

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

**ESTUDO DA DELAMINAÇÃO EM
COMPÓSITOS**

Ricardo Jorge de Sousa Chita

Engenheiro Mecânico

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Tese de Mestrado

Orientador de dissertação

Professor Doutor Luís Miguel Pereira Durão

Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto

Porto, Novembro de 2012

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto, sob a orientação do Prof. Dr. Luís Miguel Pereira Durão a quem desejo expressar a minha gratidão pelo apoio, acompanhamento e aconselhamento durante todo processo de elaboração desta tese de Mestrado.

Em segundo lugar gostaria de prestar a minha gratidão á própria instituição – ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto, mais especificamente ao Departamento de Engenharia Mecânica e aos responsáveis pelo ramo de Construções Mecânicas, pelo suporte financeiro assim como pela disponibilidade de todos os meios e ferramentas sem as quais a realização deste trabalho não teria sido possível.

Agradeço ao Engenheiro Arnaldo Pinto, cuja assistência na preparação dos provetes para teste (adesivos) foi crucial e de extrema importância.

Ao Engenheiro Victor Ribeiro pelo apoio e assistência prestados nas oficinas durante o processo de preparação e furação dos provetes.

Gostaria ainda de prestar os meus agradecimentos a todos os meus professores que durante a minha vida académica me inculcaram conhecimentos que puderam ser mais valias na realização desta tese.

Finalmente, resta-me agradecer à minha família e amigos pela compreensão e motivação, que terá servido de grande mote à realização deste trabalho.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
ÍNDICE.....	iii
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xvi
CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 ÂMBITO E OBJETIVOS	1
1.1.1 ÂMBITO	1
1.1.2 OBJETIVOS.....	2
1.1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	3
1.2 MATERIAIS COMPÓSITOS	4
1.2.1 MATRIZES	8
1.2.2 REFORÇOS	10
1.2.3 LAMINADOS	12
1.2.4 PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA	14
1.2.5 PROCESSO DE FABRICO DE MATERIAIS COMPÓSITOS	15
1.3 MAQUINAGEM DE COMPÓSITOS	17
1.3.1 TEORIA DE REMOÇÃO DE MATERIAL.....	17
1.3.2 FURAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS	19

CAPITULO 2 – ESTADO-DA-ARTE	22
2.1 MAQUINAGEM DE MATERIAIS COMPÓSITOS	22
2.1.1 MECANISMOS DE CORTE.....	23
2.1.2 FURAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS	26
2.1.2.1 FURAÇÃO DE COMPÓSITOS CARBONO/EPÓXIDO	27
2.1.3 NOTAS CONCLUSIVAS.....	34
2.2 PROCESSOS DE MAQUINAGEM NÃO CONVENCIONAIS	36
2.2.1 LASER	36
2.2.2 JATO DE ÁGUA	38
2.2.3 OUTROS PROCESSOS	39
2.2.4 COMPARAÇÃO DE PROCESSOS NÃO CONVENCIONAIS	40
2.2.5 NOTAS CONCLUSIVAS.....	41
2.3 DANOS ASSOCIADOS.....	42
2.3.1 DANOS DE FABRICO	42
2.3.2 DEFEITOS DE MAQUINAGEM	43
2.4 MODELOS ANALÍTICOS DE DANO	44
2.5 AVALIAÇÃO DO DANO	50
CAPITULO 3 – TRABALHO EXPERIMENTAL	53
3.1 SELEÇÃO DO MATERIAL	53
3.1.1 FIBRAS DE REFORÇO.....	56
3.1.2 SEQUÊNCIA (ORIENTAÇÃO DE FIBRAS) DO LAMINADO	57
3.1.3 COMPÓSITOS CARBONO/EPÓXIDO	58
3.1.4 PREPARAÇÃO DE PROVETES DE TESTE	60
3.2 SELEÇÃO DE FERRAMENTAS E CONDIÇÕES DE MAQUINAGEM	62
3.2.1 GEOMETRIA E MATERIAL DA FERRAMENTA.....	63
3.2.2 SELEÇÃO DE FERRAMENTAS.....	64

3.2.3	SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DE FURAÇÃO	66
3.2.4	PROCESSO DE FURAÇÃO DOS PROVETES DE TESTE.....	67
3.3	TÉCNICAS DE ANÁLISE DE DANOS	72
3.3.1	RADIOGRAFIA	72
3.3.2	ENSAIO DE ESMAGAMENTO	94
3.4	CONCLUSÕES DO TRABALHO EXPERIMENTAL.....	113
3.4.1	INFLUÊNCIA DO AVANÇO	114
3.4.2	INFLUÊNCIA DO MATERIAL E GEOMETRIA DA FERRAMENTA.	114
3.4.3	NOTAS CONCLUSIVAS	116
CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		117
4.1	CONCLUSÕES	117
4.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	118
CAPÍTULO 5 – REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA.....		121
5.1	REFERÊNCIAS.....	121
5.2	BIBLIOGRAFIA	128
ANEXOS		129

LISTA DE FIGURAS

Imagem		Página
1.1	Aplicações de materiais compósitos na aeronáutica	5
1.2	Space Shuttle Atlantis	6
1.3	Chevrolet Corvette de 1953	6
1.4	MacLaren MP4-1 de 1981	6
1.5	Aplicações de materiais compósitos no domínio dos transportes	7
1.6	Aplicações na área dos componentes eléctricos e electrónicos	7
1.7	Aplicações de materiais compósitos em artigos desportivos	8
1.8	Aplicações de materiais em pontes	8
1.9	Ortogonal – a) – Oblíquo – b) – Modelos de corte	18
1.10	Geometria típica de uma broca	20
1.11	Ângulos de uma broca helicoidal	20
2.1	Definição de ângulo de orientação de fibras e outras variáveis	23
2.2	Mecanismos de corte para corte ortogonal	24
2.3	Esquema de mecanismos de corte	25
2.4	Visualização por radiografia por raios X com líquido contrastante dos danos causados por furação em materiais compósitos	26
2.5	Delaminagens causadas pela furação de materiais compósitos	27
2.6	Geração de furo usando método orbital	29
2.7	Esquema proposto para furação de compósitos	31
2.8	Feixe de luz de alta potência, coerente, transversal, focalizado e posicionado	37
2.9	Esquema de funcionamento de um sistema de corte por jacto de água abrasivo	39
2.10	Mecanismo de delaminação “peel-up”	45
2.11	Mecanismo de delaminação “push-out”	45
2.12	Modelo para análise de delaminação	46
2.13	Avaliação de dano	50
2.14	Medição do diâmetro máximo delaminado	51
3.1	McLaren P1	54
3.2	Airbus A-380	54
3.3	Airbus A400M	55
3.4	Bicicleta Specialized Epic FSR Marathon Carbon	55
3.5	Utilização em construção de uma ponte	55
3.6	Propriedade de laminados unidireccionais	56
3.7	Influência da orientação das fibras	58
3.8	Marcação das placas	60
3.9	Serra circular utilizada para corte de provetes	61
3.10	Processo de corte de provetes	61
3.11	Placas devidamente marcadas e identificadas	62
3.12	Dureza Knoop de alguns materiais	63
3.13	Broca Helicoidal com ângulo de ponta de 118°	65
3.14	Broca Brad	65
3.15	Broca Step	66
3.16	Processo de furação de laminados	68
3.17	Furação de uma placa “cross-ply” usando uma broca Step	69

3.18	Furação usando uma broca Brad	69
3.19	Furação de uma placa “cross-ply” com uma broca helicoidal	70
3.20	Exemplo de furo realizado com broca Helicoidal (WC)	70
3.21	Exemplo de furo realizado com broca Brad	71
3.22	Exemplo de furo realizado com broca Step	71
3.23	Líquido de contraste	72
3.24	Máquina Kodak 2100	73
3.25	Imersão de placas em líquido de contraste	73
3.26	Limpeza das placas	74
3.27	Preparação para obtenção de imagem de raios X	74
3.28	Disparo da radiografia	75
3.29	Radiografia de placa unidirecional furada com broca Helicoidal (WC) e avanço baixo	75
3.30	Radiografia de placa unidirecional furada com broca Helicoidal (HSS) e avanço alto (0,19)	76
3.31	Radiografia de placa unidirecional furada com broca Brad e avanço intermédio (0,08)	76
3.32	Radiografia de placa “cross-ply” furada com broca Step e avanço alto (0,19)	76
3.33	Relação entre F_d /Avanço para placa unidirecional furada com broca helicoidal (WC)	78
3.34	Relação entre F_d /Avanço para placa unidirecional furada com broca helicoidal (HSS)	80
3.35	Relação entre F_d /Avanço para placa unidirecional furada com broca Brad (WC)	82
3.36	Relação entre F_d /Avanço para placa unidirecional furada com broca Step (WC)	83
3.37	Relação entre F_d /Avanço para placa “cross-ply” furada com broca Helicoidal (WC)	85
3.38	Relação entre F_d /Avanço para placa “cross-ply” furada com broca Helicoidal (HSS)	86
3.39	Relação entre F_d /Avanço para placa “cross-ply” furada com broca Brad (WC)	88
3.40	Relação entre F_d /Avanço para placa “cross-ply” furada com broca Step (WC)	90
3.41	Relação entre F_d /Geometria da Broca para placa unidirecional	91
3.42	Relação entre F_d /Geometria da Broca/Avanço para placa “cross-ply”	92
3.43	Relação entre F_d /Geometria da Broca/Avanço/Material a Maquinar	93
3.44	Máquina de Ensaio SHIMADZU	94
3.45	Preparação de provete para Ensaio de Esmagamento	95
3.46	Proвете submetido a Ensaio de Esmagamento	95
3.47	Relação Avanço/ Tensão de Esmagamento para Broca Helicoidal (WC)	97
3.48	Relação Avanço/ Tensão de Esmagamento para Broca Helicoidal (HSS)	98
3.49	Relação Avanço/ Tensão de Esmagamento para Broca Brad	100
3.50	Ensaio nulo – Placa 45	101
3.51	Relação Avanço/ Tensão de Esmagamento para Broca Step	102
3.52	Relação Avanço/ Tensão de Esmagamento para Broca Helicoidal (WC)	103
3.53	Relação Avanço/ Tensão de Esmagamento para Broca Helicoidal (HSS)	105
3.54	Relação Avanço/ Tensão de Esmagamento para Broca Brad	106
3.55	Relação Avanço/ Tensão de Esmagamento para Broca Step	108
3.56	Relação entre Tensão de Esmagamento/Geometria da Broca para placa unidirecional	109

3.57	Relação entre Tensão de Esmagamento/Geometria da Broca para placa “cross-ply”	110
3.58	Relação entre Tensão de Esmagamento/Geometria da broca/Avanço/Material a Maquinar	111
3.59	Imagem de placa após ensaio de esmagamento	112
3.60	Imagem de furo ensaiado ao esmagamento	112

LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
1.1	Propriedades de fibras e de materiais na sua forma maciça	4
1.2	Propriedades de alguns tipos de fibra de vidro	10
1.3	Propriedades de alguns tipos de fibra de carbono	11
1.4	Propriedades Mecânicas de fibras aramídicas	12
1.5	Propriedades mecânicas de fibras de boro em função do seu diâmetro	12
1.6	Exemplo de propriedades de compósitos com fração volúmica de 60% e matriz epóxida em comparação com o aço	15
2.1	Efeito do ângulo da orientação das fibras nas forças de corte	23
2.2	Deformação e mecanismos de corte de acordo com orientação das fibras	25
2.3	Comparação de processos não convencionais	40
2.4	Tipos de dano e sua descrição	43
2.5	Danos associados a maquinagem e sua breve descrição	43
3.1	Características de fibras utilizadas em compósitos	57
3.2	Propriedades do laminado unidirecional	59
3.3	Módulo de Elasticidade retirado dos ensaios efetuados	60
3.4	Características de HSS e carboneto de tungsténio	65
3.5	Programação de furos para placas unidirecionais	67
3.6	Programação de furos para placas “cross-ply”	68
3.7	do Factor de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,03 mm/rot	77
3.8	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,08 mm/rot	77
3.9	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,19 mm/rot	78
3.10	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,03 mm/rot	79
3.11	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,08 mm/rot	79
3.12	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,19 mm/rot	79
3.13	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Brad e avanço de 0,03 mm/rot	80
3.14	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Brad e avanço de 0,08 mm/rot	80
3.15	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Brad e avanço de 0,19 mm/rot	81
3.16	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Step e avanço de 0,03 mm/rot	82
3.17	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Step e avanço de 0,08 mm/rot	82
3.18	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Step e avanço de 0,19 mm/rot	83
3.19	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,03 mm/rot.	84
3.20	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,08 mm/rot.	84
3.21	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,19 mm/rot.	84

3.22	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,03mm/rot	85
3.23	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,08mm/rot	85
3.24	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,19mm/rot	86
3.25	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Brad e avanço de 0,03mm/rot	87
3.26	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Brad e avanço de 0,08mm/rot	87
3.27	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Brad e avanço de 0,19mm/rot	87
3.28	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Step e avanço de 0,03mm/rot	88
3.29	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Step e avanço de 0,08mm/rot	89
3.30	Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Step e avanço de 0,19mm/rot	89
3.31	Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,03 mm/rot	96
3.32	Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,08 mm/rot	96
3.33	Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,19 mm/rot	96
3.34	Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,03 mm/rot	97
3.35	Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,08 mm/rot	97
3.36	Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,19 mm/rot	98
3.37	Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Brad e avanço de 0,03 mm/rot	99
3.38	Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Brad e avanço de 0,08 mm/rot	99
3.39	Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Brad e avanço de 0,19 mm/rot	99
3.40	Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Step e avanço de 0,03 mm/rot	100
3.41	Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Step e avanço de 0,08 mm/rot	101
3.42	Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Step e avanço de 0,19 mm/rot	101
3.43	Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,03 mm/rot	102
3.44	Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,08 mm/rot	103
3.45	Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,19 mm/rot	103
3.46	Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,03 mm/rot	104
3.47	Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,08 mm/rot	104
3.48	Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,19 mm/rot	104
3.49	Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca	105

3.50	Brad e avanço de 0,03 mm/rot Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca	105
3.51	Brad e avanço de 0,08 mm/rot Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca	106
3.52	Brad e avanço de 0,08 mm/rot Step e avanço de 0,03 mm/rot Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca	107
3.53	Step e avanço de 0,08 mm/rot Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca	107
3.54	Step e avanço de 0,19 mm/rot Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca	107

LISTA DE SÍMBOLOS

- d; D - Diâmetro de ferramenta
- D_{RAT} - Rácio de dano
- E - módulo de elasticidade
- F_c - Força de corte no corte ortogonal
- F_{crit} - Força crítica para delaminação
- F_d - Fator de delaminação
- G_{IC} - resistência á fratura interlaminar no Modo I
- G_{IIC} - resistência á fratura interlaminar no Modo II
- G_{IIIC} - resistência á fratura interlaminar no Modo III
- ILSS - “interlaminar shear strength” – resistência ao corte interlaminar.
- k_c - Energia específica de corte
- M_t - Binário na furação
- N - Velocidade de rotação da broca
- p_s - Pressão específica de corte
- v_c - Velocidade de corte
- V_f - fração volúmica de fibras
- α - ângulo de folga
- β - ângulo de aresta
- γ - ângulo de inclinação
- ν - coeficiente de Poisson
- σ - tensão à tração

RESUMO

As excelentes propriedades mecânicas, associadas ao seu baixo peso, fazem com que os materiais compósitos sejam atualmente dos mais interessantes da nossa sociedade tecnológica.

A crescente utilização destes materiais e a excelência dos resultados daí provenientes faz com que estes materiais sejam utilizados em estruturas complexas de responsabilidade, pelo que a sua maquinagem se torna necessária de forma a possibilitar a ligação entre peças. O processo de furação é o mais frequente. O processo de maquinagem de compósitos terá como base os métodos convencionais utilizados nos materiais metálicos. O processo deverá, no entanto, ser convenientemente adaptado, quer a nível de parâmetros, quer a nível de ferramentas a utilizar. As características dos materiais compósitos são bastante particulares pelo que, quando são sujeitos a maquinagem poderão apresentar defeitos tais como delaminação, fissuras intralaminares, arrancamento de fibras ou dano por sobreaquecimento. Para a deteção destes danos, por vezes a inspeção visual não é suficiente, sendo necessário recorrer a processos específicos de análise de danos.

Existem já, alguns estudos, cujo âmbito foi a obtenção de furos de qualidade em compósitos, com minimização do dano, não se podendo comparar ainda com a informação existente, no que se refere à maquinagem de materiais metálicos ou ligas metálicas. Desta forma, existe ainda um longo caminho a percorrer, de forma a que o grau de confiança na utilização destes materiais se aproxime aos materiais metálicos.

Este trabalho experimental desenvolvido nesta tese assentou essencialmente na furação de placas laminadas e posterior análise dos danos provocados por esta operação. Foi dada especial atenção à medição da delaminação causada pela furação e à resistência mecânica do material após ser maquinado.

Os materiais utilizados, para desenvolver este trabalho experimental, foram placas compósitas de carbono/epóxico com duas orientações de fibras diferentes: unidireccionais e em “cross-ply”. Não se conseguiu muita informação, junto do fornecedor, das suas características pelo que se levaram a cabo ensaios que permitiram

determinar o seu módulo de elasticidade. Relativamente á sua resistência á tração, como já foi referido, a grande resistência oferecida pelo material, associada às limitações da máquina de ensaios não permitiu chegar a valores conclusivos.

Foram usadas três geometrias de ferramenta diferentes: helicoidal, Brad e Step. Os materiais utilizados nas ferramentas, foram o aço rápido (HSS) e o carboneto de tungsténio para as brocas helicoidais de 118° de ângulo de ponta e apenas o carboneto de tungsténio para as brocas Brad e Step. As ferramentas em diamante não foram consideradas neste trabalho, pois, embora sejam reconhecidas as suas boas características para a maquinagem de compósitos, o seu elevado custo não justifica a sua escolha, pelo menos num trabalho académico, como é o caso.

As vantagens e desvantagens de cada geometria ou material utilizado foram avaliadas, tanto no que diz respeito à delaminação como á resistência mecânica dos provetes ensaiados.

Para a determinação dos valores de delaminação, foi usada a técnica de Raio X. Algum conhecimento já existente relativamente a este processo permitiu definir alguns parâmetros (por exemplo: tempo de exposição das placas ao liquido contrastante), que tornaram acessível o procedimento de obtenção de imagens das placas furadas. Importando estas imagens para um software de desenho (no caso – AutoCad), foi possível medir as áreas delaminadas e chegar a valores para o fator de delaminação de cada furo efetuado.

Terminado este processo, todas as placas foram sujeitas a ensaios de esmagamento, de forma a avaliar a forma como os parâmetros de maquinagem afetaram a resistência mecânica do material.

De forma resumida, são objetivos deste trabalho:

- Caracterizar as condições de corte em materiais compósitos, mais especificamente em fibras de carbono reforçado com matriz epóxida (PRFC);
- Caracterização dos danos típicos provocados pela furação destes materiais;
- Desenvolvimento de análise não destrutiva (RX) para avaliação dos danos provocados pela furação;

- Conhecer modelos existentes com base na mecânica da fratura linear elástica (LEFM);

- Definição de conjunto de parâmetros ideais de maquinagem com o fim de minimizar os danos resultantes da mesma, tendo em conta os resultados provenientes dos ensaios de força, da análise não destrutiva e da comparação com modelos de danos existentes e conhecidos.

ABSTRACT

The excellent mechanical properties, combined with its low weight, makes composite materials to be currently at the top of the most interesting of our technological society.

The growing use of these materials and the excellent results derived there from makes these materials to be used in complex structures of responsibility, so that its machining becomes necessary in order to enable the connection between parts. The drilling process is the most frequent. The composite machining process is based on conventional methods used in metallic materials. The process should, however, be conveniently adjusted, both in terms of parameters, either at the tool to be used. The characteristics of composite materials are very specific so that, when subjected to machining may introduce defects such as delamination, cracking intralaminar, fiber pullout or damage through overheating. To detect such damage sometimes visual inspection is not sufficient, being necessary to use specific processes damage analysis.

There are already some studies, whose scope was to obtain quality holes in composite materials with minimized damage but they cannot be compared with the existing information with regard to the machining of metallic materials or alloys. Thus, there is still a long way to go, so that the degree of confidence in the use of these materials is close to metallic materials.

The experimental work in this thesis was based primarily on drilling of laminated plates and subsequent analysis of the damage caused by this operation. Special attention was paid to the measurement of delamination caused by the drilling and the mechanical strength of the material after being machined. The materials used to develop this experimental work, were composite plates carbon/epoxy with two different fiber orientations: unidirectional and "cross-ply". We were unable to get much information from the supplier, about the material characteristics, so were carried out tests which allowed to determine their modulus of elasticity. Regarding its tensile strength, as already mentioned, the high resistance offered by the material limitations associated with the testing machine did not allowed to reach conclusive values.

Were used three different tool geometries: twist, Brad and Step. The materials used in the tools were high-speed-steel (HSS) and tungsten carbide for twist drills and only the tip of tungsten carbide for drills and Brad Step. The diamond tools were not considered in this work, because, although they are recognized for their good machining characteristics of composites, their high cost does not justify the choice at least in an academic paper, as is the case.

The advantages and disadvantages of each material or geometry were evaluated, both with regard to delamination and to the mechanical strength of the specimens tested.

For the determination of the values of delamination was used the technique of X-ray. Some existing knowledge on this process has set some parameters (for example: time of exposure to liquid contrast plates) which became accessible procedure for obtaining images of drilled plates. Importing these images to a drawing software (in this case - AutoCad), it was possible to measure the delaminated areas and reach values of delamination factor for each hole.

After this process, all plates were subjected to bearing tests in order to evaluate how the machining parameters affected the mechanical strength of the material.

In summarized form, the main goals of this work are:

- To characterize the machining conditions in composite materials, more specifically in carbon fiber reinforced epoxy matrix (CFRP);
- Characterization of the typical damage caused by the drilling of these materials;
- Development of non-destructive analysis (RX) to evaluate the damages caused by drilling;
- Know existing models based on linear elastic fracture mechanics (LEFM);
- Defining optimal set machining parameter in order to minimize the damage resulting from drilling, taking into account the results from the tests of strength, nondestructive analysis and comparison with known existing models of damage.

CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 ÂMBITO E OBJECTIVOS

1.1.1 ÂMBITO

O principal objetivo deste trabalho assenta no estudo da delaminação provocada pela maquinagem de materiais compósitos. Deste estudo pretende-se estabelecer condições de maquinagem que levem à minimização dos danos normalmente provocados por esta ação.

Tendo em conta a vasta gama de materiais compósitos existentes surgiu a necessidade de reduzir este estudo a um tipo de material, pelo que se optou por compósitos do tipo polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC). As primeiras utilizações deste tipo de material foram essencialmente relacionadas com as indústrias aeroespacial e aeronáutica, mas à medida que a capacidade de produção de fibra de carbono a nível mundial foi crescendo, assistiu-se a uma redução considerável do seu preço, levando a sua utilização a outras indústrias, tais como a de construção ou competição automóvel pelo que se justifica este tipo de estudo.

Após a sua produção, é frequente que as placas em PRFC tenham de ser sujeitas a operações de furação com a finalidade de permitir a sua ligação mecânica com parafusos ou rebites a outras peças ou estruturas. Sendo comum surgirem danos associados a este tipo de processo, justifica-se portanto que neste trabalho se dê especial importância á furação. Exemplo desta importância, será o facto de, por exemplo, na indústria aeronáutica, cerca de 60% das peças rejeitadas da produção por defeito apresentam delaminação como resultado da furação [1].

Tendo oportunidade de testar laminados com dois tipos de empilhamento, unidirecional (0°) e “cross-ply” ($0/90^\circ$), fez-se variar a ferramenta utilizada (3 brocas diferentes) assim como o avanço da furação (3 diferentes) de forma a obter resultados de acordo com os objetivos propostos.

Após a furação, para além da avaliação visual, a olho nu, foram utilizados processos de obtenção de imagem por Raio X, processo que se demonstrou de simples utilização, com resultados interessantes para comparar as diferenças associadas às diferentes condições impostas.

De forma a obter propriedades de referência do material utilizado, foram feitos ensaios (segundo norma ASTM D3039-95^a) cujos resultados puderam ser comparados com os apresentados pelo fornecedor.

Finalmente, os provetes maquinados foram sujeitos a ensaios (segundo norma ASTM D5961/D5961M) de forma a estabelecer comparações com as diferentes condições de maquinagem (furação).

1.1.2 OBJETIVOS

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Caracterizar as condições de corte em materiais compósitos, mais especificamente em fibras de carbono reforçado com matriz epóxida (PRFC);
- Caracterização dos danos típicos provocados pela furação destes materiais;
- Desenvolvimento de análise não destrutiva (RX) para avaliação dos danos provocados pela furação;
- Conhecer modelos existentes com base na mecânica da fratura linear elástica (LEFM);

- Definição de conjunto de parâmetros ideais de maquinagem com o fim de minimizar os danos resultantes da mesma, tendo em conta os resultados provenientes dos ensaios de força, da análise não destrutiva e da comparação com modelos de danos existentes e conhecidos.

1.1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos.

No capítulo 1 é apresentada uma breve descrição acerca dos materiais compósitos que são a base de estudo deste trabalho. É feita uma apresentação da sua composição e propriedades assim como dos seus processos de fabrico. Finalmente, é feita referência á teoria de maquinagem conhecida associada a este tipo de materiais, nomeadamente ao processo de furação pela sua relevância.

O capítulo 2 é dedicado ao estado-da-arte do conhecimento atual sobre a maquinagem de materiais compósitos. Por ser objectivo principal desta tese será dada atenção especial ao processo de furação. Incluído neste capítulo é também o conhecimento atual sobre modelos de dano baseados na LEFM e técnicas disponíveis para a sua monitorização e análise.

No capítulo 3 o trabalho experimental é descrito, assim como os seus resultados e respetiva discussão. O material utilizado é descrito e caracterizado. É apresentada uma discussão acerca das ferramentas utilizadas.

As conclusões do trabalho e algumas possíveis recomendações para futuros estudos na mesma área são apresentadas no capítulo 4.

Finalmente, no capítulo 5, são apresentadas as referências e a bibliografia utilizada.

1.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Um material compósito é formado pela junção ou combinação de dois ou mais materiais diferentes, tanto no que diz respeito à sua forma como à sua composição química. Na sua forma mais comum, são compostos por materiais de reforço (fibras) ligadas através de um material aglomerante, denominado de matriz.

As fibras isoladas, devido à sua reduzida secção transversal, não são de grande utilidade em aplicações de engenharia, mas quando ligadas por uma matriz, dão origem a materiais compósitos fibrosos de elevada resistência mecânica e baixo peso, o que os torna numa importante classe de materiais para utilização em estruturas de responsabilidade.

Segundo estudo desenvolvido em 1920, por Griffith [2], ficou demonstrado que as fibras de vidro com 20 μ m de diâmetro apresentam tensões de rotura de 3500MPa ao passo que o vidro na sua forma maciça apresentava tensões de rotura de 160MPa. A tabela 1.1 demonstra as diferenças entre as propriedades de alguns materiais na sua forma maciça e fibrosa.

Tabela 1.1 - Propriedades de fibras e de materiais na sua forma maciça, adaptada de [3] e [4]

Material	Módulo de elasticidade, E (GPa)	Resistência à tracção, σ_u (GPa)	Densidade, ρ (Kg/dm ³)	Módulo específico, E/ ρ	Resistência específica, σ_u/ρ
Fibras:					
Vidro E	72	3.5	2.54	28.5	1.38
Vidro S	87	4.3	2.49	35.0	1.70
Carbono (Pitch)	690	2.2	2.15	321	1.00
Carbono (PAN)	345	2.3	1.85	186	1.24
Boro	393	3.1	2.70	146	1.15
Silica	72.4	5.8	2.19	33	2.65
Tungsténio	414	4.2	19.3	21	0.22
Berílio	240	1.3	1.83	131	0.71
Kevlar®49	131	3.6	1.45	90	2.48
Materiais convencionais:					
Aço	210	0.34-2.1	7.8	26.9	0.043-0.27
Ligas de Al	70	0.14-0.62	2.7	25.9	0.052-0.23
Vidro	70	0.7-2.1	2.5	28	0.28-0.84
Tungsténio	350	1.1-4.1	19.3	18.1	0.057-0.21
Berílio	300	0.7	1.83	164	0.38

Desta forma, não será de admirar que os materiais compósitos, com o seu crescente conhecimento, venham a ser cada vez mais utilizados em diversas áreas de atuação e de responsabilidade tais como: a aeronáutica, transportes (com destaque para a indústria automóvel), artigos desportivos, componentes elétricos e eletrónicos e a construção civil. As imagens 1.1 a 1.8 referem-se a algumas aplicações de materiais compósitos.

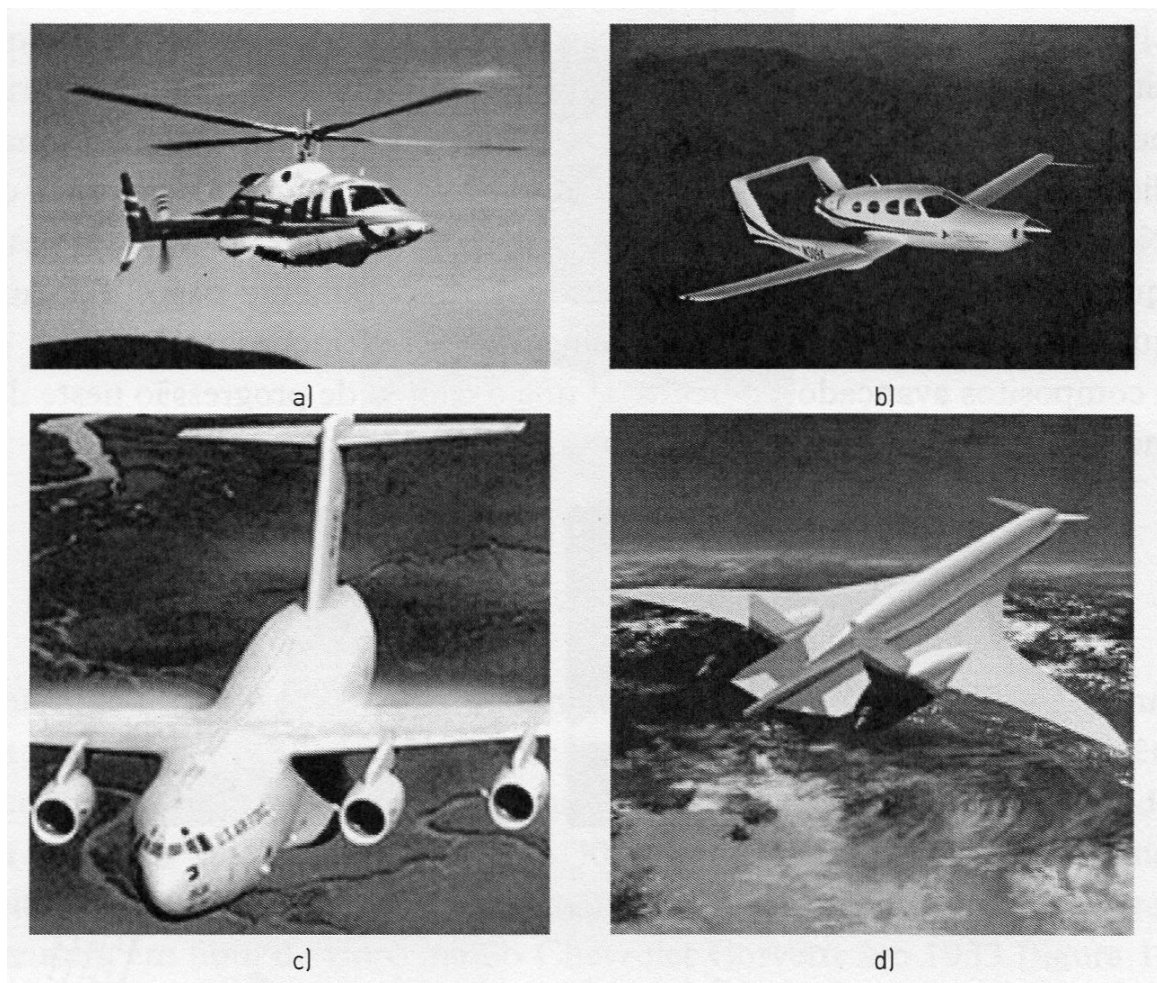


Imagem 1.1 - Aplicações de materiais compósitos na aeronáutica: a) helicóptero Bell modelo 430 que utiliza materiais compósitos nas pás e no garfo que a sustenta [5]; b) o design apresentado pelo pequeno avião M309 seria impensável de realizar sem o recurso em grande escala aos materiais compósitos [6]; c) C-17 Globemaster III que apresenta partes importantes da estrutura em materiais compósitos [7]; d) Sonic cruiser, avião da Boeing em desenvolvimento que apresentará 60% dos seus materiais em compósitos [8].

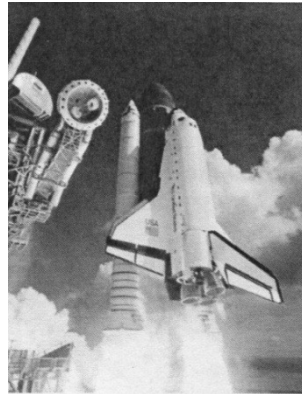


Imagem 1.2 – Space Shuttle Atlantis [9]

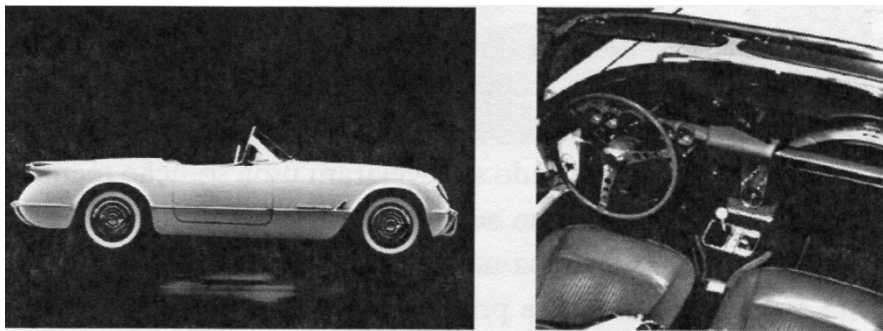


Imagem 1.3 – Chevrolet Corvette de 1953 [10, 11]

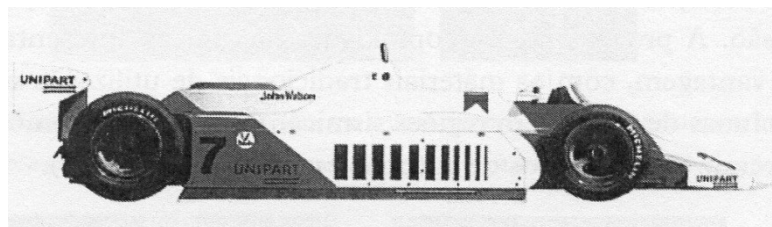


Imagem 1.4 – McLaren MP4-1 de 1981 [12]

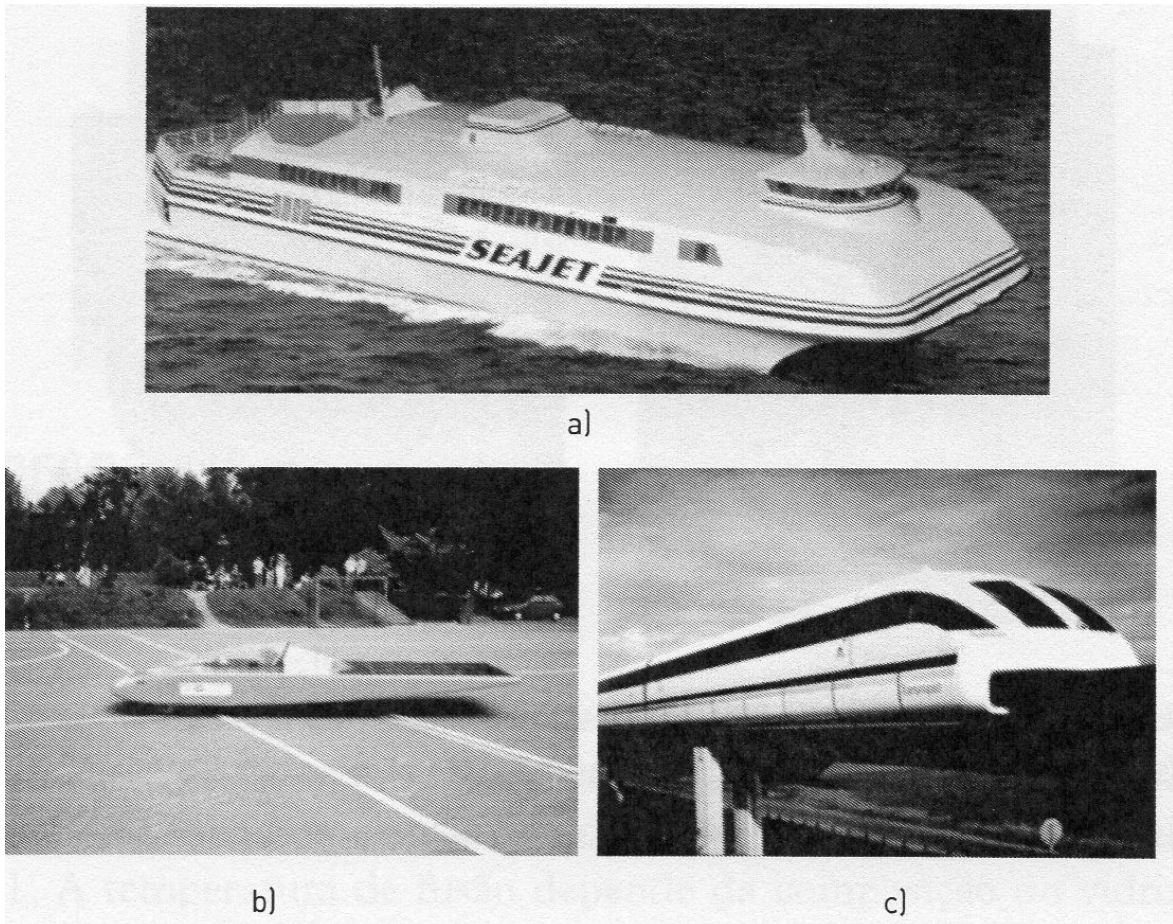


Imagem 1.5 – Aplicações de materiais compósitos no domínio dos transportes [13]: a)barco; b) veículo solar; c) comboio de alta velocidade.

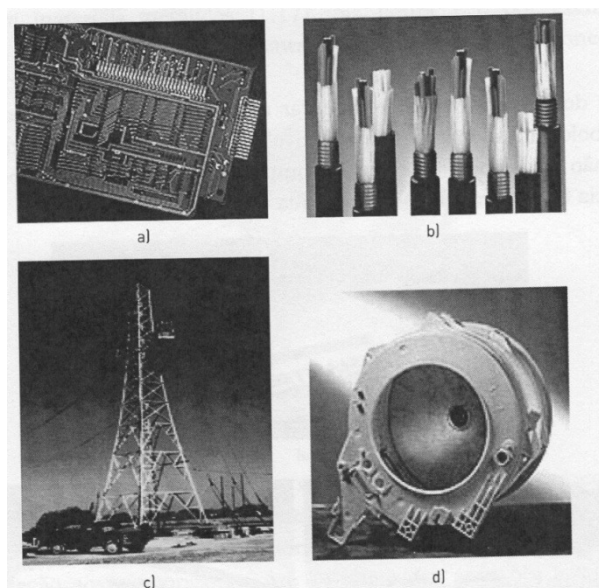


Imagem 1.6 – Aplicações na área dos componentes elétricos e eletrónicos [5]: a) circuito impresso com aplicação de uma resina de epóxico reforçada com fibras de vidro; b) cablagens em fibras óticas; c) torre de distribuição de energia elétrica com perfis pultrudidos; d) tambor de máquina de lavar em propileno reforçado com fibra de vidro.

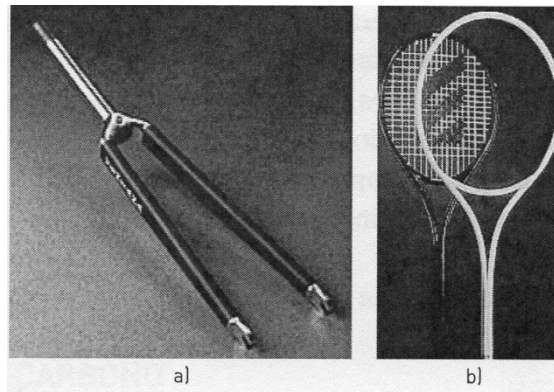


Imagem 1.7 – Aplicações de materiais compósitos em artigos desportivos: a) garfo de bicicleta que utiliza combinações de fibra de vidro sob a forma de entrelaçado e fibra de carbono [14]; b) raquetes de ténis [15].

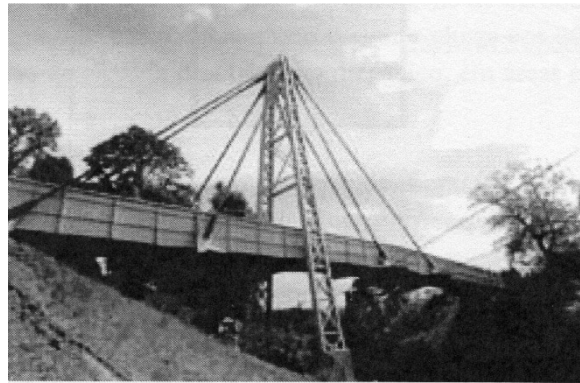


Imagem 1.8 – Aplicações de materiais em pontes [5].

1.2.1 MATRIZES

Um material compósito poderá ser classificado segundo o tipo de matriz que o constitui, podendo esta ser: polimérica, metálica, cerâmica, cimentosa ou de outro tipo.

As mais comuns são as poliméricas e dividem-se essencialmente em dois grupos: as matrizes termoplásticas e as termoendurecíveis. As matrizes termoplásticas são formadas a partir de macromoléculas individuais lineares sem qualquer reticulação entre si. Permitem ser aquecidas e arrefecidas, ser processadas e reprocessadas por

diversas vezes sem que as suas características sofram alterações. Os termoplásticos distinguem-se dos termoendurecíveis por serem mais resistentes ao impacto, terem maior tenacidade e apresentarem bastante menor higroscopicidade. Outras vantagens são o facto de poderem ser recicláveis, apresentarem boa resistência química, terem menor tempo de ciclo de processo, maior flexibilidade de ligação por fusão e serem mais facilmente reparáveis. São exemplos destas matrizes os polipropilenos, poliamidas e policarbonatos normalmente encontradas em aplicações não estruturais ou semiestruturais. Nos compósitos avançados de alta resistência, podemos encontrar PEEK (Poli-éter-éter-cetona), poliimidas e o PPS (Polisulfureto de fenileno). As matrizes termoendurecíveis são constituídas por polímeros em que as moléculas formam estruturas tridimensionais bastante rígidas. Uma vez aquecidas, estas matrizes assumem a sua forma final não permitindo qualquer reprocessamento. Como uma das principais vantagens, em relação às termoplásticas, de referir o facto de apresentarem maior facilidade de impregnação do reforço. São exemplos destas matrizes os poliésteres insaturados, as resinas de vinilester e as resinas fenólicas, facilmente encontradas em aplicações não estruturais e semiestruturais. Nos compósitos avançados de alta resistência, podemos encontrar os epóxidos, as bismaleimidas e as poliimidas.

Os compósitos de matriz metálica (geralmente designados por MMC's), devido à sua elevada resistência, têm tido um uso crescente na indústria automóvel. A matriz mais típica é o alumínio, mas outras matrizes também são utilizadas tais como: titânio, ferro ou magnésio. Apresentam como vantagens em relação às poliméricas, poderem ser utilizadas em temperaturas operacionais maiores, não serem inflamáveis e apresentarem maior resistência contra a degradação a fluidos orgânicos. Como desvantagens principais, de referir o peso mais elevado e o seu custo muito superior.

Os compósitos de matriz cerâmica (CMC's), são normalmente utilizados em ambientes de temperatura elevada ou atmosferas corrosivas. Algumas das suas aplicações mais comuns são na produção de ferramentas de corte para maquinaria de ligas metálicas duras.

Existem ainda outros tipos de materiais compósitos tais como: o betão, compósitos de madeira (ex: MDF), biocompósitos (ex: materiais biomiméticos), nanocompósitos (ex: nanotubos de carbono como reforço), materiais microcelulares (ex: osso e compósitos naturais).

1.2.2 REFORÇOS

Embora sejam os reforços os principais responsáveis pela resistência mecânica do material compósito, se não houver boa aderência da matriz à fibra, a distribuição de esforços não é eficiente. Nesse sentido o coeficiente de expansão térmica das fibras e da matriz devem ser muito semelhantes. Desta forma a escolha do material de reforço torna-se também essencial, sendo que os materiais mais utilizados são o vidro, o carbono, fibras aramídicas (kevlar®) e fibras de boro.

As fibras de vidro englobam a classe de tipo de reforço mais utilizado na indústria, essencialmente devido à sua excelente relação propriedades mecânicas/ peso. Este grupo subdivide-se essencialmente em três: fibras do tipo E, S e R. As fibras do tipo E são as mais comuns e forma progressivamente substituindo as fibras do tipo A (fortemente alcalinas). Destacam-se pelas boas propriedades eléctricas, mecânicas e químicas e o menor preço em relação às outras. As fibras dos tipos S e R são produzidas a partir de vidros de alta resistência e são muito aplicadas na indústria aeronáutica.

Tabela 1.2 – Propriedades de alguns tipos de fibra de vidro [69]

Propriedade	Vidro E	Vidro S	Vidro R
Densidade (g/cm ³)	2.6	2.49	2.55
Módulo de Young	73.0	85.5	86.0
Tensão de rotura (MPa)	3400	4580	4400
Deformação na rotura	4.4	5.3	5.2
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	5.0	2.9	4.0

Relativamente às fibras de carbono, designam-se desta forma se a percentagem de carbono se encontrar entre 80 e 95%, ou como grafite para os casos em que a percentagem de carbono é de 95% ou superior (utilização na indústria aeronáutica e aeroespacial).

Estas fibras são designadas de acordo com a sua resistência mecânica e comercializadas segundo a designação:

- » UHM (ultra high modulus) para fibras com módulos superiores a 500 GPa;
- » HM (high modulus) para fibras com módulos superiores a 300 GPa e rácio resistência mecânica/ módulo em tracção inferior a 1%;
- » IM (intermediate modulus) para fibras com módulos até 300 GPa e rácio resistência mecânica/ módulo de cerca de 1%;
- » fibras de baixo módulo, com valores inferiores a 100 GPa;
- » HS (high strength) para fibras de resistências à tracção superiores a 3 GPa e rácio resistência/ rigidez entre 0.015 e 0.02.

Tabela 1.3 – Propriedades de alguns tipos de fibra de carbono [69].

Propriedade	PAN	Alcatrão “Pitch”	“Rayon fibers”
Densidade (g/cm ³)	1.8	2.0	1.7
Módulo de Young	200-400	300-700	415-680
Tensão de rotura (MPa)	2480-5600	1900-2200	2070-2760
Deformação na rotura	0.6-1.2	1-1.5	0.5-0.6
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	-0.7 a -0.5	-1.6 a -0.9	-

Pelo facto deste tipo de fibras possuírem, no sentido longitudinal, um coeficiente de dilatação negativo ou quase nulo, quando ligados de forma correta, obtém-se materiais com coeficiente de dilatação nulo, o que torna estes materiais especialmente atrativos para aplicações na metrologia, na ótica e na indústria aeroespacial.

No que diz respeito às fibras aramídicas de referir que são produzidas à base de poliamidas aromáticas. Como principais vantagens apresentam uma grande resistência mecânica e a altas temperaturas (aplicado em coletes à prova de bala), excelente resistência química e mecânica, boa capacidade de amortecimento de vibrações, boa relação rigidez/ peso e boa resistência ao impacto e à fadiga. Como desvantagens de referir a baixa resistência à compressão e à flexão, bem como a elevada sensibilidade ao corte interlaminar.

Tabela 1.4 – Propriedades Mecânicas de fibras aramídicas [69].

Propriedade	Kevlar® 29	Kevlar® 49	Twaron®
Densidade (g/cm ³)	1.44	1.45	1.44
Módulo de Young	60	129	60
Tensão de rotura (MPa)	3000	3000	2600
Deformação na rotura	3.6	1.9	3
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	-2.0	-2.0	-

Finalmente, de referir as ligas de boro, que cuja aplicação essencialmente se enquadra na indústria aeronáutica devido ao seu custo elevado. Algumas propriedades mecânicas destas fibras são apresentadas na tabela 1.5.

Tabela 1.5 – Propriedades mecânicas de fibras de boro em função do seu diâmetro [69].

Propriedade	100µm	140µm	200µm
Densidade (g/cm ³)	2.61	2.47	2.39
Módulo de Young	400	400	400
Tensão de rotura (MPa)	3450	3450	3450
Deformação na rotura	0.7-0.9	0.7-0.9	0.7-0.9
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /°C)	4.9	4.9	4.9

Para além das já destacadas, existem ainda outros tipos de reforços utilizados em materiais compósitos, tais como são exemplo: as fibras de amianto, sisal, poliamidas, poliésteres e cerâmicas. Estas últimas são de grande aplicação quando o material tem de operar a altas temperaturas.

1.2.3 LAMINADOS

Dos vários tipos de compostos, normalmente utilizados, os laminados são os mais antigos. A sua característica principal e mais marcante é a existência de camadas

que podem ser facilmente detetadas numa observação visual simples, a olho nu. Num laminado duas das suas dimensões são claramente superiores á terceira. Os laminados são um tipo de material particularmente atraente para os engenheiros pela sua apresentação em filme ou folhas o que torna o design, especificação e controle da produção mais fácil. Entre as utilizações mais comuns, podemos identificar materiais sanduíche. Outra vantagem é a possibilidade de combinar o alinhamento das diferentes camadas a fim de conseguir atingir as propriedades mecânicas que são previamente definidas.

Quando todas as camadas de um compósito têm as suas fibras orientadas de acordo com um só sentido, este é definido como laminado unidirecional. Orientações diferentes podem ser definidas por diferentes camadas, geralmente definidas como um ângulo com uma direção de referência, indicadas como 0° . Neste caso, torna-se necessário ter um plano de simetria de forma a evitar o acoplamento entre a flexão e extensão. Camadas com ângulos de 90° e 45° para a direção referência são mais comuns, mas outros ângulos como 30° e 60° também podem ser encontradas. Normalmente, a direção de referência (0°) é a direção dos principais esforços prevista a que a peça será submetida, quando em serviço. Se a sequência de empilhamento das camadas de laminado tem orientações alternadas com 0° , 45° , 90° , -45° , o laminado é concebido como quasi-isotrópico. Nesse caso, as suas propriedades são aproximadamente idênticas em qualquer direção considerada num plano laminado. Deve-se notar que esta suposição geral é mais real para propriedades elásticas que para a resistência mecânica da peça [18]. Utilizando as ondas de Lamb, Otterloo et al. [19] determinaram que o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson mostram uma variação de 30% de acordo com a direção considerada num laminado quasi-isotrópico.

Quando a sequência de empilhamento é diferente, o laminado é anisotrópico, e a reação a uma determinada solitação dependerá e irá variar de acordo com a direção em que for realizada.

1.2.4 PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIMÉRICA

As propriedades de um material compósito serão o resultado da associação do conjunto matriz/ reforço e dependem de vários fatores, tais como:

- fração volúmica de fibras;
- tamanho, forma e orientação das fibras;
- processo de fabrico.

Em relação aos compósitos, as seguintes propriedades poderão ser destacadas:

- a resistência à tração é dependente da fração volúmica de fibras e da sua orientação;
- os compósitos não deformam plasticamente;
- têm boa resistência à fadiga;
- os compósitos não são sensíveis à corrosão, excepto quando existe contacto entre alumínio e fibras de carbono o que provoca corrosão galvânica;
- não reagem com produtos químicos normalmente utilizados em instalações industriais;
- os compósitos são normalmente menos resistentes ao choque que a maior parte dos materiais metálicos.

A tabela 1.6 compara compósitos com fracção volúmica de 60% com um aço normalmente usado na construção.

Tabela 1.6 – Exemplo de propriedades de compósitos com fração volúmica de 60% e matriz epóxida em comparação com o aço – indicam valores [20]

Propriedade	Vidro	Kevlar®	Carbono	Aço
Densidade (Kg/m ³)	2080	1350	1530	7800
Força de tração, direção das fibras l (MPa)	1250	1410	1270	400 a 600
Força de compressão, direção de fibras l (MPa)	600	280	1130	
Força de tração, direção perpendicular t (MPa)	35	28	42	
Força de compressão, direção perpendicular t (MPa)	141	141	141	
Força de cisalhamento no plano l,t (MPa)	63	45	63	
Força de cisalhamento intralaminar (MPa)	80	60	90	
Módulo de elasticidade direção de fibras l (MPa)	45000	85000	134000	205000
Módulo de elasticidade direção perpendicular t (MPa)	12000	5600	7000	
Módulo de corte (MPa)	4500	2100	4200	79000
Coefficiente de Poisson	0.3	0.34	0.25	0.3
Coefficiente de expansão térmica, direção das fibras l (K ⁻¹)	0.4-0.7x10 ⁻⁵	-0.4x10 ⁻⁵	-0.12x10 ⁻⁵	1.3x10 ⁻⁵
Coefficiente de expansão térmica, direção perpendicular t (K ⁻¹)	1.6-2x10 ⁻⁵	5.8x10 ⁻⁵	3.4x10 ⁻⁵	

1.2.5 PROCESSO DE FABRICO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

O processo de fabrico revela-se um fator importante nas características e propriedades dos materiais compósitos. Nos dias de hoje existem variadas formas de processamento, algumas das quais, numa breve apresentação serão apresentadas de seguida.

- **Moldação Manual**

Trata-se de um processo completamente manual e por isso muito dependente da habilidade do operário que o executa. Consiste na aplicação de uma resina de poliéster sobre a face do molde (“gel-coat”), com o objetivo de obter um bom acabamento superficial, seguido do empilhamento e da impregnação de sucessivas camadas de

reforço até à obtenção da espessura pretendida. É um processo indicado para a produção de protótipos ou séries muito pequenas.

- **Moldação por projeção**

É um processo bastante semelhante à moldação manual, com a diferença que é utilizada uma pistola de projeção para aplicar a resina e a fibra de forma simultânea sobre o molde. Trata-se também de um processo adequado a pequenas séries de fabrico, sendo que a qualidade das peças obtidas é normalmente inferior relativamente à moldação manual.

- **Moldação em Autoclave**

Este processo permite a produção de peças de grandes dimensões e geometria complexa e é especialmente adequado à produção de componentes para indústrias de responsabilidade como são a aeronáutica e o desporto automóvel. Consiste essencialmente em proceder à consolidação de um componente pré-formado através de ciclos de diferentes temperaturas, pressão e vácuo. Também este, não é um processo adequado para a produção em série, devido essencialmente ao forte investimento necessário e ao tempo necessário para a moldação.

- **Pultrusão**

Ao contrário dos processos anteriormente referidos, a pultrusão é um processo adequado à produção em série. Deste processo resultam perfis de secção constante,ocos ou maciços de diferentes formas. Consiste no tracionamento do reforço através de um recipiente que contém a matriz no estado líquido (normalmente resina de poliéster), sendo de seguida conduzido através de uma fieira de aço pré-aquecida. A mesma fieira é responsável pela polimerização do reforço e por dar a forma final ao perfil. No final da operação, normalmente existe um sistema de corte que, conforme o pretendido, dá o comprimento ao produto final.

Existem outros tipos de moldação tais como: moldação por vácuo, moldação por compressão, a frio e a quente, moldação por injeção (RTM, SRIM, RRIM), enrolamento filamentar, moldação por centrifugação e moldação em contínuo que não estão descritas pormenorizadamente neste trabalho mas são também de grande relevância no processamento de materiais compósitos.

1.3 MAQUINAGEM DE COMPÓSITOS

1.3.1 TEORIA DE REMOÇÃO DE MATERIAL

A base para os processos de maquinagem de materiais compósitos assentou no que já era conhecido a nível de máquinas, ferramentas e processos utilizados nos metais e ligas metálicas. Com o decorrer do tempo, o interesse nestes materiais aumentou, o que justifica este tipo de estudo de forma a otimizar os processos.

A maquinagem é um processo de fabrico no qual uma ferramenta de corte é utilizada para remover o excesso de material de uma peça. Este processo é classificado como ortogonal e bidimensional, ou como oblíquo ou tridimensional. Este último é um modelo mais genérico que considera um ângulo de inclinação diferente de 90° entre a aresta de corte e a direção da velocidade de corte. Este modelo geométrico, aproxima-se da operação de maquinagem real, é bastante complexo. No modelo de corte ortogonal, a aresta de corte é perpendicular á direção da velocidade de corte. Isto permite que o processo seja representado numa forma bidimensional, o que reduz a complexidade geométrica e permite estabelecer relações geométricas simples e a análise da força e da velocidade vectorial. Devido à sua simplicidade, este modelo de corte (ortogonal) é com frequência utilizado no desenvolvimento de trabalhos práticos e teóricos.

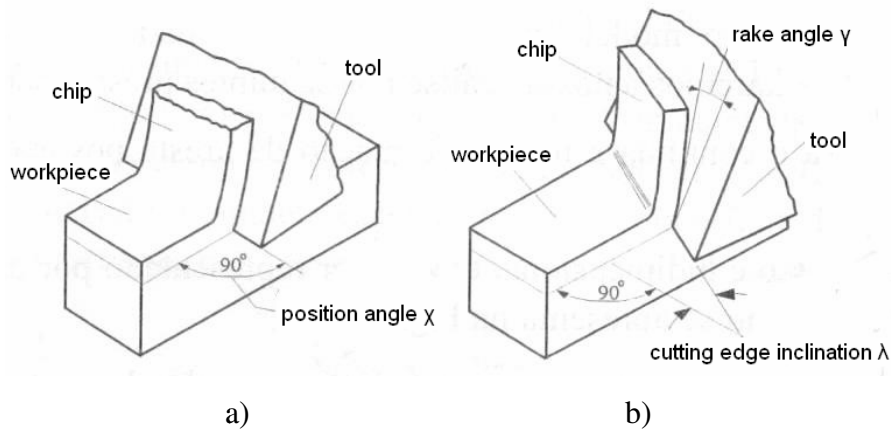


Imagem 1.9 – Ortogonal – a) – Oblíquo – b) – Modelos de corte [21]

A teoria de remoção de material é baseada na formação da avara por uma deformação plástica rápida sob uma ação de compressão. O tamanho e forma da avara dependerá de material maquinado e das condições de corte. Para materiais dúcteis, como os aços macios ou o alumínio, a avara é normalmente contínua. Para materiais frágeis, como o ferro fundido a avara é descontínua. Este tipo de avara também pode ser obtido na maquinagem de materiais dúcteis sob condições de corte específicas – taxa de alimentação alta e baixa velocidade.

A capacidade de maquinagem é o resultado do produto da força de corte e velocidade.

A taxa de material removido e consumo de energia é proporcional à velocidade de corte.

Outro parâmetro que pode ser definido é a energia específica de corte, p_s , que fornece informação acerca da eficiência do processo independentemente da velocidade de corte:

$$p_s = \frac{P_m}{Z_w} = \frac{F_c}{A_c} \quad (1.1),$$

onde P_m é a capacidade da máquina, Z_w é a taxa de remoção de material, F_c é a força de corte e A_c é a área de secção da avara.

1.3.2 FURAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

A furação é geralmente realizada com uma ferramenta cilíndrica rotativa que possui duas arestas de corte na sua extremidade. A ferramenta é denominada de broca. A alimentação da rotação da broca é realizada paralelamente ao eixo da máquina, de encontro à peça a furar, que se encontra fixa, para formar um furo, cujo diâmetro será uma função do diâmetro da broca. A taxa de movimento vertical é chamada de avanço, f , e é expresso em mm/rot. O avanço pode ainda ser convertido em taxa de avanço, f_r , expresso em mm/min, usando a equação:

$$f_r = f \times N \quad (1.2)$$

A velocidade de rotação da ferramenta, N , é expressa em rpm (rotações por minuto) e conhecendo este valor e o diâmetro da broca, D , é possível determinar a velocidade de corte, v_c , que não será mais que a velocidade tangencial no diâmetro exterior da ferramenta em m/s:

$$v_c = \frac{\pi * D * N}{1000} \quad (1.3).$$

Deve-se recordar que, na furação, como o centro da broca é abordado, a velocidade de corte diminui linearmente até zero. Na furação, a profundidade de corte é igual ao raio da furação.

A geometria padrão de uma broca helicoidal encontra-se ilustrada na imagem 1.10. O corpo da broca tem duas estrias em espiral, cujo ângulo é chamado de ângulo da hélice, que normalmente varia entre 30 e 35°. Uma das suas funções é a de evacuar as aparas criadas. A ponta da broca tem a forma de um cone, cujo design mais comum o mostrado na imagem 1.11 e que apresenta como valor típico para o ângulo da ponta 118°. Este ângulo tem uma influência decisiva na forma como a broca penetra no material até que o diâmetro máximo é atingido. Ligadas à ponta da broca, encontram-se duas arestas de corte – “lábios” – que conduzem até às estrias. A face de cada estria adjacente ao corte atua como a face de ataque da broca.

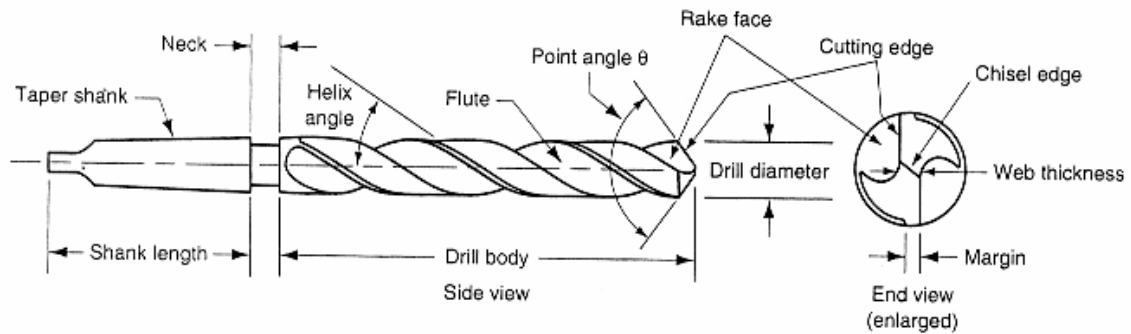


Imagem 1.10 – Geometria típica de uma broca [22]

Os ângulos principais de uma broca helicoidal são mostrados na imagem 1.11:

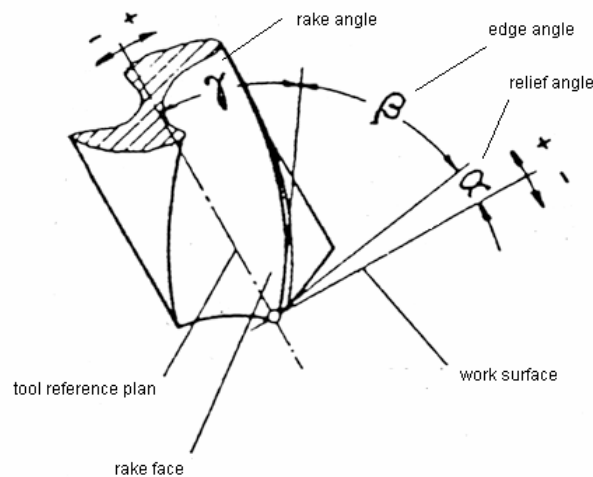


Imagem 1.11 – Ângulos de uma broca helicoidal [23]

Existem duas forças a considerar durante a furação: a força axial e o binário. Estas duas forças são afetadas pelos parâmetros de corte tais como: a velocidade, o avanço, a geometria da broca e o material a furar.

Através do valor do binário, M_t , é possível derivar para o valor da pressão de corte específica, pela equação:

$$K_c = \frac{4000 \times M_t}{\pi \times f_n \times D^2} \quad (1.4)$$

A ação de corte de uma broca helicoidal é complexa. À medida que a velocidade de corte varia em função da distância a partir do seu eixo, o mesmo acontece com a eficiência de corte, sendo menos eficiente no centro. O mecanismo de remoção da aparas é semelhante ao corte oblíquo, mas mais complicado devido à variação contínua da velocidade de corte e do ângulo de inclinação. A ação da ponta da broca é mais semelhante a uma extrusão.

Outros problemas da furação são a remoção da aparas e o aumento da temperatura. Quando não é permitida a utilização de fluidos para o arrefecimento é usual utilizar-se um procedimento, que consiste em retirar periodicamente a broca do furo, permitindo o seu arrefecimento e saída da aparas.

Sumariamente, podemos concluir que o processo de furação é bastante complexo e depende de uma grande variedade de fatores.

CAPITULO 2 – ESTADO-DA-ARTE

2.1 MAQUINAGEM DE MATERIAIS COMPÓSITOS

Apesar das suas propriedades físicas, tornarem os compósitos materiais bastante atrativos, a sua maquinagem coloca uma série de especificações e complicações em relação ao que acontece com os materiais metálicos. Normalmente, as peças maquinadas têm pobre aparência superficial e o desgaste das ferramentas é mais elevado. Um dos problemas da maquinagem dos compósitos está relacionado com as fibras normalmente usadas como reforço, que usualmente são muito abrasivas, o que provoca o desgaste das ferramentas e a deterioração das superfícies maquinadas [24]. A maquinagem pode causar vários danos, tais como a delaminação, o arrancamento de fibras, danos térmicos [25], bem como outros danos. Quando se considera a maquinagem de compósitos, os bons resultados estarão mais relacionados com as fibras e serão menos dependentes do material da matriz [26].

Koplev et al. [27] examinaram o processo de corte de plásticos reforçados com fibras de carbono unidirecionais reforçados em direções perpendiculares, bem como paralelamente à orientação das fibras. Uma série de ensaios foi realizada para examinar a área perto da ponta da ferramenta. O autor percebeu que a maquinagem deste tipo de material consiste numa série de fraturas, cada uma delas criando uma aparas. Quando este material é maquinado, um grande número de aparas é criado e a análise das mesmas revelou que não estão sujeitas a grande deformação plástica, conforme é comum nos materiais metálicos. Maquinar paralelamente à orientação das fibras resulta em superfícies mais lisas do que perpendicularmente e os danos provocados na matriz também são menores no primeiro caso.

2.1.1 MECANISMOS DE CORTE

Os materiais compósitos são caracterizados por não serem homogêneos e, na maior parte dos casos, não serem isotrópicos. A orientação das fibras em relação à direção de corte, é um fator que influencia o desenvolvimento de forças e tensões durante a maquinagem.

A definição de ângulo de orientação das fibras - θ - é mostrado na imagem 2.1.

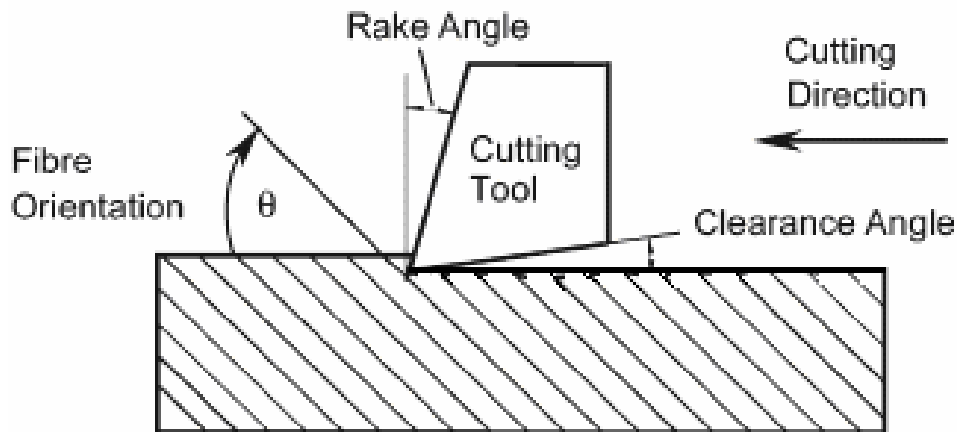


Imagem 2.1 – Definição de ângulo de orientação de fibras e outras variáveis

Wang and Chang [28], num trabalho experimental efetuado com compósitos carbono/ epóxido com fibras unidirecionais, verificaram que a orientação das fibras tem uma influência determinante nas forças desenvolvidas durante o corte conforme demonstrado na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Efeito do ângulo da orientação das fibras nas forças de corte.

Orientação das fibras θ	Força de Corte	Notas
0 a 60°	aumenta	-----
60 a 120°	diminui	aumenta se profundidade de corte for boa
Maior que 120°	aumenta	diminui se profundidade de corte for boa

A fratura das fibras desempenha um importante papel no mecanismo de corte e varia de acordo com o ângulo entre a direção de corte e a orientação da fibras – θ – Imagem 2.2.

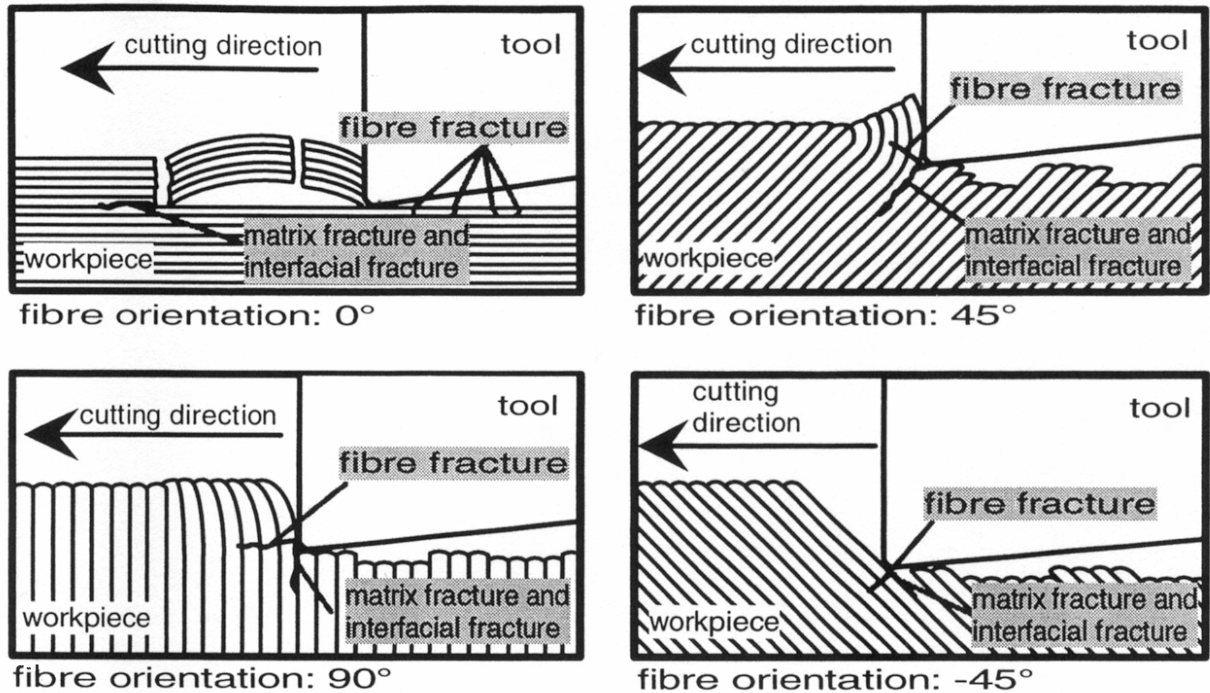


Imagem 2.2 – Mecanismos de corte para corte ortogonal [29]

Klock et al. [29] esquematizaram algumas conclusões no que diz respeito à fratura no corte ortogonal conforme imagem acima. Quando o ângulo com a orientação das fibras é de 0° , o laminado é sujeito a compressão. O material cede pela ocorrência de delaminação ou cedência pelas fibras interfaciais. Quando se maquina com um ângulo de 90° , as fibras são sujeitas a flexão e são arrancadas. À medida que o ângulo aumenta até 135° , as fibras são comprimidas e dobradas na direção oposta à orientação das fibras. A quebra das fibras é o resultado de flexão e compressão. Ângulos num intervalo entre 120° e 150° são os menos favoráveis, resultando em superfícies de pobre qualidade. A orientação de 45° é a mais favorável ao corte. As fibras são sujeitas a flexão tensões de tração e partem. Por vezes, fibras individuais são arrancadas da matriz devido a adesão insuficiente.

Tabela 2.2 – Deformação e mecanismos de corte de acordo com orientação das fibras

Orientação de fibras θ	Tensão nas fibras	Quebra das fibras	Notas
0°	compressão	delaminação	
$0^\circ < \theta < 90^\circ$	flexão e tração	quebra	melhor valor 45°
90°	flexão	arrancamento	
$> 90^\circ$	flexão e compressão	quebra	menos favorável

Wang and Chang [28] relataram os mecanismos de deformação de fibras na zona de corte com a orientação das fibras em relação ao ângulo θ . Quando este ângulo é inferior a 90° (imagem 2.3 – a)) a fibra é puxada pela ferramenta na direção perpendicular em relação ao seu eixo e à superfície da peça a maquinar. As fibras são suportadas por material por cortar e a flexão das fibras é pequena. Uma tensão de tração é criada ao longo do eixo das fibras e estas têm tendência para fraturar facilmente.

A rugosidade e danos apresentados nas superfícies são pequenos. Para ângulos superiores a 90° , os autores dividem o mecanismo de acordo com a profundidade de corte. Para pequenas profundidades (imagem 2.3 – b)) as fibras são sujeitas a uma compressão axial. Como resultado dessa força, o material da matriz à volta das fibras é fraturado. Quando a profundidade de corte é superior (imagem 2.3 – c)), as fibras são puxadas para o exterior da peça a maquinar. Isto causa superfícies com maior rugosidade e maiores danos.

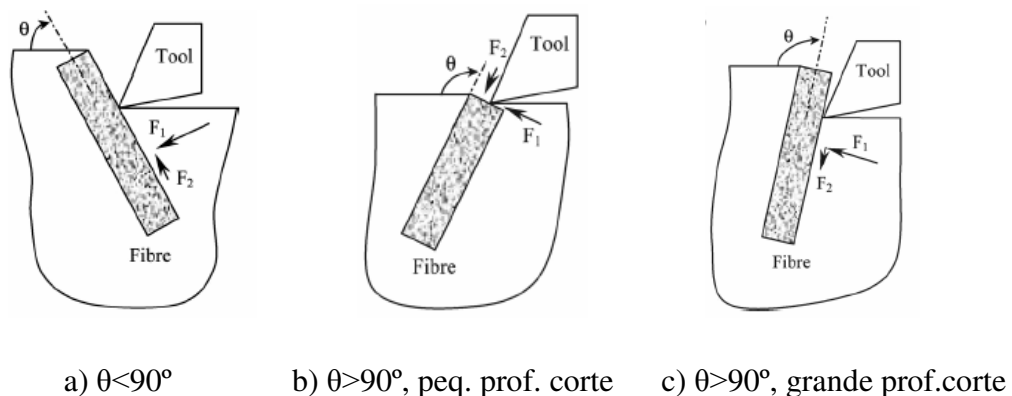


Imagem 2.3 – Esquema de mecanismos de corte [28]

2.1.2 FURAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS

De todos os processos de maquinagem a aplicar aos materiais compósitos, a furação assume especial importância pois permite que várias peças possam ser ligadas de forma a permitir a sua utilização em estruturas mais complexas.

O conhecimento existente deste processo, teve por base o existente para os materiais metálicos, pelo que o tipo de ferramentas (brocas) assim como os parâmetros utilizados necessitem de alguma adequação às características destes tipos de materiais de forma a se tornarem eficientes.

O facto de estes materiais não serem homogêneos, levanta uma série de problemas na furação que poderão causar diversos defeitos nas peças como é o caso da delaminação, fissuras interlaminares, deslocamento fibra/ matriz e danos de origem térmica (imagem 2.4).

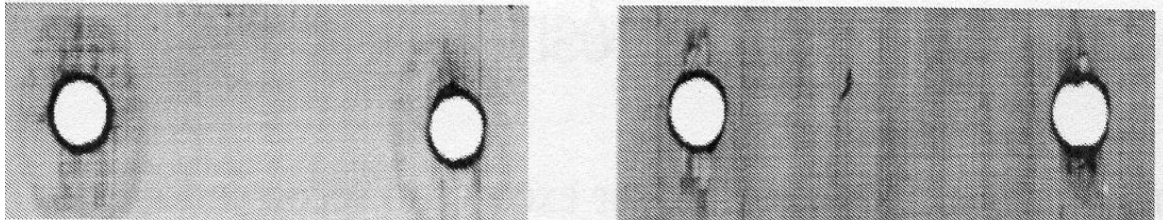


Imagem 2.4 – Visualização por radiografia por raios X com líquido contrastante dos danos causados por furação em materiais compósitos [69].

A delaminação é um dos defeitos mais comuns e mais graves provocados pela furação e divide-se em dois tipos de acordo com a região do laminado onde ocorrem. Quando se dá à entrada denominam-se de “peel-up” [30] e quando se dão à saída denominam-se de “push-out” [31].

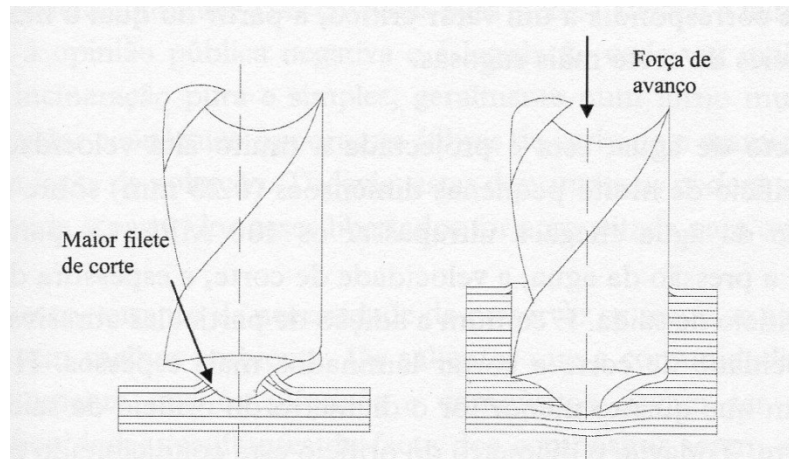


Imagem 2.5 – Delaminações causadas pela furação de materiais compósitos [69].

Alguns estudos foram já realizados tendo como objetivo a diminuição destes defeitos entre os quais: Meade [32], em que demonstrou que utilizando ferramentas de corte mais pontiagudas a penetração na peça se dá de forma menos brusca e por isso diminui o risco de delaminação; e Tsao et al. [33] e Durão et al. [34], que na sequência do que havia sido verificado por Meade, verificaram que a execução de pré-furos de menor diâmetro serviria para diminuir a força axial durante a furação tendo como consequência o menor risco de delaminação.

2.1.2.1 FURAÇÃO DE COMPÓSITOS CARBONO/EPÓXIDO

Piquet et al. [35] efetuou uma análise experimental dos danos provocados pela furação de placas finas de carbono/epóxico usando brocas especiais. As placas possuíam propriedades quasi-isotrópicas. Segundo os autores, o melhor material para a furação é o carboneto de tungstênio tendo por base fatores económicos quando comparado com o diamante policristalino. A delaminação “peel-up” pode ser reduzida com a utilização de um pequeno ângulo de inclinação (6°) impedindo a primeira camada de levantar e ser arrancada. Um grande número de arestas cortantes, de três a seis,

aumentam o contacto entre a ferramenta e a peça, facilitando o arrefecimento. É necessário um ângulo de ponta de 118° para as arestas de corte principais e 70° para as arestas de corte secundárias. A dimensão da ponta da broca tem uma relação direta com o início da delaminação, logo é necessário que seja o mais reduzida possível. Normalmente, a extremidade não cortante da broca representa 20% do seu diâmetro. As condições de corte podem ser melhoradas pela aplicação de uma taxa de alimentação variável, combinando uma baixo tempo de maquinagem nas camadas iniciais usando avanços elevados com a redução da força de impulso axial, utilizando baixos valores de avanço nas últimas camadas para evitar a delaminação. Este procedimento requer a utilização de máquinas de furação CNC.

Outros estudos foram realizados na furação de carbono/epóxico na tentativa de obter furos sem delaminação, usando métodos alternativos á furação convencional.

Park et al. [36] aplicaram o método de alimentação helicoidal para evitar a delaminação. A ferramenta utilizada foi uma broca com núcleo de ferro fundido revestida a diamante de duas formas diferentes: reta e arredondada. Esta última apresentou os melhores resultados, uma vez que não se observou existência de delaminação nos furos realizados. Foi ainda, utilizada uma broca de carboneto de tungsténio para comparação de resultado e verificou-se a diminuição da qualidade dos furos e a rápida degradação da ferramenta devido ao desgaste da aresta de corte. O uso de alimentação helicoidal permite que a operação de furação seja executada de forma eficiente sem qualquer limitação no que diz respeito à profundidade do furo.

Person et al. [37, 38] estudaram o efeito dos defeitos provenientes da furação, na força e fadiga provocados em laminados de carbono/epóxico. Para esse efeito, compararam dois métodos tradicionais de maquinagem usando uma broca PCD, uma broca Dagger e o método de furação orbital. Este é um método patenteado pela NOVATOR®, desenvolvido por Zackrisson, Person e Bäcklund nno Departamento de Aeronáutica do Kungl Tekniska Högskolan (KTH) na Suécia. O método de geração do furo é mostrado na imagem 2.6.

O furo é maquinado, tanto axialmente como radialmente, rodando a ferramenta de corte em torno do seu próprio eixo e também excêntricamente sobre um eixo principal, enquanto avança sobre o laminado.

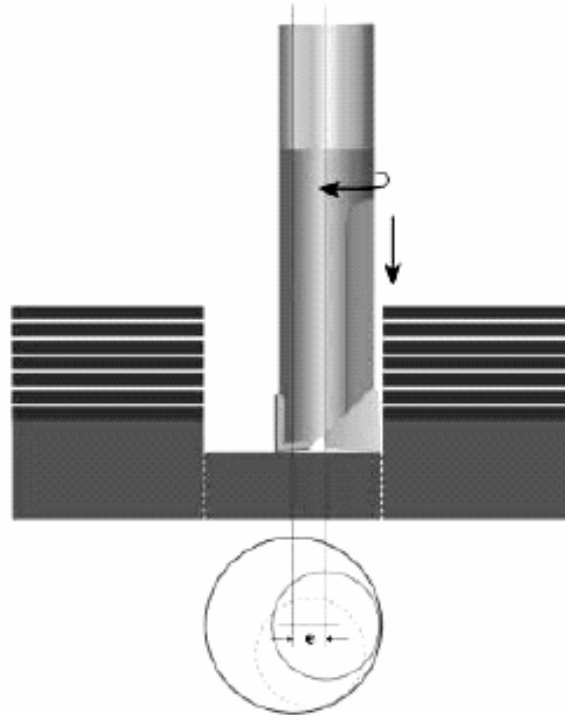


Imagem 2.6 – Geração de furo usando método orbital. Fonte NOVATOR AB.

Algumas vantagens deste método são referidas pelos autores em [37], quando comparado com outros métodos tradicionais de furação. Primeiro, elimina-se o centro estacionário da ferramenta, diminuindo assim a força axial. Em segundo lugar, não se corre o risco de “encravamento”, pois o diâmetro da ferramenta é substancialmente mais pequeno que o diâmetro do furo. Por esta razão, as arestas de corte estão apenas parcialmente, e de forma intermitente, em contacto com a superfície do furo, permitindo a eficiente remoção do material do corte e o arrefecimento eficiente da ferramenta. Outras vantagens, serão a possibilidade de utilização de um diâmetro de ferramenta para orifícios de vários diâmetros e a precisão do furo que será determinado pelo posicionamento da ferramenta e não pela precisão da ferramenta propriamente dita, reduzindo assim o seu custo.

Foram furadas placas carbono/epóxico quasi-isotrópicas utilizando os três métodos e conclusões foram retiradas. As radiografias demonstram não existirem danos á volta da órbita dos furos, danos estendidos a quase um quarto do raio nos furos efetuados com as brocas Dagger e resultados idênticos nos efetuados com as brocas PCD. Testes estáticos de carga deram o valor mais alto para a furação orbital com uma redução de 2 a 3 % para as brocas Dagger e cerca de 11% para as PCD. Testes de fadiga deram resultados 8 a 10% mais baixos para PCD e Dagger do que para a furação orbital.

Dharan e Won [39] conduziram uma série de experiências de modo a propor um esquema de maquinagem que evitasse a delaminação por “peel-up” À entrada da broca e por “push-out” à saída. O estudo da ação de furação dividiu este processo em três componentes: extrusão na ponta da broca, corte secundário na aresta da ponta da broca e corte primário nos bordos. Para furação de materiais metálicos, a percentagem da força axial que atua na ponta da broca é de cerca de 50 a 60% da força axial total. Por outro lado, o binário na ponta da broca é relativamente pequeno.

Os autores dividiram o ciclo de furação em sete passos:

- 1- Aproximação: a broca aproxima-se da peça;
- 2- Contacto: a ponta da broca entra em contacto com a peça;
- 3- Furação normal: furação sem delaminação;
- 4- Início da delaminação: quando a axial crítica é excedida;
- 5- Broca “descoberta”: a ponta da broca sai da peça;
- 6- Execução: o furo é completo;
- 7- Retirada da broca: a broca deve ser retirada para trás e retirada da peça.

Um sistema inteligente deve ser capaz de executar os passos de 1 a 7 o mais rapidamente possível. Durante o passo 3, o avanço deve ser controlado para evitar a delaminação.

Hocheng et al. [40] analisaram a maquinabilidade de compósitos reforçados com carbono utilizando diferentes materiais para a matriz: epóxico, PEEK e ABS. A observação experimental visou discutir as características da apara e o efeito da velocidade de corte e do avanço na energia específica de corte e na força axial. De um modo geral, um aumento do avanço causa um aumento da força axial e uma diminuição da energia específica de corte. Os efeitos da velocidade de corte são menos evidentes e para os dois tipos de empilhamento usados neste trabalho – $[0/90]_{4s}$ e $[0/\pm 45/90]_{2s}$ – não se verificou qualquer influência na força axial. As brocas em carbonetos de tungstênio são adequadas para a furação destes laminados e devem ser usados menores ângulos de ponta quando se fura materiais com menos resistência à fratura interlaminar.

No trabalho experimental descrito em [40], o material com maior resistência à fratura interlaminar no Modo I – G_{IC} – foi o carbono/PEEK com um valor de 1800 J/mm^2 e a qualidade dos bordos foi superior quando comparada com os exemplos em carbono/epóxico, cujo valor de G_{IC} foi 800 J/mm^2 . Os autores verificaram ainda que o empilhamento do laminado não influencia a qualidade dos bordos do furo. Como conclusão deste trabalho, apresentam um esquema de otimização da operação de furação destes materiais (Imagem 2.7).

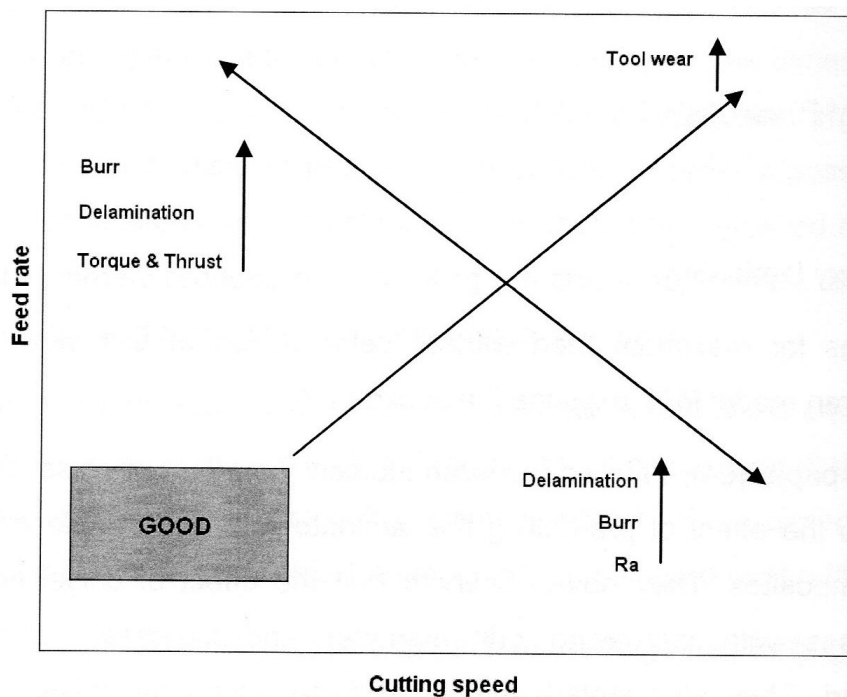


Imagem 2.7 – Esquema proposto para furação de compósitos [40].

Tsao e Hocheng [41] estudaram o efeito do comprimento da ponta da broca e pré-furo associado à delaminação. Dois comprimentos de aresta foram considerados, com 0,15 e 0,2 do diâmetro da broca. Verificaram uma redução da força de 25 a 50% quando compararam os resultados dos furos sem pré-furação, usando brocas de 10mm, uma velocidade de 1000 rpm e avanços entre 0,008 e 0,012 mm/rot. Na opinião dos autores, baseando-se no trabalho experimental e nos modelos desenvolvidos, as dimensões da ponta da broca devem rondar os 0,09 e 0,2 do diâmetro da broca.

Chen [42] propôs um factor de comparação que permite a avaliação e análise da extensão da delaminação num laminado compósito. Este fator, denominado Fator de Delaminação, F_d , é definido pelo quociente entre o diâmetro máximo da delaminação, D_{max} , e o diâmetro nominal do furo, D ,

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

Neste trabalho experimental, o autor examinou os efeitos da geometria da ferramenta, dos parâmetros de corte e do desgaste das ferramentas no fator de delaminação. Foram utilizados dois tipos de brocas diferentes: brocas de carbonetos de tungstênio e brocas de HSS com 5 mm de diâmetro. A avaliação dos danos foi feita usando leituras de raios X e inspeção não-destrutiva. Os resultados demonstram uma relação quase linear entre o fator de delaminação e as forças média de avanço para os dois tipos de materiais das brocas. O autor também concluiu que as forças de avanço aumentaram quando o ângulo de ponta da broca também aumenta. O desgaste das ferramentas causa o aumento do fator de delaminação, assim como o aumento da força axial provoca o aumento do desgaste da ferramenta.

Davim et al. [43, 44] apresentaram vários estudos acerca do efeito dos parâmetros de corte no fator de delaminação, baseados no método de Taguchi e no

método ANOVA. Os autores concluíram que a taxa de avanço tem a maior influência na pressão específica de corte e força axial, e quando esta aumenta, os danos também aumentam. Os mesmos efeitos são verificados quando a velocidade de corte é maior, embora de forma menos significativa.

Mais recentemente, Durão et al. [45] fizeram um estudo da avaliação das ferramentas para a furação de laminados compósitos. Neste trabalho foi feito um estudo comparativo de geometrias de broca com o objetivo de reduzir o dano associado. Para tal, foram analisadas as forças desenvolvidas durante o processo de furação, a extensão da zona delaminada e efetuados ensaios mecânicos com o objetivo de estabelecer uma relação entre os diversos resultados e as características mecânicas das placas maquinadas.

Deste trabalho experimental foram retiradas as seguintes conclusões:

- os valores de força máxima durante a furação dependem da geometria da broca e do avanço escolhido;
- os valores de delaminação dependem igualmente da geometria da broca e do avanço escolhido, embora não da mesma forma;
- o aumento do avanço faz aumentar quer o valor da força máxima durante a furação quer a delaminação observada;
- a geometria da broca tem efeitos diversos, sendo o valor mais baixo de força obtido com a broca Dagger e o valor mais baixo de delaminação, com a broca helicoidal com ângulo de ponta de 120°;
- os valores obtidos no ensaio mecânico apontam para um melhor resultado nas placas furadas com a broca experimental bidiâmetral de dentes direitos;
- os valores obtidos nos ensaios mecânicos não refletem a totalidade das situações experimentais, pelo que devem ser considerados apenas como indicadores;

- na seleção da geometria de broca o fator delaminação deverá ser considerado primordial pelo que, nas condições experimentais descritas, a melhor opção foi o uso de um avanço baixo – 0,02 mm/rot – com uma broca helicoidal com 120° de ângulo de ponta.

Num outro estudo, Durão et al. [46] pretenderam comparar o dano provocado pela furação em função do material, geometria e diâmetro da ferramenta. Neste trabalho experimental foram utilizadas placas carbono/epóxico com 4 mm de espessura e três diferentes ferramentas de corte: broca helicoidal com 120° de ângulo de ponta, broca Brad e broca Step. Após procedimento experimental foram retiradas as seguintes conclusões:

- o carboneto de tungstênio e o diamante policristalino são materiais adequados para a furação de placas de materiais compósitos;
- a geometria da broca teve uma influência direta nos resultados da força axial, extensão da zona delaminada e resistência mecânica;
- broca Brad – melhores resultados na força axial e no rácio de dano;
- broca helicoidal – melhor valor de resistência mecânica;
- aumento do diâmetro – maiores forças axiais, mas a extensão da zona delaminada não aumenta proporcionalmente;
- broca bidimetral de dentes direitos – uma solução de compromisso;
- Os resultados demonstrados evidenciam a necessidade de uma seleção adequada da geometria da broca e dos parâmetros de furação para minimizar a delaminação.

2.1.3 NOTAS CONCLUSIVAS

De uma forma geral, os compósitos são produzidos na sua forma final pelo que a maquinagem, quando necessária, é considerada um processo de acabamento.

A crescente utilização deste tipo de materiais e em indústrias de grande responsabilidade faz com que tenha surgido a necessidade de proceder a processo de maquinagem de forma a ligar peças mais simples formando estruturas complexas.

As características particulares dos compósitos resultam numa série de complicações na sua maquinagem. Ao contrário da maquinagem de materiais metálicos que já foi amplamente estudada e existem já uma vasta série de publicações acerca deste assunto, a maquinagem de compósitos é um assunto ainda pouco explorado e por isso menos conhecido.

Foram já realizados diferentes estudos com este âmbito, de encontro à otimização deste processo, tendo em conta a velocidade de corte, o avanço, a geometria e material da ferramenta, os materiais a maquinar, chegando-se já a algumas conclusões satisfatórias, mas ficando a ideia que este é um tema ainda bastante desconhecido e desafiante.

2.2 PROCESSOS DE MAQUINAGEM NÃO CONVENCIONAIS

Para além dos processos convencionais de maquinagem já referidos, devemos considerar a existência de outros processos alternativos. A pobre maquinabilidade dos compósitos devido á sua elevada dureza, a baixa resistênci térmica ou simplesmente a necessidade de obter formas mais complexa, serão motivos para a exploração destes métodos menos convencionais. Estes processos são já conhecidos da maquinagem de outros materiais tais como os metálicos. Assim, podemos referir como processos utilizados para a maquinagem de materiais compósitos: o corte por laser, o jacto de água e jacto de água abrasivo, os ultrassons, a electro-erosão, a maquinagem por feixe de elétrões e a maquinagem eletroquímica. Neste trabalho vamos explorar de forma mais significativa os dois primeiros processos, por serem os de maior utilização, referindo suas características, aplicações e vantagens em relação a outros. Relativamente aos restantes será feita uma abordagem mais leve, tentando dar uma ideia básica das suas características.

2.2.1 LASER

O corte por laser é considerado um processo térmico. Os lasers mais frequentemente utilizados são YAG/Nd e CO₂. Este processo apresenta como vantagem de não haver contacto físico e como uma das principais desvantagens o facto, de no corte de materiais compósitos, poder resultar dano térmico na matriz devido ao calor conduzido através das fibras.

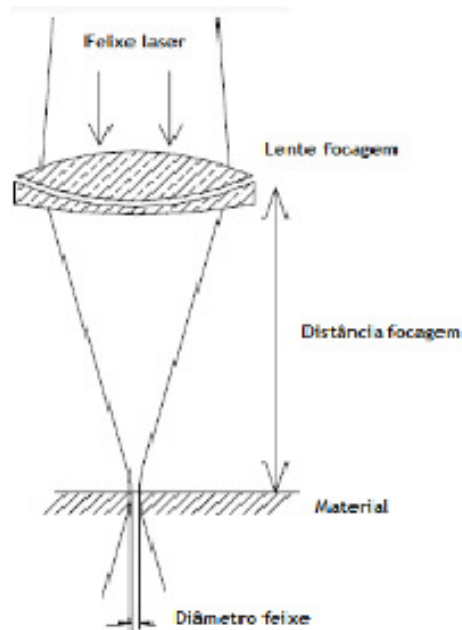


Imagem 2.8 – Feixe de luz de alta potência, coerente, transversal, focalizado e posicionado.

Principais características dos Lasers:

- Nd: YAG laser:
 - comprimento de onda 1,06 μm ;
 - frequência 200 impulsos por segundo;
 - energia (média) 500W;
 - utilizável em compósitos de matriz metálica (sem matriz orgânica).

- Laser CO₂:
 - comprimento de onda 10,6 μm ;
 - frequência 10^{-4} impulsos por segundo;
 - energia (média) 1500W;
 - utilizável em fibras de vidro, carbono e kevlar®.

Como principais desvantagens deste processo, podemos referir a existência de uma zona termicamente afetada, a necessidade de ventilação (partículas nocivas à saúde) e a degradação térmica, impossibilitando o seu uso em alguns materiais.

2.2.2 JACTO DE ÁGUA

Trata-se de uma tecnologia relativamente recente, utilizável em compósitos, metais, madeiras e plásticos. Pode ser aplicado na maior parte dos materiais, sendo normalmente aplicado em materiais metálicos, densos e casos de elevadas espessuras.

Apresenta como vantagens:

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

Como desvantagens deste processo, podemos referir:

- elevados níveis de ruído;
- podem ser cortados diferentes materiais, contudo é apenas económico para um número restrito de materiais, pois a taxa de corte por vezes é muito reduzida e o tempo de corte da peça torna-se longo;
- a precisão dimensional do corte é afetada em casos em que a espessura da peça seja elevada;
- o fluido de corte tem de ser previamente filtrado para reduzir o desgaste causado no orifício de saída;

- no caso de materiais compósitos, se houver pouca adição de abrasivo ou velocidade insuficiente no fluido de corte, ocorre delaminação.

2.2.3 OUTROS PROCESSOS

O **jato de água abrasivo** é um processo muito similar ao corte por jacto de água com a diferença da adição de um material abrasivo ao jacto de água. A água é expelida com alta pressão por um bocal em direção ao material a cortar tendo acoplada uma câmara que contém o material abrasivo em pó. Este processo é condicionado por diferentes variáveis, tais como: pressão, caudal, diâmetro do jato, abrasivo, distância e velocidade de corte.

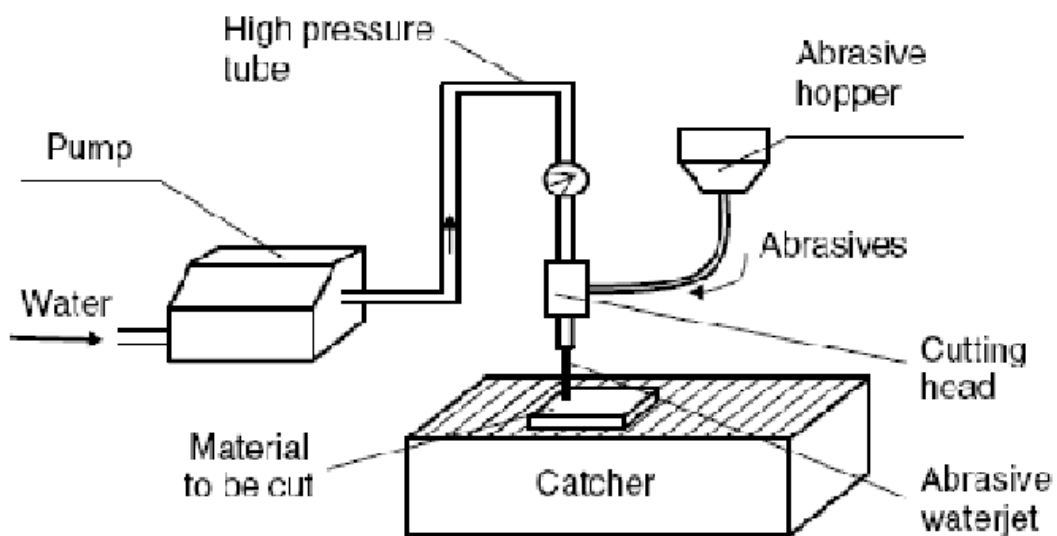


Imagem 2.9 – Esquema de funcionamento de um sistema de corte por jato de água abrasivo.

Nos **ultrassons**, é utilizada uma pasta abrasiva que embate com alta velocidade na peça a maquinar. São normalmente utilizadas neste processo, amplitudes entre os 0,05 e 0,125 mm e frequências de 20 a 30 kHz. Apresenta como vantagem o fato de reduzir a delaminação, o arrancamento de fibras e a produção de rebarbas.

A maquinagem por **electro-erosão** é baseada no efeito de erosão provocado por uma descarga elétrica entre a peça e um elétrodo. É um processo essencialmente utilizado em MMC's e outros compósitos bons condutores elétricos.

A maquinagem por **feixe de eletrões** é um processo termelétrico considerado de micro-maquinagem. O embate de eletrões contra a superfície a maquinar provoca a vaporização localizada. Apresenta como vantagem, o facto de não provocar danos térmicos e como desvantagem o facto de exigir uma câmara de vácuo.

Relativamente à maquinagem **eletroquímica**, consiste na remoção de material em peças eletricamente condutoras por dissolução anódica (é o oposto da electrodposição). Como vantagens, de referir que pode ser utilizado em formas complexas, ranhuras e furos pequenos e o facto de não causar danos térmicos.

2.2.4 COMPARAÇÃO DE PROCESSOS NÃO CONVENCIONAIS

De forma a comparar características dos métodos anteriormente referidos apresenta-se a tabela 2.3:

Tabela 2.3 – Comparação de processos não convencionais.

Processo	Taxa de remoção de material (cm ³ /s)	Energia específica de corte (GJ/m ³)
Laser	0,0001	150000
Jacto de água abrasivo	0,0001	10000
Feixe de eletrões	0,001	1500
Ultrassons	0,005	150
Electro-erosão	0,1	150
Eletroquímica	1	500
Convencional	14	3

2.2.5 NOTAS CONCLUSIVAS

Uma grande variedade de processos não convencionais de maquinagem é já utilizado nos materiais compósitos. Estes métodos apresentam algumas vantagens em relação aos métodos convencionais, pelo que será normal o crescimento na utilização dos mesmos. Esta crescente utilização levará a que, uma das suas principais desvantagens, que será seguramente o fator económico, seja reduzida de forma a que estes processo se possam tornar ainda mais atrativos.

2.3 DANOS ASSOCIADOS

Os danos provocados nos materiais compósitos poderão ter várias origens: no seu fabrico, montagem, transporte, ou mesmo durante a sua utilização normal. A dificuldade de fácil deteção de alguns destes danos, associada ao facto de estes materiais serem muitas vezes utilizados em estruturas críticas, faz com que este assunto seja de extrema importância devido aos problemas dele associados.

Uma das soluções, poderia passar pelo sobredimensionamento destas estruturas, mas isso tende a refletir-se no peso e no custo final da peça pelo que nem sempre será uma possibilidade a considerar.

2.3.1 DANOS DE FABRICO

Alguns dos defeitos das peças fabricadas podem ser detetados, logo após o seu fabrico, tais como:

- ausência de cura, ou cura insuficiente da matriz;
- uso excessivo ou em falta de resina;
- existência de “vazios”;
- inclusões;
- desalinhamento de fibras;
- desalinhamento entre camadas;
- delaminação;
- defeito de adesão à matriz.

De forma a permitir a avaliação expedita dos danos apresentados, diversos tipos de dano foram definidos (tabela 2.4). Estas definições, associadas à inspeção visual ou testes não destrutivos, permitirá decidir rapidamente se a peça terá reparação ou não, e qual a reparação necessária.

Tabela 2.4 – Tipos de dano e sua descrição [47].

Tipo de Dano	Descrição
Delaminação	Separação de camadas adjacentes
Fissura	Fraturas na matriz e/ou fibras
Abrasão	Desgaste de uma porção da superfície por causas naturais, mecânicas ou humanas. É um dano superficial.
Amolgadela/ mozza	Depressão côncava que não causa rotura nem deslocamento
Ranhura	Mossa mais grave, algumas camadas do compósito sofrem danos
Arranhão	Descontinuidade superficial alongada (comprimento >>> largura)
Impacto	Dano causado por contacto com objeto estranho
Corte	Fibras danificadas por uma ponta afiada

2.3.2 DEFEITOS DE MAQUINAGEM

A furação é o processo mais utilizado na maquinagem de materiais compósitos. Os danos normalmente associados a esta operação são: a delaminação, a descolagem fibra/matriz, fissuras intralaminares, rebarbas e danos térmicos (tabela 2.5) [28, 48, 49, 50, 51, 52, 53]. A gravidade/existência destes danos resulta das ferramentas utilizadas e dos parâmetros escolhidos.

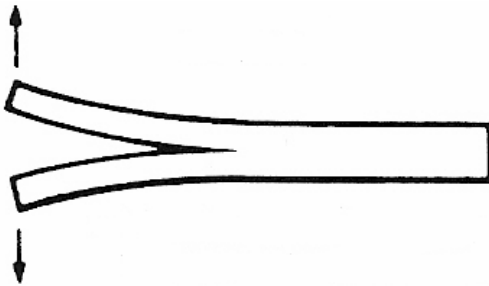
Tabela 2.5 – Danos associados a maquinagem e sua breve descrição.

Dano	Descrição
Delaminação	Separação de camadas adjacentes.
Descolagem fibra/matriz	Descolagem por arrancamento das fibras da matriz afetando a rugosidade da superfície da peça maquinada. É influenciada pelo material da ferramenta, anisotropia, e cargas aplicadas.
Fissuras intralaminares	Têm início nas camadas interiores do laminado. Começam segundo uma inclinação de 60° com o plano da camada, estendendo-se segundo essa orientação até chegar ao plano interlaminar, resultando em delaminação.
Rebarbas	São pequenas porções de material partido que fica agarrado às bordas do corte.
Danos térmicos	Consequência da fricção entre a peça e aresta de corte da ferramenta. Devido à sua baixa condutibilidade térmica, nos compósitos reforçados com fibras de carbono, é um problema grave e a ter em consideração.

2.4 MODELOS ANALÍTICOS DE DANO

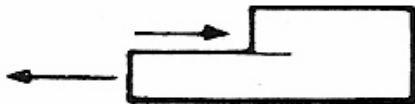
È de uma forma geral assumido, que os mecanismos de delaminação (tipo de dano em que a propagação está confinada a um plano) podem ser enquadrados na Mecânica de Fratura Linear Elástica (MFLE) cujos esquemas de determinação das taxas críticas de libertação de energia, G_c (Modo I, II e III), são apresentados:

- Modo I:



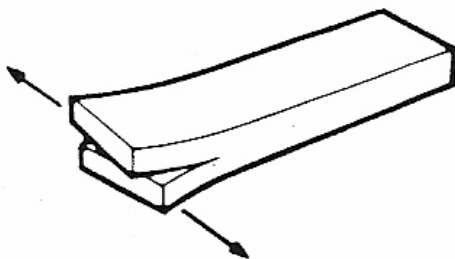
Aplicação de uma força perpendicular ao plano de propagação da fenda.

- Modo II:



Aplicações de forças de corte na direção da propagação da fenda.

- Modo III:



Aplicações de forças de corte paralelas à direção da propagação da fenda.

De referir a possibilidade de existirem situações práticas em que se considera haver a coexistência dos modos I e II (por vezes o Modo III) – Modo Misto.

Nestes modelos analíticos de dano, essencialmente interessa prever a força crítica, F_{crit} , para o início da delaminação nas operações de furação.

O modelo mais aceite, é o modelo de delaminação de Hocheng e Dharan [30] de 1990. Os autores estudaram o início da delaminação em duas situações diferente: “peel-up” (imagem 2.10) à entrada da broca e “push-out” (imagem 2.11) à saída. O mecanismo de delaminação por “peel-up” é causado pelo facto da força de corte “empurrar” o material de corte para a espiral da broca. O material tende a subir pela espiral da ferramenta antes de estar completamente maquinado. É introduzida uma força que tende a separar as camadas superiores das camadas por cortar.

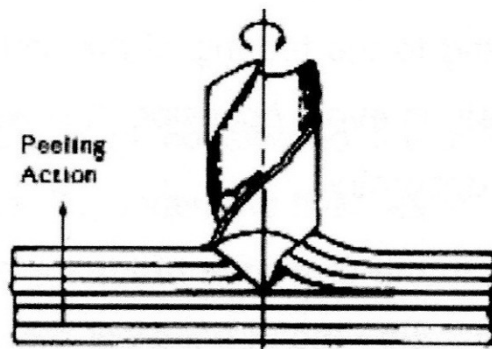


Imagem 2.10 – Mecanismo de delaminação “peel-up” [30].

O mecanismo de delaminação “push-out” é o resultado da força de compressão axial que a broca exerce sobre as camadas do laminado não cortadas, cuja espessura é reduzida com o avanço da broca. Chegado o momento, em que a carga excede a resistência de ligação interlaminar do material, a delaminação ocorre.

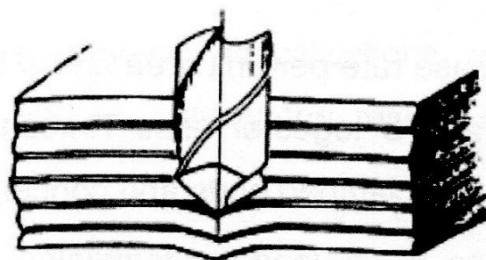


Imagem 2.11 – Mecanismo de delaminação “push-out” [30].

A partir do modelo apresentado na imagem 2.12, onde, D , é o diâmetro da broca, F_A é a força axial aplicada, x é o deslocamento, H é a largura da estrutura, h é espessura da camada não cortada e a é o tamanho de fissura assumido, é feito um balanço energético que derivará numa série de expressões que conduzem, ao objetivo que será uma expressão que defina a força crítica:

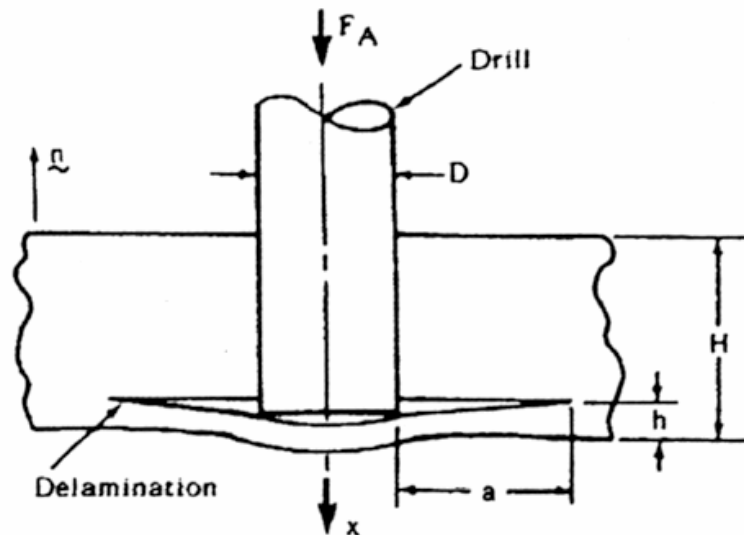


Imagem 2.12 – Modelo para análise de delaminação [30].

Balanço energético:

$$G\pi(D + 2a)da = F_A dx - dU \quad (2.2),$$

onde G é a taxa de energia libertada por unidade de área e U é a energia de deformação.

$$U = \frac{8\pi Mx^2}{\left(a + \frac{D}{2}\right)^2} \quad (2.3),$$

onde,

$$M = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2.4),$$

e o deslocamento, x , é definido como

$$x = \frac{F_A \left(a + \frac{D}{2}\right)^2}{16\pi M} \quad (2.5).$$

Substituindo (2.3) em (2.5) e aplicando em (2.2), pode-se calcular a carga crítica no início da propagação da fenda:

$$F_A^* = F_{crit} = \pi \left[\frac{8G_{IC}Eh^3}{3(1-\nu^2)} \right]^{1/2} \quad (2.6).$$

Para se evitar a delaminação a força aplicada na maquinagem não deve exceder este valor, que será função das propriedades do material e da espessura não cortada.

Outros modelos analíticos de dano foram apresentados por diversos autores, dos quais se apresenta apenas a expressão para o valor de força crítica proposta:

- Piquet, Lachaud et al. – 2001 – [54, 55]

- Carga distribuída:

$$F_{crit} = 8\pi \left[\frac{2G_{IC}D}{(1/3)-(D'/8D)} \right]^{1/2} \quad (2.7)$$

- Carga concentrada:

$$F_{crit} = 8\pi \left[\frac{2G_{IC}D}{1-(D'/8D)} \right]^{1/2} \quad (2.8)$$

- Zhang et al. – delaminação elíptica – 2001 – [56]

$$F_{crit} = \sqrt{\frac{6G_{IC}}{\zeta(C_3-K)}} \quad (2.9)$$

- Jain & Yang – 1993 – [57]

$$F_{crit} = 3\pi \left(\frac{D_{22}}{D_{11}} \sqrt{2G_{IC}D'_c} \right)^{1/4} \quad (2.10)$$

- Sadat – 2002 – [58]

$$F_{crit} = \left[\frac{2\pi G_{IC}}{\left(\frac{1}{32D'} \right) - \left(\frac{D''}{3} \right)} \right]^{1/2} \quad (2.11)$$

- Jung – 2005- [59]

$$F_{crit} = 6\pi D'_c \left(\frac{a}{b}\right)^{0.25} \sqrt{\frac{G_{IC}}{(6D'_c - \Delta)}} \quad (2.12)$$

- Tsao e Hocheng – excentricidade – 2005 – [60]

$$F_{crit} = \pi \sqrt{\frac{32G_{IC}M}{\left[1 + \frac{11}{4}\zeta^2 + 7\zeta^4 - 5\zeta^2 \ln \zeta + (1 + \zeta^2)\zeta^2 (\ln \zeta)^2\right]}} \quad (2.13)$$

- Tsao e Hocheng – influência do pré-furo – 2003 – [33]

$$F_{crit} = \frac{4\pi}{1-\nu} \left\{ \frac{G_{IC}Eh^3[(1-\nu)+2(1+\nu)\zeta^2]^2}{3(1+\nu)[2(1-\nu)(1+2\nu^2) - (12-4\nu+3\nu^2+3\nu^3)\zeta^2 - 8(1+3\nu)\zeta^2 \ln \zeta]} \right\}^{1/2} \quad (2.14).$$

2.5 AVALIAÇÃO DO DANO

Depois de se proceder à furação de laminados é importante estabelecer critérios que rapidamente permitam avaliar e comparar a extensão da delaminação causada por diferentes processos de maquinagem. A análise da extensão dos danos pode ser feita através de testes não-destrutivos, tais como são exemplos: a observação ao microscópio, ultrassons, emissão acústica e radiografia.

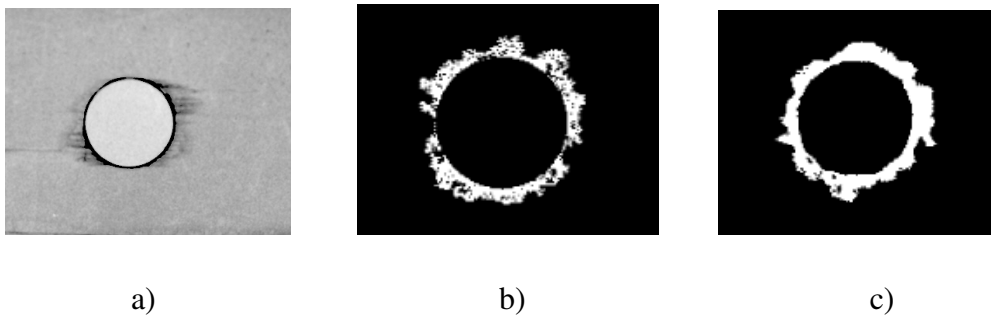


Imagem 2.13 – Avaliação de dano – a) radiografia [61, 62]; b) C-Scan [63]; c) tomografia [63].

Após análise, o procedimento passará por medir o diâmetro da área danificada (imagem 2.14), de forma a calcular um fator que expresse a extensão da mesma área. Chen [42] definiu um rácio denominado Fator de delaminação, F_d , que não será mais que o quociente entre o diâmetro da área delaminada, D_{max} , e o diâmetro nominal do furo, D ,

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

No trabalho experimental apresentado em [42], o autor examinou os efeitos da geometria da ferramenta e dos parâmetros de corte, bem como o desgaste da ferramenta, neste fator. Dois tipos de ferramentas foram utilizados: uma broca em carboneto de tungsténio e uma broca HSS com 5 mm de diâmetro. A zona de dano foi avaliada através de radiografias. Os resultados demonstram uma relação linear entre o fator de delaminação e as forças axiais (médias) aplicadas para os dois casos de ferramentas. O

autor ainda concluiu que a força axial aumenta, quando o ângulo de ponta da broca aumenta e que o ângulo da hélice não teve efeito significativo sobre essa força. O desgaste da aresta de corte provoca um aumento do fator de delaminação, assim como a força axial aumenta com o desgaste da ferramenta.

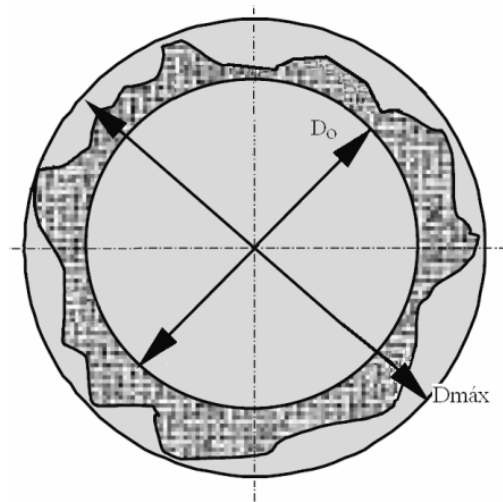


Imagem 2.14 – Medição do diâmetro máximo delaminado.

Embora o avanço tenha uma forte influência na força axial, a velocidade de corte não demonstrou grande efeito na mesma força.

Davim et al. [43, 44] estudaram o efeito dos parâmetros de furação no fator de delaminação, baseando-se no método de Tagushi e no método ANOVA. Os autores concluíram que o avanço tem a maior influência na pressão de corte específica e força axial, e quando o avanço aumenta, também os danos aumentam. O mesmo efeito é verificado quando a velocidade de corte é superior, embora de forma menos significativa. A broca Brad é a que produz menos delaminação, tanto na entrada como na saída da peça.

Mehta et al. [52] sugeriram uma relação diferente com o mesmo propósito, com o nome de Rácio de dano, D_{RAT} , definido pelo quociente entre a área de dano do furo periférico (D_{MAR}) e a área nominal do furo (D_{AVG}), isto é,

$$D_{RAT} = D_{MAR}/D_{AVG} \quad (2.15).$$

Em outro estudo, Davim et al. [64], apresentaram uma nova abordagem ao assunto, definindo um Fator de delaminação ajustado – F_{da} ,

$$F_{da} = \alpha \frac{D_{max}}{D} + \beta \frac{A_{max}}{A} \quad (2.16),$$

onde A_{max} é a área correspondente ao diâmetro máximo delaminado e onde se considera:

$$\alpha + \beta = 1 \quad (2.17).$$

CAPITULO 3 – TRABALHO EXPERIMENTAL

3.1 SELEÇÃO DO MATERIAL

O âmbito deste trabalho de investigação assenta essencialmente no estudo das condições de furação para materiais compósitos. Existindo já, atualmente no mercado, uma infinidade de materiais compósitos, a escolha recaiu sobre os plásticos reforçados com fibra de carbono, tendo por base a sua crescente utilização à medida que a sua fiabilidade aumenta e o seu preço tende a diminuir.

Este tipo de materiais é utilizado, já a algum tempo na indústria aeroespacial e nuclear, mas também na indústria automóvel, essencialmente ao nível de protótipos e viaturas de competição. Um exemplo de implementação destes materiais e sua crescente utilização será o avião comercial Airbus A-380, onde 16% do peso da sua estrutura é composto por materiais compósitos, numa grande parte em PRFC, e que podem ser encontrados nas asas, na cauda e em outras partes da estrutura. Os materiais compósitos, para além de excelentes propriedades mecânicas e baixo peso, apresentam ainda vantagens ao nível da durabilidade, manutenção reduzida e possibilidade de “embeber” no material sensores ou fibras “inteligentes” que promovam a sua auto monitorização, o que torna estes materiais mais-valias em estruturas de responsabilidade, não só a nível da aeronáutica, mas também ao nível de estruturas como pontes. A crescente utilização destes materiais, tem levado à diminuição do seu preço, o que leva a que hoje em dia, seja já possível ver aplicações de PRFC em material desportivo como: tacos de golfe, raquetes ou quadros de bicicletas. Com o conhecimento crescente destes materiais, e para ir de acordo com as atuais normas europeias, no que diz respeito às emissões de

CO₂ e eficiência do combustível, será expectável que também na indústria de automóveis de produção, a utilização destes materiais tenha tendência para crescer.

As seguintes imagens (3.1 a 3.5) mostram exemplos de aplicações de plásticos reforçados com fibra de carbono:



Imagem 3.1 – McLaren P1, utiliza fibras de carbono não só nos painéis laterais mas também ao nível da proteção de habitáculo do chassis. Fonte: Reinforced Plastics.



Imagem 3.2 – Airbus A-380. Fonte: Airbus.



Imagem 3.3 – Airbus A400M – As longarinas para a cobertura das asas do avião militar são em PRFC. Fonte: Reinforced Plastics.



Imagem 3.4 – Bicicleta Specialized Epic FSR Marathon Carbon. Fonte: Specialized.



Imagem 3.5 – Utilização em construção de uma ponte. Fonte: Reinforced Plastics.

3.1.1 FIBRAS DE REFORÇO

A função de um reforço num compósito é de aumentar as suas propriedades mecânicas. De acordo com as fibras utilizadas, e suas diferentes propriedades, as características dos compósitos serão afetadas de diferentes formas. Existem essencialmente quatro fatores que regem a contribuição das fibras:

- as propriedades mecânicas das fibras propriamente ditas;
- a interação entre as fibras e a resina;
- a fração volúmica de fibras no compósito;
- a orientação das fibras no compósito.

A imagem 3.6 mostra a comparação de alguns tipos de fibras quando usadas em compósitos unidirecionais de matriz epóxida.

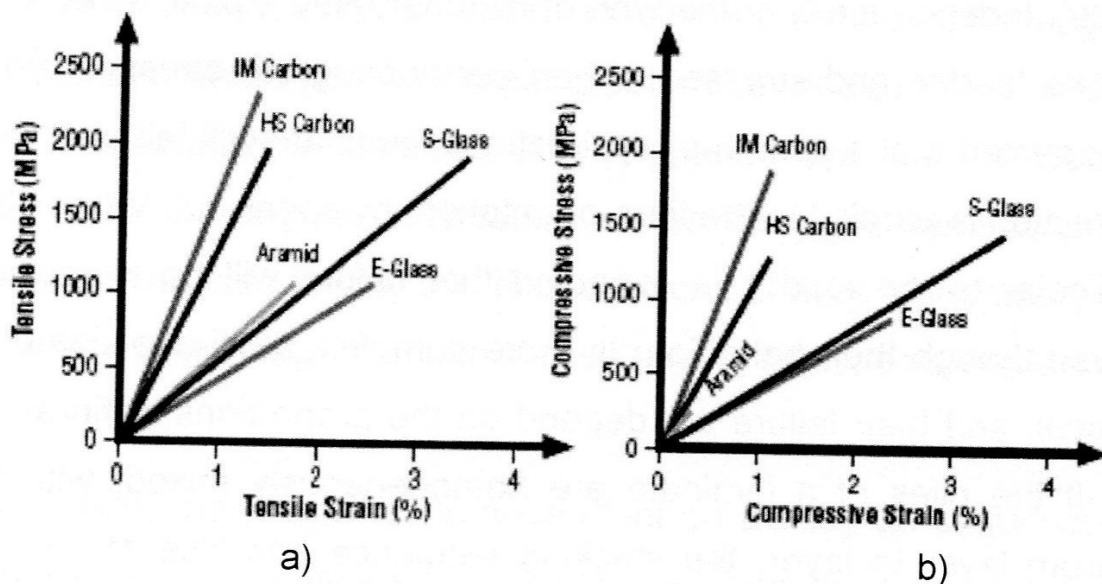


Imagem 3.6 – Propriedade de laminados unidirecionais: a) tração; b) compressão. Fonte: SP Systems.

A tabela seguinte (3.1) mostra algumas das propriedades das fibras de carbono e mais dois exemplos dos mais utilizados nos compósitos (vidro e aramídicas) para comparação:

Tabela 3.1 – Características de fibras utilizadas em compósitos.

Fibra	Vantagens	Desvantagens	Notas
Vidro E	Boa resistência á tração e compressão; boa rigidez; boas propriedades elétricas e baixo custo.	Baixa resistência ao impacto.	São as mais usadas.
Aramídica	Alta resistência; baixa densidade e alta resistência ao impacto.	Baixa resistência à compressão.	Normalmente utilizadas nos coletes à prova d bala.
Carbono HS	Maior rigidez específica de todas; alta resistência á tração e compressão; alta resistência à corrosão, deformação e fadiga.	Resistência ao impacto inferior aos outros exemplos; é frágil.	O preço tem tendência a diminuir com o aumento de utilização.

3.1.2 SEQUÊNCIA (ORIENTAÇÃO DE FIBRAS) DO LAMINADO

Considerando como situação em estudo, a furação para aplicação de parafusos ou rebites, estas junções estarão sujeitas a cargas e tensões. Será então de esperar que se a direção das cargas for paralela à orientação das fibras, e se estivermos na presença de um laminado unidirecional, esta ligação será bastante fraca e irá ceder com cargas

baixas. Como demonstrado na imagem 3.7 uma sequência quasi-isotrópica resulta na melhor solução para uma ligação deste género [65].

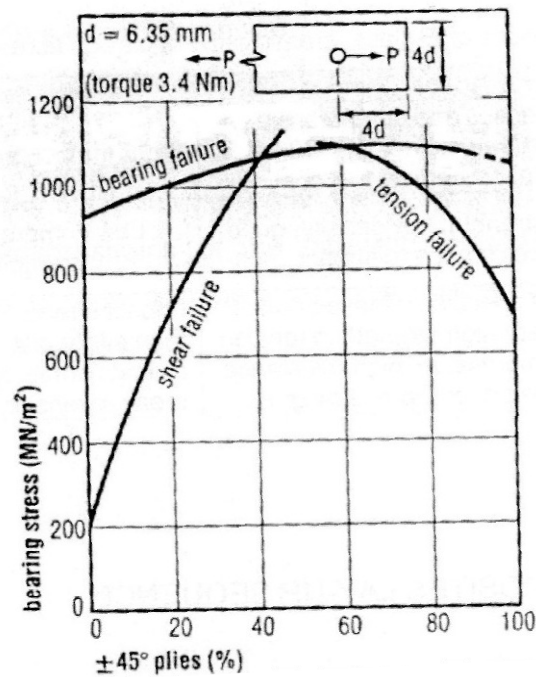


Imagem 3.7 – Influência da orientação das fibras [65].

Uma regra geral para definir um laminado quasi-isotrópico é que os ângulos entre as camadas são iguais a π/N , onde N é um número inteiro igual ou maior a 3, e o número de camadas em cada orientação é idêntico, num laminado simétrico [18].

Neste trabalho irão ser utilizadas placas com orientação de fibras unidirecionais e laminados com empilhamento “cross-ply”. 0/90°, para comparação dos resultados obtidos.

3.1.3 COMPÓSITOS CARBONO/EPÓXIDO

Não foi possível obter, junto do fornecedor a “data-sheet” do material (conseguiu-se a de um material semelhante que é apresenta nos anexos), sendo no

entanto fornecidas algumas características do pré-impregnado (para a orientação unidirecional). Desta forma, trata-se de um pré-impregnado TEXIPREG® HS 160 REM, constituído por um carbono de alta resistência unidirecional e uma resina epóxida REM. As principais características fornecidas são apresentadas na tabela 3.2:

Tabela 3.2 – Propriedades do laminado unidirecional TEXIPREG® HS 160 REM.

Proriedades	Unidades	Valores típicos	Norma utilizada
Resistência à tração	MPa	1700	ASTM D 3039
Módulo de elasticidade	GPa	150	ASTM D 3039
Tensão de rotura	%	1.3	ASTM D 3039
Resistência à flexão	MPa	1400	ASTM D 790 (L/d=16)
Módulo de flexão	GPa	130	ASTM D 790 (L/d=16)
ILSS	MPa	60	ASTM D 2344

Neste trabalho, para além de placas unidireccionais, foram também utilizadas placas com empilhamento “cross-ply”, que deverão ter sido produzidas da mesma forma que as anteriores, mas que não dispusemos de informação no que diz respeito às características anunciadas pelo fornecedor. Nos dois casos forma obtidas placas com uma espessura de 3,5 mm.

Foram efetuados testes aos materiais, para avaliar as suas propriedades (segundo norma ASTM D3039-95a [67]), sendo apenas possível apresentar os valores obtidos para o módulo de elasticidade, pois tendo em conta a resistência oferecida pelo material e as limitações da máquina de testes (SHIMADZU) não se conseguiu chegar ao ponto de rotura do material dos provetes ensaiados (a força máxima suportada pela máquina – 10 toneladas – não foi suficiente para atingir rotura do material.).

Nota: Para os ensaios de tração forma colados “tabs” de alumínio nos provetes com o adesivo estrutural Araldite® AV138M cuja ficha técnica é apresentada nos anexos.

Tabela 3.3 – Módulo de Elasticidade retirado dos ensaios efectuados.

Material	Módulo de Elasticidade (GPa)
Laminados unidireccionais 0° (foram ensaiados 4 provetes)	114
Laminados “cross-ply” 0/90° (foram ensaiados 3 provetes)	65

Estes resultados foram obtidos usando a fórmula descrita na norma e analisando os gráficos σ/ϵ que estão representados nos Anexos.

3.1.4 PREPARAÇÃO DE PROVETES DE TESTE

O material (placas) foi fornecido nas dimensões de 300x300x3,5 mm. De forma a proceder aos testes pretendidos, foi necessário marcar e cortar as placas de forma a obter o máximo de exemplares para teste (imagens 3.8 a 3.11), mas seguindo o regulado pelas normas utilizadas para os ensaios do material: para o ensaio de esmagamento usou-se a norma ASTM D5961/D5961M da qual resultaram provetes com as dimensões 135x35x3,5 mm; e para os ensaios de tração do material utilizou-se a norma ASTM D3039-95^a de onde resultaram exemplares com as dimensões 255x25x3,5 mm (4 para as placas a 0° e 3 para 0/90°).

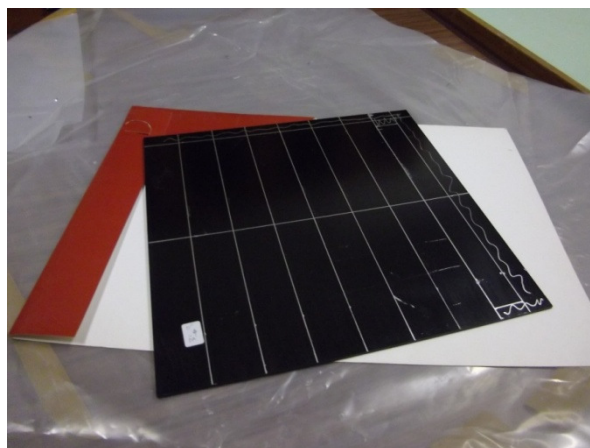


Imagem 3.8 – Marcação das placas.

As placas foram posteriormente cortadas numa serra circular, conforme ilustrado na imagem 3.10:



Imagem 3.9 – Serra circular utilizada para corte de provetes.

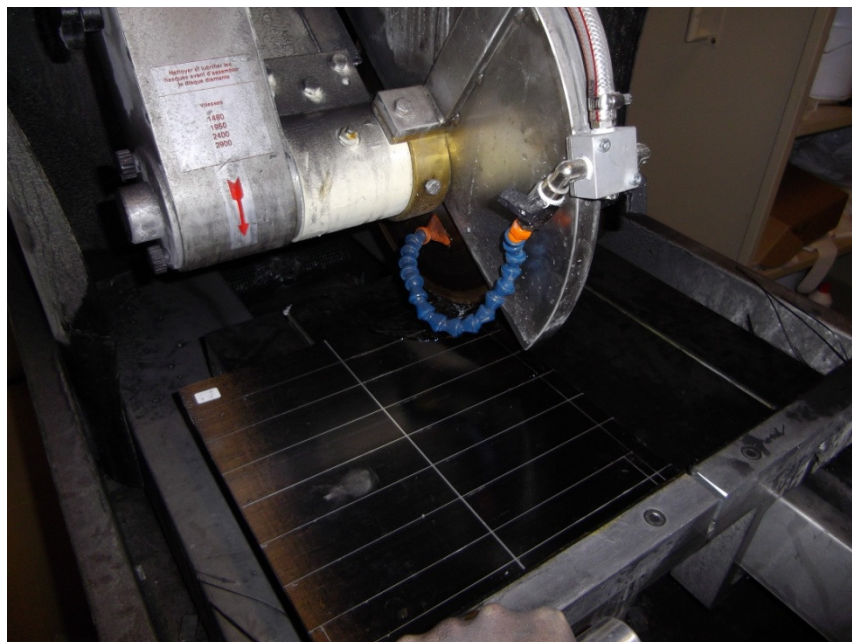


Imagem 3.10 – Processo de corte de provetes.

Depois de devidamente limpas, as placas foram marcadas e numeradas de forma a facilitar a sua utilização nos ensaios.



Imagem 3.11 – Placas devidamente marcadas e identificadas.

3.2 SELEÇÃO DE FERRAMENTAS E CONDIÇÕES DE MAQUINAGEM

Os materiais compósitos, na sua maioria são produzidos numa forma aproximada da sua forma final, pelo que a sua maquinagem estará normalmente associada a processos de acabamento. O processo de maquinagem mais comum é a furação, por permitir a junção de peças a estruturas mais complexas, mas existem outros, como já referido no capítulo 1. No mesmo capítulo, estão referenciados diversos estudos cujo principal objetivo terá sido determinar qual a geometria de broca e condições de maquinagem ideais de forma a produzir furos de qualidade, o que serviu de base para algumas considerações utilizadas neste trabalho experimental.

3.2.1 GEOMETRIA E MATERIAL DA FERRAMENTA

Os problemas provenientes da maquinagem de materiais compósitos, provêm essencialmente das fibras utilizadas como reforço e não da matriz. Uma comparação do material da ferramenta e a dureza das fibras a maquinar poderá dar-nos alguma informação importante relativamente aos materiais mais indicados:

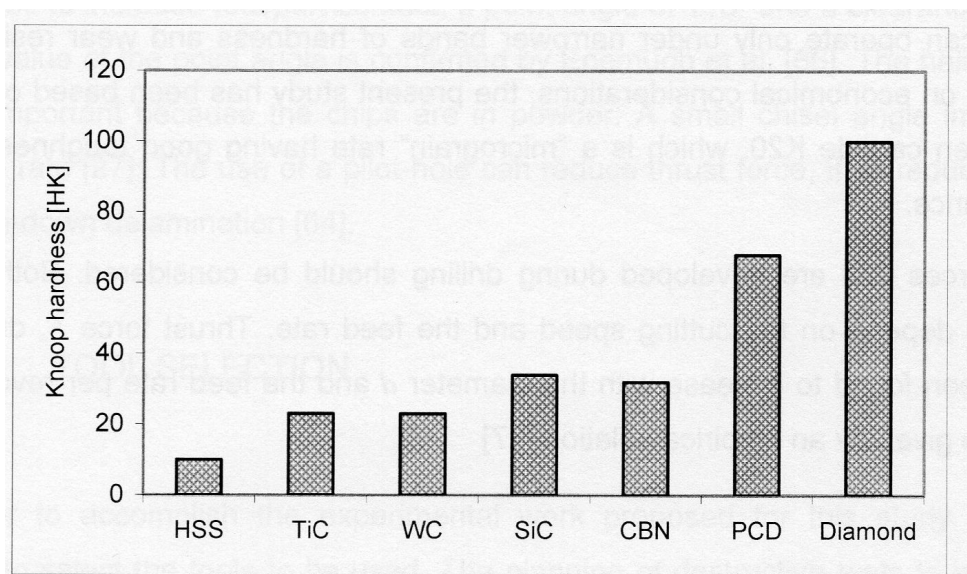


Imagem 3.12 – Dureza Knoop de alguns materiais [68].

As ferramentas feitas de aço rápido (HSS) não são apropriadas para a furação de compósitos, devido a tenderem a desgastar-se bastante rapidamente. A seleção de carbonetos revestidos, como já verificamos em alguns estudos anteriores (capítulo 1), dependendo do material a maquinar, poderão apresentar-se como uma boa solução, principalmente tendo em conta o seu muito inferior custo em relação ao diamante. As ferramentas em diamante, ou mais usualmente em diamante policristalino, são a nível de desempenho as mais indicadas para a maquinagem de compósitos. Para além de apresentarem os melhores resultados no que diz respeito á qualidade do furo, o seu período de vida é também maior.

Outros materiais são usados para ferramentas, tais como os cerâmicos e o nitreto de boro cúbico, que por serem menos usuais, não vão ser desenvolvidos neste trabalho.

No que diz respeito à furação de carbono/epóxico, há que ter em conta o calor gerado durante a maquinagem, que se distribui tipicamente em 50% pela energia absorvida pela ferramenta, 25% pela peça maquinada e o restante pelas aparas resultantes do corte.

A geometria da ferramenta é um fator importante na prevenção de danos. Quando se considera uma broca, diversos parâmetros podem ser considerados: ângulo de ponta, ângulo de inclinação, ângulo de saída, etc. A combinação de todos os fatores levará a um bom ou mau resultado. Existe ainda a possibilidade, como já referido, da utilização de pré-furos de forma a reduzir a delaminação.

3.2.2 SELEÇÃO DE FERRAMENTAS

De forma a levar a cabo o trabalho experimental proposto para este estudo, foi necessário escolher as ferramentas a utilizar. O facto de estarem planeados ensaios de esmagamento segundo a norma ASTM D5961/D5961M [66], levou á decisão por um diâmetro de ferramenta de 6 mm.

As ferramentas utilizadas neste trabalho, são facilmente encontradas no mercado especializado. A solução esteve relacionada com as características já referidas anteriormente e com a necessidade de obter valores para diferentes comparações.

A nível de materiais, os escolhidos foram o carboneto de tungsténio devido, a como estudos anteriores comprovam, ser indicado para maquinar materiais abrasivos como é o caso das placas testadas e foram ainda utilizadas ferramentas em aço rápido (HSS), devido á sua grande utilização e de forma a obter valores de comparação. As principais características dos dois materiais são apresentados na tabela 3.4:

Tabela 3.4 – Características de HSS e carboneto de tungstênio.

	HSS	WC
Dureza (HV30)	700-900	1500-1700
Composição	18%W; 4%Cr	90,5%W; 8%Co
Taxa de transf. de calor (W/mK)	15-48	20-80

Depois de selecionar o material e diâmetro das ferramentas, restava escolher a sua geometria, pelo que neste trabalho, três tipos de geometrias foram selecionadas:

- Broca Helicoidal com ângulo de ponta de 118°:



Imagem 3.13 – Broca Helicoidal com ângulo de ponta de 118°.

Esta broca foi testada com dois materiais diferentes: HSS e carboneto de tungstênio.

- Broca Brad:



Imagem 3.14 – Broca Brad.

Esta broca foi originalmente concebida para a furação de madeira. A sua principal característica é a forma de foice das arestas de corte, que promovem o tensionamento das fibras antes do seu corte, de forma a obter um corte limpo e uma boa qualidade superficial (lisa). Foi testada com carboneto de tungsténio.

- Broca Step – Bidiametral:

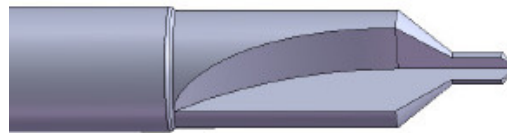


Imagem 3.15 – Broca Step.

Devidos aos dois diâmetros divide a operação de furação em duas fases. Tal geometria proporciona uma redução da força axial máxima atingida durante a furação e a redução do efeito de indentação causado pela broca numa furação efetuada num só passo. Neste trabalho foram testadas brocas com esta geometria fabricadas em carboneto de tungsténio.

3.2.3 SELEÇÃO DOS PARÂMETROS DE FURAÇÃO

Tendo em conta o estudo pretendido e o material a maquinar, foram tidos em consideração os resultados obtidos em estudos efetuados de forma a servirem de base a este trabalho. Desta forma estabeleceu-se que para o processo de furação a velocidade

seria constante, de 2800 rpm (rotações por minuto) e que se faria variar , para cada ferramenta o avanço, entre um valor baixo (0,03 mm/rot), um alto (0,19 mm/rot) e um intermédio (0,08 mm/rot).

Não sendo objetivo principal deste trabalho avaliar o efeito do desgaste da ferramenta na qualidade do furo, cada ferramenta (broca) efetuou apenas quatro furos de forma a que o seu desgaste não seja refletido nos resultados.

3.2.4 PROCESSO DE FURAÇÃO DOS PROVETES DE TESTE

Foi iniciado o processo de furação, existindo à partida 90 provetes, que obrigariam a 90 furos. Cada broca efetuou apenas entre 4 a 6 furos. A forma como foram realizados é descrita nas tabelas 3.5 e 3.6.:

Tabela 3.5 – Programação de furos para placas unidireccionais.

	Tipo de Broca	Avanço (mm/rot)	Nº de furos
Laminado unidirecional – 0º 48 furos	Broca Helicoidal (WC)	0.03	4
		0.08	4
		0.19	4
	Broca Helicoidal (HSS)	0.03	4
		0.08	4
		0.19	4
	Broca Brad	0.03	4
		0.08	4
		0.19	4
	Broca Step	0.03	4
		0.08	4
		0.019	4

Tabela 3.6 – Programação de furos para placas “cross-ply”.

	Tipo de Broca	Avanço (mm/rot)	Nº de furos
Laminado “cross-ply” – 0/90° 42 furos	Broca Helicoidal (WC)	0.03	4
		0.08	3
		0.19	3
	Broca Helicoidal (HSS)	0.03	3
		0.08	3
		0.19	4
	Broca Brad	0.03	3
		0.08	4
		0.19	3
	Broca Step	0.03	4
		0.08	4
		0.019	4

Algumas imagens do processo de furação (imagem 3.16 a 3.19):



Imagem 3.16 – Processo de furação de laminados.

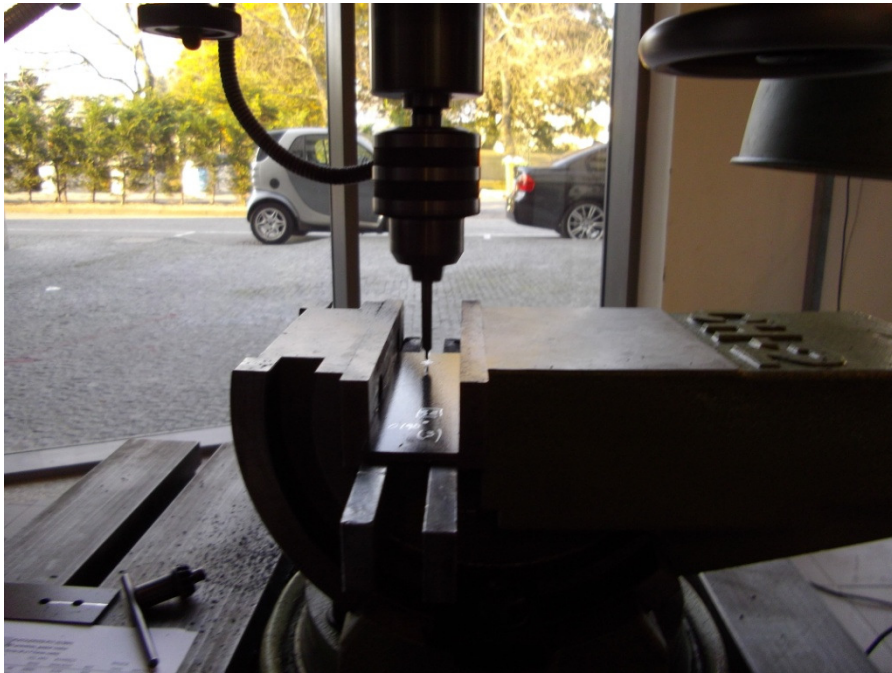


Imagem 3.17 – Furação de uma placa “cross-ply” usando uma broca Step.

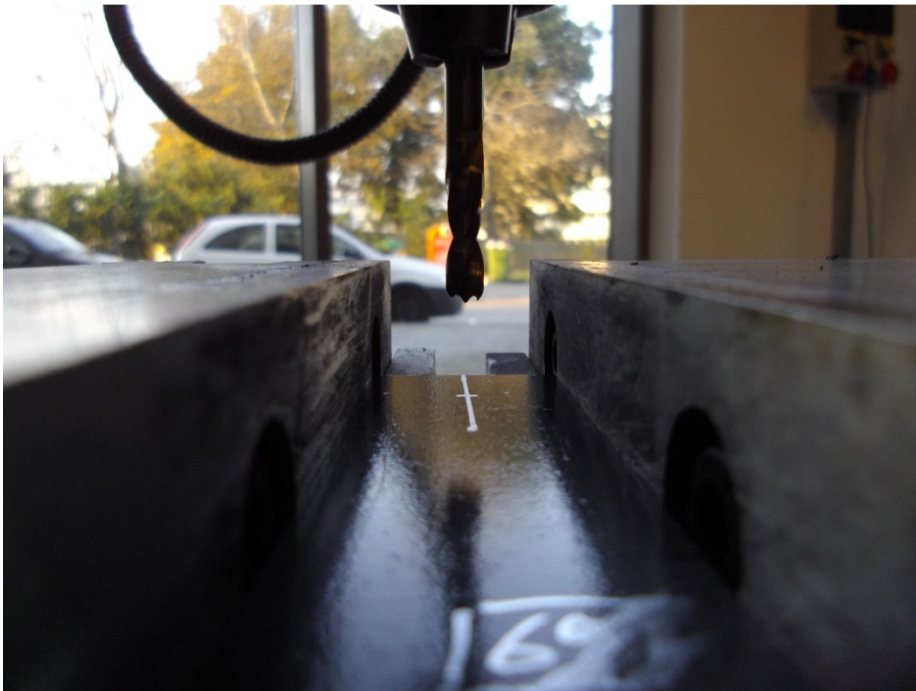


Imagem 3.18 – Furação usando uma broca Brad.



Imagem 3.19 – Furação de uma placa “cross-ply” com uma broca helicoidal.

Da observação visual dos furos realizados, apenas se poderão tecer considerações relativamente a, como seria de esperar, a broca Brad e a helicoidal apresentarem de uma forma geral, furos com melhor acabamento relativamente aos efetuados com a broca bidiametral. Dentro do grupo dos furos realizados com a broca helicoidal, aqueles que foram realizados com as brocas de aço rápido apresentam piores resultados relativamente á de carboneto de tungsténio.

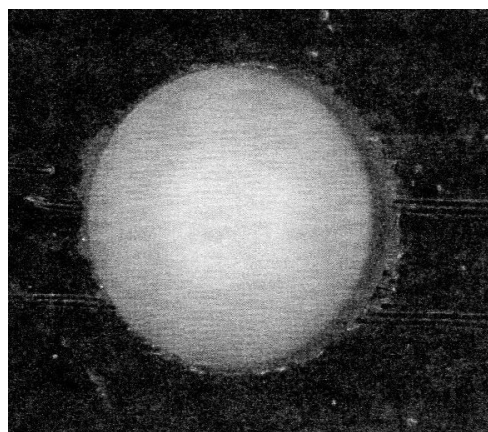


Imagem 3.20 – Exemplo de furo realizado com broca helicoidal (WC).

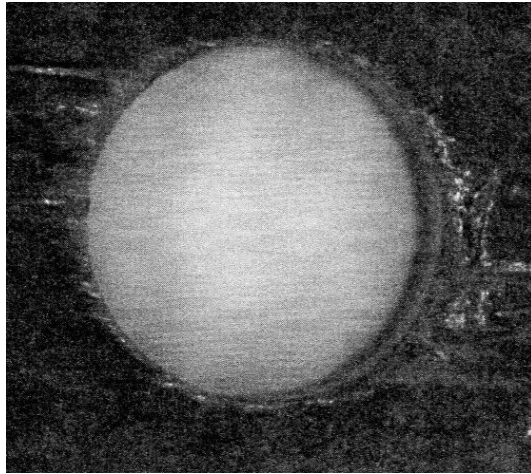


Imagem 3.21 - Exemplo de furo realizado com broca Brad.

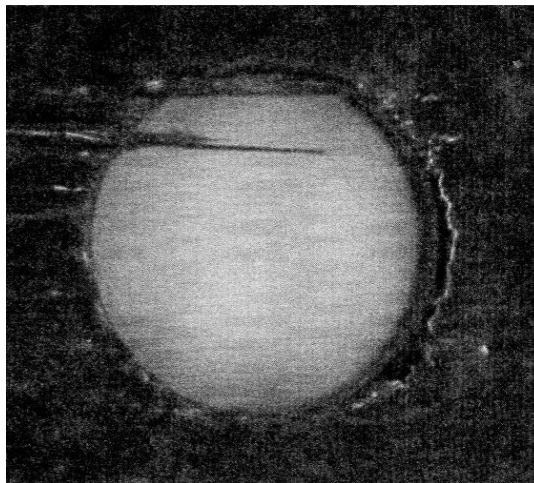


Imagem 3.22 - Exemplo de furo realizado com broca Step.

3.3 TÉCNICAS DE ANÁLISE DE DANOS

Terminado o processo de furação das placas, tornou-se então necessário proceder a técnicas de análise de dano para podermos retirar conclusões. Neste trabalho, estas técnicas dividiram-se em análise por radiografia e ensaios de esmagamento. Com a primeira análise o objetivo foi determinar o fator de delaminação para cada parâmetro ou conjunto de parâmetros utilizados. Relativamente aos ensaios destrutivos pretendeu-se avaliar como a variação destes parâmetros afeta as propriedades mecânicas do material.

Os fundamentos de cada técnica, foram já descritos na secção 2.5 deste trabalho, pelo que esta secção será dedicada apenas a reportar as configurações utilizadas e os resultados obtidos.

3.3.1 RADIOGRAFIA

Um dos principais objetivos deste trabalho foi a avaliação de regiões delaminadas devido á furação em materiais compósitos. Com este propósito, todas as placas furadas foram radiografadas. Para o fazer, foi necessária a utilização de um líquido de contraste, que neste caso foi o di-iodometano da AnalaR NORMATOR (ficha técnica apresentada nos anexos).



Imagem 3.23 – Líquido de contraste.

O equipamento utilizado para a aquisição de imagens foi a máquina de Raio X Kodak 2100 (imagem 3.24), associada ao sistema de aquisição de imagem digital RVG 5100 e ao software “Kodak Dental Imaging Software”.



Imagem 3.24 – Máquina Kodak 2100.

Para a obtenção de imagens por radiografia com contraste foi seguido o seguinte procedimento:

- Colocação do fluido de contraste num recipiente adequado;
- Imergir as placas maquinadas no fluido de contraste (imagem 3.25);



Imagem 3.25 – Imersão de placas em líquido de contraste.

- Aguardar até um tempo máximo de 20 minutos;
- Limpar devidamente as placas, com especial atenção para as paredes do furo (imagem 3.26);



Imagem 3.26 – Limpeza das placas.

- Colocar a amostra a analisar por cima do recetor e colocar o Gerador de raios X de alta frequência por cima da amostra (imagem 3.27);



Imagem 3.27 – Preparação para obtenção de imagem de raios X.

- Premir o botão para ativar o sistema digital e disparar a radiografia, com um tempo de exposição de 0.125 segundos (imagem 3.28);



Imagem 3.28 – Disparo da radiografia.

- Após transferência de imagem para o software, fazer o devido tratamento no que diz respeito a contraste de cor e luminosidade.

Alguns exemplos de imagens obtidas:

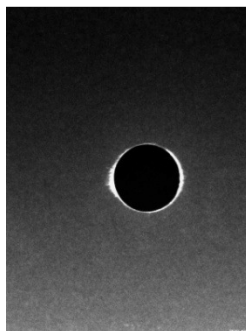


Imagem 3.29 – Radiografia de placa unidirecional furada com broca Helicoidal (WC) e avanço baixo.



Imagem 3.30 - Radiografia de placa unidirecional furada com broca Helicoidal (HSS) e avanço alto (0,19).

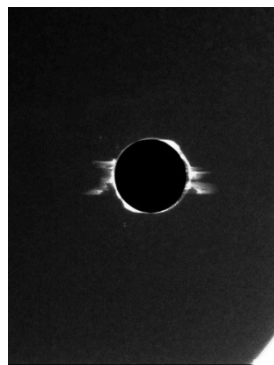


Imagem 3.31 - Radiografia de placa unidirecional furada com broca Brad e avanço intermédio (0,08).



Imagem 3.32 - Radiografia de placa "cross-ply" furada com broca Step e avanço alto (0,19).

Como é verificável, na imagem 3.29, quase que não se verifica qualquer delaminação enquanto na 3.30 a extensão da zona delaminada é bastante grande. As restantes imagens (3.31 e 3.32) representam situações menos extremas no que diz respeito à zona delaminada.

Após análise das radiografias obtidas e utilizando o software AutoCad, foram feitas medições em cada uma, do diâmetro nominal de cada furo assim como o máximo diâmetro delaminado, de forma a chegar a valores para o Fator de delaminação [42] – equação 2.1. Os valores foram separados e apresentados em tabelas para mais fácil leitura dos resultados.

- **Para as placas unidirecionais, 0°:**

Tabela 3.7 – Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,03 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Helicoidal (WC)	0,03	1	1,135
		2	1,136
		3	1,151
		4	1,150
		Fator de delaminação médio	1,143
		Desvio Padrão	0,009

Tabela 3.8 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,08 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Helicoidal (WC)	0,08	5	1,885
		6	2,416
		7	1,427
		8	1,433
		Fator de delaminação médio	1,790
		Desvio Padrão	0,469

Tabela 3.9 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,19 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Helicoidal (WC)	0,19	9	1,876
		10	2,277
		11	2,454
		12	2,270
		Fator de delaminação médio	2.219
		Desvio Padrão	0,244

Da análise dos resultados verifica-se, como seria de esperar, que o aumento do avanço leva a um aumento do fator de delaminação:

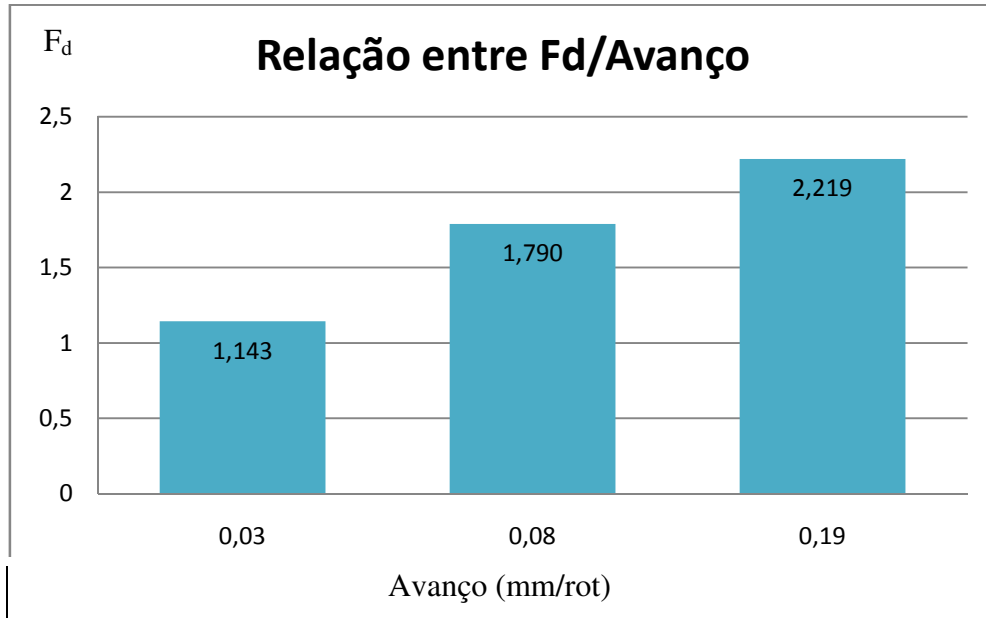


Imagem 3.33 – Relação entre F_d/Avanço para placa unidirecional furada com broca helicoidal (WC).

Tabela 3.10 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,03 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Helicoidal (HSS)	0,03	13	1,560
		14	1,317
		15	2,067
		16	1,203
		Fator de delaminação médio	1,537
		Desvio Padrão	0,384

Tabela 3.11 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,08 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Helicoidal (HSS)	0,08	17	1,558
		18	2,073
		19	1,919
		20	1,768
		Fator de delaminação médio	1,830
		Desvio Padrão	0,220

Tabela 3.12 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,19 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Helicoidal (HSS)	0,19	21	1,867
		22	2,283
		23	2,448
		24	2,601
		Fator de delaminação médio	2,299
		Desvio Padrão	0,316

Da análise dos resultados verifica-se, como seria de esperar, que o aumento do avanço leva a um aumento do fator de delaminação:

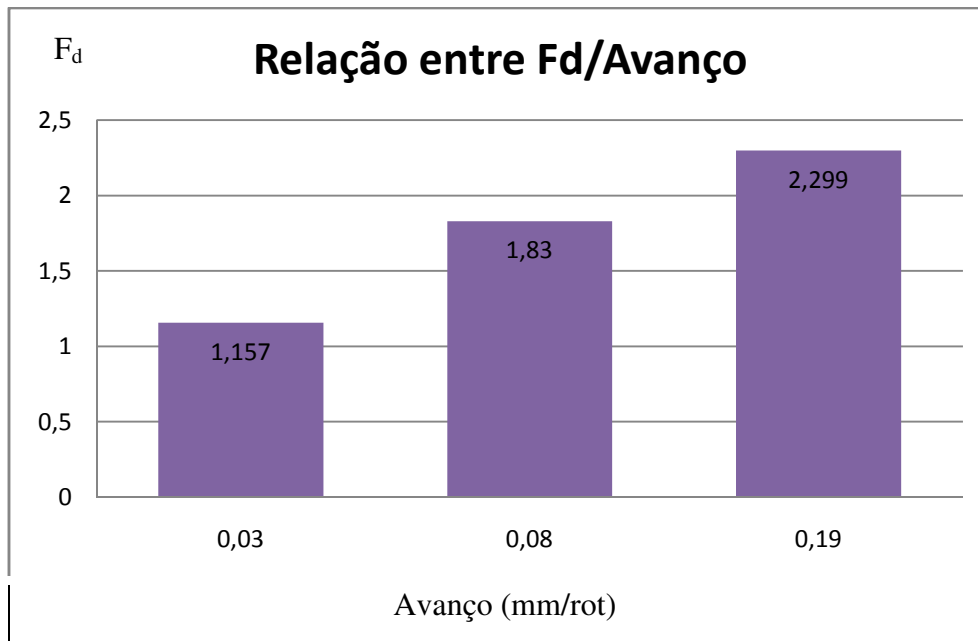


Imagem 3.34 - Relação entre F_d /Avanço para placa unidirecional furada com broca helicoidal (HSS).

Tabela 3.13 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Brad e avanço de 0,03 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F_d
Broca Brad (WC)	0,03	25	1,212
		26	1,572
		27	1,694
		28	1,355
		Fator de delaminação médio	1,458
		Desvio Padrão	0,216

Tabela 3.14 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Brad e avanço de 0,08 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Brad (WC)	0,08	29	1,917
		30	1,591
		31	1,783
		32	1,454
		Fator de delaminação médio	1,686
		Desvio Padrão	0,205

Tabela 3.15 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Brad e avanço de 0,19 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Brad (WC)	0,19	33	2,383
		34	1,857
		35	2,477
		36	2,280
		Fator de delaminação médio	2,249
		Desvio Padrão	0,274

Da análise dos resultados verifica-se, como seria de esperar, que o aumento do avanço leva a um aumento do fator de delaminação:

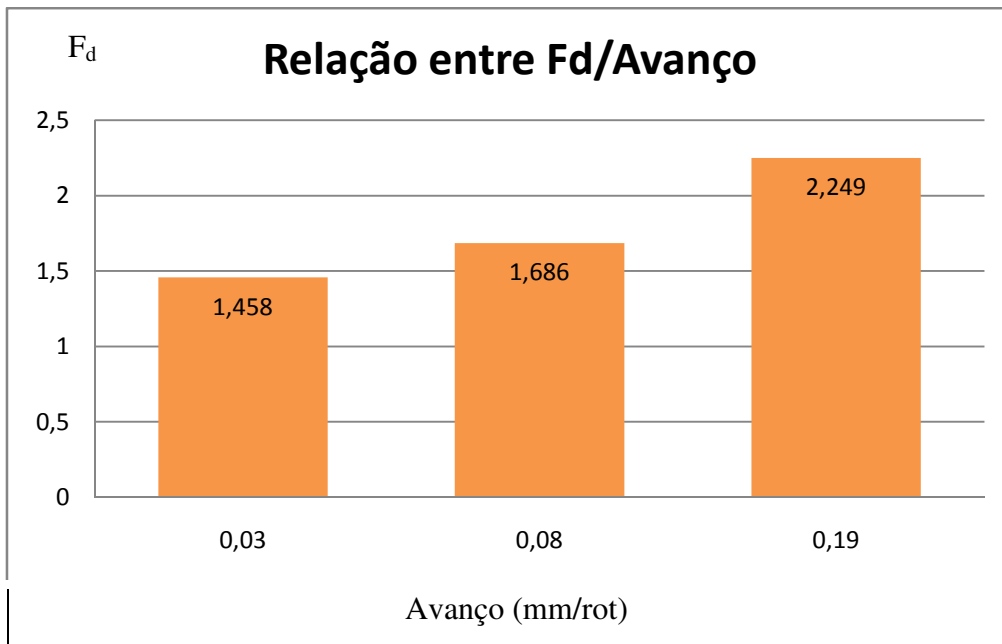


Imagem 3.35 - Relação entre F_d/Avanço para placa unidirecional furada com broca Brad (WC).

Tabela 3.16 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Step e avanço de 0,03 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Step (WC)	0,03	37	1,177
		38	1,184
		39	1,260
		40	1,260
		Fator de delaminação médio	1,188
		Desvio Padrão	0,046

Tabela 3.17 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Step e avanço de 0,08 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Step (WC)	0,08	41	2,306
		42	1,611
		43	1,684
		44	1,507
		Fator de delaminação médio	1,777
		Desvio Padrão	0,360

Tabela 3.18 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Step e avanço de 0,19 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Step (WC)	0,19	45	2,124
		46	2,237
		47	2,172
		48	2,057
		Fator de delaminação médio	2,148
		Desvio Padrão	0,076

Da análise dos resultados verifica-se, como seria de esperar, que o aumento do avanço leva a um aumento do fator de delaminação:

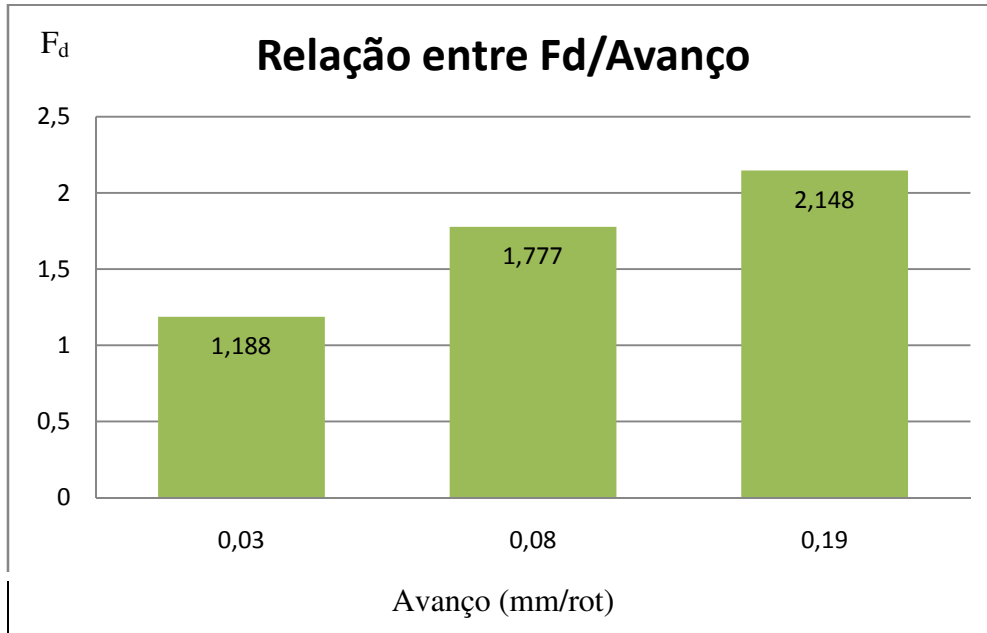


Imagem 3.36 - Relação entre F_d/Avanço para placa unidirecional furada com broca Step (WC).

- Para as placas “cross-ply”, 0/90°:

Tabela 3.19 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,03 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Helicoidal (WC)	0,03	49	2,458
		50	1,500
		51	1,937
		52	1,842
		Fator de delaminação médio	1,934
		Desvio Padrão	0,396

Tabela 3.20 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,08mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Helicoidal (WC)	0,08	53	2,244
		54	2,196
		55	1,729
		Fator de delaminação médio	2,056
		Desvio Padrão	0,284

Tabela 3.21 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,19mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Helicoidal (WC)	0,19	56	2,271
		57	2,380
		58	2,530
		Fator de delaminação médio	2,394
		Desvio Padrão	0,130

Da análise dos resultados verifica-se, como seria de esperar, que o aumento do avanço leva a um aumento do fator de delaminação:

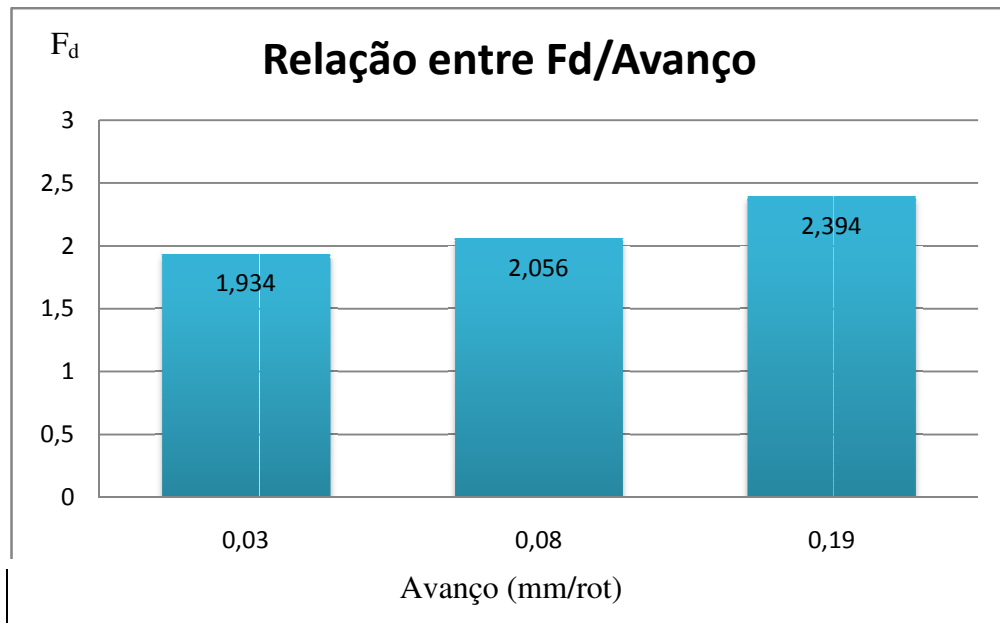


Imagem 3.37 - Relação entre F_d/Avançaço para placa “cross-ply” furada com broca Helicoidal (WC).

Tabela 3.22 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,03mm/rot.

Ferramenta	Avançaço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Helicoidal (HSS)	0,03	59	1,380
		60	1,614
		61	1,293
		Fator de delaminação médio	1,429
		Desvio Padrão	0,166

Tabela 3.23 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,08mm/rot.

Ferramenta	Avançaço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Helicoidal (HSS)	0,08	62	1,578
		63	1,632
		64	1,729
		Fator de delaminação médio	1,643
		Desvio Padrão	0,077

Tabela 3.24 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,19mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Helicoidal (HSS)	0,19	65	1,703
		66	2,126
		67	2,088
		68	2,572
		Fator de delaminação médio	2,122
		Desvio Padrão	0,356

Da análise dos resultados verifica-se, como seria de esperar, que o aumento do avanço leva a um aumento do fator de delaminação:

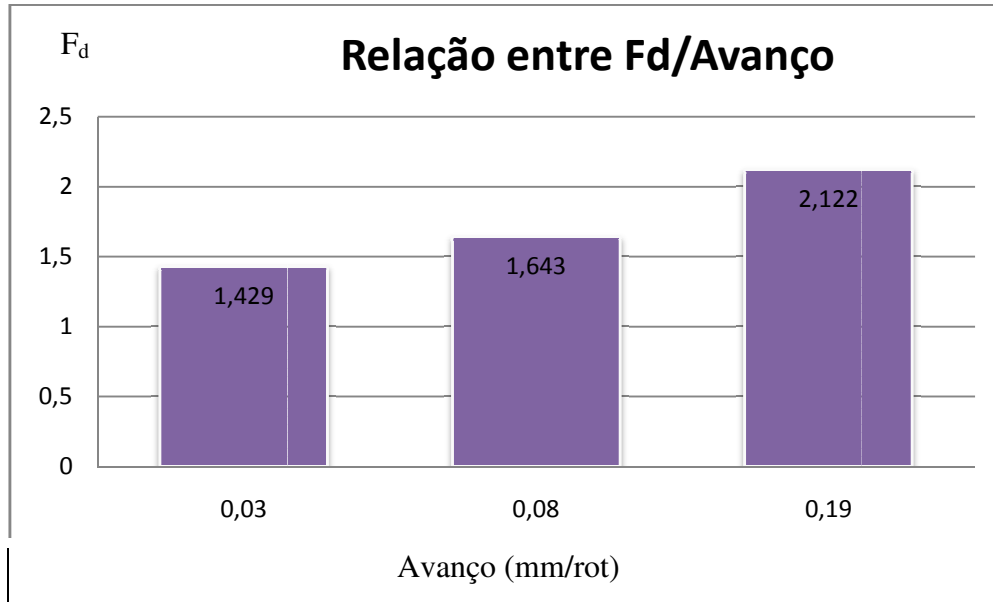


Imagem 3.38 - Relação entre F_d/Avanço para placa “cross-ply” furada com broca Helicoidal (HSS).

Tabela 3.25 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Brad e avanço de 0,03mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Brad (WC)	0,03	69	1,890
		70	1,950
		71	1,941
		Fator de delaminação médio	1,927
		Desvio Padrão	0,032

Tabela 3.26 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Brad e avanço de 0,08mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Brad (WC)	0,08	72	2,480
		73	2,697
		74	1,922
		75	1,589
		Fator de delaminação médio	2,172
		Desvio Padrão	0,508

Tabela 3.27 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Brad e avanço de 0,19mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Brad (WC)	0,19	76	1,581
		77	1,902
		78	1,864
		Fator de delaminação médio	1,782
		Desvio Padrão	0,175

Da análise dos resultados verifica-se, neste caso, que o aumento do avanço leva a um aumento do fator de delaminação para o aumento de 0,03 para 0,08 mm/rot, mas quando é utilizado um avanço alto (0,19 mm/rot), o valor lido para o fator de

delaminação foi o mais baixo dos três. Tal situação não será normal e estará provavelmente relacionada com a falta de homogeneidade do material:

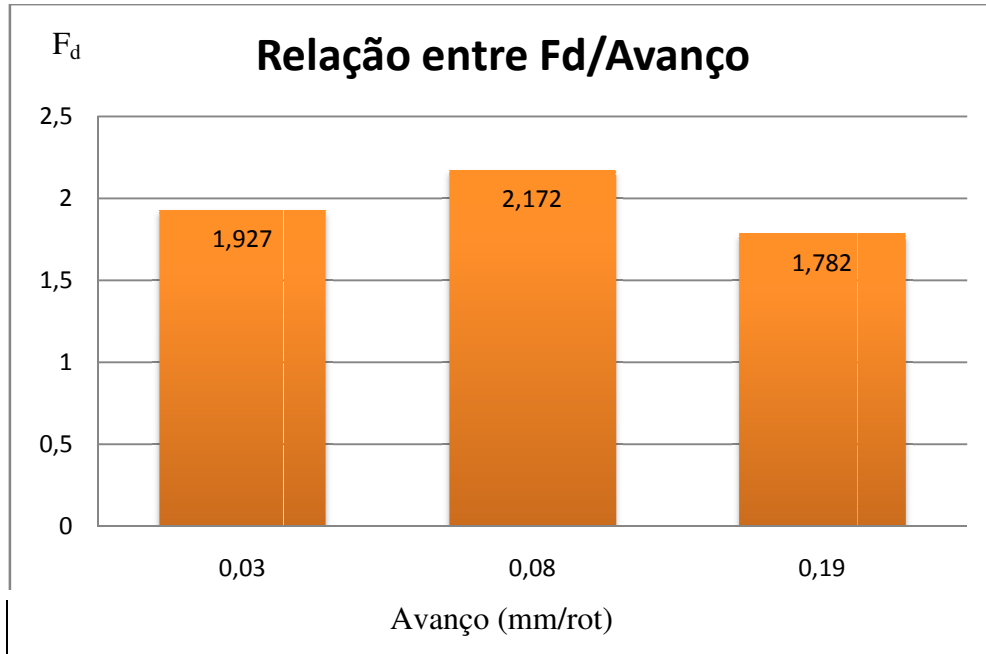


Imagem 3.39 - Relação entre F_d /Avanço para placa “cross-ply” furada com broca Brad (WC).

Tabela 3.28 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Step e avanço de 0,03mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F_d
Broca Step (WC)	0,03	79	1,161
		80	1,119
		81	1,153
		82	1,152
		Fator de delaminação médio	1,146
		Desvio Padrão	0,019

Tabela 3.29 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Step e avanço de 0,08mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Step (WC)	0,08	83	1,321
		84	1,903
		85	1,794
		86	1,624
		Fator de delaminação médio	1,661
		Desvio Padrão	0,254

Tabela 3.30 - Resultados do Fator de Delaminação para furos efetuados com a broca Step e avanço de 0,19mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de placa	F _d
Broca Step (WC)	0,19	87	2,498
		88	2,591
		89	1,881
		90	2,687
		Fator de delaminação médio	2,172
		Desvio Padrão	0,364

Da análise dos resultados verifica-se, como seria de esperar, que o aumento do avanço leva a um aumento do fator de delaminação:

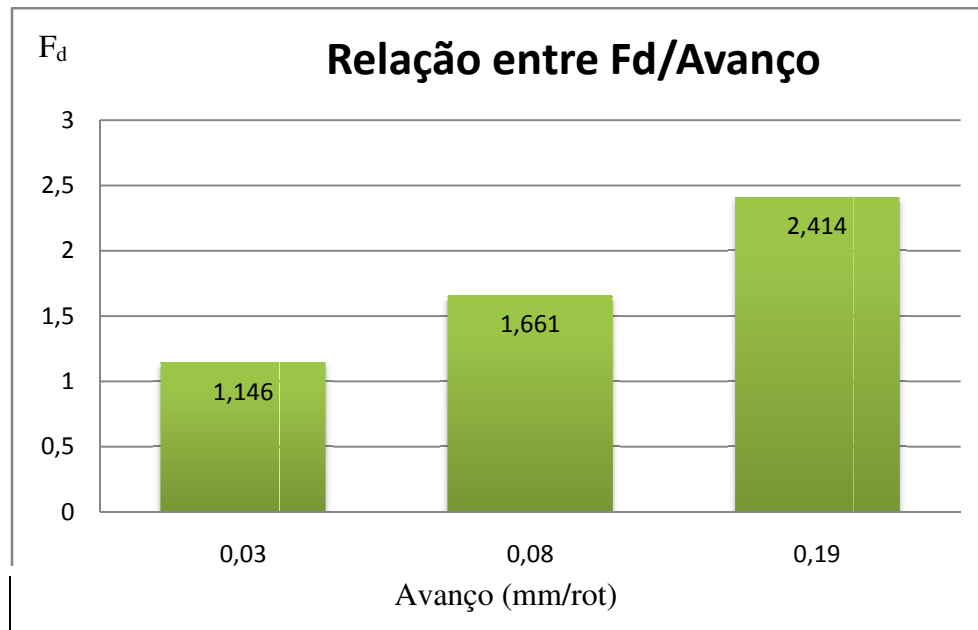


Imagem 3.40 - Relação entre F_d /Avanço para placa “cross-ply” furada com broca Step (WC).

Da análise dos resultados, com a exceção do valor anormal de F_d para a furação das placas “cross-ply” com a broca Brad e avanço de 0,19 mm/rot, verificou-se uma clara relação entre o aumento do avanço e o aumento dos danos provocados pela maquinagem (delaminação). Outro objetivo deste trabalho será também avaliar a influência da geometria da ferramenta nos danos provocados pela maquinagem, pelo que será interessante relacionar os valores obtidos de forma a chegar a conclusões.

- Para a placa unidireccional, 0°:

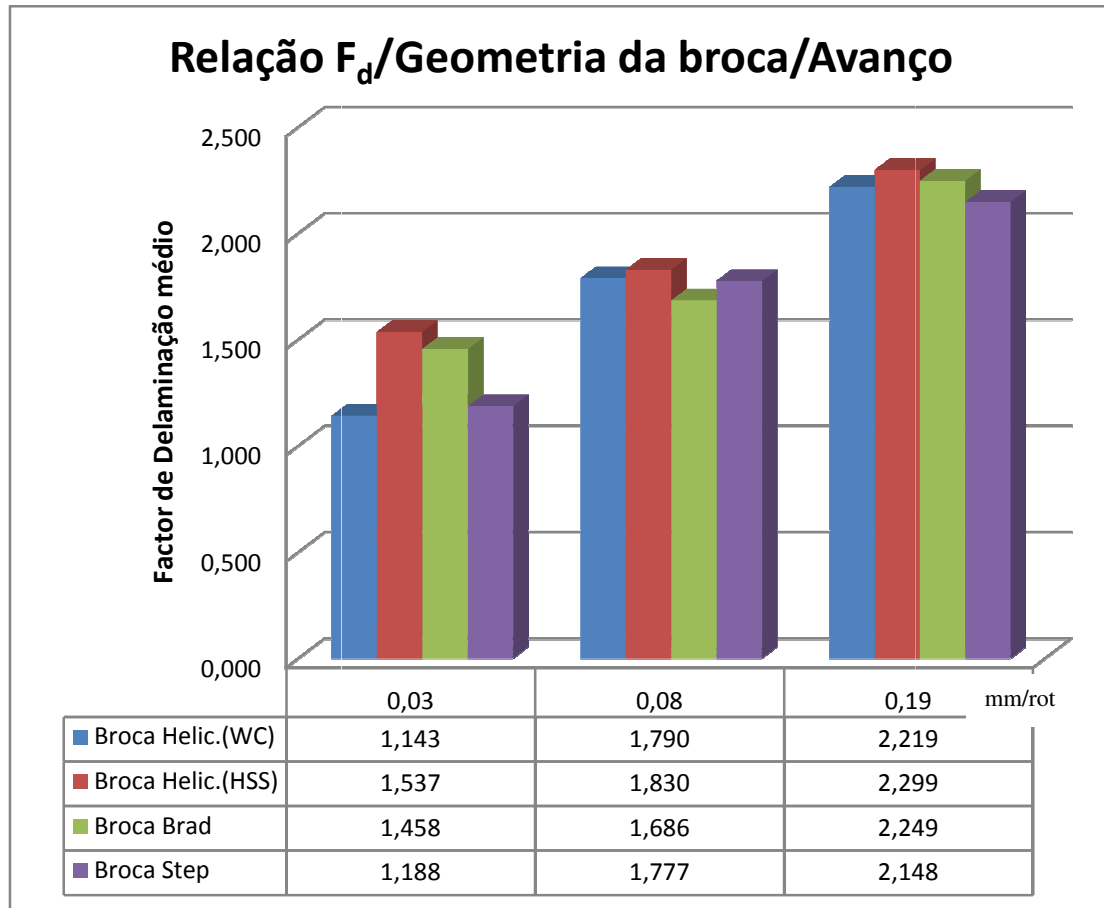


Imagem 3.41 - Relação entre F_d /Geometria da Broca para placa unidireccional.

Da análise dos resultados verifica-se, que para o avanço mais baixo (0,03 mm/rot), a broca helicoidal em carboneto de tungsténio apresenta o melhor resultado ($F_d = 1,143$), enquanto que para um avanço intermédio (0,08 mm/rot) o melhor valor foi obtido com a broca Brad e finalmente para um avanço rápido, a broca com melhor desempenho foi a Step ($F_d = 2,148$). Havendo a necessidade de efetuar uma escolha, tendo por base os resultados obtidos, em que o objetivo fosse apenas evitar a delaminação na furação destes materiais a escolha recairia na broca helicoidal de ângulo

de ponta 118° em carboneto de tungstênio associada a uma furação com avanço lento (0,03 mm/rot).

- Placa “cross-ply”, 0/90°:

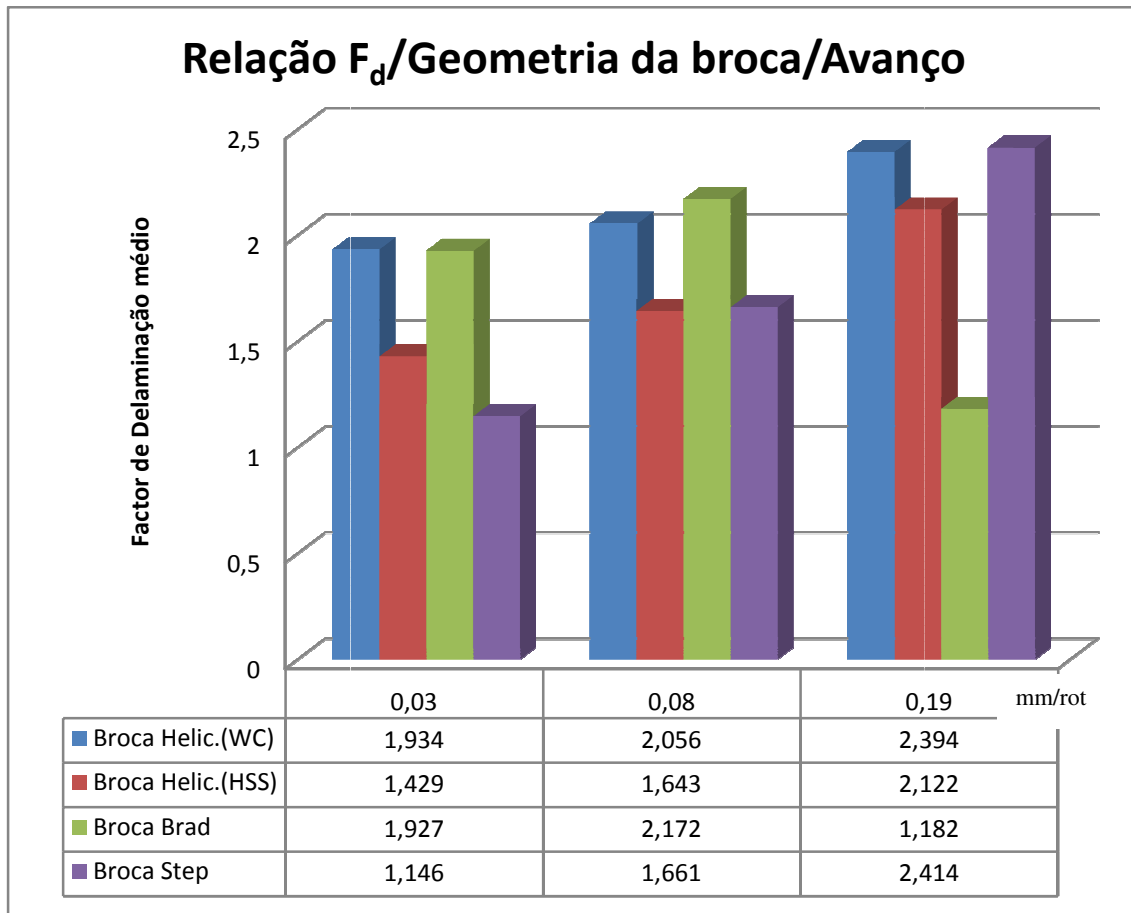


Imagem 3.42 - Relação entre F_d /Geometria da Broca/Avanço para placa “cross-ply”.

Da análise dos resultados verifica-se, que para o avanço mais baixo (0,03 mm/rot), a broca Step em carboneto de tungstênio apresenta o melhor resultado ($F_d = 1,146$), enquanto que para um avanço intermédio (0,08 mm/rot) o melhor valor curiosamente foi obtido com a broca helicoidal de aço rápido e finalmente para um avanço rápido, a broca com melhor desempenho foi a Brad ($F_d = 1,182$), sendo no entanto este um valor atípico como já foi referenciado anteriormente e por isso não muito representativo. Havendo a necessidade de efetuar uma escolha, tendo por base os

resultados obtidos, em que o objetivo fosse apenas evitar a delaminação na furação destes materiais a escolha recairia na broca Step em carboneto de tungstênio associada a uma furação com avanço lento (0,03 mm/rot).

Finalmente, poderemos apresentar uma relação dos melhores valores obtidos, tanto para as placas unidirecionais como para as “cross-ply” de forma a relacionar os parâmetros utilizados com o tipo de material a maquinar.

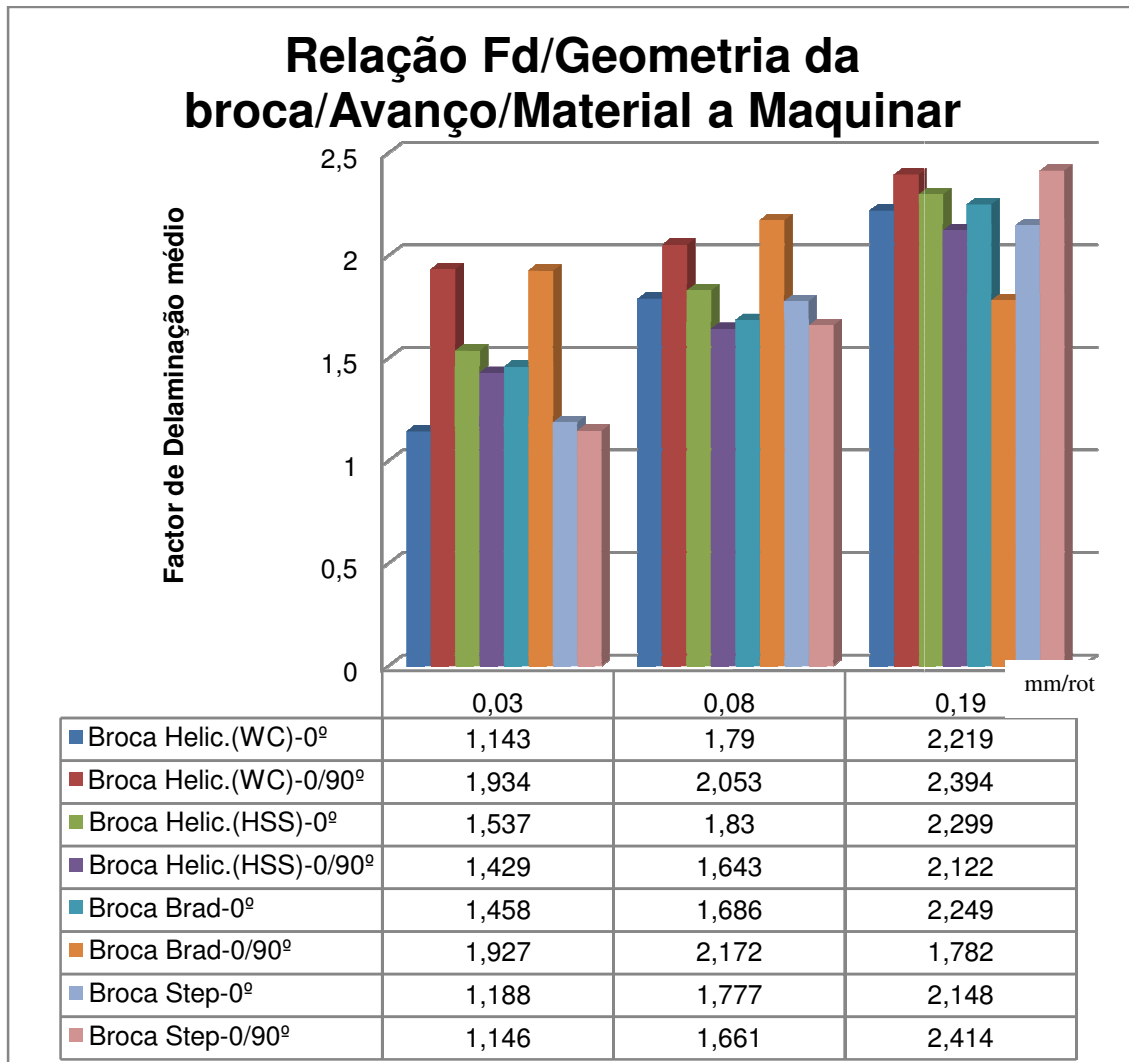


Imagem 3.43 - Relação entre F_d /Geometria da Broca/Avanço/Material a Maquinar.

Da análise dos resultados verifica-se, que de todos os furos analisados, de referir que o melhor resultado ($F_d=1,143$) foi obtido na placa unidirecional quando furada com uma broca Helicoidal em carboneto de tungstênio e com um avanço de 0,03 mm/rot, e o pior resultado ($F_d=2,414$) foi obtido na furação da placa “cross-ply” quando furada com a broca Step e avanço de 0,19 mm/rot.

3.3.2 ENSAIO DE ESMAGAMENTO

O principal objetivo de fazer furos em placas é criar a possibilidade de as ligar com outras placas, formando estruturas mais complexas. Estas peças serão depois ligadas, através de parafusos, cavilhas ou rebites, que, quando em serviço vão provocar nas paredes dos furos cargas e tensões. Será importante conhecer estes fundamentos e a capacidade do material de os suportar de forma a criar estruturas seguras e fiáveis.

Nesse sentido, neste trabalho todas as placas furadas foram testadas, de forma a avaliar como os parâmetros da maquinagem afetaram a resistência mecânica do material. Para a realização destes testes foi seguida a norma ASTM D5961/D5961M [66] e utilizada a máquina de Ensaio SHIMADZU (imagem 3.44) associada a um software de recolha de informação. Os ensaios decorreram a uma velocidade de 2 mm/min, e foram parados quando a máxima força foi atingida seguida de uma queda significativa.



Imagem 3.44 – Máquina de Ensaio SHIMADZU.

A partir dos resultados obtidos, será interessante, tal como foi feito com as radiografias, perceber como os diferentes parâmetros utilizados: material maquinado, avanço, geometria e material da ferramenta influenciam a resistência mecânica das

placas testadas. As imagens seguintes (3.45 a 3.46) demonstram a preparação dos provetes para o ensaio de esmagamento, assim como um ensaio propriamente dito.



Imagem 3.45 – Preparação de provete para Ensaio de Esmagamento.

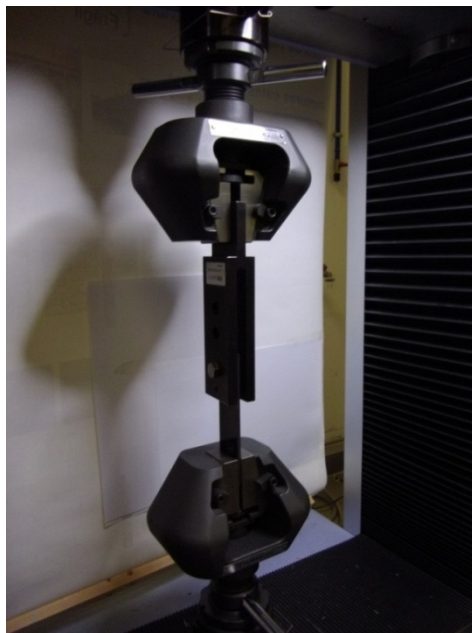


Imagem 3.46 – Provette submetido a Ensaio de Esmagamento.

Após o término dos ensaios, os resultados foram recolhidos de forma a encontrar a tensão de esmagamento máxima para cada placa furada. Estes resultados são apresentados em tabelas, para mais fácil leitura e compreensão.

- Para a placa unidirecional, 0°:

Tabela 3.31 – Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,03 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Helicoidal (WC)	0,03	1	3369,40	213,60
		2	5264,73	
		3	4522,09	
		4	4786,02	
Valor médio das Forças Máximas			4485,56	
Desvio Padrão			805,09	

Tabela 3.32 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,08 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Helicoidal (WC)	0,08	5	4884,96	228,56
		6	4614,59	
		7	4159,61	
		8	5539,97	
Valor médio das Forças Máximas			4799,78	
Desvio Padrão			577,13	

Tabela 3.33 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,19 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Helicoidal (WC)	0,19	9	4792,61	239,36
		10	5578,09	
		11	4426,11	
		12	5309,01	
Valor médio das Forças Máximas			5026,46	
Desvio Padrão			516,15	

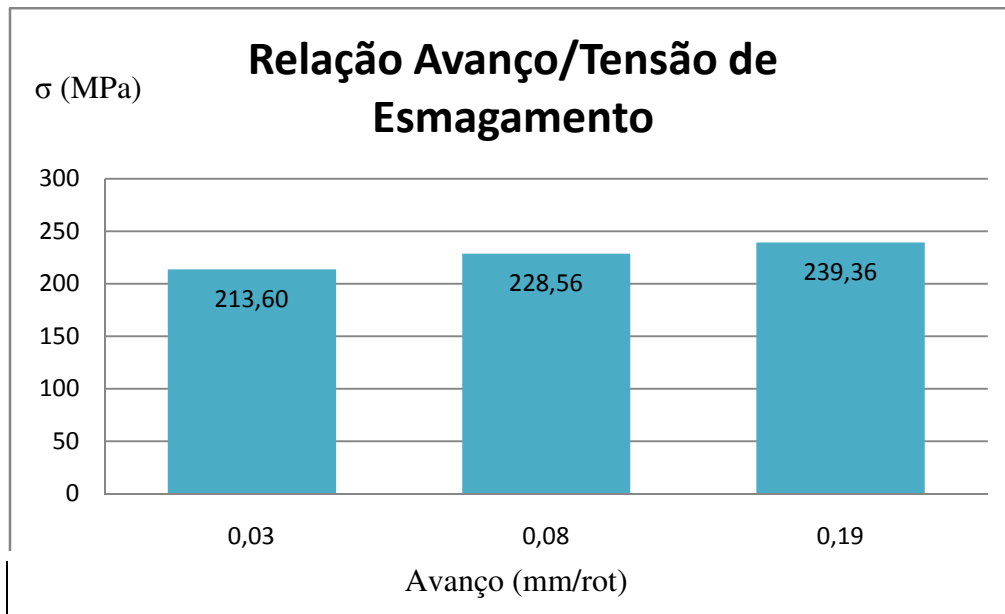


Imagem 3.47 – Relação Avanço/ Tensão de Esmagamento para Broca Helicoidal (WC).

Da análise dos resultados, verifica-se que, para esta ferramenta, com o aumento do avanço, também a tensão de esmagamento aumenta.

Tabela 3.34 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,03 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Helicoidal (HSS)	0,03	13	3579,41	204,52
		14	5873,44	
		15	3973,77	
		16	3752,71	
Valor médio das Forças Máximas			4294,83	
Desvio Padrão			1064,71	

Tabela 3.35 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,08 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Helicoidal (HSS)	0,08	17	4930,26	199,04
		18	4250,02	
		19	3044,53	
		20	4494,46	
Valor médio das Forças Máximas			4179,82	
Desvio Padrão			807,46	

Tabela 3.36 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,19 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Helicoidal (HSS)	0,19	21	4586,86	196,56
		22	3205,22	
		23	5186,46	
		24	3532,65	
Valor médio das Forças Máximas			4127,20	
Desvio Padrão			919,58	

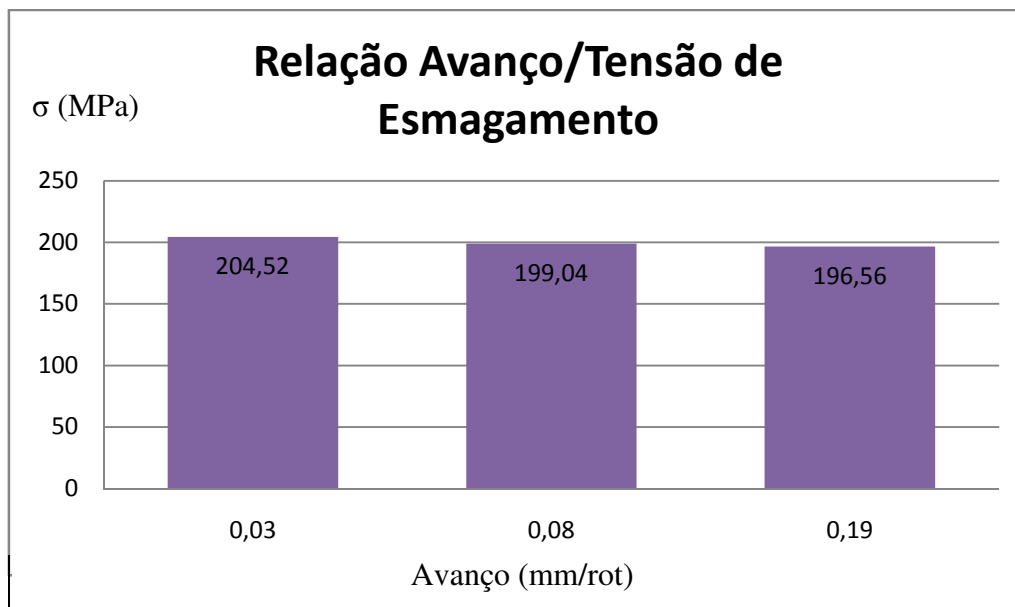


Imagem 3.48 – Relação Avanço/ Tensão de Esmagamento para Broca Helicoidal (HSS).

Da análise dos resultados, verifica-se que, para esta ferramenta, com o aumento do avanço, a Tensão de esmagamento tende a diminuir.

Tabela 3.37 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Brad e avanço de 0,03 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Brad (WC)	0,03	25	4889,17	196,09
		26	3405,70	
		27	3968,27	
		28	4208,07	
Valor médio das Forças Máximas			4117,80	
Desvio Padrão			614,44	

Tabela 3.38 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Brad e avanço de 0,08 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Brad (WC)	0,08	29	1242,40	170,86
		30	4109,91	
		31	5060,64	
		32	3939,52	
Valor médio das Forças Máximas			3588,12	
Desvio Padrão			1639,76	

Tabela 3.39 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Brad e avanço de 0,19 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Brad (WC)	0,19	33	4248,65	176,94
		34	3455,27	
		35	3272,38	
		36	3886,95	
Valor médio das Forças Máximas			3715,81	
Desvio Padrão			438,83	

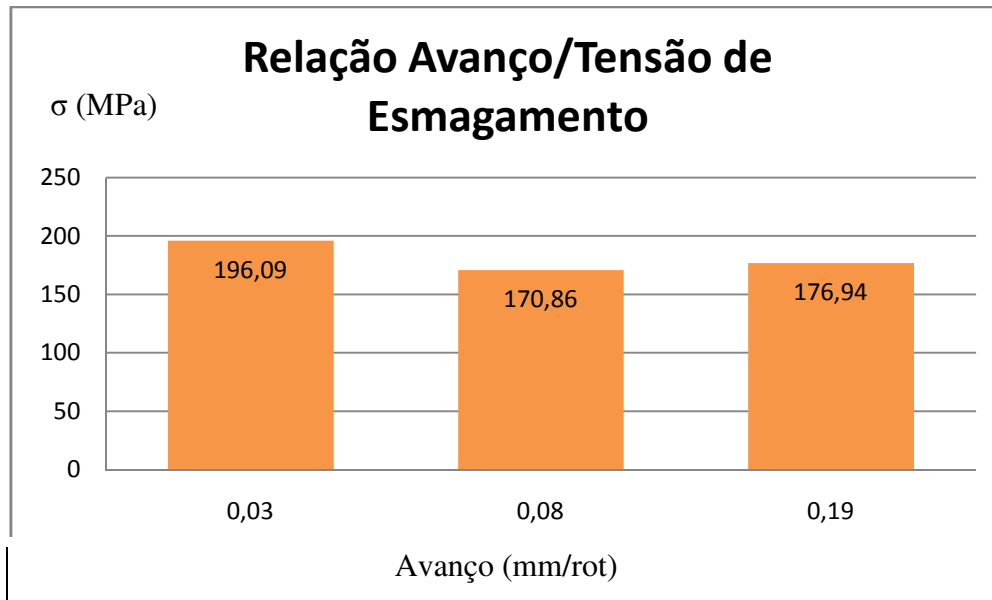


Imagem 3.49 – Relação Avanço/ Tensão de Esmagamento para Broca Brad.

Da análise dos resultados, verifica-se que, para esta ferramenta, com o aumento do avanço, a Tensão de esmagamento inicialmente diminui, mas torna a aumentar para o avanço mais elevado (0,19 mm/rot). Não se verifica uma tendência neste caso.

Tabela 3.40 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Step e avanço de 0,03 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Step (WC)	0,03	37	3507,65	158,45
		38	3117,40	
		39	3001,44	
		40	3683,31	
Valor médio das Forças Máximas			3327,45	
Desvio Padrão			321,20	

Tabela 3.41 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Step e avanço de 0,08 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Step (WC)	0,08	41	3480,05	191,40
		42	3722,62	
		43	4683,34	
		44	4191,27	
Valor médio das Forças Máximas			4019,32	
Desvio Padrão			532,08	

Tabela 3.42 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Step e avanço de 0,19 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Step (WC)	0,19	45	nulo	205,73
		46	4845,62	
		47	4402,48	
		48	3712,96	
Valor médio das Forças Máximas			4320,35	
Desvio Padrão			570,78	

O ensaio da placa nº 45 foi nulo e por isso não considerado. Conforme se pode verificar na imagem 3.50 ocorreu uma fratura não válida segundo a norma ASTM - clivagem:

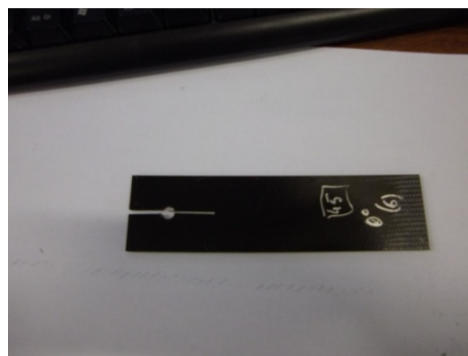


Imagem 3.50 – Ensaio nulo – Placa 45.

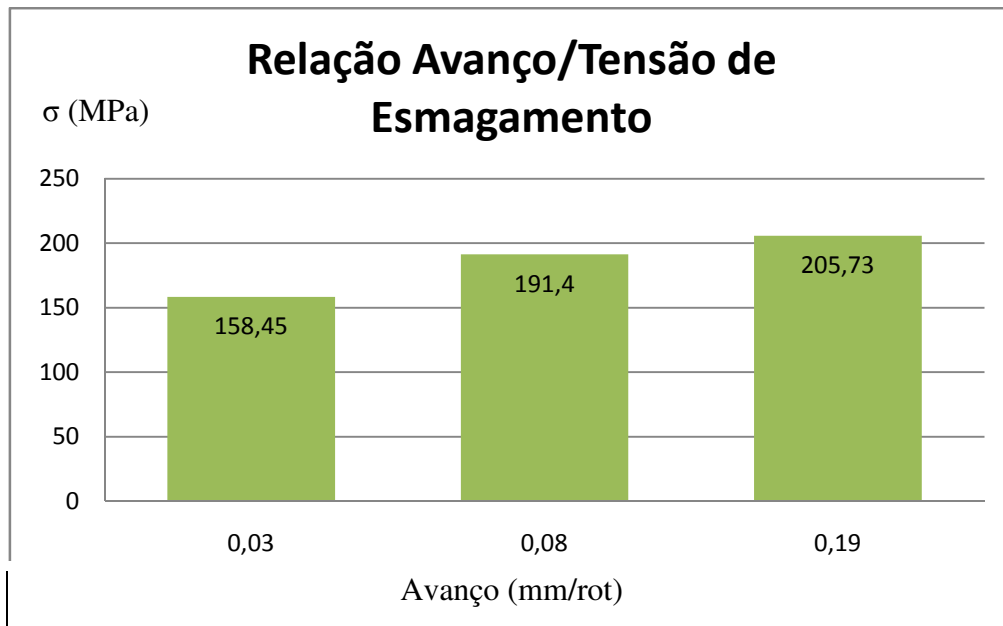


Imagem 3.51 – Relação Avanço/ Tensão de Esmagamento para Broca Step.

Da análise dos resultados, verifica-se que, para esta ferramenta, com o aumento do avanço, também a tensão de esmagamento aumenta.

- Para as placas “cross-ply”, 0/90°:

Tabela 3.43 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,03 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Helicoidal (WC)	0,03	49	9288,99	393,05
		50	9147,42	
		51	8013,10	
		52	6566,84	
Valor médio das Forças Máximas			8254,10	
Desvio Padrão			1261,47	

Tabela 3.44 - - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,08 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Helicoidal (WC)	0,08	53	8346,45	406,67
		54	7973,45	
		55	9300,57	
Valor médio das Forças Máximas			8540,15	
Desvio Padrão			684,44	

Tabela 3.45 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (WC) e avanço de 0,19 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Helicoidal (WC)	0,19	56	6841,55	370,49
		57	8274,51	
		58	8224,99	
Valor médio das Forças Máximas			7780,35	
Desvio Padrão			813,40	

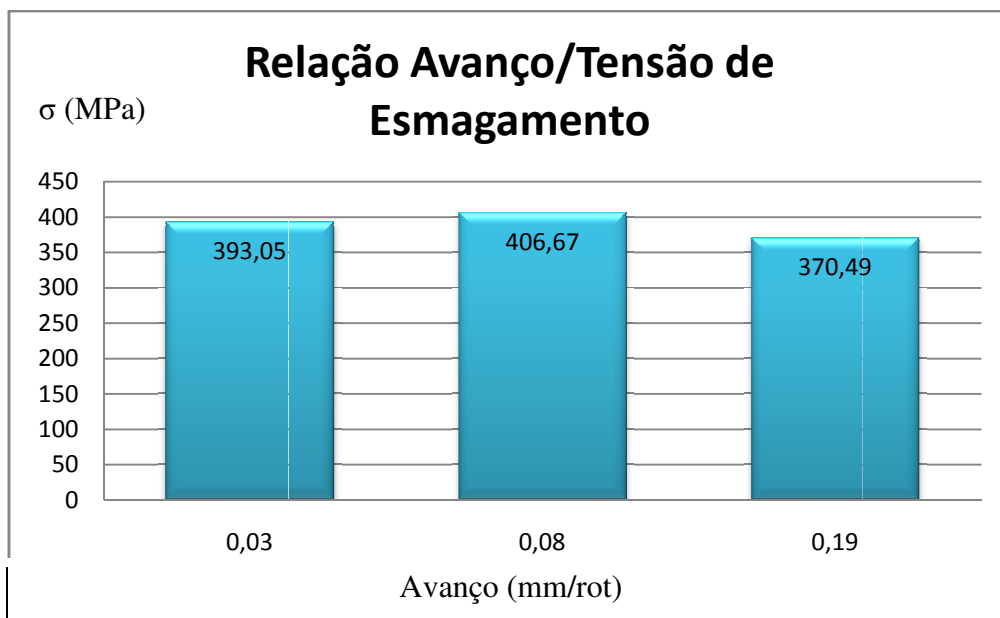


Imagem 3.52 – Relação Avanço/ Tensão de Esmagamento para Broca Helicoidal (WC).

Da análise dos resultados, verifica-se que, para esta ferramenta, com o aumento do avanço, a tensão de esmagamento inicialmente aumenta, mas torna a diminuir para o avanço mais elevado (0,19 mm/rot). Não se verifica uma tendência neste caso.

Tabela 3.46 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,03 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Helicoidal (HSS)	0,03	59	8722,02	390,15
		60	8090,53	
		61	7767,20	
Valor médio das Forças Máximas			8193,25	
Desvio Padrão			485,63	

Tabela 3.47 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,08 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Helicoidal (HSS)	0,08	62	8089,78	309,98
		63	6798,36	
		64	4642,50	
Valor médio das Forças Máximas			6509,55	
Desvio Padrão			1741,61	

Tabela 3.48 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Helicoidal (HSS) e avanço de 0,19 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Helicoidal (HSS)	0,19	65	5761,46	281,12
		66	4092,88	
		67	6024,31	
		68	7735,55	
Valor médio das Forças Máximas			5903,55	
Desvio Padrão			1491,03	

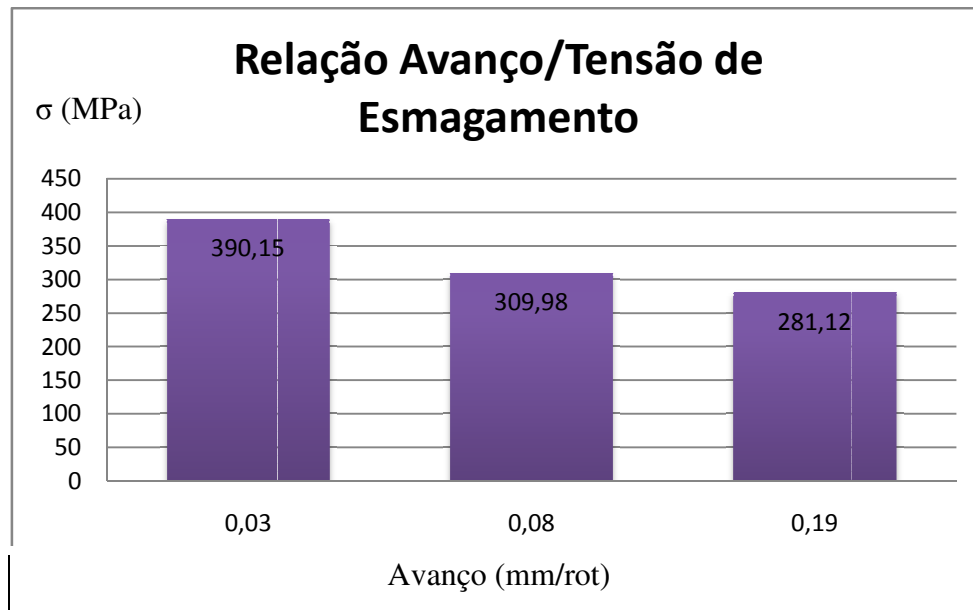


Imagem 3.53 – Relação Avanço/ Tensão de Esmagamento para Broca Helicoidal (HSS).

Da análise dos resultados, verifica-se que, para esta ferramenta, com o aumento do avanço, a Tensão de esmagamento tende a diminuir.

Tabela 3.49 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Brad e avanço de 0,03 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Brad (WC)	0,03	69	6815,69	240,24
		70	4087,21	
		71	4232,34	
Valor médio das Forças Máximas			5045,08	
Desvio Padrão			1535,11	

Tabela 3.50 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Brad e avanço de 0,08 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Brad (WC)	0,08	72	7166,37	320,45
		73	8059,53	
		74	5713,24	
		75	5978,38	
Valor médio das Forças Máximas			6729,36	
Desvio Padrão			1088,85	

Tabela 3.51 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Brad e avanço de 0,19 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Brad (WC)	0,19	76	4741,02	158,70
		77	2606,28	
		78	2650,53	
Valor médio das Forças Máximas			3332,61	
Desvio Padrão			1219,92	

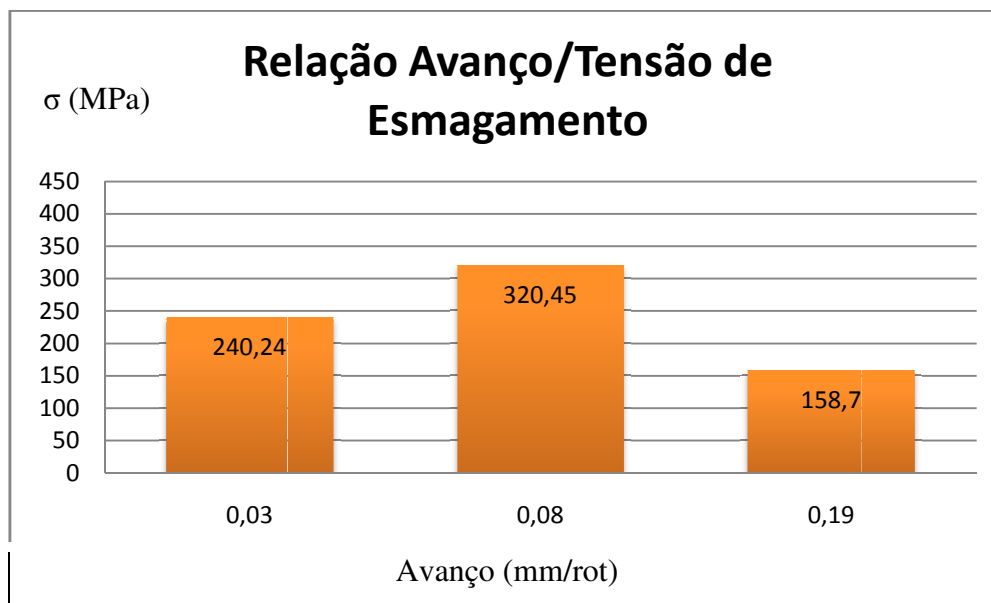


Imagem 3.54 – Relação Avanço/ Tensão de Esmagamento para Broca Brad.

Da análise dos resultados, verifica-se que, para esta ferramenta, com o aumento do avanço, a Tensão de esmagamento inicialmente aumenta, mas torna a diminuir para o avanço mais elevado (0,19 mm/rot). Não se verifica uma tendência neste caso.

Tabela 3.52 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Step e avanço de 0,03 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Step (WC)	0,03	79	2741,58	152,60
		80	3124,59	
		81	3839,76	
		82	3112,86	
Valor médio das Forças Máximas			3204,70	
Desvio Padrão			459,21	

Tabela 3.53 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Step e avanço de 0,08 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Step (WC)	0,08	83	4137,20	168,74
		84	3104,16	
		85	3290,97	
		86	3641,78	
Valor médio das Forças Máximas			3543,53	
Desvio Padrão			454,21	

Tabela 3.54 - Resultados de ensaios de esmagamento para furos efetuados com a Broca Step e avanço de 0,19 mm/rot.

Ferramenta	Avanço (mm/rot)	Nº de Placa	Valor de Força máxima no ensaio (N)	Tensão de Esmagamento média (MPa)
Broca Step (WC)	0,19	87	3754,81	175,58
		88	4520,77	
		89	3684,70	
		90	2788,37	
Valor médio das Forças Máximas			3687,18	
Desvio Padrão			708,83	

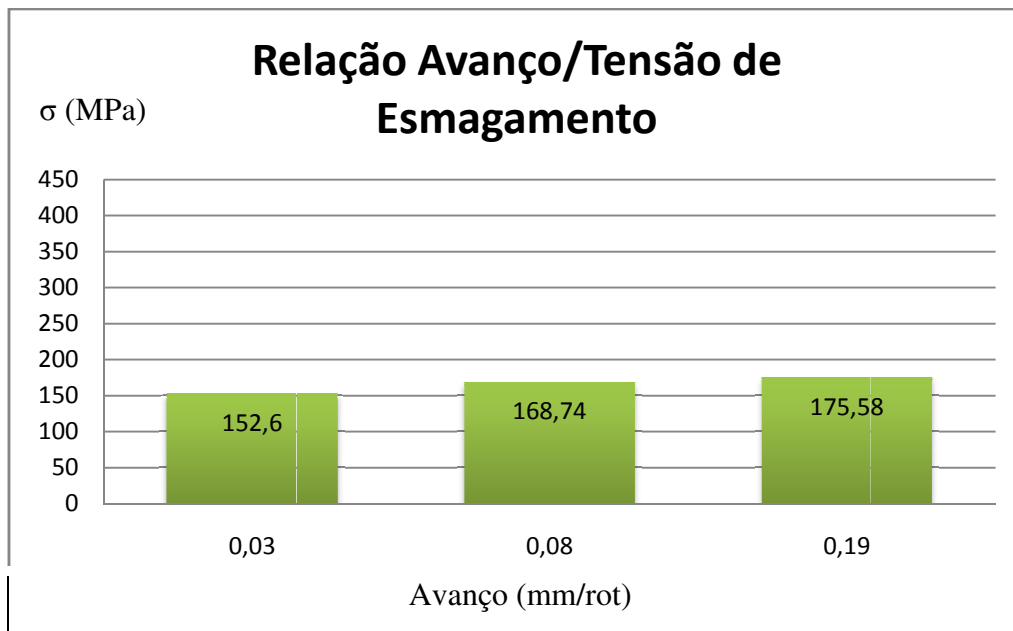


Imagem 3.55 – Relação Avanço/ Tensão de Esmagamento para Broca Step.

Da análise dos resultados, verifica-se que, para esta ferramenta, com o aumento do avanço, também a tensão de esmagamento aumenta.

Da análise dos resultados, não se verificou uma clara relação entre o aumento do avanço e a tensão de esmagamento do material. Outro objetivo deste trabalho será também avaliar a influência da geometria da ferramenta nos danos provocados pela maquinagem, pelo que será interessante relacionar os valores obtidos de forma a chegar a conclusões.

- Para a placa unidirecional, 0°:

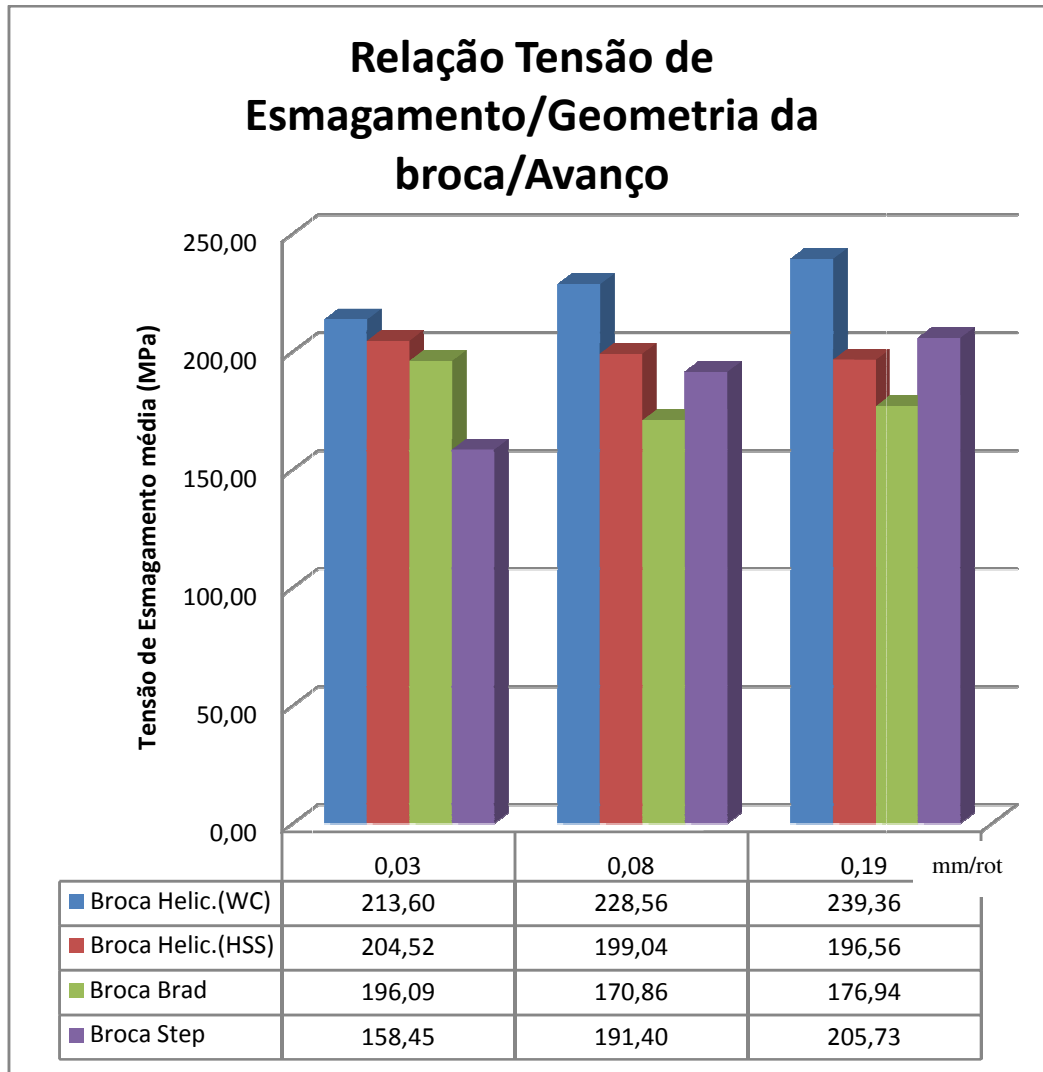


Imagem 3.56 - Relação entre Tensão de Esmagamento/Geometria da Broca para placa unidirecional.

Da análise dos resultados não se verifica nenhuma tendência pelo que, havendo a necessidade de efetuar uma escolha, tendo por base os resultados obtidos, em que o objetivo fosse apenas a maior resistência mecânica do material a escolha recairia na broca helicoidal de ângulo de ponta 118° em carboneto de tungstênio associada a uma furação com avanço rápido (0,19 mm/rot).

- Para as placas “cross-ply”, 0/90°:

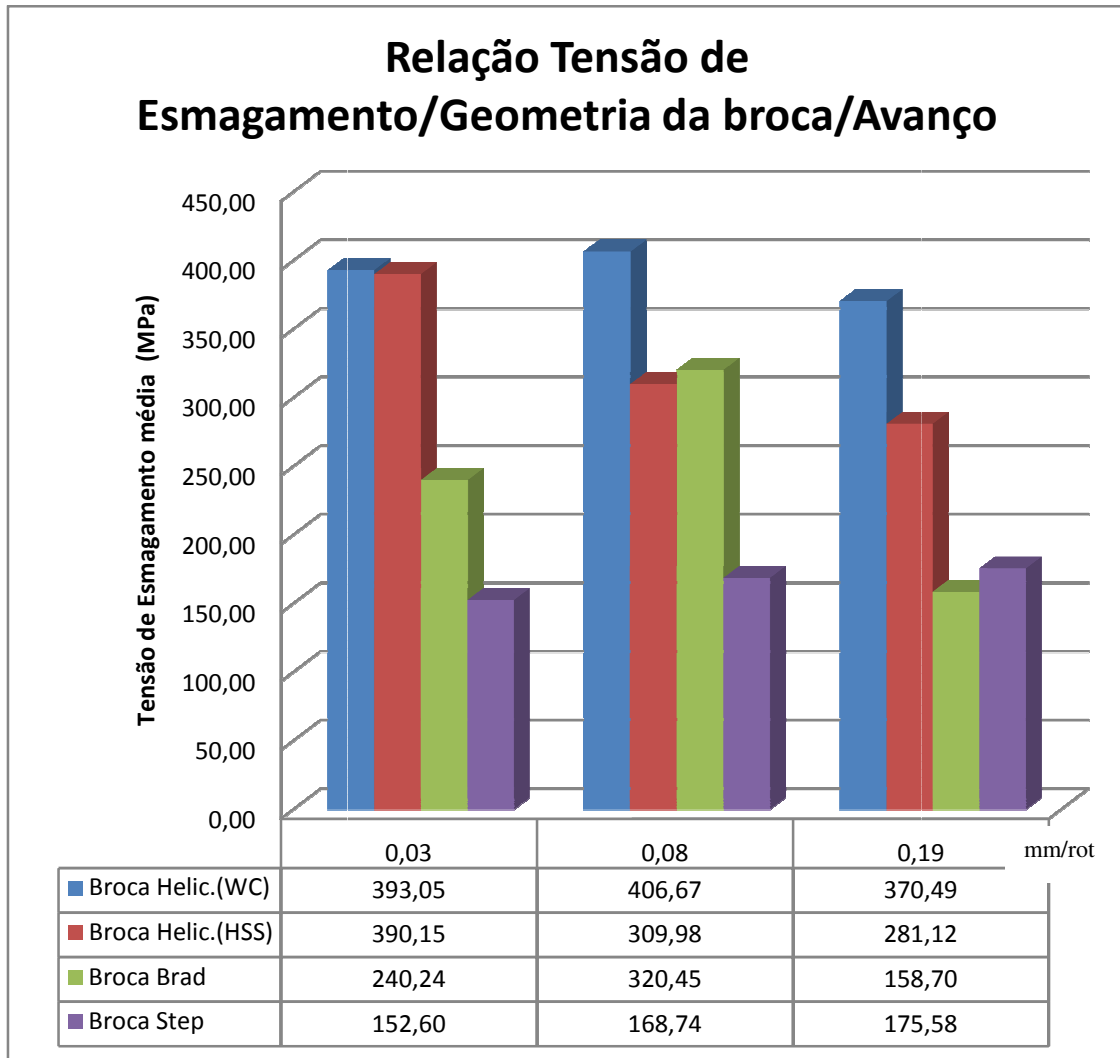


Imagem 3.57 - Relação entre Tensão de Esmagamento/Geometria da Broca para placa “cross-ply”.

Embora, também neste caso, não se possa tirar grandes conclusões dos resultados obtidos, poderá referir-se o facto dos melhores valores de resistência terem sido claramente obtidos para a broca Helicoidal em carboneto de tungsténio e os piores valores terem sido obtidos com as placas furadas pela broca bidiametral Step. O valor máximo de resistência foi obtido com a broca helicoidal (WC) e com um avanço de 0,08 mm/rot, enquanto o pior resultado foi obtido nas placas furadas com a broca Step e com um avanço de 0,03 mm/rot.

Finalmente, poderemos apresentar uma relação dos melhores valores obtidos, tanto para as placas unidirecionais como para as “cross-ply” de forma a relacionar os parâmetros utilizados com o tipo de material a maquinar.

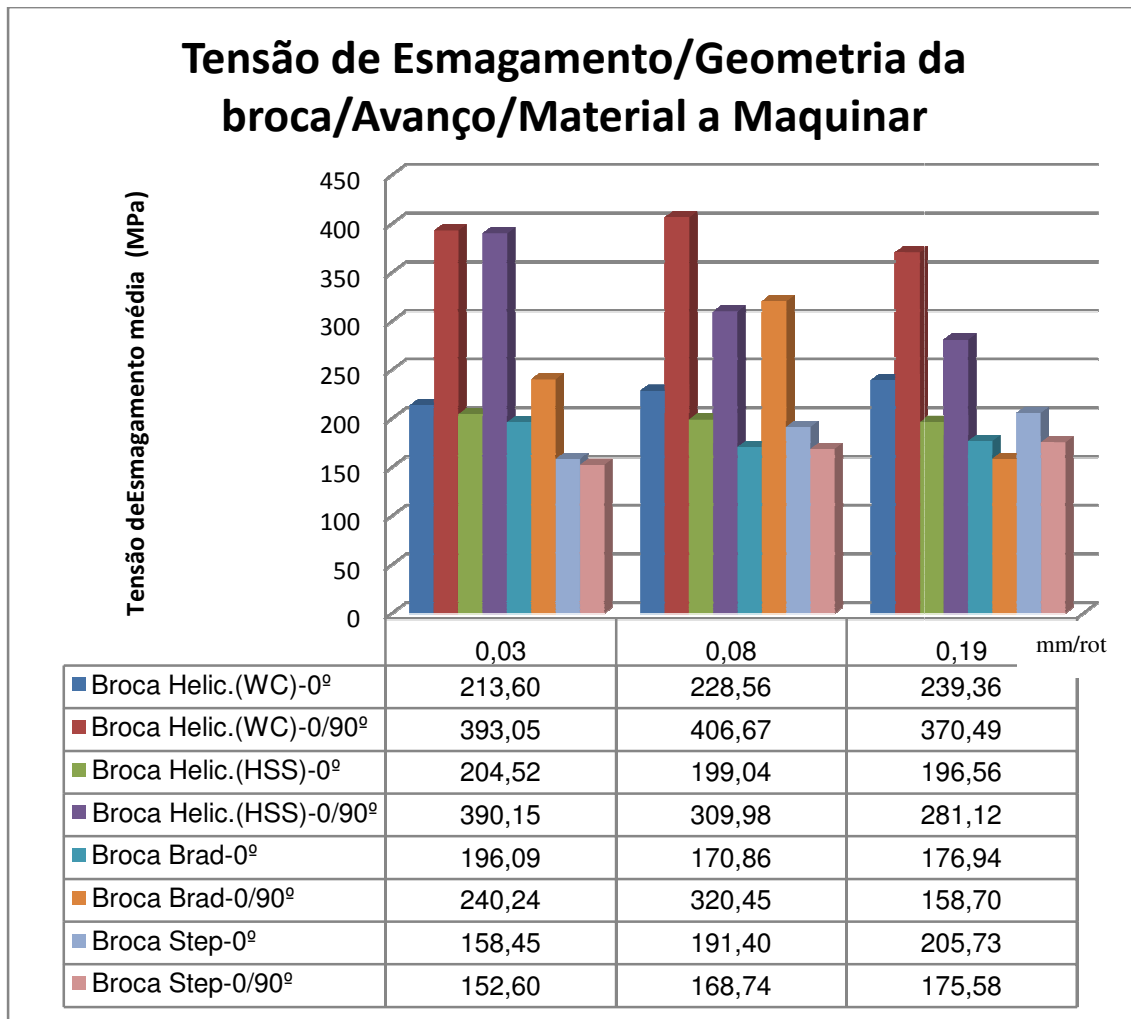


Imagem 3.58 – Relação entre Tensão de Esmagamento/Geometria da broca/Avanço/Material a Maquinar.

Da análise dos resultados verifica-se, que de uma forma geral, a furação de placas unidirecionais apresentou piores resultados, não sendo no entanto clara esta tendência. De todos os furos analisados, de referir que o melhor resultado (406,67 MPa) foi obtido na placa “cross-ply” quando furada com uma broca Helicoidal em carboneto de tungstênio e com um avanço de 0,08 mm/rot, e o pior resultado (152,60 MPa) foi

obtido na furação da placa “cross-ply” quando furada com a broca Step e avanço de 0,03 mm/rot.

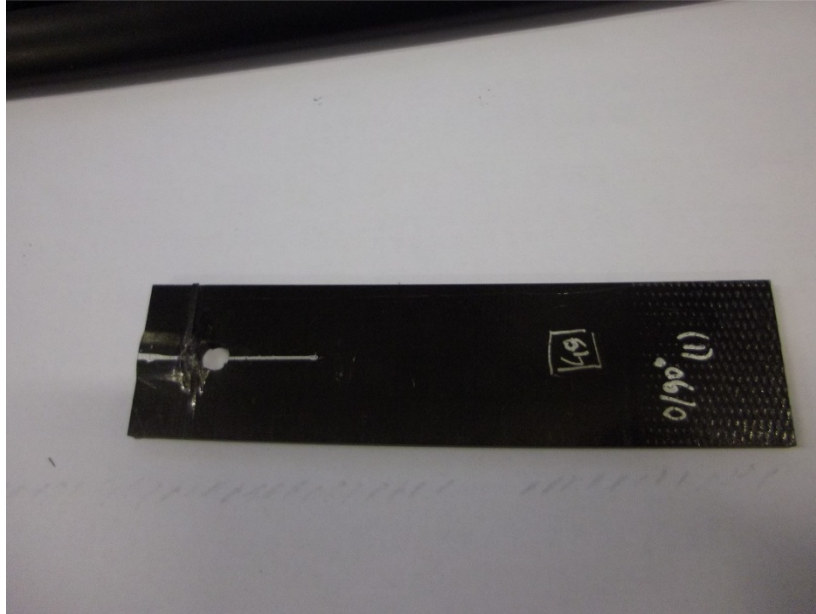


Imagem 3.59 – Imagem de placa após ensaio de esmagamento.

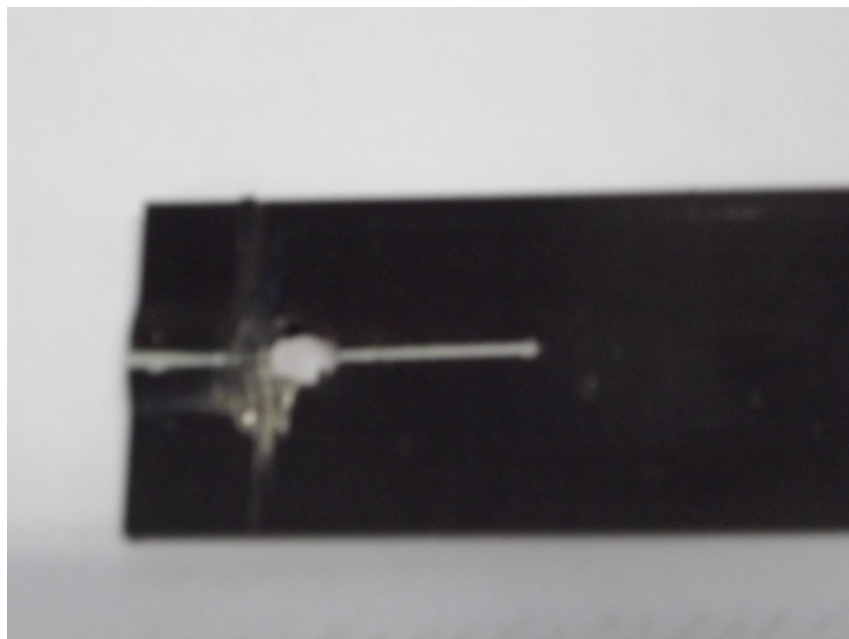


Imagem 3.60 – Imagem de furo ensaiado ao esmagamento.

3.4 CONCLUSÕES DO TRABALHO EXPERIMENTAL

Este trabalho experimental assentou essencialmente na furação de placas laminadas e posterior análise dos danos provocados por esta operação. Foi dada especial atenção à medição da delaminação causada pela furação e à resistência mecânica do material após ser maquinado.

Os materiais utilizados, para desenvolver este trabalho experimental, foram placas compósitas de carbono/epóxico com duas orientações de fibras diferentes: unidirecionais e em “cross-ply”. Não se conseguiu muita informação, junto do fornecedor, das suas características pelo que se levaram a cabo ensaios que permitiram determinar o seu módulo de elasticidade. Relativamente á sua resistência à tração, como já foi referido, a grande resistência oferecida pelo material, associada às limitações da máquina de ensaios não permitiu chegar a valores conclusivos.

Foram usadas três geometrias de ferramenta diferentes: helicoidal, Brad e Step. Os materiais utilizados nas ferramentas, foram o aço rápido (HSS) e o carboneto de tungsténio para as brocas helicoidais de 118° de ângulo de ponta e apenas o carboneto de tungsténio para as brocas Brad e Step. As ferramentas em diamante não foram consideradas neste trabalho, pois, embora sejam reconhecidas as suas boas características para a maquinagem de compósitos, o seu elevado custo não justifica a sua escolha, pelo menos num trabalho académico, como é o caso.

As vantagens e desvantagens de cada geometria ou material utilizado foram avaliadas, tanto no que diz respeito à delaminação como á resistência mecânica dos provetes ensaiados.

Para a determinação dos valores de delaminação, foi usada a técnica de Raio X. Algum conhecimento já existente relativamente a este processo permitiu definir alguns parâmetros (por exemplo: tempo de exposição das placas ao liquido contrastante), que tornaram acessível o procedimento de obtenção de imagens das placas furadas. Importando estas imagens para um software de desenho (no caso – AutoCad), foi

possível medir as áreas delaminadas e chegar a valores para o fator de delaminação de cada furo efetuado.

Terminado este processo, todas as placas foram sujeitas a ensaios de esmagamento, de forma a avaliar a forma como os parâmetros de maquinagem afectaram a resistência mecânica do material.

3.4.1 INFLUÊNCIA DO AVANÇO

Para todas as placas furadas neste trabalho verificou-se uma tendência clara em relação ao efeito do avanço. Com a exceção do valor obtido para as placas “cross-ply” furadas com a broca Brad e avanço de 0,19 mm/rot, que foi claramente atípico e por isso de menor importância, verificou-se que um aumento do avanço resulta num aumento do fator de delaminação. Retirando a exceção já referida, esta tendência foi verdadeira para as quatro ferramentas ensaiadas e para os dois tipos de placas furadas (unidireccionais e “cross-ply”).

Relativamente ao possível efeito do avanço, na resistência mecânica das placas, da análise dos resultados obtidos nos ensaios de esmagamento, não foi possível estabelecer qualquer relação entre estes fatores.

3.4.2 INFLUÊNCIA DO MATERIAL E GEOMETRIA DA FERRAMENTA

O material que se mostrou mais adequado à maquinagem de laminados carbono/epóxico foi o carboneto de tungsténio. Tal terá sido resultado das suas boas características de dureza e resistência à abrasão por contacto com as fibras. O seu

moderado custo é também uma vantagem deste material, principalmente quando comparado com o diamante. O aço rápido, normalmente não é um material adequado á maquinagem de materiais compósitos reforçados com fibras devido ao seu desgaste prematuro. Neste trabalho, apesar dos valores obtidos para este material serem piores do que para o carboneto de tungsténio, o facto de cada ferramenta ter feito apenas quatro furos, não terá permitido o desgaste acentuado das brocas e assim este fator não foi muito demonstrado nos resultados finais.

Relativamente à geometria da ferramenta, três tipos diferentes foram testados e comparados: helicoidal, Brad e Step.

As brocas helicoidais são as de geometria mais comum. São fáceis de encontrar em qualquer fornecedor especializado e são utilizadas na furação de vários tipos de materiais. Neste trabalho, de referir que com esta geometria (associada a um avanço baixo) obtiveram-se os melhores valores no que diz respeito à extensão da área delaminada em volta do furo.

As brocas Brad têm a particularidade de produzirem furos de qualidade, “limpos”, em compósitos laminados. Apesar de esta característica ser verificável ao longo deste trabalho experimental, de referir que a nível de delaminação, por comparação com as outras duas geometrias testadas foram as que apresentaram piores resultados.

As brocas Step, têm a particularidade de terem dois diâmetros, que faz com que o furo seja realizado em duas fases (como se o processo de pré-furação fosse realizado), com as vantagens daí provenientes. Relativamente aos resultados obtidos, no que diz respeito á delaminação apresentaram bons resultados, bastante próximos dos melhores que foram obtidos com a broca helicoidal de ângulo de ponta de 118° em carboneto de tungsténio.

3.4.3 NOTAS CONCLUSIVAS

Neste trabalho experimental foram testadas placas de carbono/epóxico com orientação de fibras unidirecionais e em “cross-ply”. Este trabalho consistiu na avaliação dos parâmetros de maquinagem e geometria e material de ferramentas. Foram aplicadas técnicas de análise por radiografia para avaliar os danos causados pela furação.

Tendo em conta os resultados obtidos, das combinações testadas, a que apresentou melhores resultados foi:

- avanço lento (0,03 mm/rot);
- carboneto de tungsténio como material da ferramenta;
- geometria helicoidal.

Verificou-se ainda que , de uma forma geral, foram conseguidos melhores resultados, no que diz respeito á área delaminada do furo, para as placas unidirecionais.

Dos resultados dos ensaios de esmagamento, não foi possível retirar grandes conclusões. A pouca homogeneidade do material terá sido o fator mais relevante, não permitindo identificar o possível efeito das combinações utilizadas na maquinagem, nos valores de teste. Ainda assim, podemos referir que os melhores resultados foram obtidos para a broca helicoidal em carboneto de tungsténio para um avanço intermédio (0,08 mm/rot).

CAPÍTULO 4 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

Após terminar a apresentação e respectiva discussão dos resultados obtidos no trabalho experimental, resta referir que os objetivos propostos no início deste trabalho foram de uma forma geral atingidos.

Tendo em conta os resultados obtidos estamos em condições de referir, relativamente às condições de maquinagem ideais, que:

- o aumento do avanço está diretamente relacionado com o aumento de danos verificados em furos de placas laminadas;

- o carboneto de tungsténio é um material indicado para a maquinagem de PRFC e foi o material que apresentou melhores resultados;

- a geometria da ferramenta teve uma influência direta nos resultados da extensão da zona delaminada e na resistência mecânica;

- das geometrias testadas, a que apresentou melhores resultados, no que diz respeito á zona delaminada e à resistência mecânica foi a helicoidal com ângulo de ponta de 118°;

- de uma forma geral, foram conseguidos melhores resultados, no que diz respeito á área delaminada do furo, para as placas unidirecionais;

- no que diz respeito apenas á zona delaminada, a melhor combinação de parâmetros de maquinagem encontrada foi a utilização da broca helicoidal em carboneto de tungstênio associada a um avanço lento de 0,03mm/rot;

- no que diz respeito à resistência mecânica os melhores resultados foram obtidos para a broca helicoidal em carboneto de tungstênio para um avanço intermédio (0,08 mm/rot).

Os resultados obtidos evidenciam a necessidade de uma seleção adequada da geometria da broca e dos parâmetros de furação para minimizar a delaminação.

Dos resultados dos ensaios de esmagamento, não foi possível retirar grandes conclusões. A pouca homogeneidade do material terá sido o fator mais relevante, não permitindo identificar o possível efeito das combinações utilizadas na maquinagem, nos valores de teste.

A análise não destrutiva, por raio X, demonstrou ser um processo de realização acessível e cujos resultados demonstraram ser de grande utilidade e importância para a realização deste trabalho experimental.

4.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base neste trabalho, algumas sugestões podem ser referidas para desenvolvimentos futuros. Estas sugestões podem ser divididas em seis áreas: material de teste; parâmetros e ferramentas de maquinagem; análise da influência do desgaste da ferramenta; uso de outras técnicas de análise de dano; possibilidade de criar um modelo em elementos finitos, reformulação dos ensaios mecânicos.

- Material de teste:
 - Seria interessante, para efeitos de comparação testar, para além do carbono/epóxico outros materiais, nomeadamente fibras de vidro comuns aramídicas, etc.

- Parâmetros e Ferramentas de maquinagem:
 - Para além dos parâmetros utilizados neste trabalho, outros poderiam ser considerados, nomeadamente o diâmetro do furo, a possibilidade de fazer pré-furação, ou mesmo a utilização por ferramentas de diferentes geometrias, menos comuns, já existentes no mercado e cuja análise poderia mostrar-se interessante.

- Influência de desgaste da ferramenta:
 - Poderia ser realizada (estaria inicialmente prevista esta análise), uma análise à temperatura das brocas durante a furação de forma a perceber o efeito que o desgaste da ferramenta teria nos resultados, tanto a nível da área delaminada como das características mecânicas.

- Técnicas de análise de dano:
 - Para além do raio X, poderiam ser utilizados outros métodos de análise como por exemplo os ultrassons ou a emissão acústica de forma a ter mais valores de comparação.

- Modelo em elementos finitos:
 - Seria interessante, de forma a prever as características do material e sua resposta á maquinagem, a criação de um modelo em elementos finitos.

- Ensaio mecânicos:
 - De forma a obter resultados que levem a conclusões (o que de certa forma não foi conseguido neste trabalho), seria importante, devido á pouca homogeneidade deste tipo de materiais testar um maior número de placas.

CAPÍTULO 5 – REFERÊNCIAS E BIBLIOGRAFIA

5.1 REFERÊNCIAS

- [1]- Stone, R., Krishnamurthy, K., “*A Neural Network Thrust Force Controller to Minimize Delamination During Drilling of Graphite-Epoxy Composites*”, Int.J.Machine Tools and Manufacture, 36, pp. 985-1003, 1996;
- [2]- Griffith, A. A., “*The phenomenon of rupture and flow in solids, philosophical transactions of the royal society*”, 221^a: 163-198, 1920;
- [3]- Agarwal, B. D.; Broutman, L.J., “*Analysis and performance of fiber composites*”, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 1990;
- [4]- ASM (Engineering Materials Handbook, vol.1 (composites), ASM International, 2001.
- [5]- <http://www.owenscorning.com.br/mapa.asp>
- [6]- <http://www.raacomposites.com/raacompapps.html>
- [7]- http://www.globalcomposites.com/news/news_fiche.asp?id=384&
- [8]- http://www.globalcomposites.com/news/news_aeronautics.asp
- [9]- <http://www.boeingphotostore.com/source/PODDetail.aspx?L1=space&L2>
- [10]- <http://www.km77.com/marcas/chevrolet/0fondos/corvette50/01.asp>
- [11]- <http://www.lenfrank.com/newpage.html>

- [12]- <http://www.f1-legend.com/histoire/voitures/81mclarenmp4-1.html>
- [13]- <http://www.euro-composites.com>
- [14]- <http://www.agy.com/framesets/markets/Consumes/Consumer1.htm>
- [15]- http://eng.uab.edu/compositesLab/e_appl1.htm
- [16]- Donnet, J.B.; Bansal, R.C., Carbon Fibers, Marcel Dekker, INC, 1990
- [17]- Mazumdar, S.K., “*Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering*”, CRC press, 2002
- [18]- Edward, A. H., Rosen, B.W., “*Properties analysis laminates*”, Engineered materials handbook, ASM International Handbook Committee, Vol.1, pp. 222-224, 1987;
- [19]- Van Otterloo, D. L., Dayal, V. – “*How isotropic are quasi-isotropic laminates*”, Composites A, 34, pp. 93-103, 2003;
- [20]- Gay, D., “*Matériaux Composites*”, 3rd edition, Ed. Hermès, Paris, 1991;
- [21]- Broothroyd, G., Knight, W.A., “*Fundamentals of Machining And Machine Tools*”, 2nd edition, Marcel Dekker Inc., New York, pp. 205-224, 1989;
- [22]- Groover, M. P., “*Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, processes, and systems*”, Prentice Hall, New York, pp. 205-224, 1996;
- [23]- Ferraresi, D., “*Usinagem dos metais*”; 1st ed., Ed. Blucher, São Paulo, pp. 17-65, 1970;
- [24]- S. Abrate, S., “*Machining of Composite Materials*”, Composites Engineering Handbook, P. K. Mallick, Marcel Dekker, New York, pp. 777-809, 1997;
- [25]- Wern, C. W.; Ramulu, M. and Shukla, A., “*Investigation of Stresses in the Orthogonal Cutting of Fibre-Reinforced Plastics*”, Experimental Mechanics, pp. 33-41, 1994;
- [26]- Boldt, J. A., Chanani, J. P., “*Solid-tool machining and drilling*”, Engineered materials handbook, ASM Intern. Handbook Committee, Vol.1, pp. 667-672, 1987;

- [27]- Koplev, A., Lystrup, Aa., Vorm, T., “*The cutting process, chips, and cutting forces in machining CFRP*”, Composites, 14, pp. 371-376, 1983;
- [28]- Wang, X. M., Zhang, L.C., “*An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics*”, Int. J. of Machine Tools and Manufacture, 43, pp. 1015-1022, 2003;
- [29]- Klocke, F., Koenig, W., Rummenhoeller, S., Wuertz, C., “*Milling of Advanced Composites*”, Machining of Ceramics and Composites, Ed. Marcel Dekker, New York, pp. 249-266, 1998;
- [30]- Hocheng, H., Dharan, C. K. H., “*Delamination During Drilling in Composites Laminates*”, Journal of Engineering for Industry, 112: 236-239, 1990;
- [31]- Piquet, R., B. Ferret, F. Lachaud, P. Swider, “*Experimental Analysis of Drilling in Thin Carbon/Epoxy Plate using Special Drills*”, Composites: Part A, 31: 1107-1115, 2000;
- [32]- Roy Meade L. E. Wilson, “*Machining, Assembly and Assembly Forms*”, Engineered Materials Handbook, vol1 Composites, ASM International, 9: 667-672, 1987;
- [33]- Tsao, C. C., Hosheng, H., “*The Effect of Chisel Length and Associated Pilot Hole on Delamination when Drilling Composite Materials*”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43, pp. 1087-1092, 2003;
- [34]- Durão L. M. P., A. T. Marques, A. G. Magalhães, A. M. Baptista, “*Maquinagem de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica*”, VI Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica – CIBEM6, Coimbra – Portugal, vol. II, pp. 1073-1078, 2003;
- [35]- Piquet, R., Ferret, B., Lachaud, F., Swider, P., “*Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills*”, Composites A, 31, pp. 1107-1115, 2000;
- [36]- Park, K. Y., Choi, J. H., Lee, D. G., “*Delamination-free and high efficiency drilling of carbon fibre reinforced plastics*”, J. of Composite Materials, 29, pp. 1988-2002, 1995;

- [37]- Persson, E., Eriksson, I., Zackrisson, L., “*Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composites laminates*”, Composites A, 28, 4, pp. 141-151, 1997;
- [38]- Persson, E., Eriksson, I., Hammersberg, P., “*Propagation of hole machining defects in pin-loaded composite laminates*”, J. of Composite Materials, 31, 4, pp. 383-408, 1997;
- [39]- Dharan, C. H. K., Won, M. S., “*Machining parameters for an intelligent machining system for composites laminates*”, Int. J. of Machine Tools and Manufacture, 39, pp. 415-426, 2000;
- [40]- Hocheng, H., Puw, H. Y., Yao, K. C., “*Experimental aspects of drilling of some fibre-reinforced plastics*”, Proc. of the Machining Composite Materials Symposium, ASM Materials Week, pp. 127-138, 1992;
- [41]- Tsao, C. C., Hocheng, H., “*The effect of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials*”, Int. J. of Machine Tools and Manufacture, 43, pp. 242-247, 2002;
- [42]- Chen, W.C., “*Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) composite laminates*”, Int. J. of Machine Tools and Manufacture, 37, pp. 1097-1108, 1997;
- [43]- Davim, J. P., Reis, P., António, C. C., “*Furação de laminados reforçados a fibras de carbono obtidas por autoclave – Influência dos parâmetros processuais na delaminagem*” VII Congr. de Mecânica Aplicada e Computacional, Évora, pp. 475-483, 2003;
- [44]- Davim, J. P., Reis, P., “*Furação de laminados epóxidos reforçados a fibras de carbono (CFRP): relação entre as forças de corte e o factor de delaminagem*”, VI Congr. Ibero-Americano de Engenharia Mecânica, Coimbra, pp. 1079-1084, 2003;
- [45]- Durão, L.M.P., Gonçalves, D.J.S., Albuquerque, V.H.C., Tavares, J.M.R.S., “*Avaliação de Ferramentas para a Furação de Laminados*”, VIII Congr. Nacional de Mecânica Experimental, Guimarães, 2010;

- [46]- Durão, L.M.P., Gonçalves, D.J.S., Albuquerque, V.H.C., Tavares, J.M.R.S., Baptista, A.M., “*Delaminação na Furação de Laminados Carbono/Epóxido*”, X Congresso Ibero-Americano em Engenharia Mecânica, Porto, 2011;
- [47]- Strong, A. B., “*Damage Control*”, International Encyclopedia of Composites, Vol. 2, pp. 1-6, 1991;
- [48]- Chandrasekharan, V., Kapoor, S. G., DeVor, R. E., “*A mechanistic approach to predicting the cutting forces in drilling: with application to fibre-reinforced composite materials*”, J. of Engineering for Industry, 117, pp. 559-570, 1995;
- [49]- Tagliaferri, V., Caprino, G., Ditterlizzi, A. “*Effect of drilling parameters on the finish and mechanical properties of GFRP composites*” Int. J. of Machine Tools and Manufacture, 30, pp. 77-84, 1990;
- [50]- Bongiorno, A. Cappelo, E., Copani, G. Tagliaferri, V., “*Drilled hole damage and residual fatigue behaviour of GFRP*”, ECCM-8, Naples, Italy Vol. II, pp. 525-532, June 1998;
- [51]- Enemuoh, E. U., El Gizawy, A. S., Okafor, A. C., “*An approach for development of damage-free drilling of carbon-fibre reinforced thermosets*”, Int. J. of Machine Tools and Manufacture, 41, pp. 1795-1814, 2001;
- [52]- Mehta, M., Reinhart, T.J., Soni, A. H., “*Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr Composite laminates*”, Proc. Of Machining Composite Materials Symposium, ASM Materials Week, pp. 113-126, 1992;
- [53]- Caprino, G., Tagliaferri, V., “*Damage development in drilling glass fiber reinforced plastics*”, Int. J. of Machine Tools and Manufacture, 35, pp. 817-829, 1995;
- [54]- Lachaud, F., Piquet, R., Collombet, F., Surcin, L., “*Drilling of composite structures*”, Composite Structures, 52, pp. 511-516, 2001;
- [55]- Piquet, R., Lachaud, F., Ferret, B. Swider, P., “*Étude analytique et expérimentale du perçage de plaques minces en carbone/époxy*”, Mec. Ind. 1, pp. 105-111, 2000;

- [56]- Zhang, L. B., Wang, L.J., Liu, X.Y., “*A mechanical model for predicting critical thrust forces in drilling composites laminates*”, Proc. Inst. Mech. Engrs., 215 Part B, pp. 135-146, 2001;
- [57]- Jain, S., Yang, D. C. H., “*Effects of feed rate and chisel edge on delamination in composite drilling*”, J. of Engineering for Industry, 115, pp. 398-405, 1993;
- [58]- Kim, D. W., “*Machining and drilling of hybrid composite materials*”, PhD thesis, Univ. of Washington, 2002;
- [59]- Jung, J.P., Kim, G. W., Lee, K. Y., “*Critical thrust force at delamination propagation during drilling of angle-ply laminates*”, Composite Structures, 68, pp. 391-397, 2005;
- [60]- Tsao, C. C., Hocheng, H., “*Effect of eccentricity of twist drill and candle stick drill on delamination in drilling composite materials*”, Int. J. of Machine Tools and Manufacture, 45, pp. 125-130, 2005;
- [61]- de Albuquerque, V.H.C.; Tavares, J.M.R.S.; Durão, L.M.P. “*Evaluation of delamination damages on composite plates from radiographic image processing using an artificial neural network*”, J Composite Materials, 2010, 44, pp 1139-1159;
- [62]- Johnson, W. S.; Treasurer, P.; Woodruff, G. W. “*Radiographic Investigation of the Effects of Ply Modification on Damage Development in Laminates Containing Circular Holes*”, J Composite Materials 2008, 42, pp 2143-2161;
- [63]- Tsao, C.C.; Hocheng, H. “*Computerized tomography and C-Scan for measuring delamination in the drilling of composite materials using various drills*”, Int J Machine Tools Manufacture 2005, 45, pp 1282–1287;
- [64]- Davim, J.P.; Campos Rubio, J.C.; Abrão, A.M. “*A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates*”, Composites Science Technology 2007, 67, pp 1939-1945;
- [65]- Murphy, C., Byrne, G., Gilchrist, M. D., “*The performance of coated tungsten carbide drills when machining carbon-reinforced epoxy composite materials*”, Proc. Inst. Mech. Engrs., 216 Part B, pp 143-152, 2001;

- [66]- ASTM D5961-D5961M, “*Standard Test Method for Bearing Reponse of Polymer Matrix Composite Laminates*”, ASTM International, 2007;
- [67]- ASTM D3039-95a, “*Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites*”, ASTM International, 1989;
- [68]- M. Ramulu, “*Cutting-edge Wear of Polycrystalline Diamond Inserts in Machining of Fibrous Composite Material*”, *Machining of Ceramics and Composites*, Ed. Marcel Dekker, 1998, pp. 357-410.
- [69]- de Moura, M.F.S.F, de Moraes, A.B., Magalhães, A.G., “*Materiais Compósitos – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*”, Publindústria, 2ª Edição, 2009;

5.2 BIBLIOGRAFIA

- Durão, L.M.P., “*Machining of Hybrid Composites*”, PhD Thesis, Univ. of Porto, 2005.

ANEXOS

Ficha técnica do adesivo:

HUNTSMAN

Structural Adhesives

Araldite® AV 138M with Hardener HV 998

Two component epoxy adhesive

Key properties

- Low out gassing / volatile loss
- Excellent chemical resistance
- Temperature resistant to 120°C
- Cures at temperatures down to 5°C
- Thixotropic, gap filling paste

Description

Araldite AV 138M with Hardener HV 998 is a two component, room temperature curing paste adhesive of high strength. When fully cured the adhesive will have excellent performance at elevated temperatures and has high chemical resistance. It is suitable for bonding a wide variety of metals, ceramics, glass, rubbers, rigid plastics and other materials, and is widely used in many industrial applications where resistance to aggressive or warm environments are required. The low out gassing makes this product suitable for specialist electronic telecommunication and aerospace applications.

Typical product data

Property	AV 138M	HV 998	Mixed adhesive
Colour (visual)	beige	grey	grey
Specific gravity	ca. 1.7	ca. 1.7	ca. 1.7
Viscosity (Pcs)	thixotropic	thixotropic	thixotropic
Pot Life (100 gm at 25°C)	-	-	35 mins

Processing

Pretreatment

The strength and durability of a bonded joint are dependant on proper treatment of the surfaces to be bonded. At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt. Low grade alcohol, gasoline (petrol) or paint thinners should never be used. The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching ("pickling") the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment.

Mix ratio	Parts by weight	Parts by volume
Araldite AV138M	100	100
Hardener HV 998	40	40

Resin and hardener should be blended until they form a homogeneous mix.

Application of adhesive

The resin/hardener mix is applied with a spatula, to the pretreated and dry joint surfaces. A layer of adhesive 0.05 to 0.10 mm thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint. The joint components should be assembled and clamped as soon as the adhesive has been applied. An even contact pressure throughout the joint area will ensure optimum cure.

Mechanical processing

Specialist firms have developed metering, mixing and spreading equipment that enables the bulk processing of adhesive. We will be pleased to advise customers on the choice of equipment for their particular needs.

Equipment maintenance

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesives residues have had time to cure. The removal of cured residues is a difficult and time-consuming operation.

If solvents such as acetone are used for cleaning, operatives should take the appropriate precautions and, in addition, avoid skin and eye contact.

Curing times

Temperature	°C	10	15	23	40	60	80	100
Cure time	hours	48	36	24	16	1	-	-
	minutes	-	-	-	-	-	15	10
LSS at 23°C	N/mm ²	10	11	13	14	15	18	18

LSS = Lap shear strength.

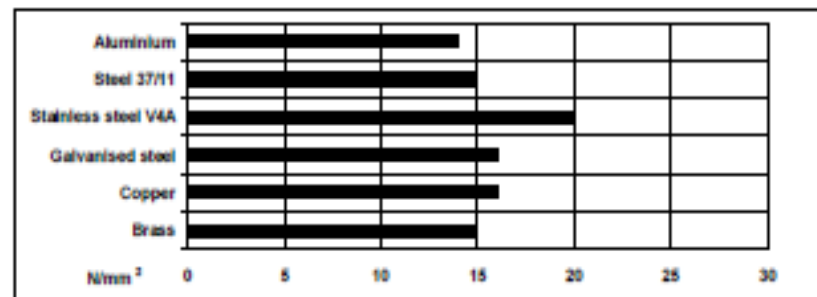
Typical cured properties

Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 170 x 25 x 1.5 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case. The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587)

Cure: 16 hours at 40°C and tested at 23°C

Pretreatment - Sand blasting



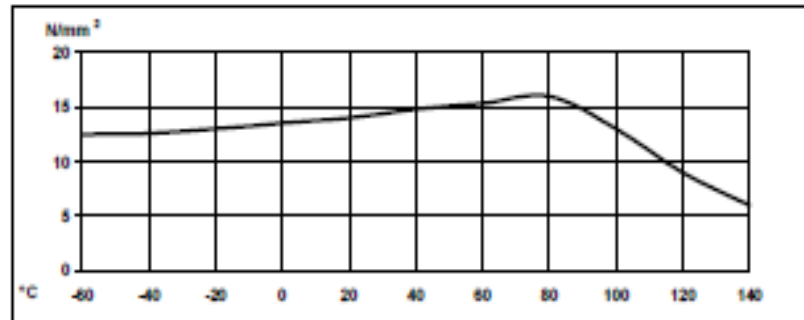
Shear modulus (DIN 53445)

Cure: 16 hours at 40°C

25°C - 30Pa
 50°C - 20Pa
 75°C - 0.40Pa
 100°C - 0.10Pa
 125°C - 3MPa
 150°C - 2MPa

Lap shear strength versus temperature (ISO 4587) (typical average values)

Cure: 16 hours at 40°C



Roller peel test (ISO 4578)

Cure: 16 hours at 40°C 1.8 N/mm

Shore hardness D84-86

Tensile strength

Cure: 16 hours at 40°C 43 MPa

Tensile modulus 4.7 GPa

Elongation at break 1.2%

Electrolytic corrosion (DIN 53489) - Cure: 16 hours at 40°C

Tested 4 days in 40°C/92% RH as specified in DIN 50015 Rated AN1

Coefficient of linear thermal expansion (VSM 77110)

Tested over range 18-93°C. Cure: 16 hours at 40°C 67x10⁻⁶/K⁻¹

Volume resistivity (VSD 0303) at 22°C 1.8x10¹⁷ ohm cm at 50 Hz

Electric strength (VSM 7710) at 22°C 45.8 kV (instantaneous value)

Fatigue test on simple lap joints (DIN 532852)

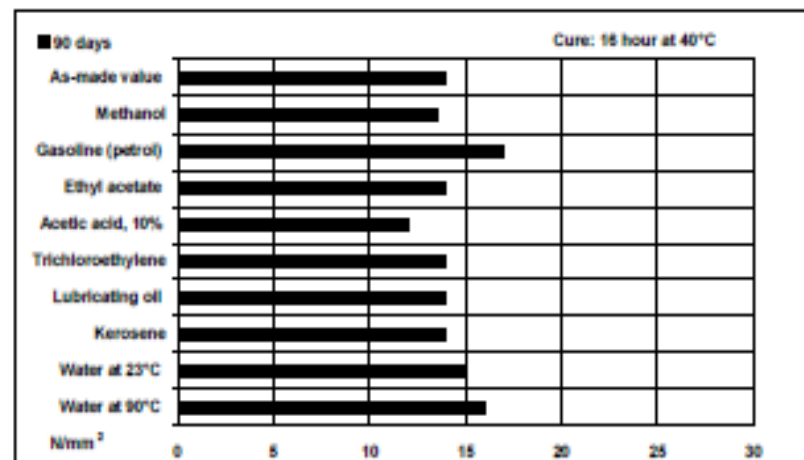
Cure: 16 hours at 40°C. Test frequency 90-130Hz

25% of static failing load >10⁷ cycles to failure

30% of static failing load 10⁷-10⁸ cycles to failure

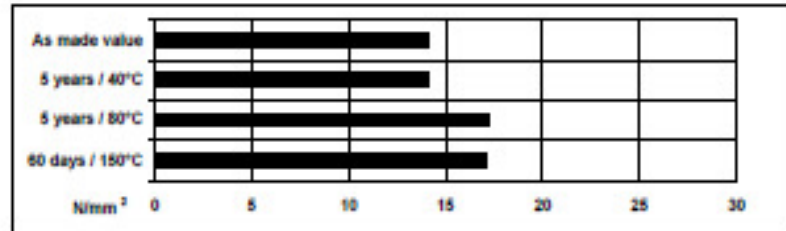
Lap shear strength versus immersion in various media (typical average values)

Unless otherwise stated, L.S.S. was determined after immersion for 90 days at 23°C



Lap shear strength versus heat ageing

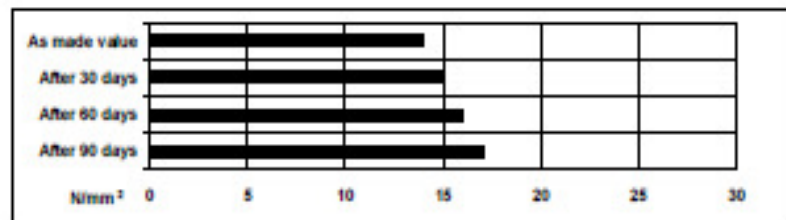
Cure: 16 hours at 40°C



Lap shear strength versus tropical weathering

(40/02, DIN 50015; typical average values)

Test at 23°C



Storage

Avaldite AV 138M and hardener HV 008 may be stored for up to 6 years and 3 years respectively at room temperature provided that the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.

Handling precautions

Caution

Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with foodstuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary, likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in the Material Safety Data sheets for the individual products and should be referred to for fuller information.

Huntsman Advanced
Materials

All recommendations for the use of our products, whether given by us in writing, verbally, or to be implied from the results of tests carried out by us, are based on the current state of our knowledge. Notwithstanding any such recommendations the Buyer shall remain responsible for satisfying himself that the products as supplied by us are suitable for his intended process or purpose. Since we cannot control the application, use or processing of the products, we cannot accept responsibility therefor. The Buyer shall ensure that the intended use of the products will not infringe any third party's intellectual property rights. We warrant that our products are free from defects in accordance with and subject to our general conditions of supply.

Duxford, Cambridge
England CB2 4QA

© Huntsman Advanced Materials (Switzerland) GmbH

© Avaldite is a registered trademark of Huntsman LLC or an affiliate thereof in one or more, but not all, countries

Tel: +44 (0) 1223 832121
Fax: +44 (0) 1223 493322
www.avaldite.com

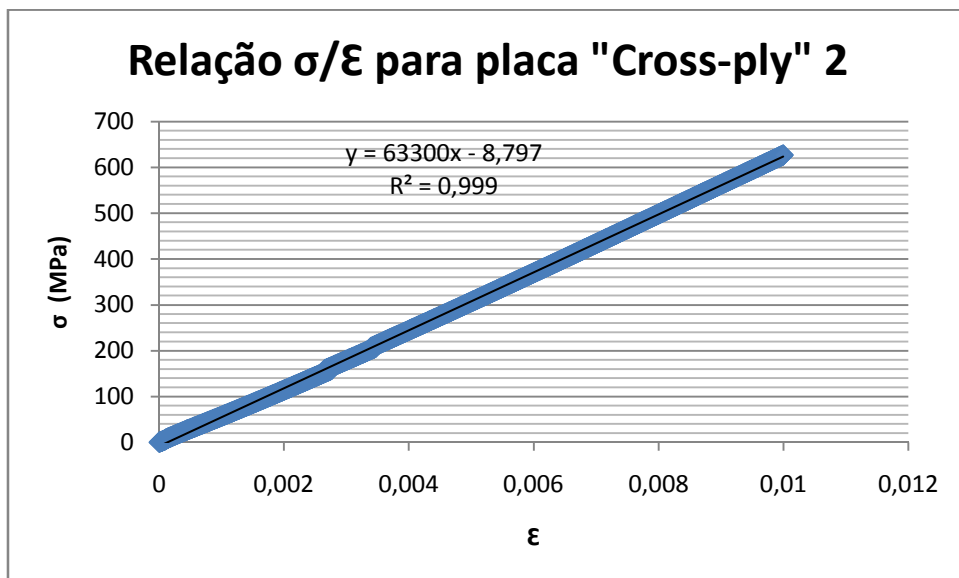
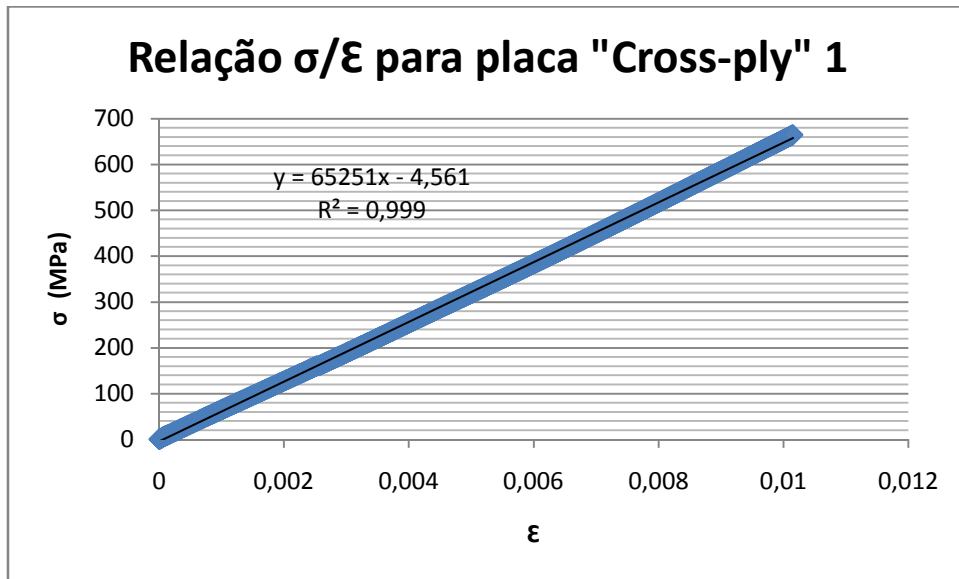
May 2004

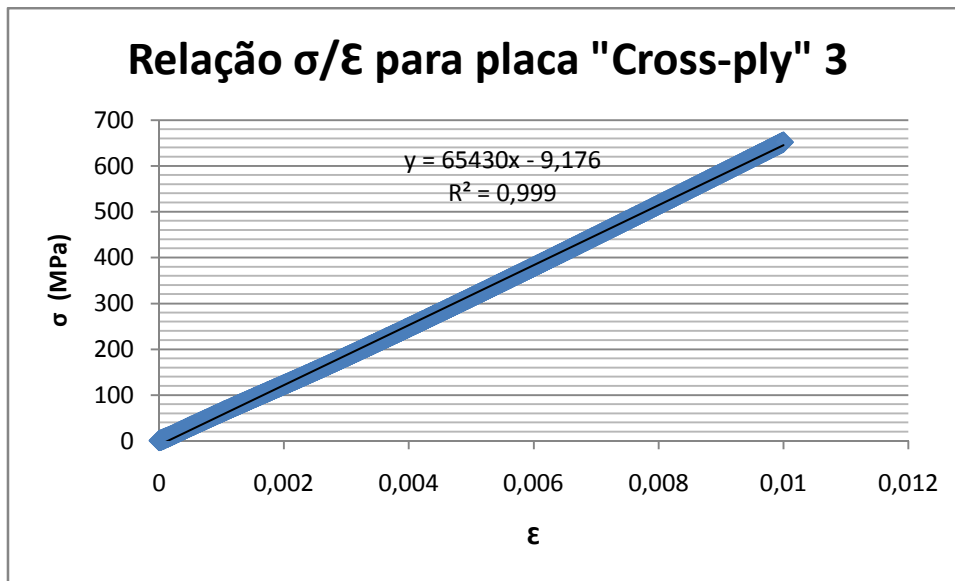
Publication No. A 63 f GB

Page 4 of 4

Cálculo do Módulo de Elasticidade do material:

- Para as placas "cross-ply":

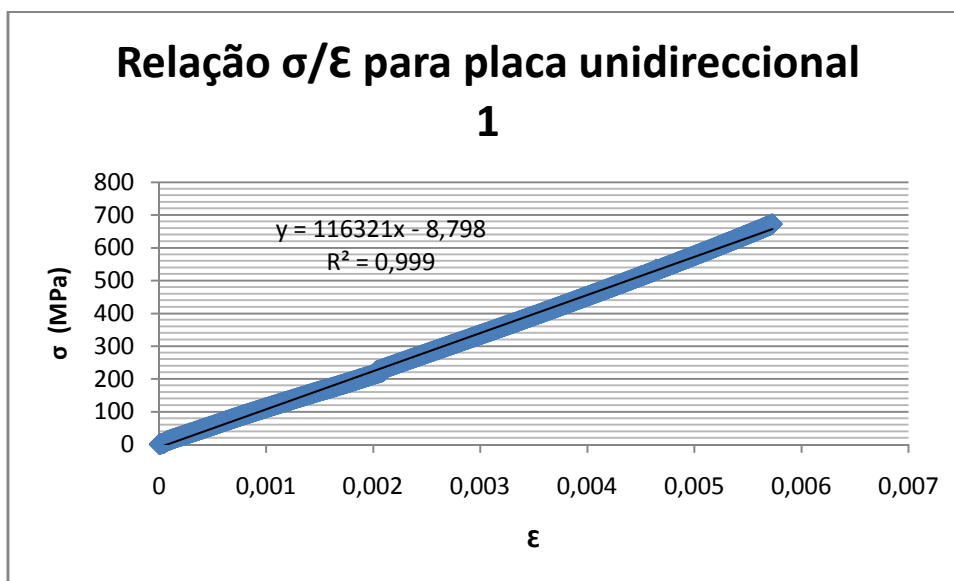


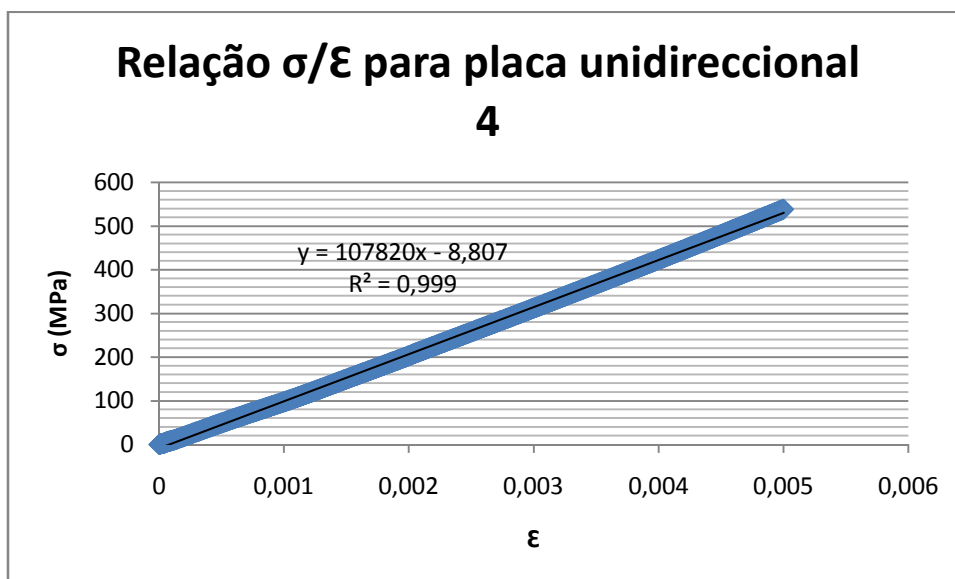
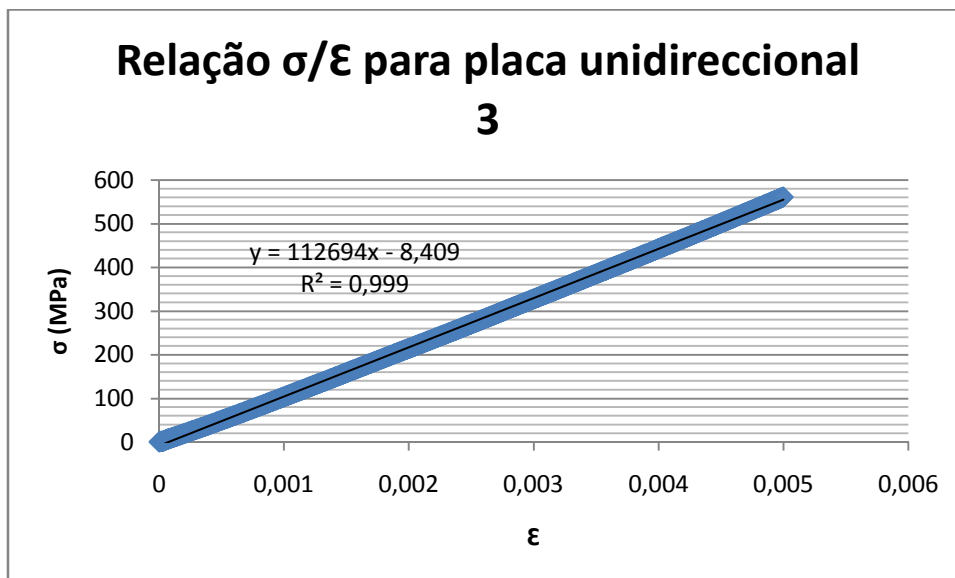
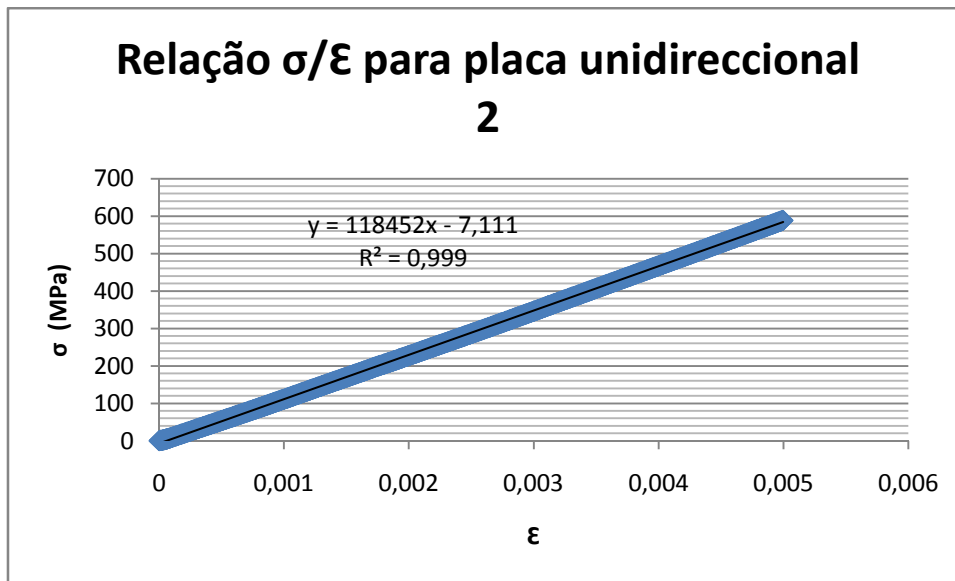


Dos três ensaios foi possível retirar um valor médio para o módulo de elasticidade de 65GPa.

Módulo de Elasticidade – E (MPa)	Valor médio de E (MPa)	Desvio Padrão
E1 = 65251	64660	1181
E2 = 63300		
E3 = 65430		

- Para as placas unidireccionais:





Dos quatro ensaios foi possível retirar um valor médio para o módulo de elasticidade de 113 GPa.

Módulo de Elasticidade – E (MPa)	Valor médio de E (MPa)	Desvio Padrão
E1 = 116321	113822	4654
E2 = 118452		
E3 = 112694		
E4 = 107820		

Ficha técnica de Pré-impregnado TEXIPREG® ET443:



20025 Legnano (MI) - ITALY
 Tel. +39-0331-467.555 fax.: +39-0331-467.777
 e mail: info.IT@seal.it web site: www.seal.it

Data Sheet of Advanced Prepreg TEXIPREG® ET443

CC160 ET443 CARBON FABRIC PREPREG

PROPERTIES

<i>Dry Fabric:</i>	<i>Unit</i>	<i>Typical Values</i>	
Weaving Style	-	plain	
Carbon Fiber	-	Carbon T300 / HTA 3K	
Warp	threads/cm	4.0	
Weft	threads/cm	4.0	
Areal Weight	g/m ²	160 (± 4%)	
<i>Uncured Prepreg:</i>	<i>Unit</i>	<i>Typical Values</i>	
Tack	-	medium / high	
Flow @ 125°C, 3 bar	%	19 ± 5	
Out life @ 23°C	days	30	
Storage life @ -18°C	months	12	
Nominal Area weight	g/m ²	308	
Nominal Resin content	Wt %	48 (± 3)	
Volatile content	Wt %	< 1	
<i>Cured Material Properties (*)</i>	<i>Unit</i>	<i>Typical Value</i>	<i>Standard Method</i>
Cured ply thickness	mm	0.18	
Tensile Strenght	MPa	750	ASTM D 3039
Tensile Modulus	GPa	65	ASTM D 3039
Flexural Strenght	MPa	820	ASTM D 790
Flexural Modulus	GPa	62	ASTM D 790
I.L.S.S.	MPa	70	ASTM D 2344
Compressive Strength	MPa	t.b.d.	Modified ASTM D 695 (SACMA SRM 1-88)

(*) The tests were carried out @ 23°C and 60% R.H. on specimens cured in std conditions (dwell @125° for 1 hour in hot press. External pressure applied: 3 bar). The tests were performed along the warp direction.

This information is property of SEAL S.p.A. and corresponds to the present knowledge without any legal binding. The values of the properties of cured material may change due to processing conditions. Modifications due to technical progress or commercial policy change are possible.

M-PDS R1

PDS 05.033 Rev.0 – 16/05/2005

Ficha técnica do Di-iodometano AnalAR NORMAPUR:



Product n° : 25633

Escolher idioma:
DIODOMETHANE AnalaR NORMAPUR
Methylene iodide
Order data

Code number	Pack	Pack type
25633.186	100 ml	Glass bottle

Technical information

boiling point	181,00 °C
melting point	6,00 °C
molecular weight in g/mol	267,840 g/mol

SpecificationPlease, use link to get PDF file [Specification-25633.pdf](#)

Assay (on anhydrous substance)	Min. 99,6 %
Acidity	Max. 0,003 meq/g
Density (20/4)	3,310 --> 3,322
Solidification point	5,6 --> 6,2 °C

To generate a C of A PDF File:

Select batch from menu and wait

Or, enter batch number and click go

 Certificate of AnalysisPlease, use link to get PDF file [Certificate-25633-06L140513.pdf](#)

Assay (on anhydrous substance)	100,0 %
Acidity	Max. 0,003 meq/g
Density (20/4)	3,318
Solidification point	6,0 °C

Safety information

CAS :	75-11-6
N° EINECS :	2008415



Certificate of Analysis

Material : 25633.186
Batch : 06L140513

DIODOMETHANE AnalaR NORMAPUR
Expires end of 12/2011

CHARACTERISTICS	SPECIFICATIONS	MEASURED VALUES
Assay (on anhydrous substance)	Min. 99,6 %	100,0 %
Acidity	Max. 0,003 meq/g	Max. 0,003 meq/g
Density (20/4)	3,310 --> 3,322	3,318
Solidification point	5,6 --> 6,2 °C	6,0 °C

We certify that this batch conforms to the specifications listed above.
BDL : Below detected limit.

Isabelle Guilpain Head of laboratory - Briare
VWR International
Document printed on 01/2010

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