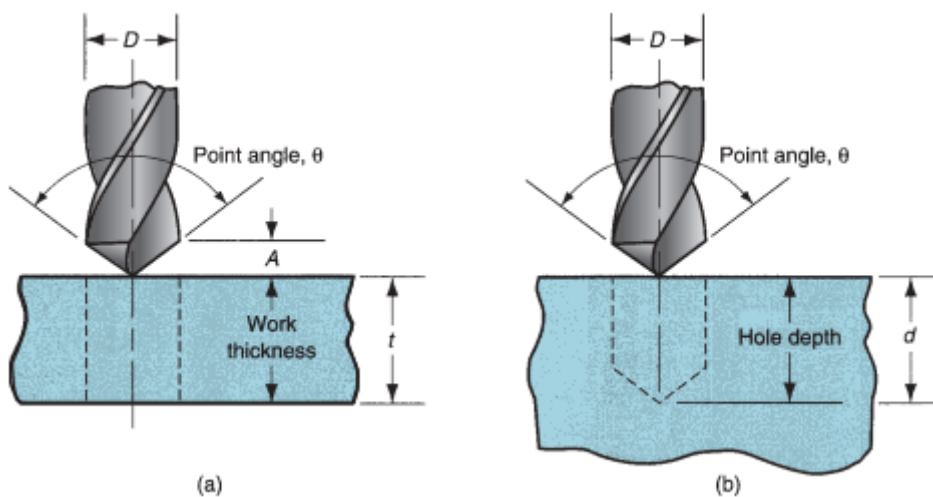


Figura 3.2 – Tipos de furos: a) passante e b) cego [28]

O movimento de corte é avaliado pela velocidade de corte que é definida por sua vez pela velocidade atingida pela superfície externa da broca. Esta velocidade é assim definida, visto que, no eixo da broca ela é praticamente nula e pode ser obtida pela

expressão da velocidade de rotação dessa ferramenta. A velocidade de rotação da broca, N , que é a mais usual de se empregar numa operação de furação é dada pela equação 3.1, em rpm (rotações por minuto).

$$N = \frac{V_c}{\pi \cdot D} \quad 3.1$$

onde V_c é a velocidade de corte em mm/min e D o diâmetro da broca em mm. Esta equação é também aplicada às situações em que broca mantém-se estática e o movimento de rotação é feito pela própria peça.

Pode-se facilmente obter de forma gráfica a velocidade de rotação desejada a partir da velocidade de corte de tal como ilustra a Figura 3.3.

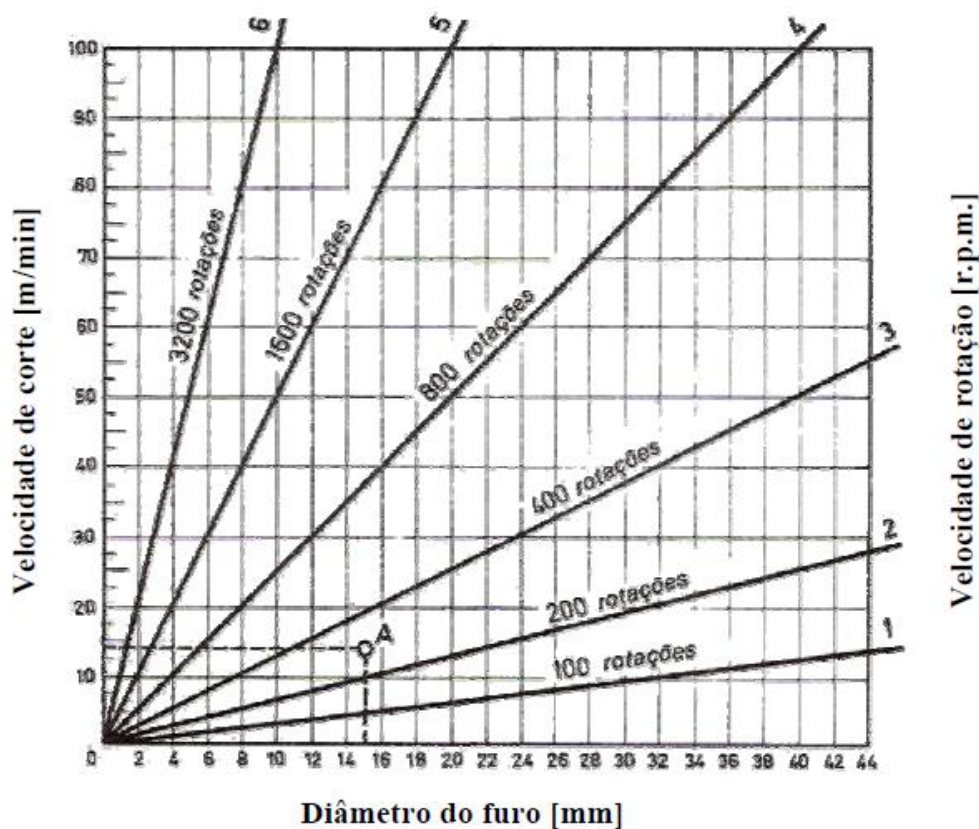


Figura 3.3 – Gráfico de conversão de velocidades de corte e de rotação em função do diâmetro da broca [29]

O movimento de avanço axial da broca pode ser definido pelo parâmetro f , designado de avanço e expresso em mm/rotação (mm/rot) que corresponde ao deslocamento longitudinal da ferramenta relativa á peça por cada rotação do veio principal da máquina de furação O avanço pode ser facilmente convertido em taxa de

avanço, f_r , expresso em mm/min pela equação 3.2, visto que, as ferramentas de corte apresentam normalmente duas arestas de corte.

$$f_r = N \cdot f \quad 3.2$$

O avanço é proporcional ao diâmetro da broca, mas também depende do material a furar. Avanços elevados são recomendados para brocas com diâmetros superiores, assim como os avanços mais baixos são para as brocas de diâmetros inferiores.

3.3 Maquinagem não convencional

Os métodos de maquinagem não convencionais têm despertado interesse ultimamente para aplicação em materiais compósitos. O facto destes materiais serem difíceis de maquinar, por causa das suas propriedades peculiares fomenta o desenvolvimento de técnicas alternativas. Algumas dessas técnicas, como a maquinagem à laser e por descarga elétrica mostraram ser eficazes [30], contudo, esta última não se aplica ao tipo de compósito aqui em estudo.

O processo de furação à laser tem sido estudado por vários autores também. Lau et al. [31] estudaram ainda em 1990 efeitos de maquinagem à laser em materiais compósitos. Desde então muitos são os autores que direcionaram os seus estudos nesta área de maquinagem de compósitos com objetivos diversos [32–35].

Lau et al. fizeram no trabalho [30] uma análise sistemática sobre a eficiência de tanto para a aplicação da maquinagem à laser e por descarga elétrica assim como a profundidade máxima obtida para o primeiro caso assim como a análise de defeitos impostos por estes processos nos materiais compósitos. A maquinagem por descarga elétrica é uma outra técnica não convencional também aplicada aos materiais compósitos e tem sido tema de estudo de alguns investigadores [36,37].

Outra técnica que tem sido aplicada na maquinagem de compósitos é a maquinagem por jato de água. Esta também tem sido bastante estudada por alguns instigadores, tanto na área da delaminação [38] assim como com outros propósitos [39,40].

Capítulo 4

Furação de materiais compósitos – análise de danos

Fazem-se algumas considerações sobre a investigação e desenvolvimento no âmbito da furação em materiais compósitos. Mostra-se também, o impacto que o processo de furação tem nestes materiais (danos de furação), com especial atenção à delaminação.

4.1 Introdução

As peças em materiais compósitos de matriz polimérica são produzidas em forma “quase-final”, por isso, as operações de maquinagem são, normalmente, introduzidas na fase de acabamento. A operação de furação trata-se de um dos processos mais aplicado na maquinagem de materiais compósitos devido à necessidade de ligação de peças de um mesmo mecanismo, ou seja, ligação mecânica entre os diversos componentes, por intermédio de parafuso ou rebite. As peças têm que ser furadas com precisão e sem danos, para que se possa garantir ligações também precisas e de alta resistência [27,41,42].

4.2 Furação em materiais compósitos

A furação nos materiais compósitos é bastante complexa devido à sua heterogeneidade, anisotropia, sensibilidade ao calor e pelo facto de os reforços serem extremamente abrasivos, por isso, trazem, por vezes, algumas complicações [43–46], com impacto direto na qualidade dos furos produzidos. Muitos estudos foram desenvolvidos a nível de análise de qualidade dos furos laminados compósitos em várias vertentes. Quanto ao acabamento do furo, Arola e Ramula [47], por exemplo, determinaram que heterogeneidade entre a matriz e o reforço conduz a uma superfície mais rugosa, que a superfície obtida em materiais metálicos. Hocheng e Puw [48] e Ogawa et al. [49] verificaram que os parâmetros processuais como velocidades de corte

elevadas e baixos avanços conduzem a um mau acabamento de superfície na parede do furo.

Outros autores [50–52] verificaram a influência da orientação das fibras relativamente à direção de corte na formação de aparas e na rugosidade do furo. Koplev et al. [50] num estudo sobre o processo de corte em PRFC e Wang et al. [51] num estudo sobre mecanismos de corte em laminado Grafite/Epóxido em laminados multidirecionais com ferramentas de diamante policristalino, verificaram o mesmo efeito na produção de aparas. Estas apresentam-se sempre descontínuas e sem grandes deformações plásticas. No primeiro trabalho foi verificado que a maquinagem paralela às fibras resulta em superfícies mais lisas que à perpendicular às fibras. Wang e Zhang [52] verificaram também que a orientação das fibras tem um grande impacto nas forças desenvolvidas durante o processo de corte.

A operação pode causar grandes danos na peça, conforme já foi visto anteriormente. Dos diversos tipos de dano que se podem resultar da furação de laminados de matriz polimérica, o mais frequente e indesejável é a delaminação à saída, que se torna evidente através da existência de material da última ou últimas camadas separado das restantes camadas do laminado, degradando assim o desempenho da peça [1,53–55]. Outros modos de dano que podem ocorrer em consequência da furação são o delaminação à entrada, defeitos de circularidade do furo ou ainda os danos de origem térmica devidos ao sobreaquecimento da matriz [6,53,56,57].

Abrão et al. [58] defendem que, de forma a ultrapassar estas dificuldades de furação, é necessário desenvolver procedimentos para seleccionar os parâmetros de corte apropriados de forma a evitar colapso prematuro das estruturas em serviço. Estudo e desenvolvimento de procedimentos de furação que diminuam defeitos de furação têm sido, na verdade, objetivos de vários investigadores na área dos compósitos [6,10,41,45,53,59–63]. A Figura 4.1 exhibe os principais fatores a considerar para uma operação de furação adequada em polímeros reforçados com fibras de acordo com Abrão et al. [58].

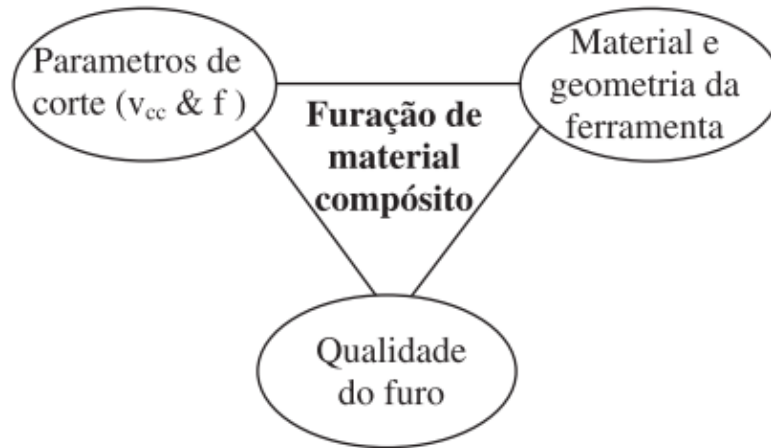


Figura 4.1 - Principais aspetos a ter em conta para a furação de PRF's (Tradução: [64] de [58])

Analisando a figura é possível verificar que a escolha correta dos parâmetros processuais (velocidade de corte e avanço) e da ferramenta de corte (geometria e material) são fulcrais para a garantia de qualidade dos furos e performance da peça.

Abrate e Walton [46] também sugerem que técnicas de maquinagem tradicionais, tais como a furação, podem ser aplicadas com a geometria da ferramenta e condições de operação apropriados.

Na verdade, diversas são as origens dos danos. Desgaste excessivo da ferramenta, por exemplo, conduz ao arrancamento de fibras e delaminação na peça [65–68]. Por outro lado, diversos autores [65,66,69–71] identificaram que forças axiais elevadas na furação de compósitos podem ser prejudiciais.

Caprino e Tagliaferri [72] estudaram a furação de compósito de poliéster reforçado com fibras de vidro com brocas de aço rápido. Eles concluíram que o avanço é o principal parâmetro responsável pela intensidade e natureza dos danos causados à peça.

4.3 Delaminação induzida pela furação

A delaminação é definida como a separação de camadas adjacentes do laminado e representa um tipo de dano em que a propagação está confinada a um plano [53]. Nesta definição cabem dois tipos de delaminação que podem ocorrer durante a operação de furação: a delaminação à entrada e a delaminação à saída, Figura 4.2 a) e b), respetivamente [2,53,60].

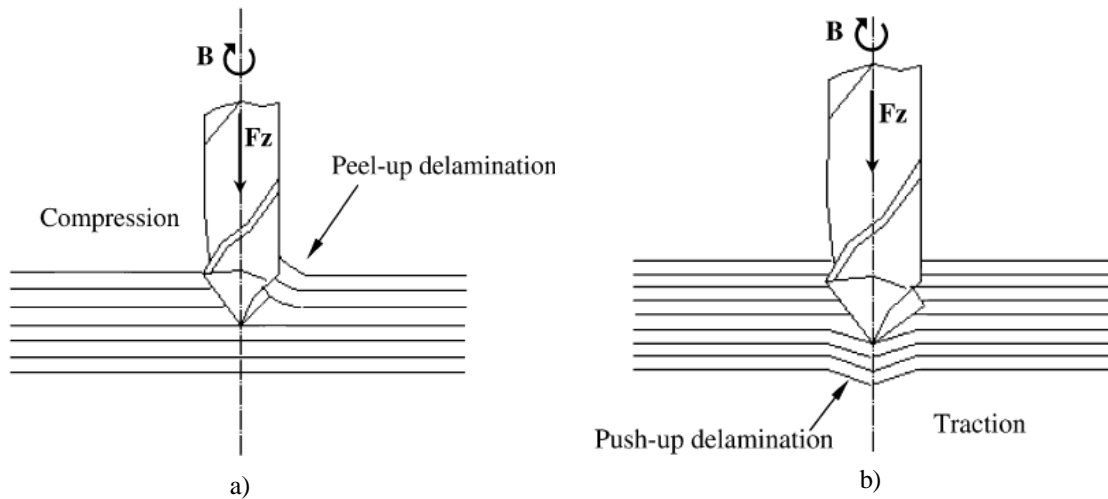


Figura 4.2 - Delaminação durante o processo de furação numa placa em PRFC [63]:
a) à entrada e b) à saída

Na Figura 4.3 são apresentadas algumas imagens SEM (microscopia eletrônica de varrimento) do efeito da delaminação induzida pela furação. As imagens a) e b) foram apresentadas por Khashaba et al. [10] e ilustram a delaminação interna num laminado compósito em PRFC. Cada figura é acompanhada pelo perfil de rugosidade superficial para melhor compreensão. A imagem c) exibe a extensão da delaminação superficial também numa placa PRFC.

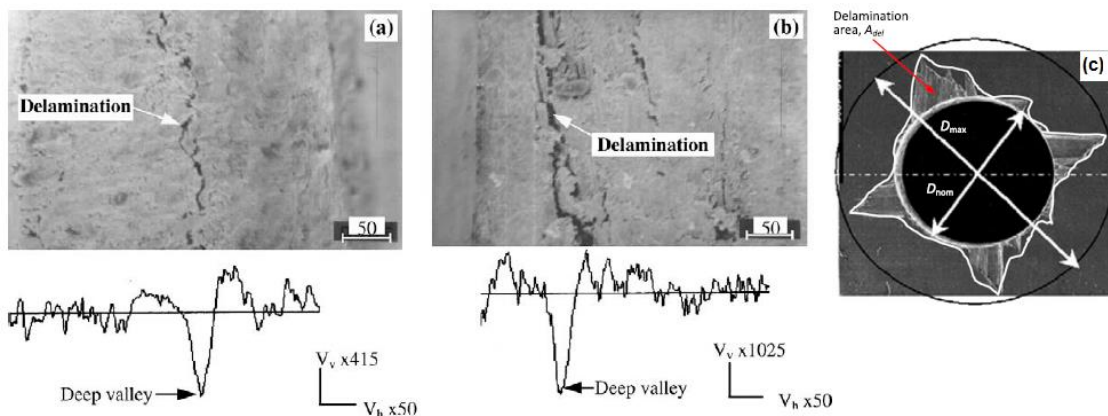


Figura 4.3 – Imagens SEM da delaminação induzida pela furação em placas em PRFC: a) pela entrada da broca [10]; b) pela saída da broca [10] e c) imagem superficial [73]

A delaminação, para além de reduzir o rendimento da peça, reduz também drasticamente a tolerância de montagem [1,54,55,74]. Para analisar a extensão do dano em materiais compósitos existem atualmente alguns mecanismos amplamente divulgados.

4.4 Avaliação da delaminação

Após execução da furação, recorrem-se, por vezes, a métodos de análise de imagens processadas digitalmente para analisar a extensão da delaminação e obter diâmetros da maior diagonal de delaminação ou da área do dano [75–77]. Gao e Kim [78] já tinham alertado que a inspeção visual apresenta algumas desvantagens associadas a dificuldade de medição do perfil do dano e da sua profundidade.

Portanto, os dados de diâmetros obtidos, pelas técnicas de análise digital de imagens podem ser utilizados para a obtenção de um valor concreto da extensão do dano, aplicando o critério do Fator de Delaminação (F_d) definido por Chen [79].

$$F_d = \frac{D_{max}}{D} \quad 4.1$$

Este fator que se encontra definido na equação 4.1, é a razão entre o diâmetro máximo (D_{max}) da área delaminada (área do círculo maior da Figura 4.3 c), apresentada anteriormente) e o diâmetro nominal (D) do furo (círculo interior da figura). Porém, este fator unidirecional apresenta algumas limitações, visto que não consegue definir a extensão da delaminação para além da orla circular a volta do furo [80], por isso outros critérios foram apresentados.

Um critério bidimensional baseado na área delaminada foi apresentado por Mehta et al. [81] e conhecido como Rácio de Dano (D_{RAT}) é definido pela razão entre a área delaminada (D_{MAR}) e a área nominal do furo (A_{AVG}) de acordo com a equação 4.4.

$$D_{RAT} = \frac{D_{MAR}}{A_{AVG}} \quad 4.2$$

O Fator de Delaminação Ajustado (F_{da}), foi apresentado por Davim et al. [82], também alternativa melhorada do Fator de Delaminação da equação 4.1 e é definida pela 4.3,

$$F_{da} = \alpha \frac{D_{max}}{D} + \beta \frac{A_{max}}{A_0} \quad 4.3$$

onde, A_{max} representa a área máxima relativa ao diâmetro máximo da área delaminada (D_{max}) e A_0 a área relacionada com o diâmetro nominal do furo (D). Os parâmetros α e β são usados para definir o peso de cada parcela dessa equação.

4.5 Efeito das diferentes variáveis na delaminação

Neste ponto é analisado o impacto das diferentes variáveis de entrada e da força axial num processo de furação em compósitos na delaminação. As variáveis são: taxa avanço, velocidade de corte e ferramenta de corte. A maioria dos autores identificam delaminação num processo de furação aumenta com a taxa de avanço para qualquer velocidade de corte e para diferentes tipos e broca [4,83–88]. Eles justificam este fenómeno com o aumento da força axial com o aumento da taxa de avanço.

Relativamente à velocidade de corte, estes autores identificaram dois fenómenos diferentes. Davim et al. [63,83,89], Sardinias et al. [84] e Kilickap [85] indicam que a delaminação aumenta com o aumento da velocidade de corte, durante a furação de laminados compósitos. Por outro lado, Khashaba et al. [4,10] verificaram que em laminados PRFV com tecidos entrelaçados, a delaminação diminui com o aumento da velocidade de corte. Em laminados PRFC com tecidos entrelaçados foi verificada também uma diminuição da delaminação com o aumento da velocidade de corte, por Gaitonde et al. [74]. O impacto do avanço na delaminação é superior ao efeito da velocidade de corte. Davim et al. [57] procuraram num trabalho experimental avaliar os parâmetros de corte (velocidade e avanço) e influência do material da matriz na furação de compósitos e concluíram que o avanço é o parâmetro de corte que apresenta estatisticamente maior influência na delaminação.

Quanto ao ângulo de ponta da broca, Gaitonde et al. [74] e Karnik et al. [86] verificaram que para brocas Helicoidais em carboneto de tungstênio, que a delaminação tende a aumentar com o aumento do ângulo de ponta da broca, durante testes de furação convencional e furação de alta velocidade em laminados PRFC com tecidos entrelaçados. Kilickap [85] verificou o inverso no seu estudo sobre a influência dos parâmetros de corte como a velocidade de corte, taxa de avanço e ângulo de ponta da

broca na furação de PRFV. Ele verificou nesse estudo uma tendência de diminuição de delaminação com o aumento do ângulo de ponta da broca Helicoidal.

Existe ainda a influência do material da broca. Piquet et al. [59] numa análise experimental da furação de placas carbono/epóxico com disposição quasi-isotrópica, recomendam que a broca deve ser em carboneto de tungstênio. Dá-se preferência a este material, também, por razões económicas, quando comparados com as brocas em diamante [42]. O material da broca é definido por dois critérios: primeiro: prolongar o seu tempo útil de vida [79,90]; segundo: redução da delaminação [91,92].

Para além das variáveis de entrada que já foram atrás apresentadas existe ainda a força axial exercida pelo centro estacionário da broca. Está a uma das variáveis chave para a descrição da maquinabilidade de um laminado compósito, dado que aparece diretamente associada com a qualidade do furo e com a delaminação [10]. A determinação analítica desta força, que se encontra no limite para a qual se inicia a delaminação tem sido desenvolvida a partir de equações da Mecânica da Fratura Linear-Elastica [93]. Hocheng e Tsao [45] acreditam que uma furação que ocorra com forças axiais abaixo desse limite pode não induzir delaminação ao laminado compósito. Ho-Cheng e Dharan [54] apresentaram a formulação mais simples para a determinação da força crítica (F_{CT}) para a ocorrência de delaminação com brocas helicoidais, que pode ser definida também como força responsável pelo início de delaminação e é representada pela equação 4.4.

$$F_{CT} = \pi \left[\frac{8G_{IC}Eh^3}{3(1-\nu^2)} \right]^{1/2} \quad 4.4$$

em que, G_{IC} é a taxa crítica de libertação de energia em modo I, isto é, em que a força é aplicada perpendicularmente ao plano de propagação de delaminação, E o módulo de elasticidade do material, h a espessura não cortada e ν o coeficiente de Poisson. A força exercida pelo centro da broca é considerada como uma carga concentrada.

Lachaud et. al. [6], apresentam dois modelos para calcular a força axial crítica, F_z :

- um deles considerando a carga concentrada (equação 4.5):

$$F_z = 8\pi \left[\frac{2G_{IC}D}{1-(D'/8D)} \right]^{1/2} \quad 4.5$$

- e um outro em que a carga é considerada distribuída (equação 4.6):

$$F_z = 8\pi \left[\frac{G_{IC} D}{(1/3) - (D'/8D)} \right]^{1/2} \quad 4.6$$

em que, D e D' são constantes do material calculadas a partir da matriz de rigidez à flexão do laminados.

Outros modelos foram apresentados Hocheng e Tsao [45,56,94] para a delaminação à saída, para diferentes geometrias de brocas. Na Figura 4.4 são apresentadas imagens esquemáticas sobre como ocorre a delaminação à saída para várias geometrias de broca.

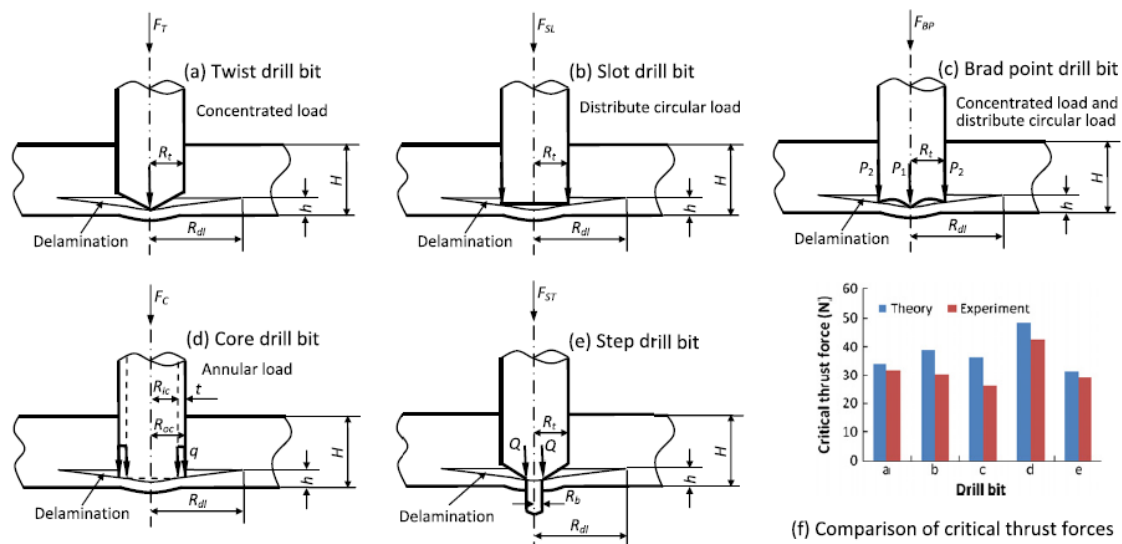


Figura 4.4 – Representação esquemática da delaminação com várias geometrias de broca [27]

Para reduzir ou até evitar a delaminação numa operação de furação, vários métodos foram testados de forma a reduzir a força axial aplicada à peça. Neste sentido alguns autores [45,95,96] sugeriram a utilização de placas de apoio, tal como na Figura 4.5.

Capello [96], por exemplo, em testes de furação com brocas helicoidais comprovou que a utilização de suporte pode reduzir drasticamente a ocorrência de delaminação

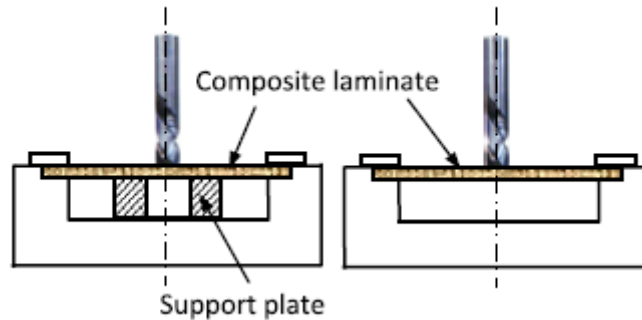


Figura 4.5 – Operação de furação com e sem placas de apoio [27]

Won e Dharan [97] fizeram monitorização de forças axiais em furos executados de uma vez só e com recurso a pré-furação, executando os furos em duas fases, durante a furação de laminados compósitos com fibras aramidas e de carbono utilizando brocas em carboneto de tungsténio. Observaram desta forma que a redução da força axial obtida com recurso à pré-furação pode chegar aos 60%.

Stone e Krishnamurthy [3] propõem um controlador neural da força axial para minimizar a delaminação durante a furação, em que a força seria continuamente monitorizada, e a cada três rotações da broca, seria possível alterar o avanço de acordo com os valores de força axial verificados.

Num estudo com o objetivo de identificar condições de operação que garantissem furos livres de defeitos em PRFC, Enemuoh et al. [98] indicaram que o emprego de altas velocidades de rotação associadas a baixos valores de avanço assegura a produção de furos sem delaminação e com baixa rugosidade.

Nesta secção foram apresentados os principais problemas da furação em materiais compósitos, com ênfase para a delaminação, e recomendações de alguns autores sobre a melhor forma de ultrapassar tais problemas. Na secção seguinte são apresentados as descrições de cada ensaio, os resultados obtidos, assim como a desses resultados.

Capítulo 5

Trabalho experimental

Apresenta-se a parte experimental deste trabalho, descrevendo os materiais e os métodos utilizados, os parâmetros utilizados nos ensaios, assim como os resultados obtidos. Faz-se também uma análise crítica desses resultados.

5.1 Introdução

A parte experimental do trabalho incide principalmente na realização de ensaios *pin-bearing* e de início de delaminação. Para além destes ensaios foram obviamente feitos ensaios de caracterização dos materiais em estudo.

O ensaio de *pin-bearing*, aqui mostrado, foi efetuado de forma a avaliar materiais que já tinham sido estudados por Chita durante a sua tese de mestrado [11] através do ensaio de esmagamento segundo a norma ASTM D5961/D5961M [99] e verificar o impacto da ferramenta de corte e das condições de maquinagem em cada situação e também comparar os resultados obtidos por esses dois métodos. Para este caso foram também calculados os valores de *Fator de Delaminação Ajustado*, F_{da} , apresentado por Davim et al. [82] com os valores obtidos por Chita na sua análise, de forma a avaliar a extensão do dano em cada caso. Este critério de avaliação foi escolhido, por ser uma melhoria do *Fator de Delaminação*, F_d , que leva em conta não só diâmetro da área delaminada, mas também a área da delaminação. Neste trabalho o parâmetro β da equação 4.3 é obtida pelo quociente entre a área delaminada e a diferença entre a área correspondente ao diâmetro máximo D_{max} e a área nominal do furo e o parâmetro α o seu complemento ($\alpha = 1 - \beta$).

O ensaio de início de delaminação foi, por sua vez, realizado de forma a ser avaliado como possível método de avaliação de danos, por delaminação, em matérias compósitos e também para avaliar a influência de diversos parâmetros, que serão apresentados mais adiante, no início de delaminação.

Para a realização desses dois ensaios foram utilizados polímeros reforçados com fibras de carbono, tendo em conta a sua importância atual em várias indústrias. Foram, também, projetadas ferramentas apropriadas e definidos procedimentos de ensaios próprios que podem ser consultados no Anexo B para ensaio *pin-bearing* e no Anexo C

para ensaio de início de delaminação e que poderão vir a ser utilizados em trabalhos futuros.

5.2 Descrição dos ensaios experimentais

Neste ponto só se vão fazer descrições dos ensaios de início de *pin-bearing* e de início de delaminação, visto que os outros já são conhecidos e encontram-se normalizados.

5.2.1 Ensaio *pin-bearing*

O ensaio *pin-bearing* consiste em comprimir um provete, aplicando uma carga vertical, por um semicírculo previamente efetuado com um indentador cilíndrico. A força máxima registada durante o ensaio é registada como sendo a força responsável para rutura da placa. Este ensaio foi realizado de acordo com a proposta de Khashaba et al. [10], que tem algumas semelhanças com o modelo apresentado por Wu e Sun [100] para análise de iniciação de falhas em materiais compósitos.

A Figura 5.1 exibe a curva resultante do ensaio *pin-bearing* conforme apresentado por Khashaba et al. [10].

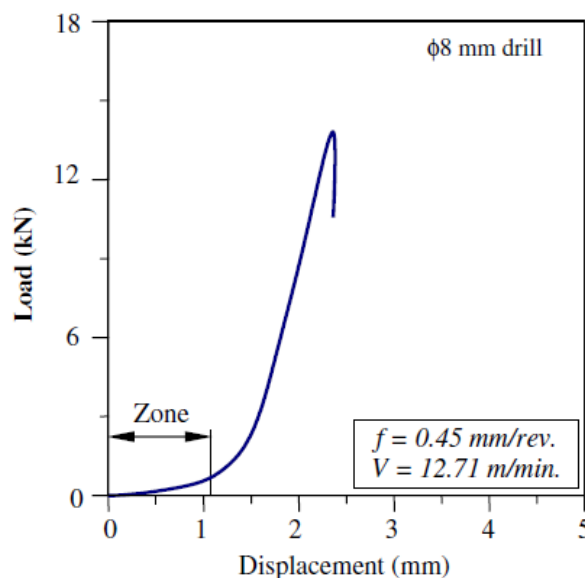


Figura 5.1 – Curva força-deslocamento resultante do ensaio *pin-bearing* de acordo com Khashaba [10]

Esta curva apresenta é bastante idêntico ao apresentado por Wu e Sun [100]. Na curva é visível uma zona inicial não-linear que é justificada por Khashaba et al. [10] como sendo resultado da delaminação e rugosidade (irregularidades) que reduz a rigidez do provete na zona de teste (zona de contacto indentador/provete), tal como a Figura 5.2.

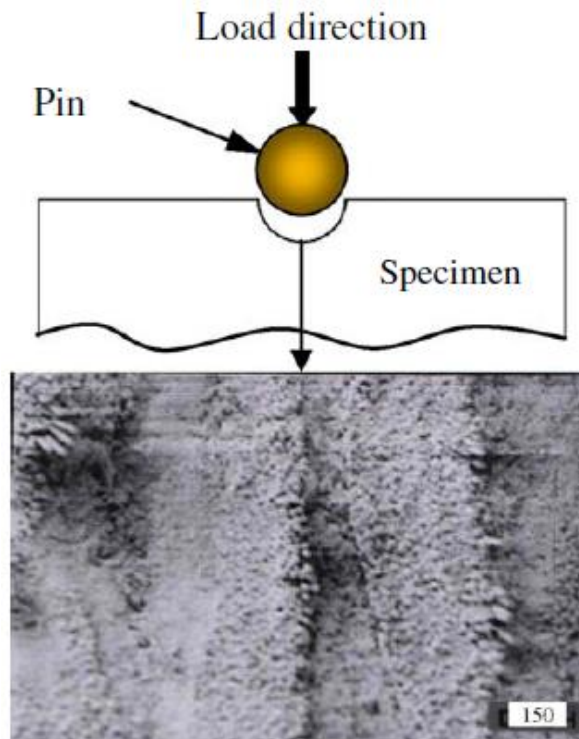


Figura 5.2 – Imagem SEM, da rugosidade superficial na zona de contacto indentador/provete [10]

Após essa zona de não linearidade verifica-se um aumento linear da força até a rutura. A delaminação é observada com o aumento da carga de compressão, por causa da falha interlaminar (entre as chamadas do laminado compósito).

O procedimento de ensaio é explicado detalhadamente no Anexo B, onde aparecem também a descrição da preparação dos provetes, as suas dimensões recomendadas, a montagem do dispositivo na máquina de ensaios e a fixação do provete. Nesse mesmo anexo é possível também consultar o desenho técnico do dispositivo de ensaio.

Foram ensaiados provetes com furos de 6 mm realizados com as seguintes brocas: Helicoidal em carboneto de tungsténio (WC), Helicoidal em aço rápido (HSS), *brad* (WC) e Bidiametral (WC), nas vertentes *cross-ply* e quasi-isotrópicas. As geometrias das brocas estão ilustradas na Figura 5.3.

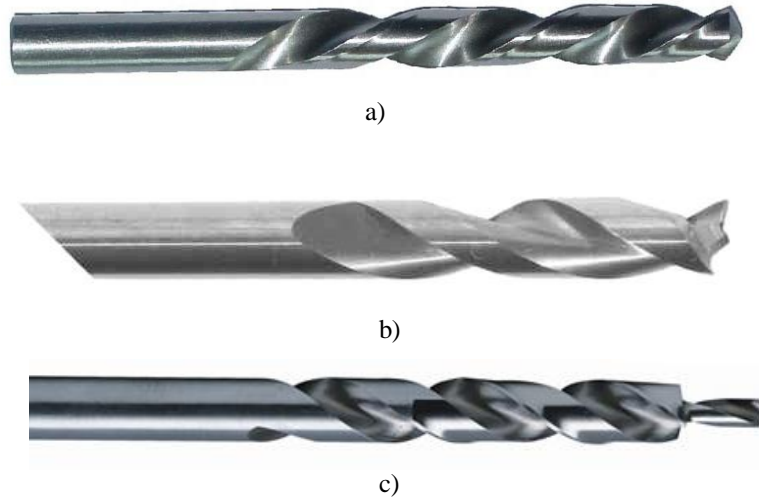


Figura 5.3 – Brocas utilizadas nos ensaios de *pin-bearing*: a) Broca Helicoidal; b) Broca *Brad*; c) broca Bidiametral

Os furos tinham sido realizados a velocidade constante de 2800 rpm com avanços variáveis. Foram, no entanto, utilizados 3 patamares de avanço. O valor mais baixo foi de 0,03 mm/rot, o intermédio de 0,08 mm/rot e o mais alto de 0,19 mm/rot.

Os objetivos aqui, para além de verificar a influência das geometrias e materiais das brocas, são também analisar a influência do avanço e de diferentes configurações de placas.

Neste trabalho foram feitos quatro ensaios para cada situação com a velocidade de ensaio constante e igual a 1 mm/min.

5.2.2 Ensaio de início de delaminação

O ensaio de início de delaminação consiste em aplicar uma carga perpendicular sobre uma área não cortada, com espessura controlada, de um furo cego com uma broca que funciona como punção, e registar a força máxima. Esta força é a responsável pela delaminação [7] e é denominada durante este trabalho de força de início de delaminação.

Desenho ilustrativo do provete utilizado no ensaio de início de delaminação é apresentado na Figura 5.4 onde se pode observar em detalhe a espessura da área não cortada, designada espessura não cortada, h .

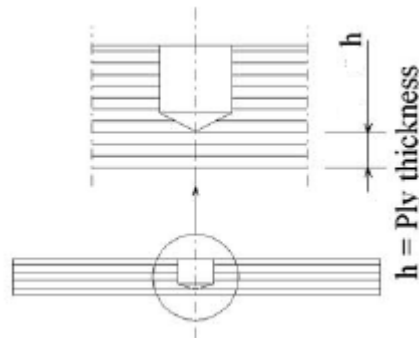


Figura 5.4 – Desenho ilustrativo do provete, onde se pode observar a espessura não cortada, h (Adaptado de [7])

Este ensaio foi proposto por Lachaud et. al. [6] na fase experimental do estudo sobre um modelo que relaciona a penetração axial da broca com as condições de delaminação das últimas camadas de um laminado composto. O ensaio foi aplicado de forma a poderem fazer comparações entre resultados experimentais com os analíticos obtidos a partir dos dois modelos para obtenção da força axial crítica apresentados nas equações 4.5 e 4.6. Nesse trabalho os resultados foram também comparados com o modelo de Ho-Cheng e Dharan [54] da equação 4.4. Os resultados obtidos por eles são os apresentados na Figura 5.5.

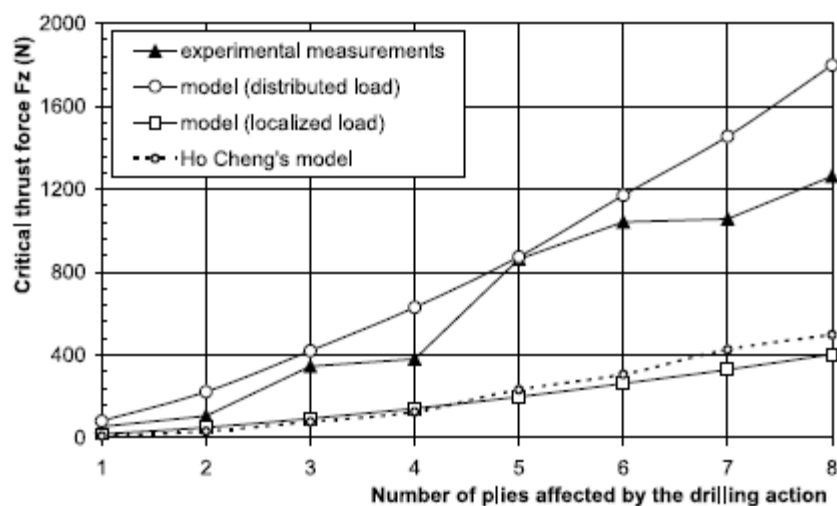


Figura 5.5 – Resultados experimentais e analíticos obtidos por Lachaud et al. [6]

Lachaud et al. [6] indicam que a delaminação à saída do furo é provocada pelas condições de corte impostas pelo facto das arestas de corte da broca deixa de conseguir cortar material. A delaminação pode ocorrer a diversas espessuras a medida que a broca progride no furo. Tendo em conta que a taxa de avanço é o principal fator responsável pela delaminação, com este ensaio espera-se obter resultados satisfatórios para a força responsável pela delaminação. Contudo, não existem, para já, valores na literatura de forma a comparar os resultados aqui obtidos.

Portanto, com este ensaio pretende-se para além do registo da força axial responsável pela delaminação, pretende-se principalmente avaliar o impacto que diversos fatores têm nesse tipo de dano. Assim sendo, as variáveis analisadas foram:

- Espessura não cortada (h) de um furo cego;
- Velocidades de ensaio;
- Geometria de broca;
- Tipos de configurações de placas.

A nível experimental para cada valor de uma dessas variáveis, a ideia foi, alterar os valores das outras e registar a força de delaminação. Para cada caso foram realizados quatro ensaios e o valor final da força de início de delaminação é a média dos seus resultados. O detalhe das variáveis utilizadas é apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Detalhe das variáveis utilizadas no ensaio de início de delaminação

Variável	Detalhe da variável
Espessuras não cortada (mm)	0,15 / 0,30 / 0,45
Velocidades de ensaio (mm/min)	1 / 3 / 6
Geometria de broca	Helicoidal / <i>Brad</i> / Bidiametral / <i>Dagger</i>
Tipos de configurações de placas	Unidirecional / Cross-ply / Quasi-isotrópica

Como se pode constatar da análise desta última tabela, as geometrias das três primeiras brocas são as mesmas das utilizadas para a execução dos furos nas placas dos ensaios *pin-bearing*. Para além dessas brocas, para o ensaio de início de delaminação foi também utilizada a broca *Dagger* cuja geometria é ilustrada na Figura 5.6. Foram utilizadas brocas de diâmetro de 6 mm.



Figura 5.6 – Broca *Dagger*

O procedimento de ensaio é explicado detalhadamente no Anexo C. É de registrar que os ensaios foram realizados na máquina de ensaios Shimadzu Autograph do Laboratório de Ensaios Mecânicos.

5.3 Materiais utilizados

Para a concretização da parte experimental deste trabalho foram utilizados provetes obtidos de placas de resina de epóxico reforçadas com fibra de carbono obtidas de pré-impregnados fornecidos pela SEAL®.

Para o ensaio de *pin-bearing* foram utilizadas placas unidirecionais com referência TEXIPREG® HS160REM, constituído por carbono de alta resistência unidirecional e pela resina de epóxico REM e placas com sequência de empilhamento do tipo “*cross-ply*”, sem referência, mas possivelmente será a mesma das placas anteriores, conforme indicações do Chita [11]. As propriedades após cura deste pré-impregnando disponibilizadas pelo fornecedor são apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Propriedades do pré-impregnado HS160REM após cura (Fonte: SEAL - Anexo D)

Propriedade	Unidades	Valores típicos	Norma utilizada
Resistência à tração	MPa	1700	ASTM D 3039
Módulo de elasticidade	GPa	150	ASTM D 3039
Resistência à flexão	MPa	1400	ASTM D 790
Módulo de flexão	GPa	130	ASTM D 790
I.L.S.S.	MPa	60	ASTM D 2344

Para o ensaio de início de delaminação foram utilizadas placas com um total 24 camadas e:

- com orientação de fibras unidirecionais;
- do tipo “*cross-ply*”;
- com propriedades quasi-isotrópicas.

As placas foram fornecidas com a referência HS160REM (ver *data sheet* em Anexo D.1 ordem de fabrico em Anexo D.2); As propriedades após cura deste pré-impregnando disponibilizadas pelo fornecedor são as mesmas da Tabela 5.2.

A designação das placas para o ensaio de início de delaminação, as suas sequências de empilhamento, assim como as suas espessuras e número de camadas de cada uma são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Sequência de empilhamento, espessura e número de camadas das placas utilizadas no ensaio de início de delaminação

Designação da placa	Sequência de empilhamento	Espessura (mm)	Número de camadas
Unidirecional	$[0^\circ]_{24}$	3,7	24
<i>Cross-ply</i>	$[0/90]_{6S}$	3,7	24
Quasi-isotrópicas	$[0/45/90/-45]_{3S}$	3,7	24

5.4 Preparação de provetes

5.4.1 Ensaios de caracterização dos compósitos

Antes de iniciar a realização dos ensaios propostos neste trabalho, foram feitas alguns outros ensaios para determinar as propriedades dos materiais utilizados. Para isso foram efetuados ensaios de tração e ensaios de flexão para além da análise do teor de fibra de pelo menos uma das placas que foi realizada.

Os ensaios de caracterização de materiais foram efetuados apenas para os materiais utilizados nos ensaios de início de delaminação.

Para a determinação do teor de fibra (apenas nas placas unidirecionais) foram cortadas pequenas amostras do laminado compósito que foram previamente pesados e depois colocados em cadinhos. O ensaio de calcinação foi realizado de acordo com a norma NP 2216:1988 no Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP.

Para os ensaios de tração e flexão foram cortados provetes de secção retangulares com as dimensões da Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Dimensões dos provetes utilizados nos ensaios de tração e flexão

Tipo de ensaio	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
Tração	250	25	3,7
Flexão	100	20	3,7

5.4.2 Ensaio *pin-bearing*

Foram recolhidos os provetes utilizados por Chita [11] nos ensaios de esmagamento, que se encontravam devidamente identificados, foram cortados pelo centro dos furos eliminando a zona danificada e de forma a criar um meio círculo por onde o ensaio é realizado. A configuração do provete para ensaio de início de delaminação é ilustrada na Figura 5.7.



Figura 5.7 - Configuração de provete para ensaio *pin-bearing*

As dimensões dos provetes são as apresentadas Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Dimensões dos provetes utilizados nos ensaios *pin-bearing*

Propriedade	Unidades	Valores
Altura média dos provetes	mm	105
Largura	mm	35
Espessura	mm	3,5
Raio dos semicírculos	mm	3

Para a concretização deste ensaio foi projetado um dispositivo próprio adaptável à máquina de ensaios Shimadzu Autograph do Laboratório de Ensaios Mecânicos, onde foram realizados os ensaios, com características adequadas de forma a evitar influência de fatores externos nos ensaios. A montagem do dispositivo de ensaio é mostrada na Figura 5.8.

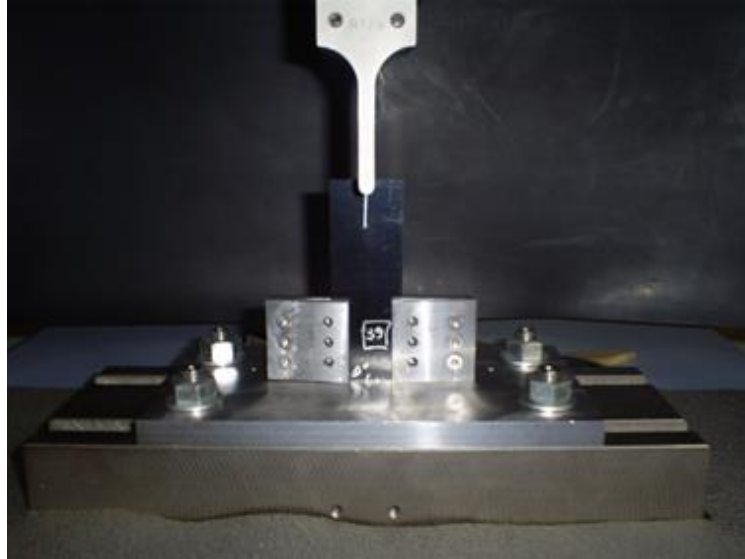


Figura 5.8 – Sistema de ensaio de ensaio *pin-bearing*

5.4.3 Ensaio de início de delaminação

Para a obtenção dos provetes para a realização deste foram cortadas várias placas com largura fixa de 35 mm e de comprimento variável. Em cada placa foram efetuados vários furos de 6 mm de diâmetro, com uma fresa para garantir fundo plano, com distância fixa entre os seus centros de 18 mm com recurso ao centro de maquinagem HAAS das Oficinas Mecânicas do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP. Encontra-se identificado em Anexo A o código CNC base utilizado para a execução dos furos. Os furos foram realizados com os parâmetros de corte da Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Parâmetros de corte para execução dos furos para o ensaio de início de delaminação

Parâmetro	Unidades	Valor
Velocidade de rotação, n	rpm	7000
Velocidade do avanço, f	mm/min	100

Para além desses furos, foram deixadas de cada lado da placa uma distância de 70 mm que vai desde o extremo da placa e o centro do primeiro furo desse lado, de forma a garantir pelo menos 60 mm para a zona de aperto para quando se está a proceder testes a esse furo. No final o provete fica com a configuração da Figura 5.9.

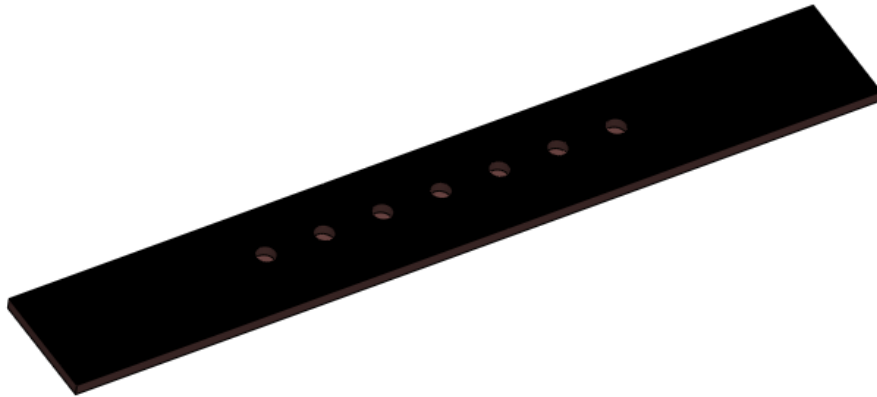


Figura 5.9 - Configuração de provete para ensaio de início de delaminação

Após alguns testes iniciais, foi projetado um dispositivo próprio para a realização deste ensaio, que pudesse imprimir eficácia na sua realização, evitando flexão e escorregamento da placa e também o escorregamento da broca-punção de forma a garantir resultados fiáveis. A montagem do dispositivo de ensaio é mostrada na Figura 5.10.

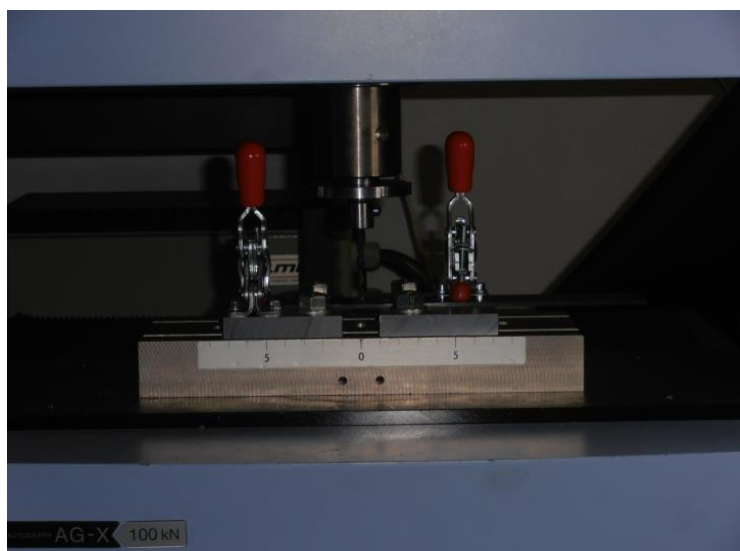


Figura 5.10 – Sistema de ensaio de início de delaminação

5.5 Resultados experimentais

5.5.1 Ensaios de caracterização dos compósitos

Do ensaio de calcinação foi obtido o resultado de teor em fibras é de 66% para as placas unidirecionais.

5.5.1.1 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram aplicados de acordo com a norma EN ISO 527 para medir a resistência à tração longitudinal (σ_{ut1}), o módulo de elasticidade longitudinal (E1), o módulo de elasticidade transversal (E2) e o coeficiente de Poisson, ν_{12} para as placas unidirecionais. Os resultados obtidos do ensaio de tração estão apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Propriedades obtidas do ensaio de tração para placas unidirecionais

Propriedade	Unidades	Resultado
σ_{ut1}	MPa	-
E1	GPa	111,41
E2	GPa	7,75
ν_{12}	-	0,29

Como se pode verificar pela análise da tabela anterior, não foi possível obter o resultado da resistência à tração. Este valor não foi conseguido por causa da capacidade da máquina.

Para as placas *cross-ply* e quasi-isotrópicas foram obtidos os valores da resistência à tração (σ), do módulo de elasticidade (E). Para as placas *cross-ply* os resultados estão apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Propriedades obtidas do ensaio de tração para placas *cross-ply*

Propriedade	Unidades	Resultado
σ	MPa	443,89
E	GPa	52,83

E para as placas quasi-isotrópicas os resultados aparecem na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Propriedades obtidas do ensaio de tração para placas quasi-isotrópicas

Propriedade	Unidades	Resultado
σ	MPa	500,32
E	GPa	47,95

Estes ensaios foram levados a cabo na máquina de ensaios Shimadzu Autograph com célula de carga de 100 kN do Laboratório de Ensaio Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP, sendo a velocidade de ensaio de 2 mm/min.

5.5.1.2 Ensaio de flexão

Os ensaios de flexão também foram levados a cabo na máquina de ensaios Shimadzu Autograph com célula de carga de 100 kN do Laboratório de Ensaio Mecânicos. Estes foram assim realizados segundo a vertente três pontos em placas unidirecionais de acordo com a norma ISO 14125:1998 [101]. O módulo de flexão (E_f) e a resistência à flexão (σ_{uf}) são as principais propriedades que podem ser obtidas a partir deste ensaio. Neste trabalho só foi medido o valor do módulo de flexão que é apresentado na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Propriedades obtidas do ensaio de flexão para placas unidirecionais

Propriedade	Unidades	Resultado
σ_{uf}	MPa	-
E_f	GPa	52,80

Este ensaio foi realizado com a velocidade de 1,4 mm/min e com a distância entre apoios de 80 mm.

5.5.2 Ensaio *pin-bearing*

Os resultados dos ensaios de *pin-bearing* serão apresentados e analisados neste tópico para cada um dos tipos de configuração das placas separadamente e no final é também feita uma análise da influência também das placas na força de rutura.

Uma curva típica resultante do ensaio é apresentada na Figura 5.11.

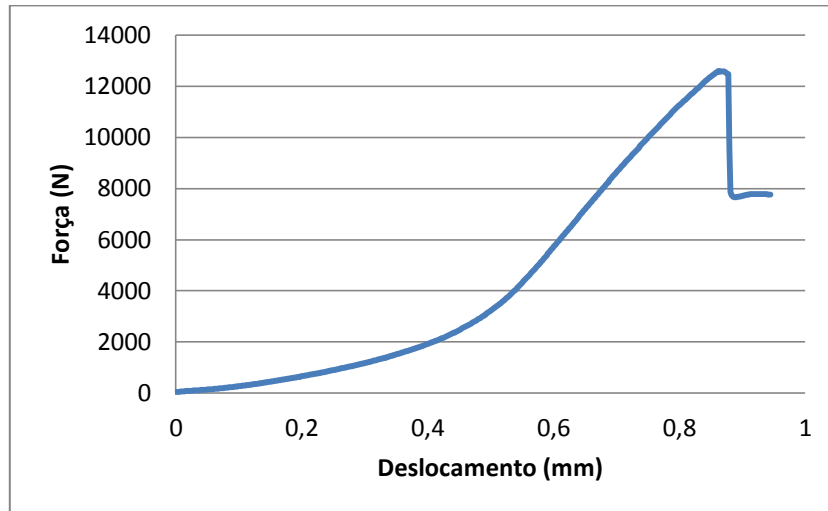


Figura 5.11 – Curva força-deslocamento resultante do ensaio de *pin-bearing*

A curva apresenta a forma como a força evolui positivamente com o deslocamento em compressão do indentador de teste sobre o provete até atingir a força de rutura. Nesse ponto dá-se uma quebra brusca da força. Se se continuasse com o ensaio a partir desse ponto de rutura, verificaria um novo aumento, e gradual, da força, visto que, o provete está em compressão, porém essa zona não teria qualquer significado prático. É de notar que existe uma zona inicial sem qualquer linearidade entre a força e o deslocamento, tal como visto na literatura.

Convém relembrar que este ensaio foi realizado em continuação do trabalho apresentado anteriormente pelo Chita na sua tese de mestrado [11], por isso os valores de Fator de delaminação ajustado (F_{da}) e os de Força axial de esmagamento aqui apresentados foram obtidos com base nos resultados dele. De forma a evitar qualquer engano as forças axiais e as tensões obtidas no ensaio de *pin-bearing* são designadas de forças de rutura e tensões de rutura, respetivamente.

Para uma melhor compreensão da discussão dos resultados que aqui é feita, aconselha-se a análise dos resultados dos ensaios de *pin-bearing* em Anexo E e a dos resultados dos ensaios de esmagamento (resultados do Chita) em Anexo F.

5.5.2.1 Placa unidirecional

A primeira análise a fazer é sobre a extensão do dano nos furos utilizados para ensaio. Esta análise é aqui feita com o fator de delaminação ajustado, conforme referido anteriormente.

Para a placa unidirecional foi verificada uma clara tendência de aumento da extensão do dano com o aumento do avanço. Esta tendência é apresentada no gráfico da Figura 5.12 e é uma realidade para qualquer uma das brocas.

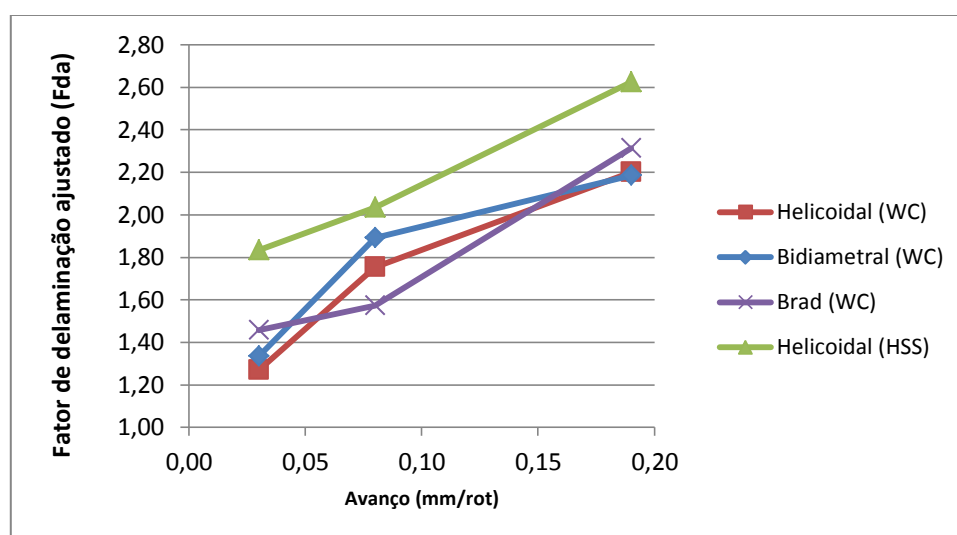


Figura 5.12 – Evolução do Fator de delaminação ajustado (F_{da}) com o avanço para todas as brocas testadas na placa unidirecional

Fazendo uma análise individual às brocas verifica-se que a broca Helicoidal produzida em aço rápido (HSS) é a que menos se adequa para a furação de laminados compósitos.

Quanto às brocas produzidas em carboneto de tungsténio (Helicoidal, Bidiametral e Brad), verifica-se que para o menor avanço (0,03 mm/rot) e para o maior (0,19 mm/rot) apresentam resultados bastante similares, o que já não acontece para o avanço intermédio de 0,08 mm/rot. A este avanço verifica-se que a broca Brad apresenta melhor resultado. Esta, que aliás, apresenta o pior resultado entre as brocas de carboneto de tungsténio para os outros avanços.

Nota-se que o melhor resultado foi conseguido pela broca Helicoidal em carboneto de tungsténio (WC) com o avanço de 0,03 mm/rot com F_{da} igual 1,270 e o pior resultado com a broca com a mesma geometria produzida em aço rápido com o F_{da} a atingir o valor de 2,625. Em termos médios a broca Helicoidal em carboneto de

tungsténio continua com melhor resultado e a broca Helicoidal com o pior, de acordo com a Tabela 5.11, e o melhor avanço continua a ser 0,03 mm/rot conforme Tabela 5.12.

Tabela 5.11 – Valores médios do Fator de delaminação ajustado (F_{da}) para cada broca e para a placa unidirecional

Broca	F_{da} (média)
Helicoidal (WC)	1,741
Helicoidal (HSS)	2,164
Brad (WC)	1,781
Bidiametral (WC)	1,804

Tabela 5.12 – Valores médios do Fator de delaminação ajustado (F_{da}) para os diferentes avanços e para a placa unidirecional

Avanço (mm/rot)	F_{da} (média)
0,03	1,474
0,08	1,813
0,19	2,331

Pelos resultados atrás apresentados pode-se concluir que a broca Helicoidal (WC) é a melhor para furação de laminados compósitos carbono/epóxico para baixos avanços. A broca Brad é a que apresenta o segundo melhor valor, seguido da broca Bidiametral e por fim a broca Helicoidal (HSS). Entretanto, para continuar a análise são apresentados de seguida, na Figura 5.22, os resultados das forças de rutura obtidos nos ensaios de *pin-bearing*.

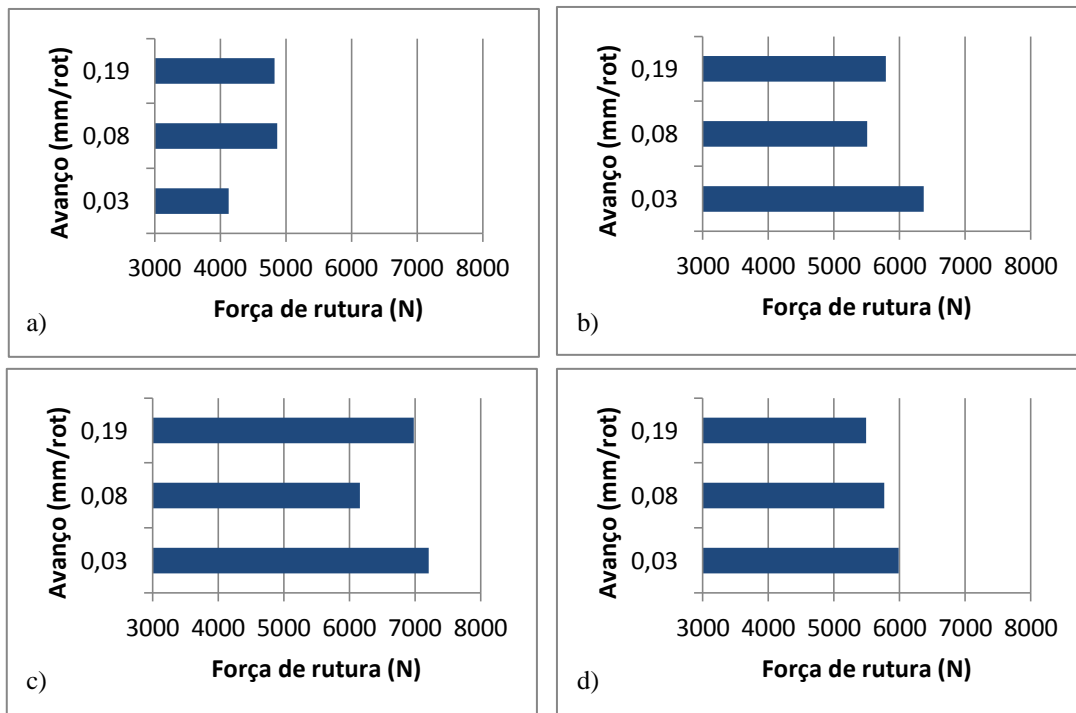


Figura 5.13 – Força de rutura dos ensaios de *pin-bearing* para a placa unidirecional e para as brocas: a) Helicoidal (HSS); b) Helicoidal (WC); c) Brad (WC); d) Bidiametral (WC)

Analisando os gráficos da força de rutura (Figura 5.22) verifica-se uma clara quebra de resistência das placas com furos efetuados com a broca Helicoidal em aço rápido em relação às outras. Os ensaios nas placas furadas com broca Brad atingiram forças mais elevadas até a rutura para todos os patamares de avanço. Por este critério de análise a broca Helicoidal (WC) apresenta o segundo melhor resultado e a Bidiametral (WC) surge em terceiro lugar.

O cenário do parágrafo anterior repete-se quando a análise é feita a nível de resistência mecânica (Figura 5.23). Ou melhor, a resistência mecânica neste caso, acaba por definir as variáveis em causa, em termos comparativos, da mesma forma que a força axial máxima (força de rutura), visto que, os furos foram feitos com brocas do mesmo diâmetro e as espessuras das placas eram praticamente constantes.

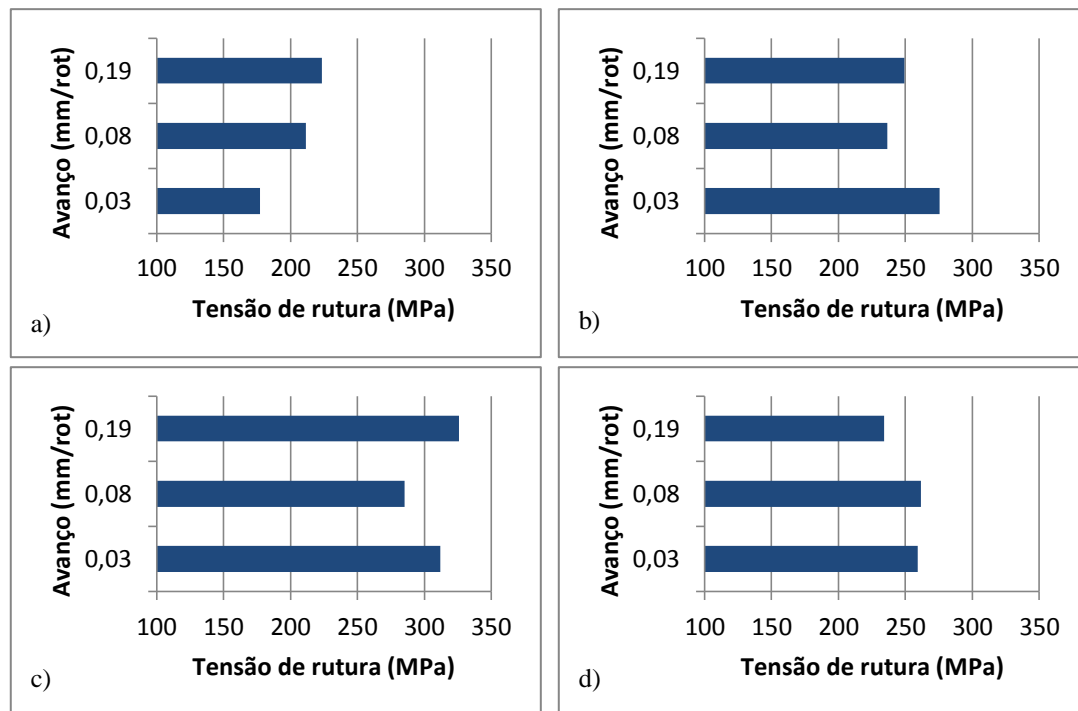


Figura 5.14 – Tensão de rutura dos ensaios de *pin-bearing* para a placa unidirecional e para as brocas: a) Helicoidal (HSS); b) Helicoidal (WC); c) Brad (WC); d) Bidiametral (WC)

No entanto, na variação entre os avanços, não ficou patente que o avanço mais elevado apresenta o pior cenário, com a exceção da broca Bidiametral. Em termos médios, o avanço que atingiu forças mais baixas e que conduzem as placas a resistências mecânicas mais baixas é 0,08 mm/rot de acordo com a Tabela 5.13. O avanço 0,03 mm/rot apresenta força de rutura média mais elevada, porém as suas placas apresentam em média, valores mais baixos em termos de resistência mecânica. Este avanço apresenta também a resistência força e a resistência mecânica mais baixas em termos individuais com a broca Helicoidal (HSS). Por fim, tem-se o avanço 0,19 mm/rot com melhor resistência mecânica tanto em média assim como individuais que acontece com a Bidiametral (WC).

Tabela 5.13 – Valores médios da força de rutura e da tensão de rutura para a placa unidirecional e para os diferentes avanços de furação

Avanço (mm/rot)	Força rutura (N) (Média)	Tensão rutura (MPa) (Média)
0,03	5922,38	256,07
0,08	5577,32	248,60
0,19	5773,26	258,20

Por fim é feita uma análise comparativa entre os valores de força axial máxima obtidos neste ensaio de *pin-bearing* com os valores do ensaio de esmagamento obtidos do trabalho anterior. Para isso são apresentados 3 gráficos, um para cada avanço na Figura 5.15.

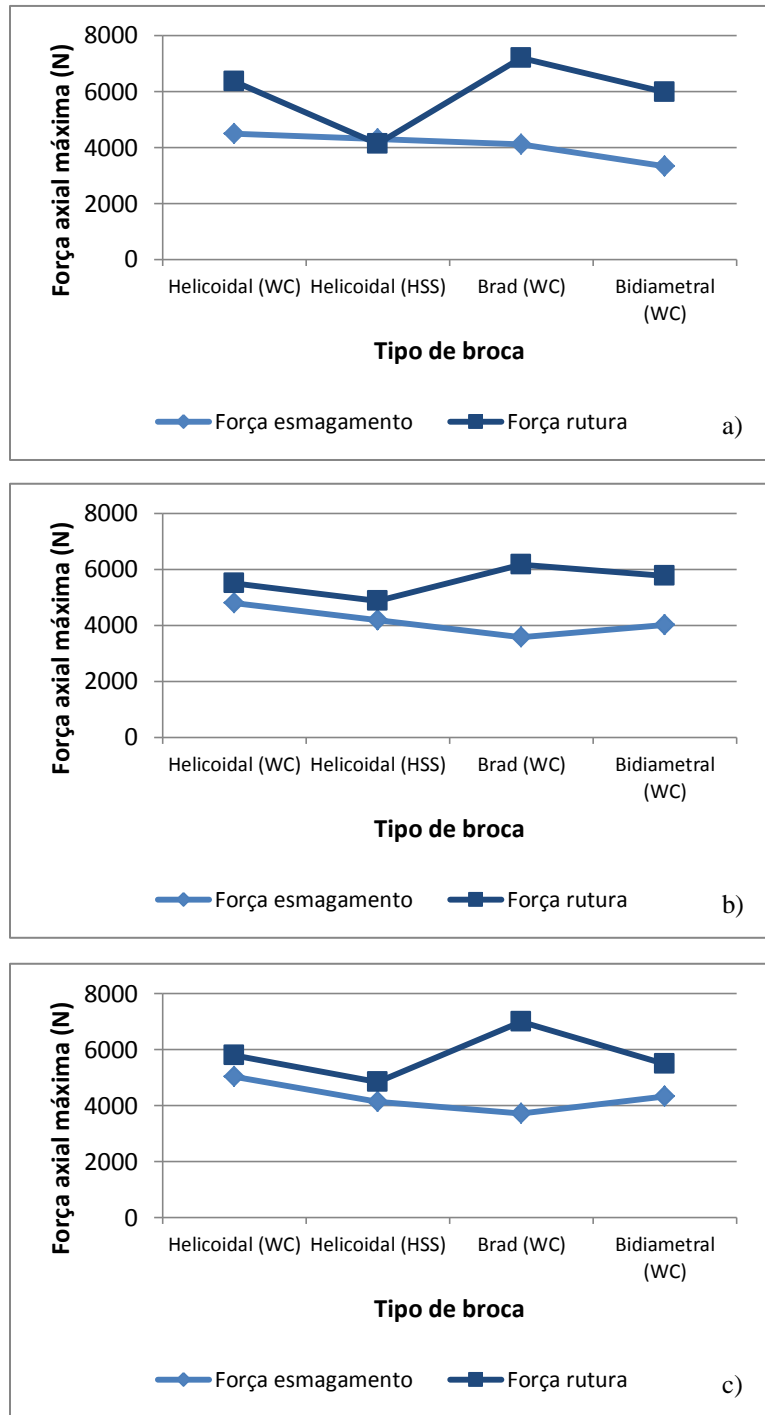


Figura 5.15 – Comparação das forças de rutura e de esmagamento entre as brocas para a placa unidirecional e para os avanços: a) 0,03 mm/rot b) 0,08 mm/rot; c) 0,19 mm/rot

Em primeiro lugar, verifica-se que com o ensaio de pin-bearing atingem-se valores mais elevados em termos de força axial máxima, contudo, o que vai ser analisado aqui é qual dos ensaios traduziram melhor os valores obtidos da análise de danos. Analisando em primeiro lugar o material da broca ficou explicito que a broca em aço rápido é a que causa a maiores danos na placa e pelo ensaio de *pin-bearing* ficou explicito que as placas por ela furadas são as que aguentam menos carga (força de rutura em todos os gráficos da Figura 5.15), o que não acontece com o ensaio de esmagamento (força de esmagamento em todos os gráficos da Figura 5.15).

Quanto à geometria da broca, com o ensaio de esmagamento, a pior broca foi a Bidiametral para o avanço mais baixo e para os seguintes foram sempre a broca Brad, sendo a melhor situação conseguida sempre pela Helicoidal em carboneto de tungsténio que na verdade coincide com o resultado da extensão do dano apresentado anteriormente. Com o ensaio de pin-bearing a broca Brad, apresentou-se sempre como melhor caso tal como já se tinha explicado anteriormente de seguida a broca Helicoidal (WC) com exceção do avanço 0,08 mm/rot, tendo neste caso a Bidiametral ficado em segundo lugar quando se apresentou como pior caso em termos de extensão de danos a nível de geometria. Pode-se concluir daqui que nenhum dos ensaios traduz de forma clara o impacto que os danos causados pela geometria da broca têm na resistência da placa.

Quando a comparação é feita em termos de avanço, verifica-se que com o ensaio pin-bearing melhores resultados foram conseguidos em termos de carga suportada quando se pretende através dela traduzir a extensão do dano.

5.5.2.2 Placa *cross-ply*

A análise aos resultados obtidos nesta placa é feita da mesma forma como já foi feita para a placa unidirecional, por isso a primeira análise será sobre a extensão do dano nos furos utilizados nos ensaios. Para isso, os valores do Fator de delaminação ajustado é apresentado na Figura 5.16. A broca que apresenta pior cenário em termos absolutos é a Helicoidal (WC), partilhando valores semelhantes com a Brad (WC) e Helicoidal (HSS) no avanço inferior (0,03 mm/rot), porém dispara para um valor de desvantagem para o avanço intermédio (0,08 mm/rot) e mantendo-se assim para o avanço superior (0,19 mm/rot).

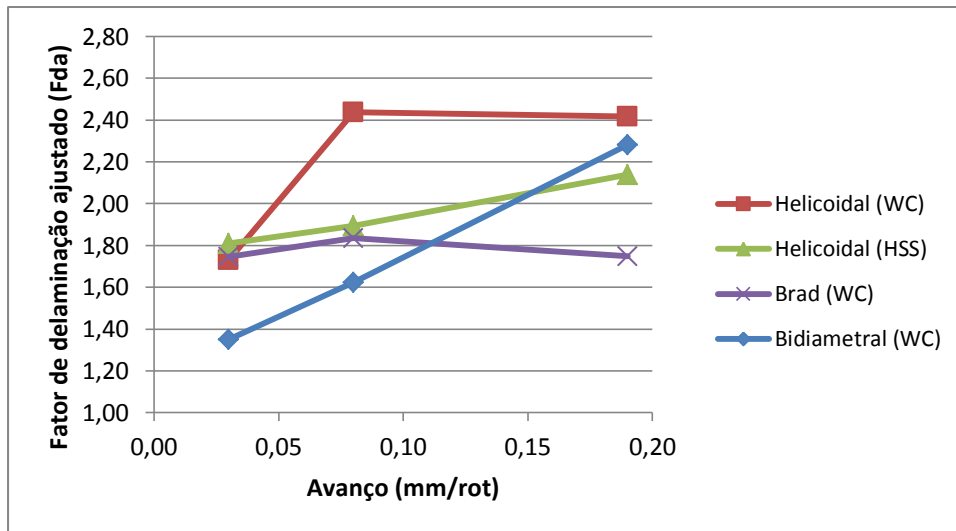


Figura 5.16 – Evolução do Fator de delaminação ajustado (F_{da}) com o avanço para todas as brocas testadas na placa cross-ply

A broca Bidiametral é a que apresenta melhor resultado de forma explícita para os avanços inferior e intermédio, contudo venha a perder esta vantagem para o avanço de 0,19 mm/rot, ficando após atrás da Helicoidal (WC). A Brad (WC) é a que apresenta destacadamente o melhor resultado com o avanço superior e o segundo melhor para o avanço intermédio.

Por fim a broca Helicoidal (HSS) só apresentou piores valores para o avanço 0,03 mm/rot, embora com resultados muito semelhantes às das brocas Helicoidal (WC) e Brad (WC) conforme visto anteriormente.

Quanto ao avanço, o que apresenta melhor resultado é o 0,03 mm/rot, depois 0,08 e por fim o avanço superior (0,19 mm/rot), com exceção da broca Brad. Nesta, os avanços, inferior e superior, apresentam valores semelhantes. Ressalva-se que os resultados obtidos pela broca Brad para o avanço, 0,19 mm/rot já tinham sido classificados como atípicos e de menor importância pelo Chita [11].

Em termos médios (Tabela 5.14) o pior resultado continua a pertencer a broca Helicoidal (WC) seguida da Helicoidal (HSS), Brad e Bidiametral.

Tabela 5.14 – Valores médios do Fator de delaminação ajustado (F_{da}) para cada broca e para a placa cross-ply

Broca	F_{da} (média)
Helicoidal (WC)	2,196
Helicoidal (HSS)	1,948
Brad (WC)	1,776
Bidiametral (WC)	1,752

Como já se sabe o problema do aço rápido tem a ver principalmente com o desgaste do material, e como a broca utilizada na furação dos provetes era nova e foram realizados poucos furos [11] para análise de extensão de dano, esse problema fica de lado, daí os bons resultados por ela conseguidos.

O melhor avanço médio (Tabela 5.15) é o mais baixo, ou seja, o avanço igual a 0,03 mm/rot.

Tabela 5.15 – Valores médios do Fator de delaminação ajustado (F_{da}) para os diferentes avanços e para a placa *cross-ply*

Avanço (mm/rot)	F_{da} (média)
0,03	1,660
0,08	1,948
0,19	2,147

Com estes resultados, pode-se concluir que o melhor cenário de furação é o com broca Bidiametral e com avanço 0,03 mm/rot. De forma a analisar se este cenário reflete na carga máxima suportada pelas placas por ela furadas é apresentada a Figura 5.17.

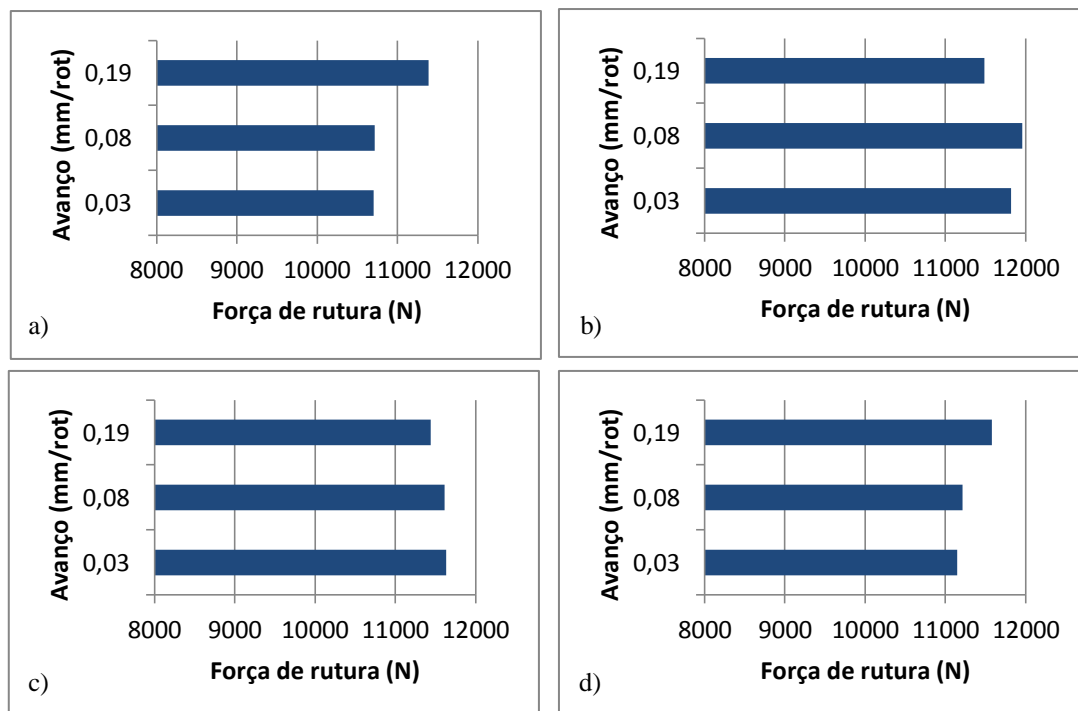


Figura 5.17 – Força de rutura dos ensaios de *pin-bearing* para a placa *cross-ply* e para as brocas: a) Helicoidal (HSS); b) Helicoidal (WC); c) Brad (WC); d) Bidiametral (WC)

Apesar dos valores de fator de avaliação de dano ajustado serem elevados para as placas *cross-ply*, estas aguentam cargas elevadas antes de atingirem a rutura. Por outro lado, apesar dos maus resultados da broca Helicoidal (WC) na avaliação de danos, as placas por ela furadas são as que suportaram cargas superiores nos ensaios de pin-bearing, com exceção dos furos efetuados à 0,19 mm/rot. Para este avanço a broca Bidiametral é a que apresenta melhores resultados. O pior cenário em termos de suporte de carga é apresentado pela broca Helicoidal em aço rápido de forma geral e o mesmo acontece se se for comparar esta broca com as outras avanço-a-avanço.

Em relação à tensão de rutura (ver gráficos da Figura 5.18), verifica-se uma tendência de um aumento de resistência mecânica com o aumento do avanço, com a exceção da broca Helicoidal (WC). Esta broca exibiu um efeito oposto. Neste caso, a tensão de rutura diminuiu com o aumento do avanço e é exatamente com esta broca que se consegue resistências superiores para os avanços 0,03 e 0,08 mm/rot a inferior para o caso do avanço 0,19 mm/rot.

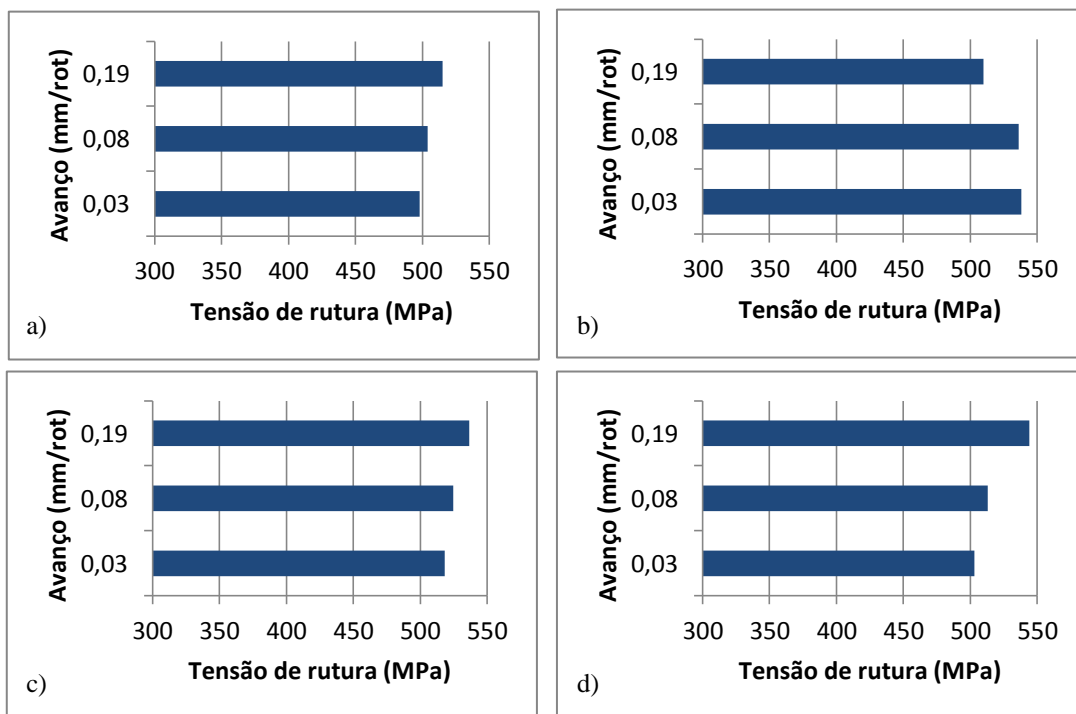


Figura 5.18 – Tensão de rutura dos ensaios de *pin-bearing* para a placa *cross-ply* e para as brocas: a) Helicoidal (HSS); b) Helicoidal (WC); c) Brad (WC); d) Bidiametral (WC)

Tabela 5.16 – Valores médios da força de rutura e da tensão de rutura para a placa *cross-ply* e para os diferentes avanços de furação

Avanço (mm/rot)	Força rutura (N) (Média)	Tensão rutura (MPa) (Média)
0,03	11325	514
0,08	11374	519
0,19	11472	526

Em termos médios nem a força axial máxima e a tensão de rutura traduz aquilo que se espera pela análise de dano. Pela análise da Tabela 5.16 pode-se verificar que tanto a força assim como a tensão atrás referenciadas aumentam os seus valores com o aumento do avanço e é exatamente nesse sentido que a extensão do dano também aumenta.

Na Figura 5.19 estão representados 3 gráficos comparativos da evolução da força axial máxima com para os ensaios de *pin-bearing* e esmagamento com a broca utilizada na furação, para os três avanços em estudo. Quando comparado os valores para os dois ensaios verificam-se as seguintes situações: as placas com maiores extensões de danos pela análise do fator de delaminação ajustado (F_{da}), que são neste caso as placas furadas pela broca Helicoidal (WC), são as que aguentaram cargas superiores, nos dois ensaios; No ensaio de *pin-bearing*, as placas com furos realizados com avanço de 0,19 mm/rot atingiram forças axiais máximas bastante similares ao contrário do que acontece no ensaio de esmagamento em que há uma grande variação entre as forças máximas para as diferentes brocas, estando neste caso a broca Brad (WC) em desvantagem com valores mais baixos. De seguida e pela ordem crescente aparecem as brocas Bidiametral, Helicoidal (WC) e por fim a Helicoidal (HSS).

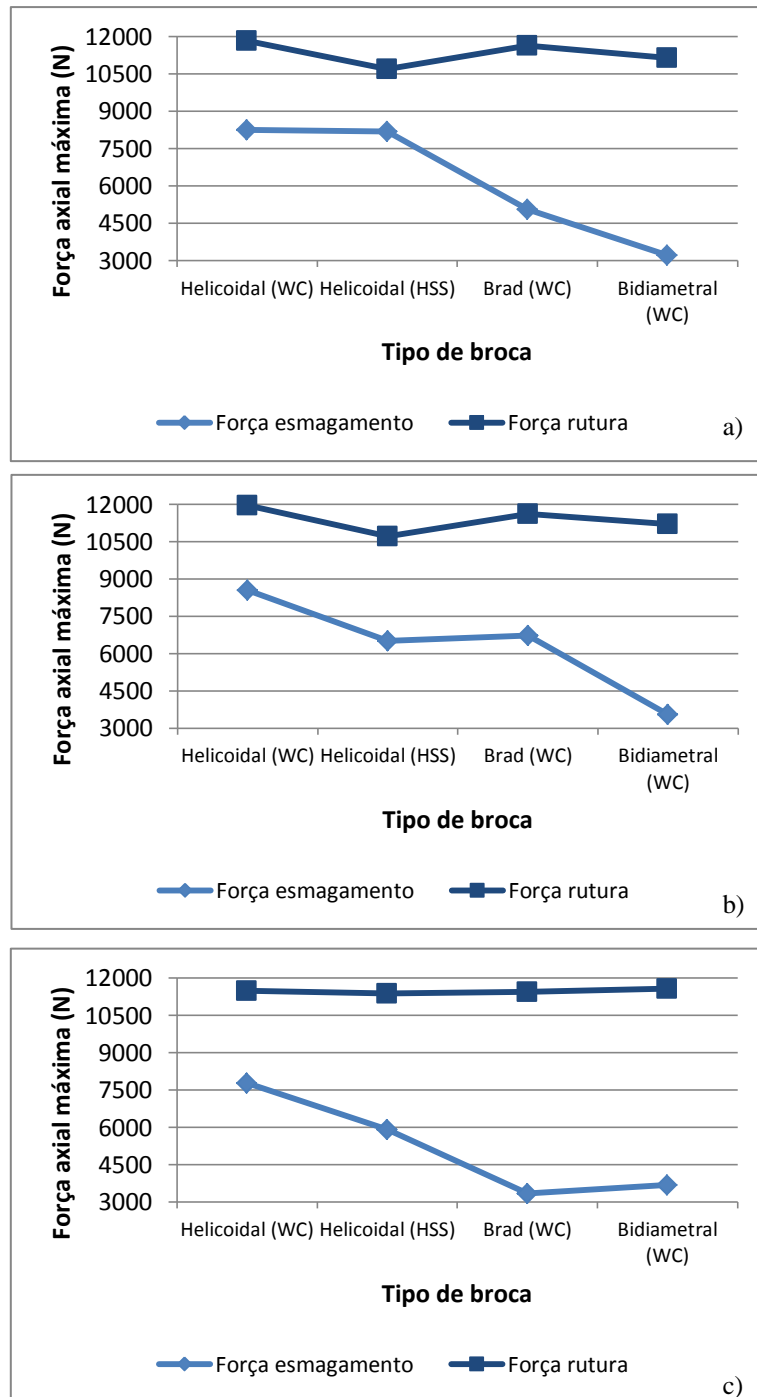


Figura 5.19 – Comparação das forças de rutura e de esmagamento entre as brocas para a placa *cross-ply* e para os avanços: a) 0,03 mm/rot b) 0,08 mm/rot; c) 0,19 mm/rot

5.5.2.3 Comparação das placas

Após apuração dos resultados para cada tipo de placa individualmente é feita neste tópico uma comparação entre os seus valores. Em primeiro lugar, ficou explícito que as placas *cross-ply* atingem forças bastante superiores às das unidirecionais.

Ao contrário do sucedido com a placa unidirecional, com a placa *cross-ply* a broca com piores valores a nível de extensão de dano é a Helicoidal em carboneto de tungsténio. O seja a broca fabricada em aço rápido não apresentou sinais de desvantagem, na placa *cross-ply*, em relação ao carboneto de tungsténio, como sucesso com a placa unidirecional.

Verifica-se também que a extensão do dano causado pela furação é bastante superior na placa *cross-ply*, porém nesta situação nem sempre as extensões de danos superiores levam a perda de resistência mecânica também superiores às placas com menos danos aparentes.

5.5.3 Ensaio de início de delaminação

Para iniciar a apresentação dos resultados do ensaio de início de delaminação, começa-se por apresentar na Figura 5.20 uma curva típica do ensaio.

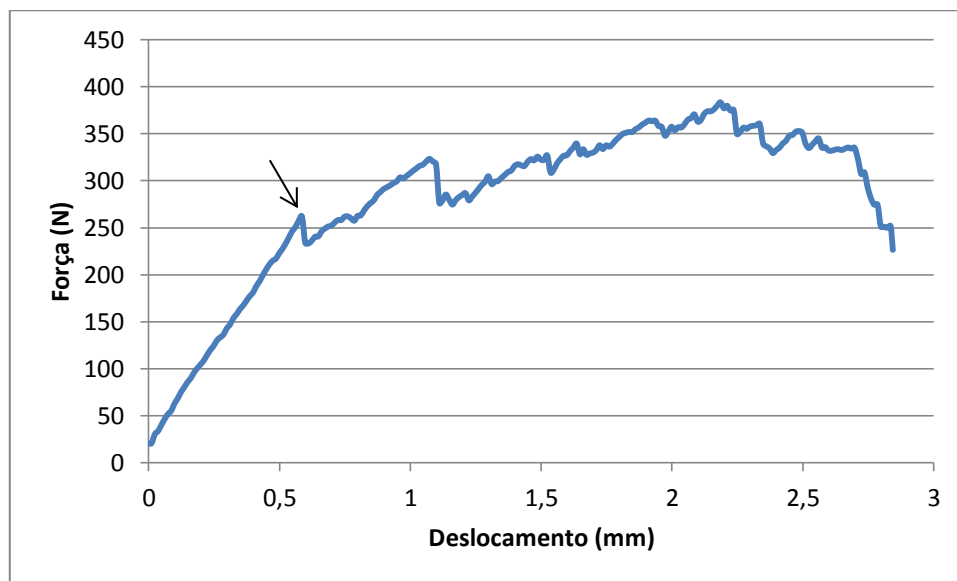


Figura 5.20 – Curva força-deslocamento resultante do ensaio de início de delaminação

Na curva é ilustrada a evolução da força em função do deslocamento da broca-punção sobre a espessura não cortada do provete. O valor de interesse neste trabalho é a força máxima que antecede a primeira queda que é a força de início de delaminação (F_{di}). Pela análise da curva pode-se constatar, no ponto marcado pela seta, a força de início de delaminação. Após esse ponto, como a peça está em compressão existe uma oscilação de força na medida em que as fibras do laminado vão cedendo, até a rutura.

Os resultados dos ensaios de início de delaminação serão aqui apresentados e analisados para cada tipo de configuração das placas separadamente e no final é também feita uma análise da influência desta variável na força de início de delaminação.

5.5.3.1 Placa unidirecional

Para a placa unidirecional só foram feitos ensaios com broca Helicoidal e para três espessuras não cortadas. A espessura 0,60 mm não foi testada. Tendo em conta o número limitado de ensaios, neste ponto só se fazem análises e comparações aos resultados das espessuras não cortadas e a evolução desses resultados com a velocidade de ensaio.

No gráfico da Figura 5.21 são exibidos os valores das forças de início de delaminação para cada velocidade de ensaio. Este ilustra de uma forma geral que a F_{id} tende a baixar com o aumento da velocidade, contudo existe a exceção da espessura não corta 0,15 mm. Nesta situação o efeito é inverso.

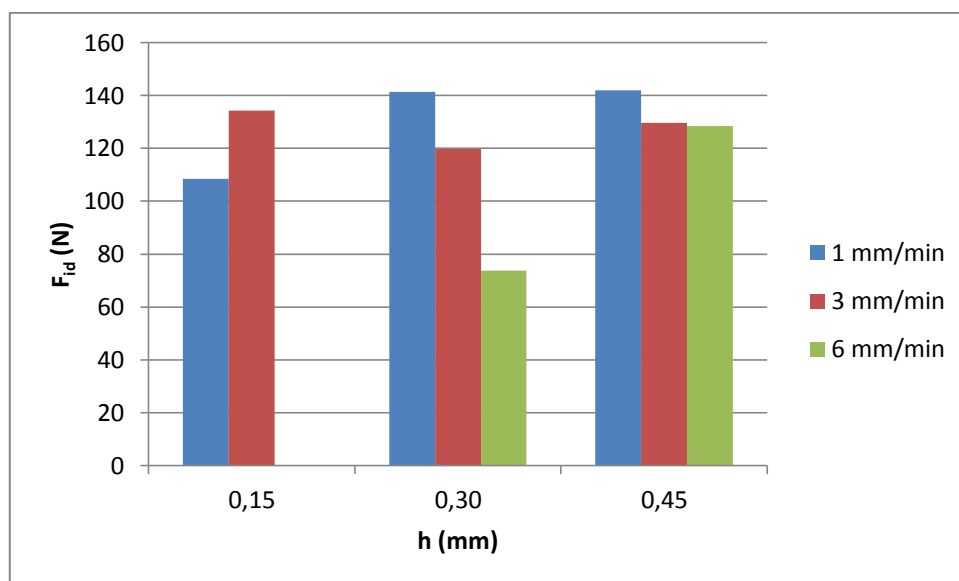


Figura 5.21 – Comparação dos valores da força de início de delaminação para as diferentes velocidades de ensaio para cada espessura não cortada

Por outro lado, quando os resultados obtidos são comparados através da média dos valores para cada velocidade, conforme a Tabela 5.17, verifica-se a tendência clara da diminuição da F_{id} , em função do aumento da velocidade de ensaio. Deve-se porém constatar que a média para a velocidade 6 mm/min foi feita com apenas dois resultados. Esta velocidade não foi aplicada para o ensaio da espessura não cortada de 0,15 mm.

Tabela 5.17 – Média ilustrativa da evolução da força de início de delaminação com o aumento da velocidade de ensaio para a placa unidirecional

Velocidade (mm/min)	1	3	6
F_{id} médio (N)	130,58	127,89	101,11

Analisando ainda a Figura 5.21 pode-se verificar a influência da espessura não cortada na força de início de delaminação. A força aumenta com o aumento da espessura, como que já era de esperar. Aqui também existe a situação da espessura não cortada 0,15 mm para a velocidade 3 mm/min que atua como exceção. O seu valor é superior aos seus correspondentes para as demais espessuras, como se pode verificar em termos numéricos na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 – Evolução da força de início de delaminação para a velocidade de ensaio 3 mm/min

Velocidade	h (mm)		
	0,15	0,30	0,45
3 mm/min	134,21	119,83	129,64

Da Tabela 5.19 onde são apresentadas as médias da F_{id} para as diferentes espessuras, nota-se que estas fazem uma espécie de uma parábola, ao contrário daquilo que se esperava. No entanto, o valor da medida para 0,15 mm está afetado pela falta de resultado para a velocidade 6 mm/min. Presume-se que o valor dessa média seria inferior caso houvesse valor para aquela velocidade que esperaria ser inferior aos seus correspondentes para as outras velocidades.

Tabela 5.19 – Média ilustrativa da evolução da força de início de delaminação com o aumento da espessura não cortada para a placa unidirecional

h (mm)	0,15	0,30	0,45
F_{id} médio (N)	121,33	111,65	133,34

5.5.3.2 Placa cross-ply

No caso da placa do tipo *cross-ply*, já se realizaram mais ensaios com mais combinações de variáveis. Para começar é apresentada, no gráfico da Figura 5.22, a evolução da força de início de delaminação numa placa *cross-ply* em função da espessura não cortada. Este gráfico é um exemplo do ensaio realizado com a broca Helicoidal com velocidade de 1 mm/min e que se mostrou representar claramente a tendência de todas as situações, porém com valores de força diferentes.

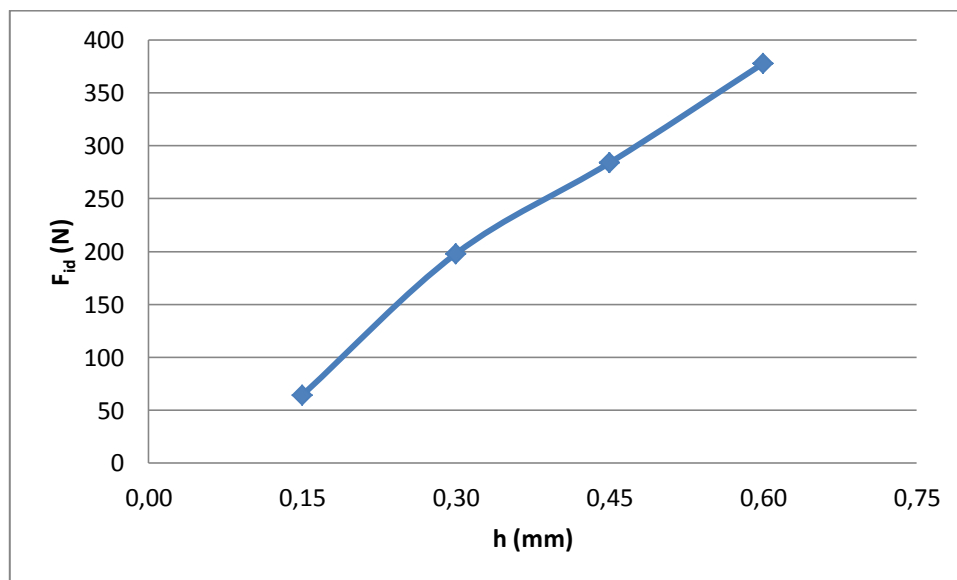


Figura 5.22 – Curva da evolução da força de início de delaminação numa placa *cross-ply* em função da espessura não cortada (Broca: Helicoidal; $v = 1$ mm/min)

De seguida é feita a análise sobre a influência da geometria da broca na força de início de delaminação com auxílio do gráfico da Figura 5.23, onde também é visível a evolução positiva da força com o aumento da espessura não cortada. Na figura é apresentada o exemplo da velocidade 6 mm/min, que traduz o que se passou com todas as velocidades.

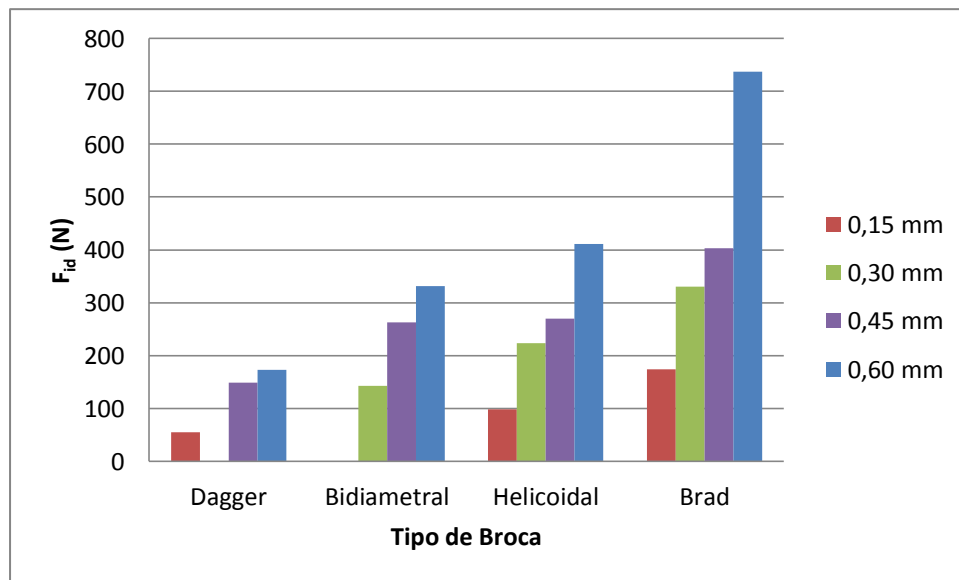


Figura 5.23 – Comparação dos valores da força de início de delaminação na placa *cross-ply* para as diferentes geometrias de broca e para cada espessura não cortada ($v = 6$ mm/min)

Para qualquer uma das conjugações das variáveis verificou-se que a broca Brad atinge forças de início de delaminação superiores às outras. Em algumas situações os valores das forças para aquela broca atingem grandezas de duas ou mais vezes superiores aos outros casos.

Durante os ensaios com a broca Brad foram verificados que por vezes os valores de início de delaminação eram um pouco desproporcionais. Na Tabela 5.20 são exibidos os resultados de um ensaio de exemplo onde se pode constatar a discrepância desses resultados no caso da broca Brad.

Tabela 5.20 – Resultados do ensaio de início de delaminação para diferentes brocas na placa *cross-ply* ($h: 0,45$; $v = 3$ mm/min)

Ensaio	F_{id} (N)		
	Broca Helicoidal	Broca Brad	Broca Dagger
1	285,01	425,10	123,74
2	329,94	148,31	131,45
3	273,13	718,23	118,56
4	326,09	126,60	108,67
Média	303,54	354,56	120,60
Desvio padrão	28,72	277,94	9,56

Os valores atingidos por essa broca podem ser justificados pela influência da parede do furo. Como as brocas utilizadas são da espessura do furo e analisando a ponta desta broca é natural que esta arraste pela parede do furo até atingir a espessura não cortada e desta forma podem-se estar perante uma situação de soma da força de início de delaminação com outras. O mesmo se sucede com a broca Helicoidal, mas em menor escala. Aliás, esta é a broca que aparece em segundo lugar em termos de força de início de delaminação.

Portanto, as forças de início de delaminação são inferiores para o caso da broca Bidiametral e decresce até atingir a broca Dagger que se encontra no outro extremo, atingindo valores mais baixos e com um desvio padrão inferior.

À parte da situação da situação da influência da parede do furo nos resultados, pode-se concluir que as brocas com área de contacto (ou de ponta) superiores são as que atingem forças mais elevadas de início de delaminação.

Quanto à influência da velocidade de ensaio, aqui verificou-se um comportamento inverso do da situação anterior. Ao contrário das placas unidireccionais, aqui notou-se um aumento da força de início de delaminação com o aumento da velocidade de ensaio.

Tabela 5.21 – Média ilustrativa da evolução da força de início de delaminação com o aumento da velocidade de ensaio para a placa *cross-ply*

Velocidade (mm/min)	1	3	6
F_{id} médio (N)	216,65	237,84	268,83

5.5.3.3 Placa quasi-isotrópica

Aqui também é apresentada a curva com a evolução da força de início de delaminação de um exemplo representativo de todas as situações testadas. Para verificar a esta evolução, deve ser analisada a Figura 5.24 (curva para o ensaio à velocidade 3 mm/min com a broca Helicoidal). Verifica-se que a força axial é mais baixa para a espessura não cortada 0,15 mm e tende a aumentar para a espessura 0,30 mm e de seguida é verificada uma tendência de queda na espessura 0,45 mm, mas depois volta a aumentar para máximo que acontece com a espessura 0,60 mm.

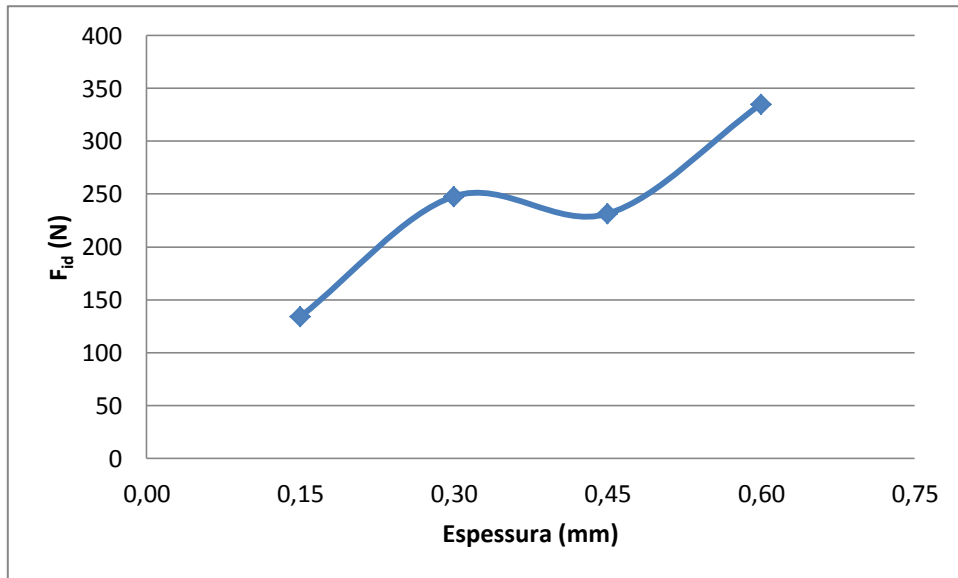


Figura 5.24 – Curva da evolução da força de início de delaminação numa placa quasi-isotrópica em função da espessura não cortada (Broca: Bidiametral; v = 3 mm/min)

Para ensaios em placas quasi-isotrópicas não se utilizaram a velocidade 1 mm/min. No entanto, para averiguar a influência da geometria da broca é apresentado o gráfico da Figura 5.25 que representa os resultados obtidos para a força de início de delaminação nos ensaios às placas quasi-isotrópicas com as diferentes geometrias de brocas para a velocidades 6 mm/min.

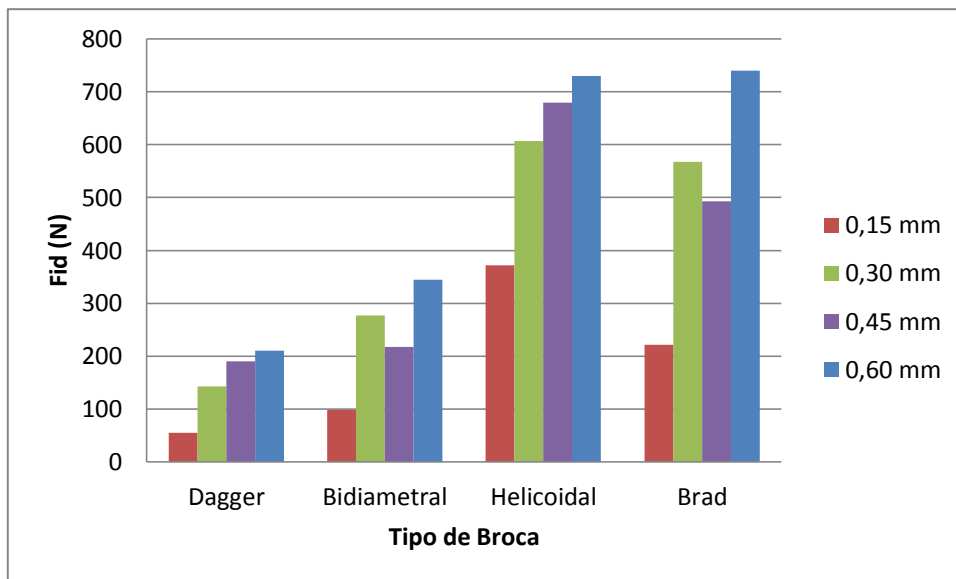


Figura 5.25 – Comparação dos valores da força de início de delaminação na placa quasi-isotrópica para as diferentes geometrias de broca, para cada espessura não cortada e para v = 6 mm/min

O comportamento verificado nestes ensaios é exatamente o mesmo verificado nos ensaios realizados com a velocidade de 3 mm/min. Verifica-se para as brocas Dagger e Helicoidal, um aumento da força de início de delaminação com o aumento da espessura não cortada, porém para as brocas Bidiametral e Brad, a espessura não cortada 0,30 mm apresentam resultados de força superiores à espessura 0,45 mm. Para além desta situação de destaque da espessura 0,30 mm, a força aumenta consoante o aumento da espessura não cortada.

A broca Helicoidal é, para qualquer conjugação das outras variáveis, a broca com valores de forças mais elevados. De seguida, por ordem decrescente, aparecem as brocas Brad, Bidiametral e por fim a Dagger. Tal como na situação *cross-ply*, a broca Brad apresenta grandes variações nos resultados e numa escala inferior, de seguida, aparece a broca Helicoidal.

Analisando a influência das duas velocidades utilizadas nos ensaios das placas quasi-isotrópicas, detetou-se a força de início de delaminação aumenta com o aumento da velocidade de ensaio. Os valores médios desta força para as duas velocidades são apresentados na tabela Tabela 5.22.

Tabela 5.22 – Média ilustrativa da evolução da força de início de delaminação com o aumento da velocidade de ensaio para a placa quasi-isotrópica

Velocidade (mm/min)	3	6
F_{id} médio (N)	347,41	371,80

5.5.3.4 Comparação das placas

Na comparação dos resultados obtidos para as diferentes configurações de placa a primeira observação é que para placa unidirecional a força de início de delaminação tende a aumentar com o aumento da velocidade de corte ao contrário do que acontece com as placas *cross-ply* e quasi-isotrópicas. Nestes dois últimos casos a força aumenta com o aumento da velocidade.

Como as placas unidirecionais foram testadas apenas com brocas helicoidais esta comparação faz mais sentido quando feita apenas para essas brocas. Esta comparação é feita na gráfico da Figura 5.26.

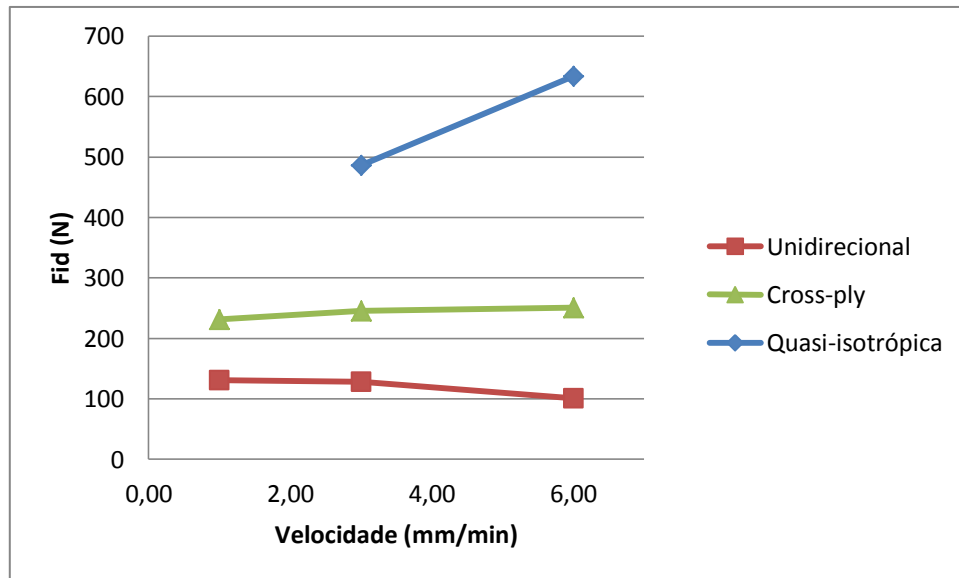


Figura 5.26 – Comparação dos valores da força de início de delaminação entre as diferentes configurações de placas para cada velocidade de ensaio (Broca: Helicoidal)

Como se pode constatar pelo gráfico da figura anterior, assim como acontece de forma geral (com a média de todas as brocas), a força de início de delaminação tende a aumentar com o aumento da velocidade de ensaio para as placas *cross-ply* e quasi-isotrópicas ao contrário do que acontece no caso da unidirecional. É possível também concluir da mesma figura que placas quasi-isotrópicas suportam cargas bastante superiores às suportadas pelas outras para todas as condições de velocidade. De seguida aparece a placa *cross-ply* e por fim a placa unidirecional com valores mais baixos.

Para fazer uma análise comparativa entre os resultados da força de início de delaminação entre cada tipo de configuração de placas para cada espessura não cortada é apresentado o gráfico da Figura 5.27. Neste gráfico são apresentados os valores médios para cada espessura.

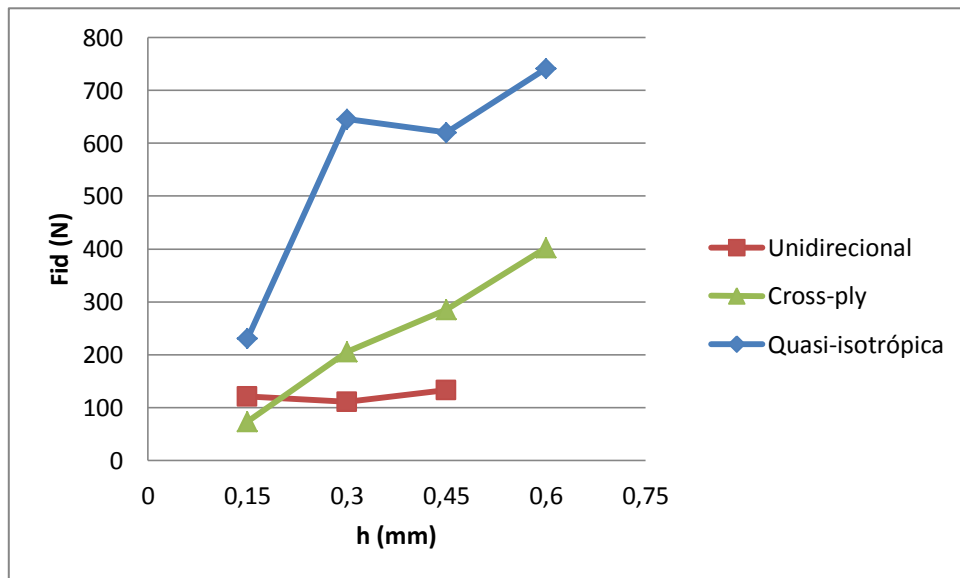


Figura 5.27 – Comparação dos valores da força de início de delaminação entre as diferentes configurações de placas para cada espessura não cortada (Broca: Helicoidal)

Como já tinha sido visto anteriormente, a placa quasi-isotrópica apresenta valores de força bastante superiores às outras, contudo, os valores tendem a convergir para as espessuras de corte mais baixas. Verifica-se também de modo geral que os valores da força apresentam uma tendência de aumento com o aumento da espessura não cortada. As situações de exceção que acontecem para as placas unidirecional e quasi-isotrópica já tinham sido referenciados anteriormente.

A comparação entre as diferentes geometrias de broca é feita apenas entre as placas cross-ply e quasi-isotrópicas. As médias dos valores aqui comparados foram calculadas tendo em conta os valores das velocidades 3 mm/min e 6 mm/min. Isto porque, a velocidade 1 mm/min não foi aplicada para a placa quasi-isotrópica. Os resultados dessas médias são apresentados na Figura 5.28.

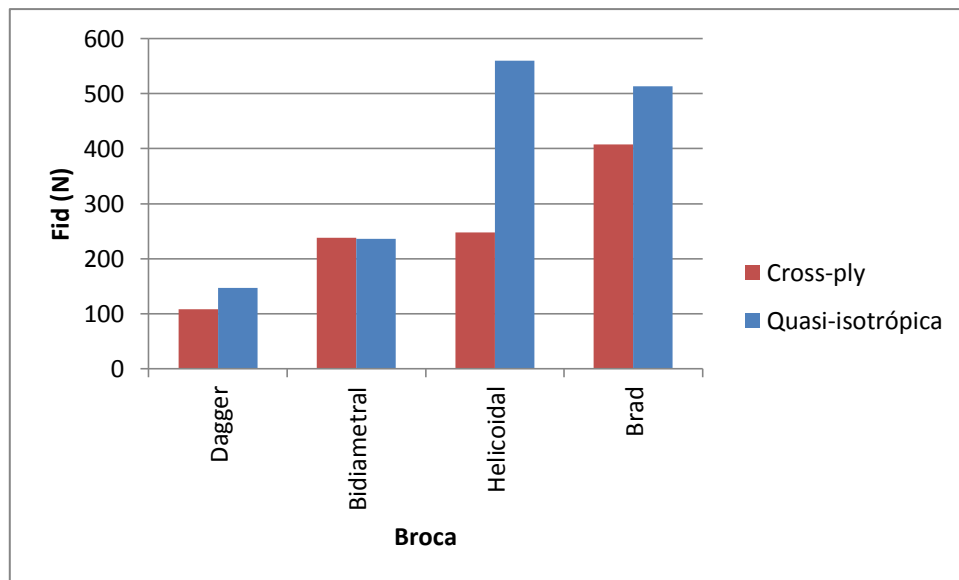


Figura 5.28 – Comparação dos valores da força de início de delaminação entre as placas cross-ply e quasi-isotrópicas para as diferentes geometrias de broca

Tendo em conta todas as espessuras não cortadas e as duas velocidades atrás mencionadas para todas as geometrias de corte as forças atingidas nas placas quasi-isotrópicas são bastante superiores às atingidas nas placas cross-ply para as brocas Helicoidal e Brad. Para a broca Brad à situação quasi-isotrópica continua com valores superiores, mas a diferença é menos destacada e por fim para a Bidiametral quase que não se nota nenhuma diferença, apresentando neste caso a placa cross-ply valores ligeiramente superiores.

Capítulo 6

Conclusões e recomendações para trabalhos futuros

Descrevem-se de modo geral as principais conclusões deste trabalho e são apresentadas recomendações para trabalhos futuros sobre o tema aqui tratado.

6.1 Introdução

Após o estudo teórico do comportamento dos materiais compósitos quando submetidos à furação fizeram-se estudos experimentais com base nas propostas de Khashaba et al. [10] e Lachaud et al. [6]. Depois disso, foram feitas análises aos resultados obtidos nesse trabalho experimental, comparando-os, em alguns casos, com resultados obtidos anteriormente em outros trabalhos e chegaram-se a algumas conclusões que serão aqui apresentadas. Recomendações que se acharam relevantes para a continuação deste estudo serão aqui também deixadas.

6.2 Ensaio *pin-bearing*

Em primeiro lugar, convém realçar que com este ensaio conseguiram-se resultados em termos de evolução da força na medida que o indetador de teste se desloca em compressão na zona de teste do provete, tal como revisto na literatura.

Seguindo pela análise da extensão de dano causado pela furação em que foi utilizado o fator de delaminação ajustado, verificou-se, sem qualquer surpresa, que o avanço é a variável com mais impacto na furação. O aumento do avanço faz aumentar também a extensão do dano, independentemente da conjugação das outras variáveis, tais como geometria de broca, sequência de empilhamento (tipo de configuração de placas) e material de broca.

Melhores resultados a nível de extensão de dano foram conseguidos na placa unidirecional quando comparado com a *cross-ply*. Porém, esta, mesmo com danos

superiores, mostrou ser mais resistente, pois os seus provetes suportaram cargas superiores durante os ensaios.

Quanto ao material de broca ficou claro para a placa unidirecional que o aço rápido é o menos recomendado, quando comparado com carboneto de tungsténio. Contudo, esta situação não ficou explícita no caso da placa *cross-ply*. Este facto é justificado pela ausência de desgaste da broca em aço rápido durante a furação destas placas. Pois, com ela, foram realizados um número limitado de furos e o desgaste apresenta-se como o maior inimigo desse tipo de brocas durante a furação de laminados compósitos.

Durante uma avaliação comparativa da resistência das placas com a extensão do dano, entre as diferentes geometrias de broca, notaram-se para as duas configurações, de que maiores extensões de dano nem sempre levaram a maiores perdas de resistência mecânica. Isto deve-se possivelmente com a forma como o dano se propaga com as diferentes geometrias.

De uma forma geral para evitar grandes extensões de danos nos laminados compósitos aconselham-se a utilização de brocas helicoidais para a placa unidirecional e bidiametral para a *cross-ply*, sempre com baixos avanços.

Quanto ao ensaio de *pin-bearing* em si, verifica-se este pode ser bem aplicado para análise do comportamento de laminados compósitos. Contudo, aconselha-se durante o período e preparação de provetes uma medição criteriosa das suas dimensões de forma a evitar a influência da encurvadura dos provetes nos resultados. De qualquer forma a altura irá sempre depender da altura das amarras do dispositivo de ensaio utilizado.

Por fim, alguns resultados do ensaio não corresponderam com aquilo que se esperava pela análise de danos, mas como, ele foi realizado em provetes que já tinham sido utilizados em ensaios de esmagamento, por isso, sugeria-se, para trabalhos futuros a realização de ensaios *pin-bearing* também em provetes novos para verificar se existe influência do primeiro ensaio na parte da placa utilizada no segundo.

6.3 Ensaio de início de delaminação

Após a realização dos ensaios experimentais para determinação de força de início de delaminação, com sucesso, os resultados foram avaliados de forma comparativa entre as diversas variáveis aplicadas.

A primeira grande conclusão que se tira deste ensaio é que a força de início de delaminação aumenta com o aumento da espessura não cortada da placa. Ou seja,

durante a furação quanto menos material fica exposto por baixo da broca maior é a probabilidade de haver delaminação caso não se ajuste a força axial provocada pela ferramenta de corte.

A geometria da broca influencia muito a força de início de delaminação, contudo, esta influência está associada ao diâmetro projetado da ponta da broca. As brocas com diâmetros inferiores apresentam forças mais baixas, como é o caso das brocas *Dagger* e *Bidiametral*. Contudo, os resultados conseguidos pelas outras brocas (*Helicoidal* e *Brad*) podem ter associados a eles a influência de efeitos externos, como a força de atrito da parede do furo. Isto aliás foi verificado em algumas situações durante os ensaios pela seguinte razão: o diâmetro das brocas utilizadas como punção é igual ao diâmetro do pré-furo. Posto isto, para trabalhos futuros aconselha-se a utilização de broca/punção com diâmetro imediatamente inferior ao diâmetro do furo ou então a utilização de sistemas de posicionamento broca/furo precisos.

A influência da espessura não cortada e da geometria da broca foram verificadas em todas as configurações de placas, com a exceção da unidirecional que só foi testada com a broca *Helicoidal*. Por outro lado, a influência da velocidade de ensaio, varia com o tipo de placa. Para as placas *cross-ply* e *quasi-isotrópica*, a força de início de delaminação aumenta com o aumento da velocidade de ensaio, por outro lado, para a placa unidirecional verificou-se que a força diminui com o aumento da velocidade. Relacionando a velocidade de ensaio com o avanço da ferramenta durante a furação era de esperar que esta última situação sucedesse também para as outras placas.

Por fim foi efetuada uma análise comparativa entre a influência da configuração das placas na força de início de delaminação. Constatou-se que a delaminação na placa *quasi-isotrópica* acontece para cargas bastante superiores às das outras placas. A placa *cross-ply* é a segunda melhor e por fim surge a placa unidirecional.

Neste trabalho foram ensaiados em média quatro furos por cada combinação de variáveis, o que revelou ser muito limitado pelo menos numa fase inicial para caracterização do ensaio. Deve-se assim num trabalho futuro testar cada situação com mais ensaios e determinar valores padrão com utilização de técnicas estatísticas que podem servir assim como referências para a normalização do ensaio. Numa fase inicial pode-se também utilizar, associadas às técnicas estatísticas, técnicas de análise não destrutiva durante os ensaios para determinação do ponto exato de delaminação de forma a definir critérios de rigorosos para determinação do ponto de delaminação graficamente. Para além disso, podia-se fazer também uma pré-análise de danos aos furos realizados para detenção de possíveis danos que possam influenciar os resultados.

Capítulo 7

Referências

- [1] Jain S., and Yang D. C. H., 1994, “Delamination-Free Drilling of Composite Laminates,” *J. Eng. Ind.*, **116**(4), p. 475.
- [2] Murthy B. R. N., and Rodrigues L. L. R., 2013, “System Dynamics Approach for Optimization of Process Parameters to Reduce Delamination in Drilling of GFRP Composites,” *Int. J. Curr. Eng. Technol.*, **3**(3), pp. 1013–1019.
- [3] Stone R., and Krishnamurthy K., 1996, “A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite-epoxy laminates,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **36**(9), pp. 985–1003.
- [4] Khashaba U. a., 2004, “Delamination in drilling GFR-thermoset composites,” *Compos. Struct.*, **63**(3-4), pp. 313–327.
- [5] Kassapoglou C., 1999, “Minimum cost and weight design of fuselage frames: Part B: cost considerations, optimization, and results,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **30**(7), pp. 895–904.
- [6] Lachaud F., Piquet R., Collombet F., and Surcin L., 2001, “Drilling of composite structures,” *Compos. Struct.*, **52**(3-4), pp. 511–516.
- [7] Piquet R., Lachaud F., Ferret B., and Swider P., 2000, “Étude analytique et expérimentale du perçage de plaques minces en carbone/époxy,” *Mécanique Ind.*, **1**(1), pp. 105–111.
- [8] Durão L. M. P., 2005, “Machining of hybrid composites,” Faculty of Engineering – University of Porto.
- [9] Durão L. M. P., Gonçalves D. J. S., Moura M. F. S. F. de, and Marques A. T., 2012, “Modelação da Furação de Laminados por Elementos Finitos,” *Rev. Mecânica Exp. - APAET*, **20**, pp. 109–116.
- [10] Khashaba U. a., El-Sonbaty I. a., Selmy a. I., and Megahed a. a., 2010, “Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: Part I – Effect of machining parameters,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **41**(3), pp. 391–400.
- [11] Chita R. J. de S., 2012, “Estudo de delaminação em compósitos,” ISEP.
- [12] Magalhães A. G. de, Moura M. F. S. F. de, and Morais A. B. de, 2009, *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, Publindustria.

- [13] Schwartz M. M., 1984, Composite Materials Handbook, McGraw-Hill Companies.
- [14] (U.S.) P. N. N. L., and Energy U. S. D. of, 1994, Materials Science and Technology Teachers Handbook, Pacific Northwest National Laboratory.
- [15] Avallone E. A., Baumeister T., and Sadegh A. M., 2007, Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers, McGraw-Hill.
- [16] Owens Corning, "Aplicações para Compósitos" [Online]. Available: <http://www.owenscorning.com.br/aplicacao.asp>. [Accessed: 03-Aug-2013].
- [17] ANCA, "ANCA Ajuda a Ind. Aeroespacial na Fabr. de Novas Aeronaves com Mat. Compósitos" [Online]. Available: <http://www.anca.com/Resources/Articles/Aerospace-Applications/ANCA-Helps-Aerospace-Industry-Manufacture-New-Comp?lang=pt-PT>. [Accessed: 08-Jul-2013].
- [18] Aviação.org, "Materiais compósitos na aviação" [Online]. Available: <http://www.aviao.org/especiais/materiais-compositos/>. [Accessed: 08-Jul-2013].
- [19] Boeing, "787 Dreamliner" [Online]. Available: http://www.newairplane.com/787/design_highlights/#/home. [Accessed: 08-Jul-2013].
- [20] Airbus, "A380" [Online]. Available: <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a380family/>. [Accessed: 08-Jul-2013].
- [21] Rezende M., 2007, "Fractografia de compósitos estruturais," *Polímeros Ciência e Tecnol.*, **17**(3), pp. 4–11.
- [22] Staab G. H., 1999, *Laminar Composites*, Butterworth-Heinemann.
- [23] Morais A. M. B. de, "Fabrico e Utilização Estrutural de Laminados de Materiais Compósitos" [Online]. Available: <http://www.engenhariacivil.com/fabrico-utilizacao-estrutural-laminados-materiais-compositos>. [Accessed: 25-Oct-2013].
- [24] Pinheiro M. F. de C. A., 2008, "Compósitos avançados reforçados com fibras naturais para construção," Universidade de Aveiro.
- [25] Silva J. F. M. G. da, 2005, "Pré-impregnados de matriz termoplástica: fabrico e transformação por compressão a quente e enrolamento filamentar," Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [26] Okutan B., 2001, "Stress and failure analysis of laminated composite pinned joints," Dokuz Eylül University.

- [27] Liu D., Tang Y., and Cong W. L., 2012, “A review of mechanical drilling for composite laminates,” *Compos. Struct.*, **94**(4), pp. 1265–1279.
- [28] Groover M. P., 2010, *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*, John Wiley & Sons.
- [29] Ruas M., 1982, *Tecnologia Mecânica - Formação Profissional*, Plátano, Lisboa.
- [30] Lau W. S., Yue T. M., Lee T. C., and Lee W. B., 1995, “Un-conventional machining of composite materials,” *J. Mater. Process. Technol.*, **48**(1–4), pp. 199–205.
- [31] Lau W. S., Lee W. B., and Pang S. Q., 1990, “Pulsed Nd: YAG Laser Cutting of Carbon Fibre Composite Materials,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, **39**(1), pp. 179–182.
- [32] Mathew J., Goswami G. L., Ramakrishnan N., and Naik N. K., 1999, “Parametric studies on pulsed Nd:YAG laser cutting of carbon fibre reinforced plastic composites,” *J. Mater. Process. Technol.*, **89–90**(0), pp. 198–203.
- [33] Cenna A. A., and Mathew P., 2002, “Analysis and prediction of laser cutting parameters of fibre reinforced plastics (FRP) composite materials,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **42**(1), pp. 105–113.
- [34] Voisey K. T., Fouquet S., Roy D., and Clyne T. W., 2006, “Fibre swelling during laser drilling of carbon fibre composites,” *Opt. Lasers Eng.*, **44**(11), pp. 1185–1197.
- [35] Herzog D., Jaeschke P., Meier O., and Haferkamp H., 2008, “Investigations on the thermal effect caused by laser cutting with respect to static strength of CFRP,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **48**(12–13), pp. 1464–1473.
- [36] Guu Y. H., Hocheng H., Tai N. H., and Liu S. Y., 2001, “Effect of electrical discharge machining on the characteristics of carbon fiber reinforced carbon composites,” *J. Mater. Sci.*, **36**(8), pp. 2037–2043.
- [37] Lau W. S., Wang M., and Lee W. B., 1990, “Electrical discharge machining of carbon fibre composite materials,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **30**(2), pp. 297–308.
- [38] Shanmugam D. K., Nguyen T., and Wang J., 2008, “A study of delamination on graphite/epoxy composites in abrasive waterjet machining,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **39**(6), pp. 923–929.
- [39] Lemma E., Chen L., Siores E., and Wang J., 2002, “Study of cutting fiber-reinforced composites by using abrasive water-jet with cutting head oscillation,” *Compos. Struct.*, **57**(1–4), pp. 297–303.

- [40] Azmir M. A., and Ahsan A. K., 2009, “A study of abrasive water jet machining process on glass/epoxy composite laminate,” *J. Mater. Process. Technol.*, **209**(20), pp. 6168–6173.
- [41] Lin S. C., and Chen I. K., 1996, “Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed,” *Wear*, **194**(1–2), pp. 156–162.
- [42] Durão L. M. P., Tavares J. M. R. S., Marques A. T., Magalhães A. G., and Figueiredo M., 2004, “Estudo da furação de laminados carbono-epóxico com diferentes brocas,” 4^{as} Jornadas Politécnicas Eng.
- [43] Teti R., 2002, “Machining of Composite Materials,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, **51**(2), pp. 611–634.
- [44] Persson E., Eriksson I., and Zackrisson L., 1997, “Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **28**(2), pp. 141–151.
- [45] Hocheng H., and Tsao C. C., 2005, “The path towards delamination-free drilling of composite materials,” *J. Mater. Process. Technol.*, **167**(2–3), pp. 251–264.
- [46] Abrate S., and Walton D. A., 1992, “Machining of composite materials. Part I: Traditional methods,” *Compos. Manuf.*, **3**(2), pp. 75–83.
- [47] Arola D., and Ramula M., 1994, “Machining-induced surface texture effects on the flexural properties of a graphite/epoxy laminate,” *Composites*, **25**(8), pp. 822–834.
- [48] Hocheng H., and Puw H. Y., 1993, “Machinability of Fiber-Reinforced Thermoplastics in Drilling,” *J. Eng. Mater. Technol.*, **115**(1), pp. 146–149.
- [49] Ogawa K., Aoyama E., Inoue H., Hirogaki T., Nobe H., Kitahara Y., Katayama T., and Gunjima M., 1997, “Investigation on cutting mechanism in small diameter drilling for GFRP (thrust force and surface roughness at drilled hole wall),” *Compos. Struct.*, **38**(1–4), pp. 343–350.
- [50] Koplev A., Lystrup A., and Vorm T., 1983, “The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP,” *Composites*, **14**(4), pp. 371–376.
- [51] Wang D. H., Ramulu M., and Arola D., 1995, “Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part II: multi-directional laminate,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **35**(12), pp. 1639–1648.
- [52] Wang X. M., and Zhang L. C., 2003, “An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **43**(10), pp. 1015–1022.
- [53] Durão L. M. P., Gonçalves D. J. S., S.Tavares J. M. R., Albuquerque V. H. C. de, and Baptista A. M., 2011, “Delaminação na furação de laminados carbono/epóxico,” CIBEM 10, Porto.

- [54] Ho-Cheng H., and Dharan C. K. H., 1990, “Delamination During Drilling in Composite Laminates,” *J. Eng. Ind.*, **112**(3), pp. 236–239.
- [55] Mishra R., Malik J., Singh I., and Davim J. P., 2010, “Neural network approach for estimating the residual tensile strength after drilling in uni-directional glass fiber reinforced plastic laminates,” *Mater. Des.*, **31**(6), pp. 2790–2795.
- [56] Hocheng H., and Tsao C. ., 2003, “Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits,” *J. Mater. Process. Technol.*, **140**(1-3), pp. 335–339.
- [57] Paulo Davim J., Reis P., and Conceição António C., 2004, “Drilling fiber reinforced plastics (FRPs) manufactured by hand lay-up: influence of matrix (Viapal VUP 9731 and ATLAC 382-05),” *J. Mater. Process. Technol.*, **155-156**, pp. 1828–1833.
- [58] Abrão A. M., Faria P. E., Rubio J. C. C., Reis P., and Davim J. P., 2007, “Drilling of fiber reinforced plastics: A review,” *J. Mater. Process. Technol.*, **186**(1-3), pp. 1–7.
- [59] Piquet R., Ferret B., Lachaud F., and Swider P., 2000, “Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **31**(10), pp. 1107–1115.
- [60] Park K. Y., Choi J. H., and Lee D. G., 1995, “Delamination-Free and High Efficiency Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastics,” *J. Compos. Mater.*, **29**(15), pp. 1988–2002.
- [61] Durão L. M. P., Magalhães A. G., Marques A. T., and Tavares J. M. R. S., 2006, “Avaliação do dano em laminados carbono/epóxico após furação,” *I Jornada Luso-Brasileira de Ensino e Tecnologia em Engenharia*, Porto Alegre, Brasil.
- [62] Dharan C. K. H., and Won M. S., 2000, “Machining parameters for an intelligent machining system for composite laminates,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **40**(3), pp. 415–426.
- [63] Davim J. P., and Reis P., 2003, “Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave—experimental and statistical study,” *Mater. Des.*, **24**(5), pp. 315–324.
- [64] Rubio J. C. C., Silva L. R., Abrão A. M., Faria P. E., Correia A. E., and Davim J. P., 2007, “Furação com alta velocidade de corte em compósitos poliméricos reforçados com fibras de vidro,” *Ciência Tecnol. dos Mater.*, **19**(3-4), pp. 83–87.
- [65] König W., Wulf C., Graß P., and Willerscheid H., 1985, “Machining of Fibre Reinforced Plastics,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, **34**(2), pp. 537–548.
- [66] Komanduri R., 1993, “Machining fiber-reinforced composites,” *Mech. Eng.*, **115**(4), pp. 58–64.

- [67] Ramulu M., and Arola D., 1994, "Traditional and Non-traditional Machining of Fiber Reinforced Plastic Composites," 39th International Sampe Symposium and Exhibition, Anaheim, California, pp. 1073–1087.
- [68] Colligan K., and Ramulu M., 1992, "The effect of edge trimming on composite surface plies," *Manuf. Rev.*, **5**(4), pp. 274–283.
- [69] Tagliaferri V., Caprino G., and Diterlizzi A., 1990, "Effect of drilling parameters on the finish and mechanical properties of GFRP composites," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **30**(1), pp. 77–84.
- [70] Mathew J., Ramakrishnan N., and Naik N. K., 1999, "Investigations into the effect of geometry of a trepanning tool on thrust and torque during drilling of GFRP composites," *J. Mater. Process. Technol.*, **91**(1–3), pp. 1–11.
- [71] Mathew J., Ramakrishnan N., and Naik N. K., 1999, "Trepanning on unidirectional composites: delamination studies," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **30**(8), pp. 951–959.
- [72] Caprino G., and Tagliaferri V., 1995, "Damage development in drilling glass fibre reinforced plastics," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **35**(6), pp. 817–829.
- [73] Rawat S., and Attia H., 2009, "Characterization of the dry high speed drilling process of woven composites using Machinability Maps approach," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, **58**(1), pp. 105–108.
- [74] Gaitonde V. N., Karnik S. R., Rubio J. C., Correia A. E., Abrão A. M., and Davim J. P., 2008, "Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites," *J. Mater. Process. Technol.*, **203**(1–3), pp. 431–438.
- [75] Grilo T. J., Paulo R. M. F., Silva C. R. M., and Davim J. P., 2013, "Experimental delamination analyses of CFRPs using different drill geometries," *Compos. Part B Eng.*, **45**(1), pp. 1344–1350.
- [76] De Albuquerque V. H. C., Tavares J. M. R. S., and Durao L. M. P., 2010, "Evaluation of Delamination Damage on Composite Plates using an Artificial Neural Network for the Radiographic Image Analysis," *J. Compos. Mater.*, **44**(9), pp. 1139–1159.
- [77] Durão L. M. P., Gonçalves D. J. S., Tavares J. M. R. da S., Albuquerque V. H. C. de de, and Marques A. T., 2010, "Drilling Process Of Composite Laminates – A Tool Based Analysis," ECCM14, Budapest, Hungary.
- [78] Gao S.-L., and Kim J.-K., 1999, "Scanning acoustic microscopy as a tool for quantitative characterisation of damage in CFRPs," *Compos. Sci. Technol.*, **59**(3), pp. 345–354.

- [79] Chen W.-C., 1997, “Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **37**(8), pp. 1097–1108.
- [80] Faraz A., Biermann D., and Weinert K., 2009, “Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **49**(15), pp. 1185–1196.
- [81] Mehta M., Reinhart T. J., and Soni A. H., 1992, “Effect of Fastener Hole Drilling Anomalies on Structural Integrity of PMR-15/Gr Composite Laminates,” *Machining of composite materials Symposium*, pp. 113–126.
- [82] Davim J., Rubio J., and Abrao a, 2007, “A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates,” *Compos. Sci. Technol.*, **67**(9), pp. 1939–1945.
- [83] Davim J. P., Reis P., and António C. C., 2004, “Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up,” *Compos. Sci. Technol.*, **64**(2), pp. 289–297.
- [84] Sardiñas R. Q., Reis P., and Davim J. P., 2006, “Multi-objective optimization of cutting parameters for drilling laminate composite materials by using genetic algorithms,” *Compos. Sci. Technol.*, **66**(15), pp. 3083–3088.
- [85] Kilickap E., 2010, “Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite,” *Expert Syst. Appl.*, **37**(8), pp. 6116–6122.
- [86] Karnik S. R., Gaitonde V. N., Rubio J. C., Correia A. E., Abrão A. M., and Davim J. P., 2008, “Delamination analysis in high speed drilling of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model,” *Mater. Des.*, **29**(9), pp. 1768–1776.
- [87] Tsao C. C., and Hocheng H., 2005, “Computerized tomography and C-Scan for measuring delamination in the drilling of composite materials using various drills,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **45**(11), pp. 1282–1287.
- [88] Arul S., Vijayaraghavan L., Malhotra S. K., and Krishnamurthy R., 2006, “The effect of vibratory drilling on hole quality in polymeric composites,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **46**(3-4), pp. 252–259.
- [89] Davim J. ., and Reis P., 2003, “Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments,” *Compos. Struct.*, **59**(4), pp. 481–487.
- [90] Iliescu D., Gehin D., Gutierrez M. E., and Girot F., 2010, “Modeling and tool wear in drilling of CFRP,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **50**(2), pp. 204–213.

- [91] Abrão A. M., Rubio J. C. C., Faria P. E., and Davim J. P., 2008, “The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite,” *Mater. Des.*, **29**(2), pp. 508–513.
- [92] Kim D., and Ramulu M., 2004, “Drilling process optimization for graphite/bismaleimide–titanium alloy stacks,” *Compos. Struct.*, **63**(1), pp. 101–114.
- [93] Durão L. M. P., Tavares J. M. R. S., Marques A. T., Magalhães A. G., and Freitas M., 2008, “Estudo da Influência da Pré-Furação no Dano em Laminados Carbono/Epóxido,” *Rev. Mecânica Exp. - APAET*, **15**, pp. 73–81.
- [94] Hocheng H., and Tsao C. C., 2006, “Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **46**(12-13), pp. 1403–1416.
- [95] Tsao C. C., and Hocheng H., 2005, “Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **45**(11), pp. 1261–1270.
- [96] Capello E., 2004, “Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates,” *J. Mater. Process. Technol.*, **148**(2), pp. 186–195.
- [97] Won M. S., and Dharan C. K. H., 2002, “Drilling of Aramid and Carbon Fiber Polymer Composites,” *J. Manuf. Sci. Eng.*, **124**(4), pp. 778–783.
- [98] Enemuoh E. U., El-Gizawy A. S., and Chukwujekwu Okafor A., 2001, “An approach for development of damage-free drilling of carbon fiber reinforced thermosets,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **41**(12), pp. 1795–1814.
- [99] ASTM Standards, ASTM D5961 / D5961M, Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates, ASTM International.
- [100] Wu P. S., and Sun C. T., 1998, “Modeling bearing failure initiation in pin-contact of composite laminates,” *Mech. Mater.*, **29**(3-4), pp. 325–335.
- [101] ISO, 1998, ISO 14125 - Fibre-reinforced plastic composites - Determination of flexural properties.

Anexo A

Código CNC para execução de furos

Apresenta-se aqui o código CNC base usado no equipamento HAAS (ISO modificado) das Oficinas Mecânicas do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP, para a execução dos furos nas placas utilizadas para o ensaio de início de delaminação.

```
%  
O00500(SERIE500)  
( SETUP1 - 12-04-2013 - 17:27:29 )  
( FEATURECAM - HAAS VF )  
( MACHINE TIME = 0:26.3 )  
  
( DRILL HOLE1 )  
G00 G17 G21 G40 G94  
T13 M6 ( EM::06.0::C135 6.0 DIA. )  
G54 G90 X-63.0 Y0. S7000 M03  
G43 H13 Z29.0 M08  
  
G81 G99 Z0.15 R7.0 F100.  
  
N10 P9901 M97  
G0 G80 Z29.0  
  
G00 G53 G49 Z0. M09  
G53 Y0.  
M30  
  
N9901 ( MACRO FOR HOLE1 )  
X-45.0  
X-27.0  
X-9.0  
X9.0  
X27.0  
X45.0  
G98 X63.0  
M99  
%
```

Em cada placa foram efetuados vários furos, dependendo o número exato do comprimento de cada uma. O que foi importante garantir são, a distância fixa entre os furos de 18 mm, o comprimento de pelo menos 60 mm para a zona de aperto, tendo em conta as especificações do dispositivo concebido e uma distância mínima de 10 mm entre o centro dos furos localizados nas extremidades e o limite da zona de aperto. Foram executados furos de diâmetro de 6 mm.

Os principais parâmetros de corte utilizados são:

- Velocidade de rotação da ferramenta, $n = 7000$ rpm (Código: S7000);
- Velocidade do avanço, $f = 100$ mm/min (Código: F100)

Outras considerações importantes sobre o código:

- O zero foi marcado no centro da peça (eixos x e y);
- Na vertical o zero foi marcado na inferior da peça;
- O X e o Y do comando G54 indicam a posição do primeiro furo;
- G43 é ligado a refrigeração através do comando M08;
- O Z do comando G81 indica a profundidade do furo, neste caso indica a espessura não cortada;
- No macro N9901 são indicadas as posições dos furos seguintes.

Anexo B

Procedimentos para ensaio *pin-bearing*

(Adaptado do procedimento de ensaio para ensaio “pin-bearing” elaborado no âmbito deste projeto para a máquina de ensaios Shimadzu Autograph com célula de carga de 100 kN do Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP. Para a realização dos ensaios com mais rigor, deve-se consultar o referido manual na sua versão completa).

Anexo B.1 Descrição do procedimento

Antes de iniciar o ensaio, o operador deve-se familiarizar com os comandos da máquina de ensaios – Shimadzu e inteira-se das instruções de segurança da mesma.

Este ensaio consiste em comprimir um provete, aplicando uma carga vertical, por um semicírculo previamente efetuado com um indentador cilíndrico (igual ao de ensaio de flexão à três pontos). A força máxima registada durante o ensaio é a força responsável pela rutura da placa.

Preparação dos provetes:

Dimensões recomendadas para os provetes (ver desenho do provete na Figura B.1), tendo em conta as dimensões do dispositivo concebido:

- Altura mínima: 80 mm;
- Largura: 35 mm;
- Espessura: 3,5 mm;
- Diâmetro do furo: 6 mm (resulta num raio de semicírculo de 3 mm, após corte).

As placas podem ser cortadas inicialmente com o comprimento de 120 mm, depois furadas no centro com uma broca de 6 mm e por fim cortadas a passar pelo centro do furo, de forma a obter dois provetes com as mesmas dimensões.

Para este ensaio foram utilizadas placas previamente ensaiadas para ensaio de esmagamento segundo a norma ASTM D5961/D5961M. As placas foram cortadas a passar pelo furo, de forma a obter um provete com um semicírculo com raio de 3 mm.

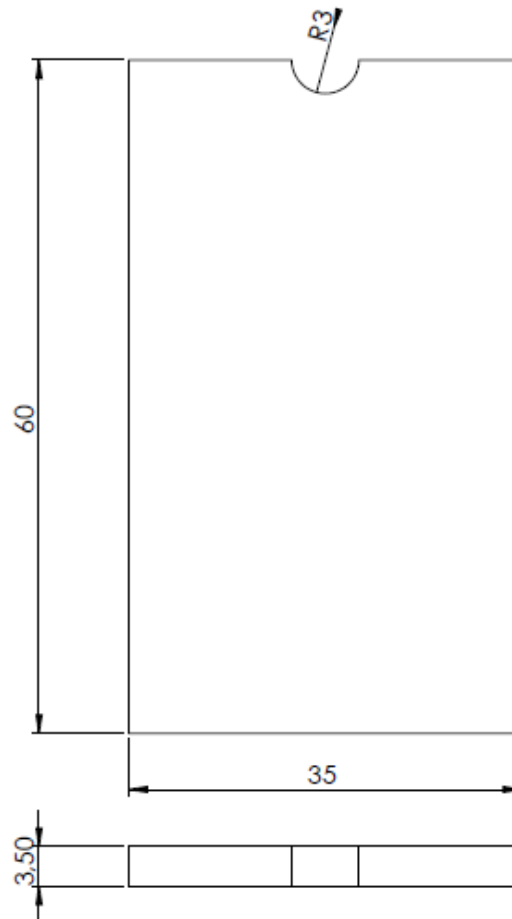


Figura B.1 – Desenho exemplificativo do provete para ensaios *pin-bearing*

Procedimento de Ensaio:

1. Identificar, medir e registar as medidas dos provetes disponíveis;
2. Montar o dispositivo de ensaio concebido especificamente para este ensaio (Ver secção seguinte – “**Montagem do dispositivo de ensaio e fixação do provete**”);
3. Ligar a máquina no interruptor geral para a posição ON e no botão que se encontra na parte de trás da máquina lateralmente;
4. Ligar o computador de apoio à máquina e abrir o programa Trapezium (o ícone de acesso está situado no “desktop”), Introduzir o usuário e a palavra passe:

Usuário: *user*

Palavra passe: *user*

5. Colocar o travessão e a cabeça de amarração superior na posição de trabalho com a ajuda do controlador “Smart”. Para isso carregar na tecla “Manual” e movimentar a cabeça carregando continuamente nas teclas “Up” ou “Down”;
6. Fixar o provete na máquina de ensaios, verificando o correto alinhamento do mesmo com o dispositivo de fixação (Ver secção seguinte – “**Montagem do dispositivo de ensaio e fixação do provete**”);
7. No programa Trapezium seleccionar o tipo de ensaio que pretende efetuar. Clicar na janela “abrir método). Na barra de ferramentas abrir a pasta “Methods” e abrir o ensaio pretendido. Nome do arquivo do método: “*pin_bearing*”, baseado no método de ensaios de flexão em três pontos. **Nota:** Deve-se neste ponto seleccionar a velocidade de ensaio;
8. Após seleccionar o teste, este abre o programa correspondente. No lado esquerdo clicar em “Executar ensaio com este método”. Quando a janela de ensaio se abrir basta seleccionar o botão “Iniciar” no campo superior esquerdo, para que o ensaio comece a ser executado;
9. Após atingir a carga máxima, o ensaio deve ser interrompido;
10. Retirar o provete ensaiado;
11. No programa de computador guardar o ensaio seleccionando “gravar”. Guardar o Relatório, para esta operação basta exportar o relatório para PDF e/ou para Excel, seleccionando a função “export”.

Nota: Velocidade de ensaio recomendada: 1 mm/min.

Montagem do dispositivo de ensaio e fixação do provete (ver Figura B.2):

1. Retirar o dispositivo de fixação do provete para o ensaio de tração (ou outro) caso esteja previamente montado na máquina;
2. Montar a base utilizada no ensaio de flexão;
3. Fixar a base de ensaio *pin-bearing* (Figura B.3 do Anexo B.2) à base do ensaio de flexão;
4. Fixar a peça de aperto do provete com ligação à base (Figura B.4 do Anexo B.2);
5. Fixar peça de aperto sem ligação à base (Figura B.5 do Anexo B.2), à peça do ponto 4 sem apertar muito;

6. Montar o indentador cilíndrico na parte superior da máquina de ensaio (utilizado também no ensaio de tração).

Nota: utilizar o cilindro existente com o diâmetro mais adequado tendo em conta o diâmetro do furo;

7. Montar o provete entre às peças dos pontos 4 e 5 e apertar, garantindo o seu alinhamento com o cilindro.

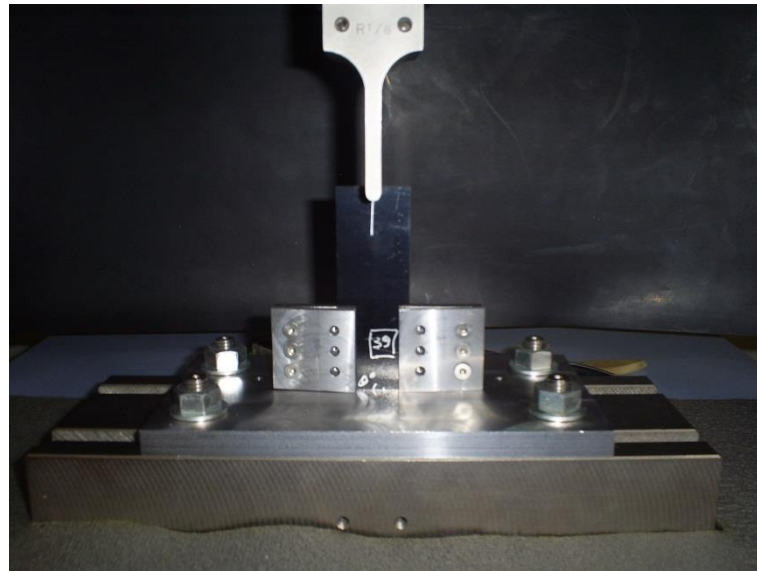


Figura B.2 – Sistema de ensaio *pin-bearing* montado

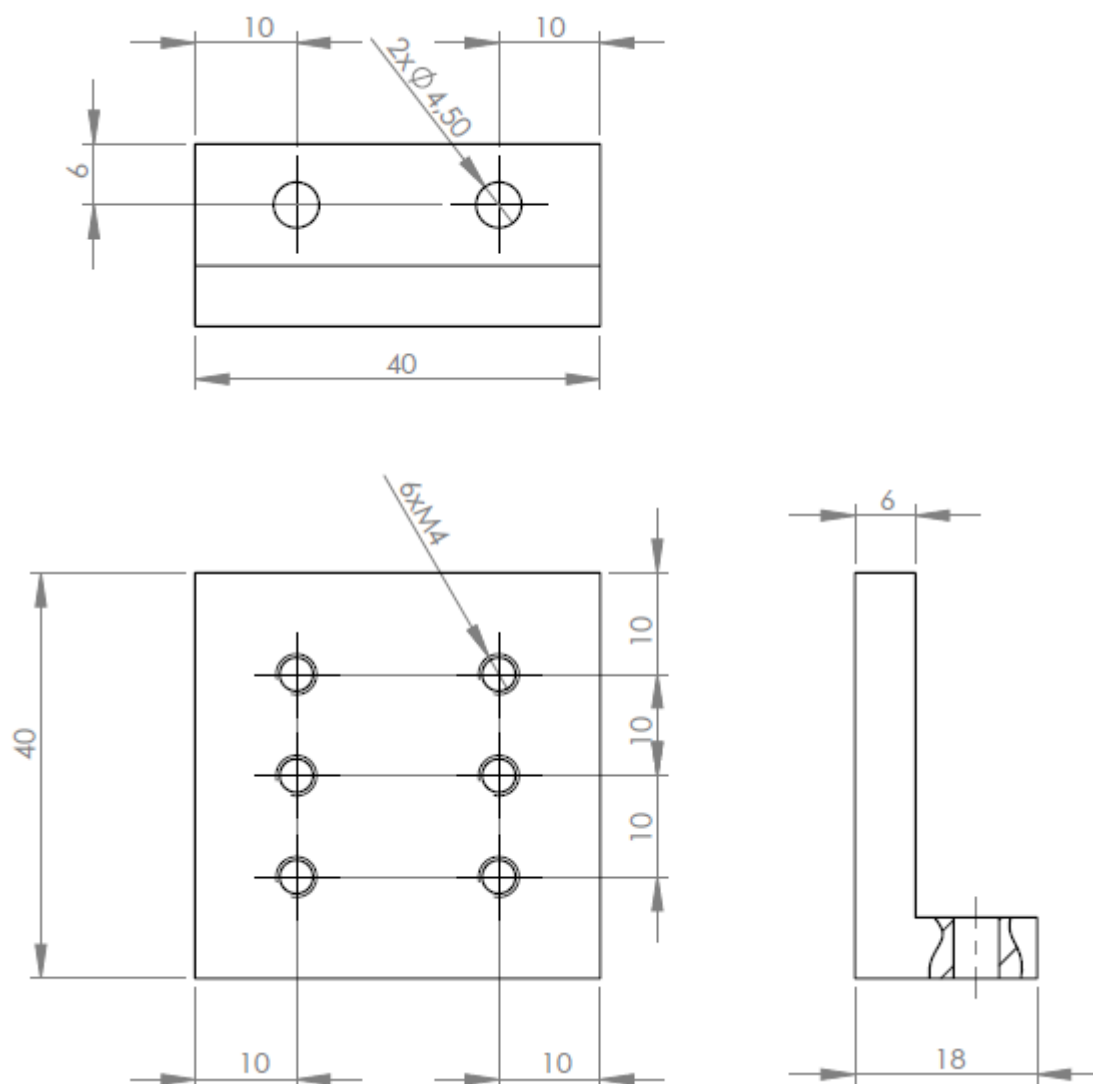


Figura B.4 - Peça de aperto com ligação à base

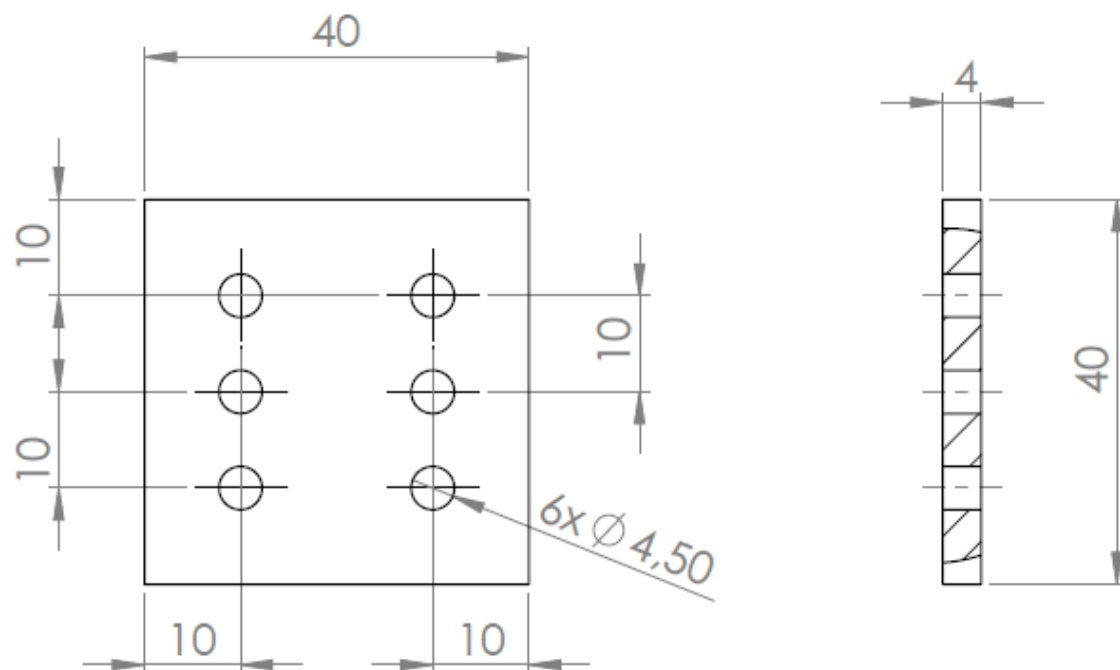


Figura B.5 - Peça de aperto sem ligação à base

Anexo C

Procedimentos para ensaio de início de delaminação

(Adaptado do procedimento de ensaio para ensaio de início de delaminação elaborado durante esta investigação para a máquina de ensaios Shimadzu Autograph com célula de carga de 100 kN do Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP).

Anexo C.1 Descrição do procedimento

Antes de iniciar o ensaio, o operador deve-se familiarizar com os comandos da máquina de ensaios – Shimadzu e inteira-se das instruções de segurança da mesma.

Este ensaio consiste em aplicar uma carga perpendicular sobre uma área não cortada, com espessura controlada, de um furo cego com uma broca que funciona como punção e registar a força máxima que é a força responsável pela delaminação.

Preparação dos provetes:

Dimensões recomendadas para os provetes, tendo em conta as dimensões do dispositivo concebido:

- Comprimento: depende do comprimento da placa existente. Deve-se no entanto garantir que não ultrapasse a área útil de teste da máquina;
- Largura: menor ou igual a 35 mm;
- Espessura: 3,5 mm;
- Diâmetro do furo: 6 mm;
- Deve-se garantir um espaçamento de 18 mm entre os furos;
- A profundidade dos furos depende da espessura não cortada que se pretende testar;
- Deve-se adicionalmente resguardar uma distância de 60 mm para o aperto do provete durante o ensaio, por isso, a distância recomendada entre as extremidades e o centro do primeiro deve ser no mínimo de 70 mm.

Desenho exemplificativo de um provete preparado para 7 ensaios é mostrado na Figura C. e na Figura C.2 é exibido o seu desenho técnico (espessura não cortada de 0,15 mm):

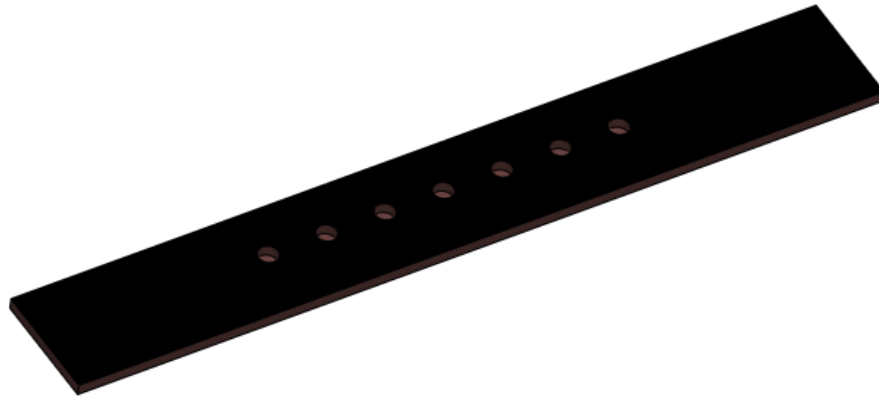


Figura C.1 – Exemplo de configuração de provete com 7 furos para ensaio de início de delaminação

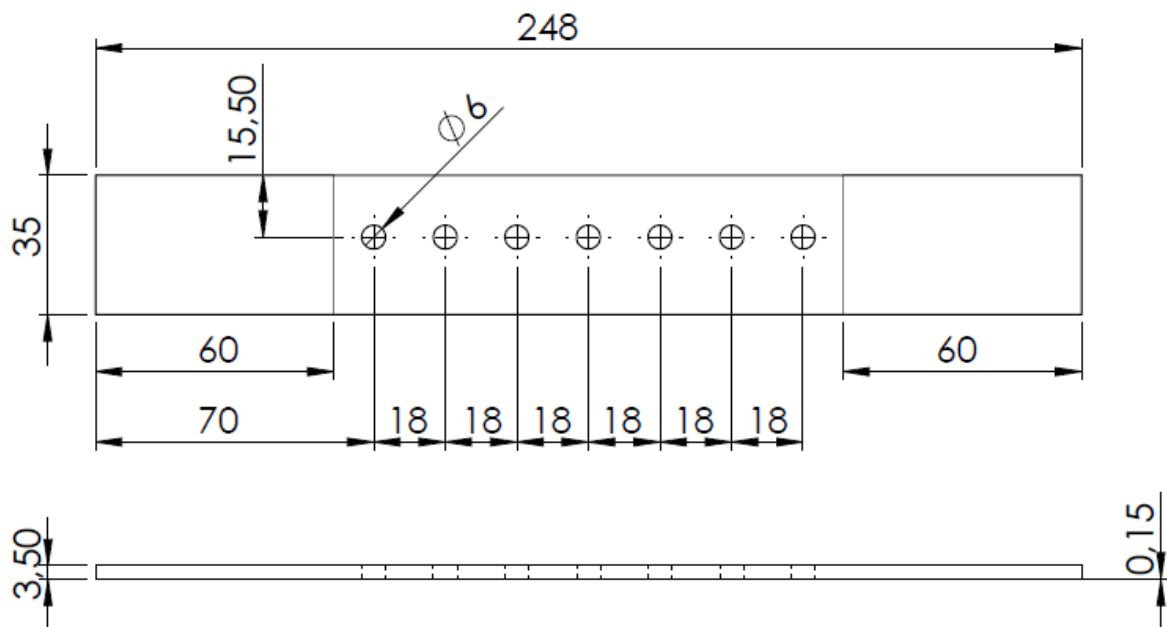


Figura C.2 - Desenho técnico do provete de exemplo para ensaio de início de delaminação

Procedimento de Ensaio:

1. Identificar, medir e registar as medidas dos provetes disponíveis;
2. Montar o dispositivo de ensaio concebido especificamente para este ensaio (Ver secção seguinte – “**Montagem do dispositivo de ensaio e fixação do provete**”);
3. Ligar a máquina no interruptor geral para a posição ON e no botão que se encontra na parte de trás da máquina lateralmente;
4. Ligar o computador de apoio à máquina e abrir o programa Trapezium (o ícone de acesso está situado no “desktop”), Introduzir o usuário e a palavra passe:

Usuário: *user*

Palavra passe: *user*

5. Colocar o travessão e a cabeça de amarração superior na posição de trabalho com a ajuda do controlador “Smart”. Para isso carregar na tecla “Manual” e movimentar a cabeça carregando continuamente nas teclas “Up” ou “Down”;
6. Fixar o provete na máquina de ensaios, verificando o correto alinhamento do mesmo com o dispositivo de fixação (Ver secção seguinte – “**Montagem do dispositivo de ensaio e fixação do provete**”);
7. No programa Trapezium seleccionar o tipo de ensaio que pretende efetuar. Clicar na janela “abrir método). Na barra de ferramentas abrir a pasta “Methods” e abrir o ensaio pretendido. Nome do arquivo do método: “*delaminação*”, baseado no método de ensaios de flexão em três pontos. **Nota:** Deve-se neste ponto seleccionar a velocidade de ensaio;
8. Após seleccionar o teste, este abre o programa correspondente. No lado esquerdo clicar em “Executar ensaio com este método”. Quando a janela de ensaio se abrir basta seleccionar o botão “Iniciar” no campo superior esquerdo, para que o ensaio comece a ser executado;
9. Após atingir a carga máxima, o ensaio deve ser interrompido;
10. Retirar o provete ensaiado;
11. No programa de computador guardar o ensaio seleccionando “gravar”. Guardar o Relatório, para esta operação basta exportar o relatório para PDF e/ou para Excel, seleccionando a função “export”.

Montagem do dispositivo de ensaio e fixação do provete:

1. Retirar o dispositivo de fixação do provete para o ensaio de tração (ou outro) caso esteja previamente montado na máquina;
2. Montar a base utilizada no ensaio de flexão;
3. Montar o dispositivo onde é fixado indentador cilíndrico no ensaio de flexão na parte superior, porém este indentador não é aqui utilizado;
4. Montar o calcador Destaco Model 2002-U (Figura C.3 do Anexo C.2) na base de ensaio de início de delaminação (Figura C.4 do Anexo C.2);
5. Fixar o conjunto do ponto 2 à base do ensaio de flexão;
6. Fixar o dispositivo de suporte da broca para ensaio de início de delaminação (Figura C.5 do Anexo C.2), à peça do ponto 3;
7. Acoplar a broca que vai ser utilizada do ensaio ao dispositivo de suporte da broca;
8. Montar o provete na ranhura da base de ensaio de início de delaminação e garantir alinhamento entre o furo cego e a broca.

Anexo C.2 Dispositivo de fixação para ensaio de início de delaminação

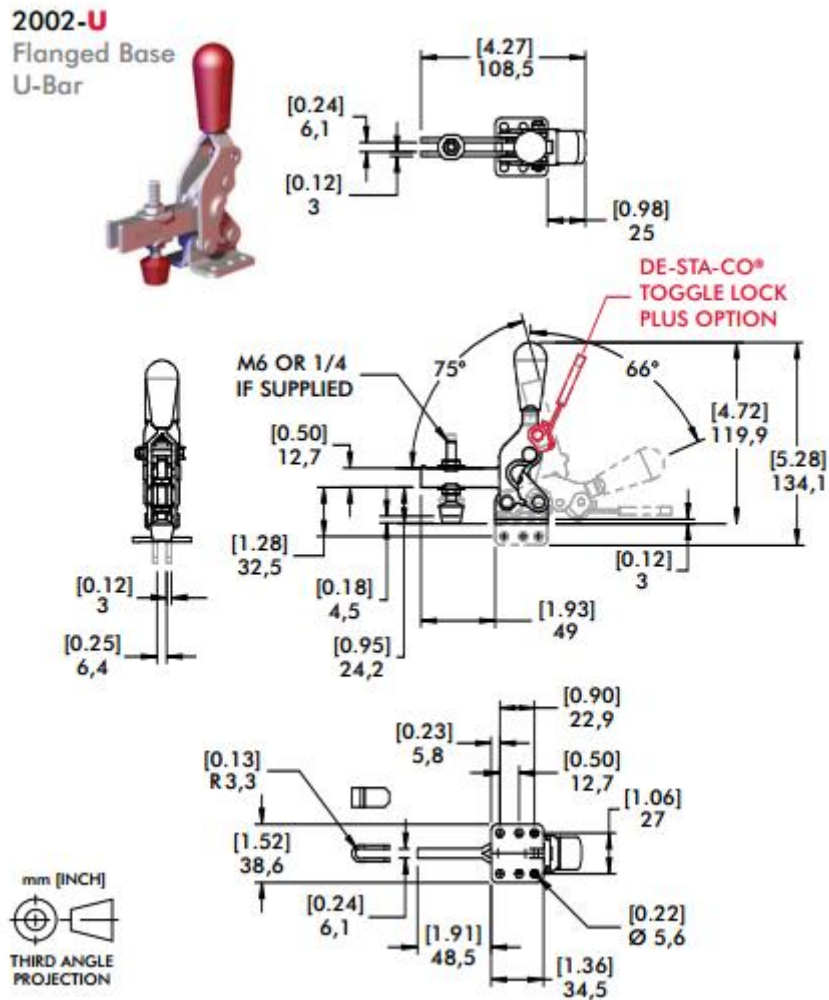


Figura C.3 – Calçador Destaco modelo 2002-U (Fornecedor: Destaco)

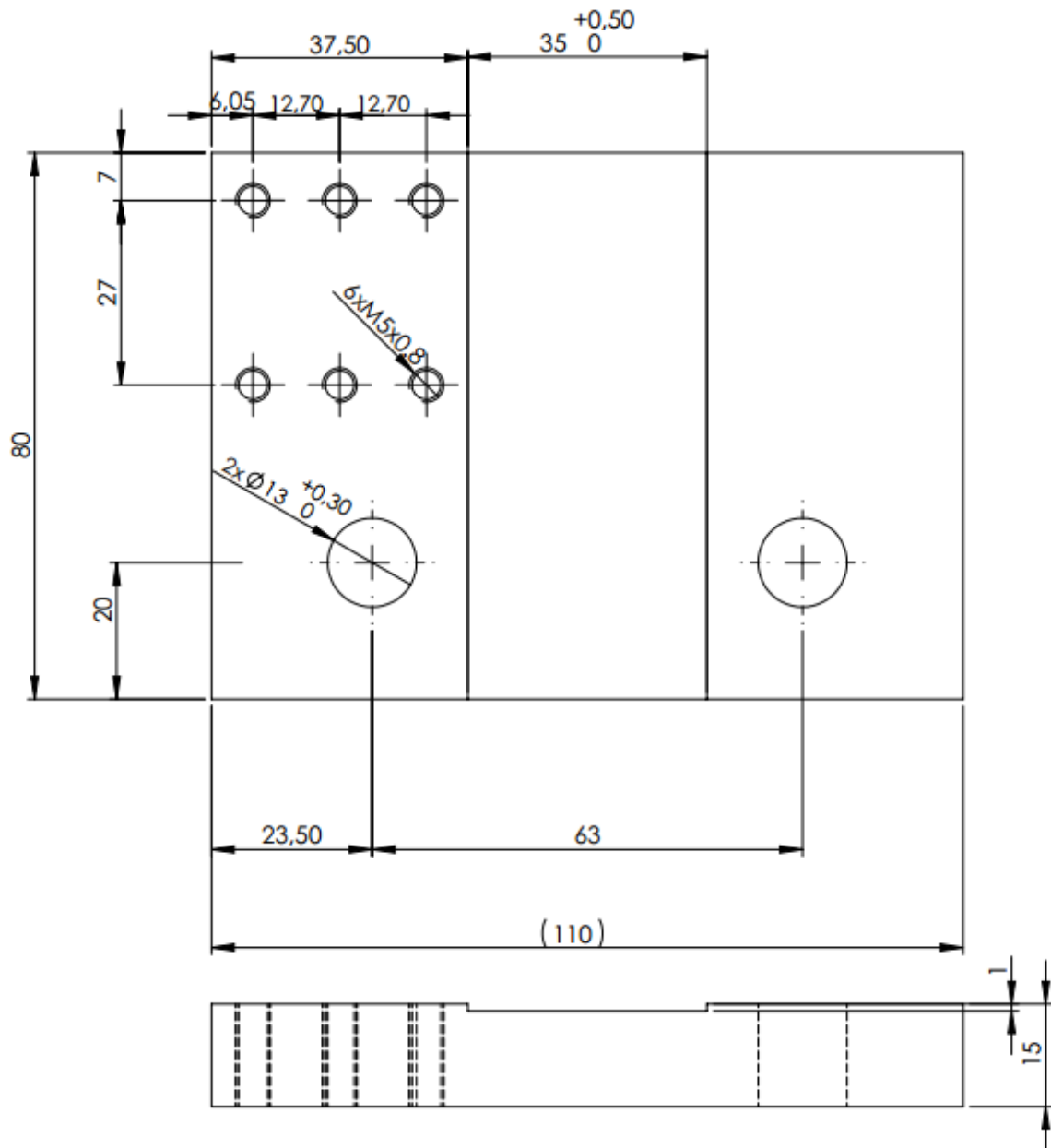


Figura C.4 - Base para o dispositivo de ensaio de início de delaminação

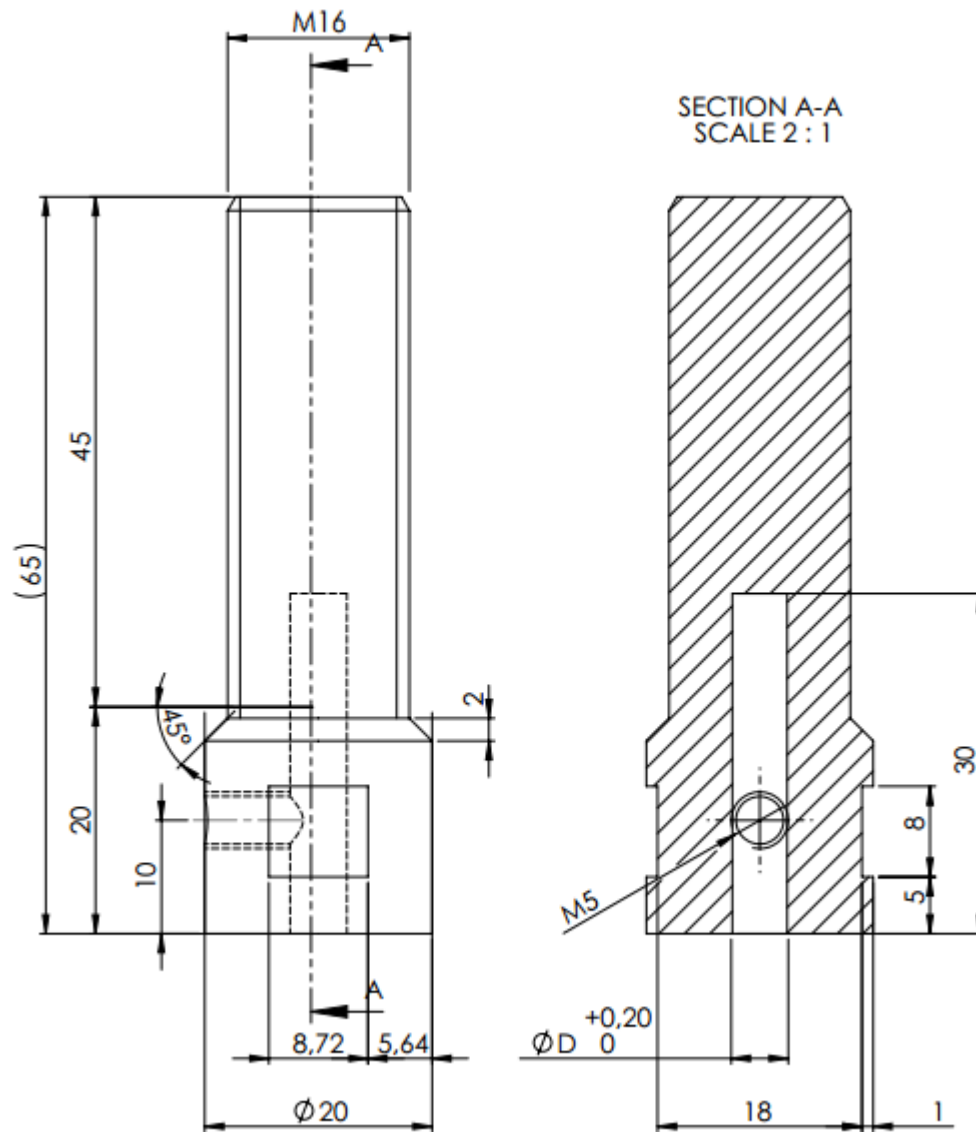


Figura C.5 – Dispositivo de suporte da broca para ensaio de início de delaminação

Anexo D

Dados do pré-impregnado TEXIPREG® HS160REM

Anexo D.1 Data Sheet do pré-impregnado

SAATILAR
TEXIPREG
TEXINDUSTRIA
TEXILAR



TEXIPREG® HS 160 REM

High strength unidirectional carbon pre-preg with modified epoxy resin REM, suitable both for compression and vacuum-bag moulding. It sticks directly to the honeycomb and it doesn't need any adhesive film for sandwich moulding. Well fitted for top-class fishing rods and sport tools.

PRE-PREG

<i>fibres:</i>			
type		high strength carbon T300 or similar	
weave		unidirectional at 0°	
areal weight (dry)	g/m ²	160 ± 4%	
<i>resin:</i>			
type		Modified epoxy REM	
Minimum cure temperature	°C	125	
gel time	min	12 ± 3	at 125°C
<i>prepreg:</i>			
resin content	%	36 ± 3	
areal weight	g/m ²	250	
volatile content	%	< 1	10' at 150°C
flow	%	3 - 13	15' at 125 °C, 3 bar
tack		Medium	
working life	days	20	at 20°C
shelf life	months	12	at -18°C

COMPOSITE

* after compression moulding at 5 bar for 60 min, T=125°C

<i>physical properties:</i>			
specific gravity	g/cm ³	1,46	ASTM D792
T _g	°C	110 - 120	
<i>mechanical properties (0°)*:</i>			
tensile strength	MPa	1700	ASTM D3039
breaking strain	%	1.3	ASTM D3039
tensile modulus	GPa	150	ASTM D3039
flexural strength	MPa	1400	ASTM D790 (L/d = 16)
flexural modulus	GPa	130	ASTM D790 (L/d = 16)
compression strength	MPa	-	ASTM D695
ILSS	MPa	60	ASTM D2344

Data are only indicative and may be strongly affected by process conditions; no responsibility will be accepted for results obtained from the application of this information. For more reliable data specific tests should be performed.

SAATILAR
TEXIPREG
TEXINDUSTRIA
TEXILAR



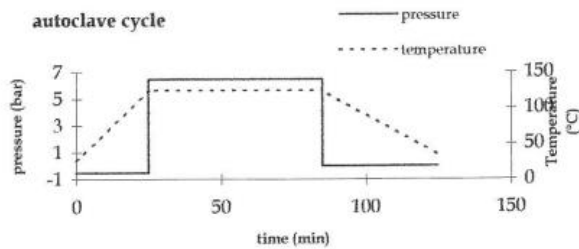
PROCESSING

compression moulding:

- put the packet into the mould at room temperature
- close the mould and apply a pressure about 1 bar
- heat to 125 °C at a 3-5 °C/min rate
- when 120-125 °C is reached apply 2-7 bar
- maintain pressure and Temperature for 60'
- get the part out from the mould

autoclave/vacuum-bag moulding:

- make the bag and apply 0.5 bar vacuum
- heat to 125 °C at a 3-5 °C/min rate
- when 120-125 °C is reached apply 2-7 bar
- maintain pressure and Temperature for 60'
- cool down to room temperature maintaining pressure
- get the part out from the mould



suggestions:

- handle the pre-preg only using protective gloves
- use the pre-preg in ventilated and dust-free rooms

STORAGE

Stock rolls at -18 °C, sealed in original packages. Work life at 20 °C refers to rolls sealed in original packages.

Before to use the pre-preg, get out the roll from the freezer and let it warm up to room temperature for 6 h sealed in its original package, then open it.

Informations corresponding to the present knowledge and without any legal binding. Changes due to technical progress are possible.

Anexo D.2 Ordem de fabrico do pré-impregnado

UMEC LABCOMP LABORATÓRIO DE COMPOSITOS	<h1>ORDEM DE FABRICO</h1>	Página: 1 de 1
---	---------------------------	----------------

Elaborado por:
 Data: 23-07-10

Aprovado por:
 Data: 2013-03-05

Referência do Serviço	Projeto	Colaboradores	Ordem Fabrico (data)	Ordem Entrega (data)	Observações
07/LABCOMP/13	CCP Labcomp Eng Durão	FN	04-03-13	13-03-2013	

1 – Material

Pré-impregnado HS160REM

2 – Polimerização

Prensa pratos quentes

Ciclo 135°C durante 1h com aquecimento/arrefecimento 4°C/min. (Placa 120°C 1h)

Utilização caixilho de 300X300mm²

3 – Empilhamento da placa

- 2 placas [0/90]6S, 3 mm de espessura, medidas 300*300mm.

- 2 placas [0/45/90/-45]3S, 3 mm de espessura, medidas 300*300mm.

- Filme desmoldante de temperatura.

Célia Novo
 Responsável CCP Labcomp

Anexo E

Resultados dos ensaios de *pin-bearing*

(Aqui são apresentados os resultados os ensaios de *pin-bearing*, por tipo de broca e por avanços para as placas unidirecionais e para as placas *cross-ply*)

Anexo E.1 Resultados para as placas unidirecionais

- Os resultados dos ensaios *pin-bearing* nas placas unidirecionais são apresentados nas próximas 4 tabelas em função da broca utilizada no ensaio.

Tabela E.1 – Resultados dos ensaios de *pin-bearing* para placas unidirecionais furadas com a broca Helicoidal em aço rápido

Tipo de broca	Avanço (mm/rot)	Força Axial Máxima (N)	Tensão de rutura (MPa)	Fd	Drat	Fda
Helicoidal (HSS)	0,03	4126,99	177,28	1,443	1,671	1,833
	0,08	4869,22	211,52	1,654	1,601	2,034
	0,19	4828,11	223,41	2,170	1,659	2,625

Tabela E.2 – Resultados dos ensaios de *pin-bearing* para as placas unidirecionais furadas com a broca Helicoidal em carbeto de tungsténio

Tipo de broca	Avanço (mm/rot)	Força Axial Máxima (N)	Tensão de rutura (MPa)	Fd	Drat	Fda
Helicoidal (WC)	0,03	6367,95	275,53	1,184	1,158	1,270
	0,08	5509,51	236,41	1,620	1,218	1,754
	0,19	5790,51	249,51	1,983	1,328	2,201

Tabela E.3 – Resultados dos ensaios de *pin-bearing* para as placas unidirecionais furadas com a broca Brad em carbeto de tungsténio

Tipo de broca	Avanço (mm/rot)	Força Axial Máxima (N)	Tensão de rutura (MPa)	Fd	Drat	Fda
Brad (WC)	0,03	7206,84	312,07	1,314	1,254	1,458
	0,08	6161,99	285,02	1,435	1,231	1,572
	0,19	6983,23	325,80	2,047	1,397	2,313

Tabela E.4 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para as placas unidirecionais furadas com a broca Bidiametral em carbeto de tungstênio

Tipo de broca	Avanço (mm/rot)	Força Axial Máxima (N)	Tensão de rutura (MPa)	Fd	Drat	Fda
Bidiametral (WC)	0,03	5987,73	259,40	1,221	1,205	1,335
	0,08	5768,55	261,47	1,732	1,256	1,893
	0,19	5491,18	234,07	1,965	1,331	2,185

- Os resultados dos ensaios pin-bearing nas placas unidirecionais são apresentados nas próximas 3 tabelas em função do avanço de furação.

Tabela E.5 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para as placas unidirecionais furadas com o avanço de 0,03 mm/rot

Avanço (mm/rot)	Tipo de broca	Força Axial Máxima (N)	Tensão de rutura (MPa)	Fd	Drat	Fda
0,03	Helicoidal (WC)	6367,95	275,53	1,184	1,158	1,270
	Helicoidal (HSS)	4126,99	177,28	1,443	1,671	1,833
	Brad (WC)	7206,84	312,07	1,314	1,254	1,458
	Bidiametral (WC)	5987,73	259,40	1,221	1,205	1,335

Tabela E.6 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para as placas unidirecionais furadas com o avanço de 0,08 mm/rot

Avanço (mm/rot)	Ferramenta	Força Axial Máxima (N)	Tensão de rutura (MPa)	Fd	Drat	Fda
0,08	Helicoidal (WC)	5509,51	236,41	1,620	1,218	1,754
	Helicoidal (HSS)	4869,22	211,52	1,654	1,601	2,034
	Brad (WC)	6161,99	285,02	1,435	1,231	1,572
	Bidiametral (WC)	5768,55	261,47	1,732	1,256	1,893

Tabela E.7 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para as placas unidirecionais furadas com o avanço de 0,19 mm/rot

Avanço (mm/rot)	Ferramenta	Força Axial Máxima (N)	Tensão de rutura (MPa)	Fd	Drat	Fda
0,19	Helicoidal (WC)	5790,51	249,51	1,983	1,328	2,201
	Helicoidal (HSS)	4828,11	223,41	2,170	1,659	2,625
	Brad (WC)	6983,23	325,80	2,047	1,397	2,313
	Bidiametral (WC)	5491,18	234,07	1,965	1,331	2,185

Anexo E.2 Resultados para as placas *cross-ply*

- Os resultados dos ensaios *pin-bearing* nas placas unidirecionais são apresentados nas próximas 4 tabelas em função da broca utilizada no ensaio.

Tabela E.8 – Resultados dos ensaios de *pin-bearing* para placas *cross-ply* furadas com a broca Helicoidal em aço rápido

Broca	Avanço (mm/rot)	Força Axial Máxima (N)	Tensão de rutura (MPa)	Fd	Drat	Fda
Helicoidal (HSS)	0,03	10701,32	497,97	1,422	1,662	1,811
	0,08	10714,16	503,97	1,628	1,431	1,894
	0,19	11388,20	514,82	1,817	1,493	2,139

Tabela E.9 – Resultados dos ensaios de *pin-bearing* para placas *cross-ply* furadas com a broca Helicoidal em carboneto de tungsténio

Broca	Avanço (mm/rot)	Força Axial Máxima (N)	Tensão de rutura (MPa)	Fd	Drat	Fda
Helicoidal (WC)	0,03	11820,38	538,30	1,570	1,266	1,731
	0,08	11953,53	536,19	2,195	1,358	2,439
	0,19	11485,55	509,70	2,096	1,473	2,417

Tabela E.10 – Resultados dos ensaios de *pin-bearing* para as placas *cross-ply* furadas com a broca Brad em carbeto de tungsténio

Broca	Avanço (mm/rot)	Força Axial Máxima (N)	Tensão de rutura (MPa)	Fd	Drat	Fda
Brad (WC)	0,03	11629,04	518,20	1,539	1,340	1,747
	0,08	11611,66	524,73	1,633	1,327	1,834
	0,19	11437,07	536,52	1,537	1,348	1,748

Tabela E.11 – Resultados dos ensaios de *pin-bearing* para as placas *cross-ply* furadas com a broca Bidiametral em carbeto de tungsténio

Broca	Avanço (mm/rot)	Força Axial Máxima (N)	Tensão de rutura (MPa)	Fd	Drat	Fda
Bidiametral (WC)	0,03	11149,14	503,21	1,213	1,248	1,349
	0,08	11215,25	512,85	1,472	1,255	1,624
	0,19	11578,26	544,03	2,031	1,374	2,282

- Os resultados dos ensaios pin-bearing nas placas unidirecionais são apresentados nas próximas 3 tabelas em função do avanço de furação.

Tabela E.12 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para as placas cross-ply furadas com o avanço de 0,03 mm/rot

Avanço (mm/rot)	Broca	Força Axial Máxima (N)	Tensão de rutura (MPa)	Fd	Drat	Fda
0,03	Helicoidal (WC)	11820,38	538,30	1,570	1,266	1,731
	Helicoidal (HSS)	10701,32	497,97	1,422	1,662	1,811
	Brad (WC)	11629,04	518,20	1,539	1,340	1,747
	Bidiametral (WC)	11149,14	503,21	1,213	1,248	1,349

Tabela E.13 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para as placas cross-ply furadas com o avanço de 0,08 mm/rot

Avanço (mm/rot)	Broca	Força Axial Máxima (N)	Tensão de rutura (MPa)	Fd	Drat	Fda
0,08	Helicoidal (WC)	11953,53	536,19	2,195	1,358	2,439
	Helicoidal (HSS)	10714,16	503,97	1,628	1,431	1,894
	Brad (WC)	11611,66	524,73	1,633	1,327	1,834
	Bidiametral (WC)	11215,25	512,85	1,472	1,255	1,624

Tabela E.14 – Resultados dos ensaios de pin-bearing para as placas cross-ply furadas com o avanço de 0,19 mm/rot

Avanço (mm/rot)	Broca	Força Axial Máxima (N)	Tensão de rutura (MPa)	Fd	Drat	Fda
0,19	Helicoidal (WC)	11485,55	509,70	2,096	1,473	2,417
	Helicoidal (HSS)	11388,20	514,82	1,817	1,493	2,139
	Brad (WC)	11437,07	536,52	1,537	1,348	1,748
	Bidiametral (WC)	11578,26	544,03	2,031	1,374	2,282

Anexo F

Resultados dos ensaios de esmagamento

(Aqui são apresentados os resultados os ensaios de esmagamento feito por Ricardo Chita em “Estudo de delaminação em compósitos,” Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, ISEP - Porto, 2012)

- Nas 3 tabelas seguintes, os resultados dos ensaios de esmagamento nas placas unidirecionais são apresentados em função do avanço para cada broca.

Tabela F.1 – Resultados dos ensaios de esmagamento para as placas unidirecionais furadas com o avanço de 0,03 mm/rot

Avanço (mm/rot)	Tipo de broca	Força axial máxima (N)	Tensão de Esmagamento (MPa)
0,03	Helicoidal (WC)	4485,56	213,60
	Helicoidal (HSS)	4294,83	204,52
	Brad (WC)	4117,80	196,09
	Bidiametral (WC)	3327,45	158,45

Tabela F.2 – Resultados dos ensaios de esmagamento para as placas unidirecionais furadas com o avanço de 0,08 mm/rot

Avanço (mm/rot)	Tipo de broca	Força axial máxima (N)	Tensão de Esmagamento (MPa)
0,08	Helicoidal (WC)	4799,78	228,60
	Helicoidal (HSS)	4179,82	199,04
	Brad (WC)	3588,12	170,86
	Bidiametral (WC)	4019,32	191,40

Tabela F.3 – Resultados dos ensaios de esmagamento para as placas unidirecionais furadas com o avanço de 0,19 mm/rot

Avanço (mm/rot)	Tipo de broca	Força axial máxima (N)	Tensão de Esmagamento (MPa)
0,19	Helicoidal (WC)	5026,46	239,36
	Helicoidal (HSS)	4127,20	196,56
	Brad (WC)	3715,81	176,94
	Bidiametral (WC)	4320,35	205,73