



COMPORTAMENTO DE LAMINADOS REFORÇADOS COM FIBRAS E RESÍDUOS APÓS FURAÇÃO

JOÃO GOMES ALVES

novembro de 2020

COMPORTAMENTO DE LAMINADOS REFORÇADOS COM FIBRAS E RESÍDUOS APÓS FURAÇÃO

João Gomes Alves
1140629

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

COMPORTAMENTO DE LAMINADOS REFORÇADOS COM FIBRAS E RESÍDUOS APÓS FURAÇÃO

João Gomes Alves
1140629

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

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

JÚRI

Presidente

Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Prof. Adjunto, ISEP

Orientador

Luís Miguel Pereira Durão

Prof. Adjunto, ISEP

Co-orientador

João Emílio Raimundo Carrilho Matos

Prof. Adjunto, ISEP

Arguente

Nuno Alexandre de Oliveira Calçada Loureiro

Prof. Adjunto, ISVOUGA

AGRADECIMENTOS

A conclusão da dissertação de mestrado marca o fim de uma etapa e o cumprir de um objetivo. Apesar de todas as dúvidas e dificuldades que foram surgindo ao longo do caminho, houve um conjunto de pessoas que, direta ou indiretamente, deram o seu contributo para a conceção deste trabalho. Deste modo, gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos:

Ao Prof. Dr. Luis Miguel Pereira Durao por toda a orientação e apoio que me prestou de forma incansável e irrepreensível durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Joao Emilio Matos pelos conhecimentos que me transmitiu e pelo apoio prestado na realização do trabalho.

Ao Eng. José Fecheira e aos meus colegas Vítor Sousa e Luís Devesa pela assistência prestada nas oficinas de Engenharia Mecânica do ISEP, durante a realização dos trabalhos experimentais.

Ao meu amigo Fábio Silva, por todo o companheirismo e apoio prestado durante todo o meu percurso académico.

Aos meus pais e irmã, pelo apoio e incentivo constantes que me deram ao longo de toda a minha vida, sempre com visão de me proporcionar o melhor futuro.

PALAVRAS CHAVE

Compósitos com matriz termoendurecível, Valorização de resíduos, Maquinagem, Propriedades mecânicas, Forças axiais na furação, Análise da composição

RESUMO

O uso de materiais compósitos tem cada vez mais assumido um papel de maior grandeza com o passar dos tempos, a investigação e a aplicação destes materiais tem aumentado. Em conjunto com o desenvolvimento destes materiais e a preocupação crescente com o meio ambiente, surge a necessidade de aproveitamento de resíduos para o fabrico de compósitos, as vantagens para o meio ambiente e custo final de produção são notórias.

Tendo em conta que a produção de materiais compósito é realizada maior parte das vezes com o intuito de obter produtos sob a forma final, surge então um problema a quando da maquinagem dos mesmos. Devido à sua composição a maquinagem dos mesmos nem sempre é viável pois insurge defeitos na peça, quando o processo de ligação entre duas peças é necessariamente mecânico, o processo de maquinagem torna-se impossível de contornar em maior parte dos casos.

Com as duas premissas anteriores em conta, surgem os objetivos deste estudo. O primeiro objetivo consiste na compreensão e tentativa de previsão de influências e propriedades, induzidas em materiais compósitos com a adição de cargas na matriz. O segundo consiste na análise da influência, negativa ou positiva dessa mesma adição de cargas em relação ao processo de Furação.

Foram então testadas 48 placas de materiais compósitos com reforços de fibras de vidro e fibras de carbono, todas com diferentes composições em relação a matriz e empilhamento. Essas placas foram todas furadas e maquinadas sempre sob os mesmos parâmetros, com o intuito de descobrir a influencia da alteração de composição nas propriedades dos laminados.

Através da definição de amostras padrão, foram estabelecidos conjuntos de provetes com base na carga presente em cada matriz e percentagem volúmica da mesma. A composição destes conjuntos permitiu então concluir sobre a alteração gerada pelas cargas nas propriedades dos compósitos e provetes furados.



KEYWORDS

Thermosetting matrix composites, Waste recovery, Machining, Mechanical properties, Axial forces in drilling, Analysis of compositions

ABSTRACT

The use of composite materials has taken on a greater role over time, the research and application of these materials has increased.

The development of these materials together with the growing concern with the environment, appears a need for using recovered waste in the manufacture of composites, the advantages for the environment and the final cost of production are notorious.

Bearing in mind that the production of composite materials is carried out most of the time in order to obtain products in the final form, a problem then arises when machining them. Due to their composition, their machining is not always viable because it causes defects on parts, when the connection process between two parts is necessarily mechanical, the machining process becomes important in most cases.

With the two previous sentences in mind, the objectives of this study emerge. The first objective is to understand and try to predict influences and properties, induced in composite materials with the addition of fillers in the matrix. The second consists in the analysis of the influence, negative or positive, of this same load addition in relation to the drilling process.

48 plates of composite materials were then tested, with glass fiber and carbon fiber reinforcements and all with different compositions of matrix and stacking. These plates were all drilled and machined, always under the same parameters, in order to discover the influence of the composition change on the properties of the laminates.

Through the definition of standard samples, sets of specimens were established based on the load presented in each matrix and its volume percentage. The composition of these sets allowed us to conclude about the change generated by the loads in the properties of the composites and pierced test pieces.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

Ad	Área de Dano
Amax	Área Máxima
Ao	Área Nominal
C	Reforço Fibra de Carbono
Conj.	Conjunto
De	Diâmetro Equivalente
Dmax	Diâmetro Máximo
Dnom	Diâmetro Nominal
Do	Diâmetro Nominal
FA	Força Axial
Fd	Fator de Delaminação
Fda	Fator de Delaminação Ajustado
Fed	Fator de Delaminação Equivalente
Fz	Thrust Force
HSS	Aço Rápido
MC	Materiais Compósitos
PRFC	Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono
PRFV	Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro
Ref.	Referencia
Seq.	Sequencia
Tf	Tensão de Flexão
V	Reforço Fibra de Vidro
Va	Velocidade de Avanço
Vc	Velocidade de Corte
Vm	Volume da matriz
Vr	Volume de Reforço

Lista de Símbolos

σ_f	Tensão de Flexão
------------	------------------

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DOS MATERIAIS COMPÓSITOS	6
FIGURA 2 - DELAMINAÇÃO NA FURAÇÃO	12
FIGURA 3 – ESQUEMA DE VÁRIAS GEOMETRIAS DE BROCAS USADAS EM MATERIAIS COMPÓSITOS REFORÇADOS POR FIBRAS: (A) <i>TWIST DRILL</i> ; (B) <i>STEP DRILL</i> ; (C) <i>BRAD POINT DRILL</i> ; (D) <i>DAGGER DRILL</i> ; (E) <i>MULTI-FACETED DRILL</i> ; (F) <i>CORE DRILL</i> .	16
FIGURA 4 - COMPARAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE GEOMETRIA NO PROCESSO DE FURAÇÃO	17
FIGURA 5 - BROCAS DE HSS	18
FIGURA 6 - BROCA REVESTIDA DE DIAMANTE	18
FIGURA 7 - BROCAS DE CARBONETO DE TUNGSTÊNIO	18
FIGURA 8 - IMAGEM DE CARACTERIZAÇÃO DE DELAMINAÇÃO (RAIO-X)	21
FIGURA 9 - REPRESENTAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA CALCULO DO <i>Fed</i> .	22
FIGURA 10 - TIPOS DE ESFORÇOS FUNDAMENTAIS	24
FIGURA 11 - EXEMPLO DE ENSAIO DE FLEXÃO	25
FIGURA 12 - EXEMPLO DE ENSAIO DE IMPACTO	26
FIGURA 13 - ESQUEMA DE MAQUINAGEM	33
FIGURA 14 - <i>SETUP</i> DE MAQUINAGEM	33
FIGURA 15 - BROCA E FRESA USADAS NO PROCESSO	34
FIGURA 16 - GABARI DE FIXAÇÃO	34
FIGURA 17 - CÉLULA DE CARGA	35
FIGURA 18 - ESQUEMA DE MEDIÇÃO	36
FIGURA 19 - ESQUEMA DE ENSAIO FLEXÃO 4 PONTOS	38
FIGURA 20 - MÁQUINA DE ENSAIOS <i>SHIMADZU AG-X PLUS</i>	39
FIGURA 21 - PROVETE SUJEITO A ENSAIO DE FLEXÃO	40
FIGURA 22 - GRÁFICO DE FORÇAS DE FURAÇÃO	42
FIGURA 23 - GRÁFICO EXEMPLO DO PERFIL FZ	43
FIGURA 24 – PRIMEIRO FURO RETIRADO DO PERFIL FZ	43
FIGURA 25 – CRIAÇÃO DA EQUAÇÃO DA POLINOMIAL	44
FIGURA 26 – PRIMEIRO FURO AJUSTADO AO EIXO Y	44
FIGURA 27 - IMERSÃO DOS PROVETES	46
FIGURA 28 - SENSOR RVG 5100	46
FIGURA 29 - KODAK 2100 X-RAY SYSTEM	47
FIGURA 30 - IMAGEM DE RAIO-X DA ZONA DE FURAÇÃO	47
FIGURA 31 - GRÁFICO DE FZ MÁXIMO REGISTADO POR PLACA	51
FIGURA 32 - GRÁFICO DE TF CONJUNTO 1	52
FIGURA 33 - TF MÁXIMA PARA O CONJUNTO 1 DE PROVETES	52
FIGURA 34 - GRÁFICO DE TF CONJUNTO 1 VS 2	53
FIGURA 35 - GRÁFICO DE TF CONJUNTO 1 VS 3	53
FIGURA 36- GRÁFICO DE TF CONJUNTO 1 VS 4	54
FIGURA 37 - GRÁFICO DE TF CONJUNTO 5	55

FIGURA 38 - GRÁFICO DE TF CONJUNTO 1 VS 5	55
FIGURA 39 - GRÁFICO DE TF CONJUNTO 5 VS 6	56
FIGURA 40 - GRÁFICO DE TF CONJUNTO 5 VS 7	56
FIGURA 41 - GRÁFICO DE TF CONJUNTO 5 VS 8	57
FIGURA 42 - GRÁFICO DE VALORES DO ENSAIO DE IMPACTO (40% VM)	60
FIGURA 43 - GRÁFICO DE VALORES DO ENSAIO DE IMPACTO (60% VM)	61

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - PROPRIEDADES DE MATERIAIS NA FORMA MACIÇA E DE FIBRA	5
TABELA 2 - APLICAÇÕES DE MATERIAIS COMPÓSITOS.....	7
TABELA 3 - LIGAÇÕES APARAFUSADAS E REBITADAS VS LIGAÇÕES ADESIVAS	10
TABELA 4 - DANOS DE FABRICO E SERVIÇO	11
TABELA 5 - ESTUDOS SOBRE A INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS	13
TABELA 6 - ESTUDOS SOBRE INFLUENCIA DE FERRAMENTAS	16
TABELA 7 - TÉCNICAS DE ANÁLISE NÃO DESTRUTIVAS.....	19
TABELA 8 - LISTA DE COMPOSIÇÃO DAS PLACAS	32
TABELA 9 - PARÂMETROS DE FURAÇÃO	35
TABELA 10 - MEDIÇÕES DE LARGURA DO 1º LOTE	36
TABELA 11 - MEDIÇÕES DE LARGURA DO 2º LOTE	37
TABELA 12 - VALORES DE TENSÃO MÉDIOS POR LOTE.....	40
TABELA 13 - ENERGIA DE IMPACTO POR PROVETE	41
TABELA 14 - FZ MÁXIMOS DE CADA PLACA.....	45
TABELA 15 - VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO POR ADIÇÃO DE CARGA (FRAÇÃO VOLÚMICA 40/60, ENSAIO DE 4 PONTOS)	54
TABELA 16 - VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO COM MUDANÇA DA FRAÇÃO VOLÚMICA DE 40/60 PARA 60/40 (ENSAIO DE FLEXÃO DE 3 PONTOS)	55
TABELA 17 - VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO POR ADIÇÃO DE CARGA (FRAÇÃO VOLÚMICA 60/40, ENSAIO DE 4 PONTOS)	57
TABELA 18 - VALORES DE TENSÃO DE ENSAIO DE FLEXÃO A 3 PONTOS.....	58
TABELA 19 - VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO POR ADIÇÃO DE CARGA (FRAÇÃO VOLÚMICA 40/60, ENSAIO DE 3 PONTOS)	59
TABELA 20 - VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO COM MUDANÇA DA FRAÇÃO VOLÚMICA DE 40/60 PARA 60/40 (ENSAIO DE FLEXÃO DE 3 PONTOS)	59
TABELA 21 - VARIAÇÃO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO POR ADIÇÃO DE CARGA (FRAÇÃO VOLÚMICA 60/40, ENSAIO DE 3 PONTOS)	59

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Estrutura da Dissertação	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Materiais Compósitos e suas Aplicações	5
2.2	Compósitos com fibras naturais e aproveitamento de resíduos	9
2.3	Ligações com materiais compósitos.....	10
2.4	Danos em Materiais Compósitos	11
2.5	Furação.....	13
2.5.1	Parâmetros	13
2.5.2	Ferramentas e Materiais	16
2.6	Técnicas de análise de danos	19
2.6.1	Critérios de avaliação de delaminação.....	21
2.7	Ensaio Mecânicos	24
2.7.1	Ensaio de Flexão	25
2.7.2	Ensaio de Impacto	26
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	31
3.1	Preparação dos provetes	31
3.1.1	Maquinagem	33
3.1.2	Medição.....	36
3.2	Análise Experimental.....	38
3.2.1	Ensaio de Flexão a 4 Pontos	38

3.2.2	Ensaio de Impacto	41
3.2.3	Medição da <i>thrustforce</i>	42
3.2.4	Radiografias	46
4	DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES	51
4.1	Análise e discussão de resultados	51
4.1.1	Forças durante a Furação	51
4.1.2	Ensaio Flexão 4 Pontos	52
4.1.3	Ensaio de Flexão 3 Pontos	58
4.1.4	Ensaio de Impacto	60
4.2	Conclusões Finais e Recomendações para Trabalhos Futuros.....	62
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	65
5.1	Bibliografia	65
5.2	Anexos	70
5.2.1	Ficha técnica HASS Vf-2	70
5.2.2	Diodo	72
5.2.3	Catálogo de escolha da Fresa	73
5.2.4	Catálogo de escolha da Broca~	74
5.2.5	Ficha técnica da Célula de Carga	75
5.2.6	Ficha técnica Shimadzu	77

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Estrutura da Dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Os materiais compósitos têm vindo a ser alvo de um interesse crescente com o passar do tempo, devido à sua flexibilidade e facilidade de adaptação a cada projeto. Sendo que aquando do seu fabrico é possível a alteração de propriedades dos mesmos com vista ao projeto final.

Devido à sua elevada utilização no fabrico de peças para estruturas, surge a necessidade de ligação entre as mesmas, seja através de ligações adesivas ou por meio de ligações mecânicas, tendo cada uma as suas vantagens e desvantagens.

Nas ligações mecânicas entre peças surge então a necessidade de maquinaria das mesmas, nas quais se inclui, entre outras, a operação de furação. Devido à sua estrutura e composição, este processo pode provocar diversos problemas, como por exemplo o desgaste das ferramentas e diversos danos provocados na peça.

A análise de danos em compósitos tem por sua vez sido um ponto de estudo na área de investigação destes materiais, com o objetivo de reduzir assim quer a sua ocorrência quer as consequências deste processo na produção de estruturas em materiais compósitos.

A presente dissertação surge com essa necessidade de avaliar e estudar a influência dos danos provocados pelo processo de furação, assim como o entendimento da interação da constituição do Compósito e da sua sensibilidade ao dano provocado, com vista a diminuir o impacto deste processo e melhor entender a causa dos danosas otimizações de configuração possíveis para a maior eficiência do processo.

1.2 Objetivos

Com a realização deste projeto os principais objetivos a cumprir serão a análise de danos em torno do furo provocados pelo processo de furação, assim como a análise de alteração de propriedades de resistência mecânica de peças furadas. E com tal desenvolver um método de previsão de danos para a furação de compósitos. Assim sendo podemos resumir os seguintes objetivos:

- Análise qualitativa de danos induzidos por furação através da monitorização da força axial de corte;
- Correlação de danos com as alterações de resistência mecânica das peças fabricadas em materiais compósitos;

- Análise da influência de cargas na matriz dos compósitos e correlação com o processo de furação;
- Estudo do comportamento aquando do processo de furação;
- Análise da influência da sequência de empilhamento nas propriedades mecânicas dos compósitos.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

- O capítulo 1 pretende elucidar o leitor em relação ao tema abordado, com uma pequena introdução e guia de leitura com a estrutura da dissertação;
- No capítulo 2 são apresentadas algumas considerações e generalidades. É feito o fundamento teórico e são também apresentadas todas as ferramentas estudadas para a realização da parte experimental. Este capítulo é dividido em vários subcapítulos, que são os seguintes:
 - Materiais Compósitos e suas Aplicações, este capítulo interioriza um pouco o leitor acerca destes tipos de materiais, conta um pouco da sua história e algumas aplicações;
 - Compósitos com fibras naturais e aproveitamento de resíduos, nesta parte são descritas algumas vantagens e aplicações do uso de fibras naturais e resíduos em compósitos;
 - Ligações com materiais compósitos, o capítulo referido aborda os tipos de ligações de componentes compósitos possíveis e as suas vantagens e desvantagens;
 - Defeitos em materiais compósitos, com vista no objetivo de análise de danos nestes materiais, este capítulo serve como base na identificação de danos e causas;
 - Furação, como o processo de furação é o tema alvo da presente dissertação, foi elaborado um ponto que aborda as variantes do processo e alguns estudos já efetuados na área;
 - Técnicas de análise de danos, para finalizar o capítulo 2, são apresentadas algumas técnicas de análise de danos e métodos de quantificação que serão posteriormente usados para o procedimento experimental.
- Para o capítulo 3 é realizada uma descrição de todo o processo experimental, desde a preparação das placas em estudo, bem como realização dos ensaios propriamente ditos.
- No capítulo 4 são apresentados, todos os resultados obtidos no decorrer da fase experimental, bem como todas as conclusões tidas para esses valores, e ainda propostas para melhorias e trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Materiais Compósitos e suas Aplicações
- 2.2 Compósitos com fibras naturais e aproveitamento de resíduos
- 2.3 Ligações com materiais compósitos
- 2.4 Danos em Materiais Compósitos
- 2.5 Furação
- 2.6 Técnicas de análise de danos
- 2.7 Ensaios Mecânicos

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais Compósitos e suas Aplicações

Um material é designado de compósito quando resulta de uma combinação de dois ou mais materiais distintos, em que as propriedades resultantes são superiores à simples soma das propriedades singulares de cada parte. O exemplo mais conhecido são os materiais compósitos fibrosos, estes são materiais que resultam da dispersão de fibras num material aglomerante que se designa de matriz.

A principal razão das excelentes propriedades atingidas por este tipo de materiais resultante das fibras, pois estas apresentam melhores propriedades sob a forma de fibra do que sob a sua forma maciça. Este ponto foi provado a primeira vez por Griffith em 1920, demonstrando que fibras de vidro com diâmetro de 20 μ m apresentavam tensões de rotura que chegavam aos 170MPa [1]. A Tabela 1 permite a comparação de propriedades de materiais sob forma de fibras e sob forma maciça.

Tabela 1 - Propriedades de materiais na forma maciça e de fibra

Material	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Resistência à tração σ_u (GPa)	Massa volúmica kg/dm^3
Fibras:			
Vidro E	72	3,5	2,54
Vidro S	87	4,3	2,49
Carbono (Pitch CP)	690	2,2	2,15
Carbono (PAN C)	345	2,3	1,85
Boro	393	3,1	2,70
Sílica	72,4	5,8	2,19
Tungsténio	414	4,2	19,3
Berílio	240	1,3	1,83
Kevlar 49	131	3,6	1,45
Materiais Convencionais:			
Aço	210	0,34 - 2,1	7,8
Ligas de Al	70	0,14 - 0,62	2,7
Vidro	70	0,7 - 2,1	2,5
Tungsténio	350	1,1 - 4,1	1,3
Berílio	300	0,7	1,83

As várias combinações disponíveis, conferem propriedades específicas e vantagens quando comparados aos materiais usados tradicionalmente na construção de estruturas complexas. Algumas dessas vantagens são enumeradas de seguida:

- Possibilidade de modelação e adaptação de propriedades mediante as especificações de projeto;
- Diminuições de peso que podem chegar ao 50% quando comparadas com peças produzidas com ligas metálicas;
- Boa resistência ao impacto;
- Coeficiente de expansão térmica baixo (dependendo dos materiais escolhidos);
- Rigidez torsional elevada (importante nos veículos);
- Boa resistência à corrosão;
- Facilidade de montagem em estruturas;
- Ciclos de produção curtos;
- Baixo custo e facilidade de transporte, conseqüente da sua leveza;
- Bom desempenho à fadiga.

O uso de materiais compósitos não é uma aplicação recente, este tipo de materiais tem vindo a ser utilizado, desde 1500 A.C. [2]. O seguinte esquema da Figura 1 mostra algumas datas históricas de importância no desenvolvimento deste tipo de materiais.

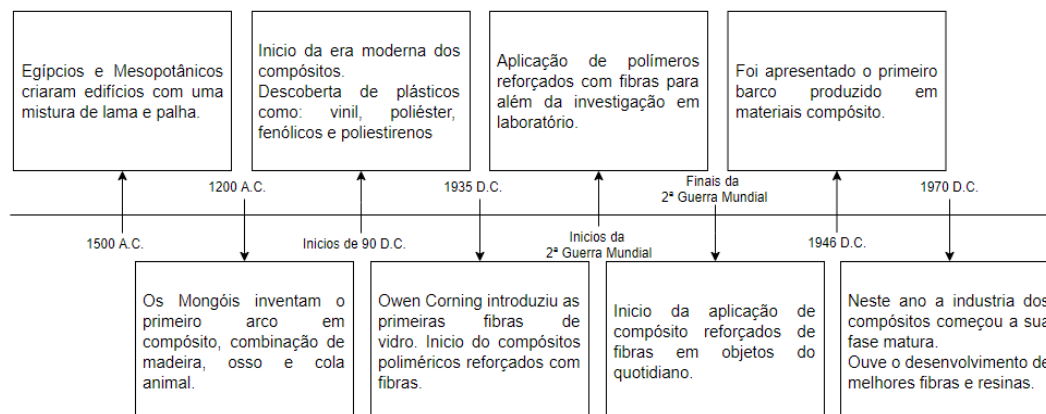


Figura 1 – Desenvolvimento histórico dos materiais compósitos

Dentro do leque de possibilidades que estes produtos apresentam, a sua facilidade de processamento e adaptabilidade fazem com que estes se tornem apeteceíveis a muitos tipos de indústrias. Na Tabela 2 são apresentados alguns exemplos de aplicações recentes, em várias indústrias neste campo dos materiais compósitos.

Tabela 2 - Aplicações de Materiais Compósitos

Área de Aplicação	Aplicações	Ref.
	Sistema de travagem de carboneto de silício reforçado com fibras de carbono, para veículos de emergência, pesados e de competição.	[3], [4]
Automóvel	Partes estruturais fabricadas em plásticos reforçados com fibras, de modo a reduzir o peso e conseqüentemente, aumentar a eficiência do veículo.	[5], [6]
	Substituição da cablagem usadas para transmitir informação dos sensores, por compósitos reforçados com fibras de carbono. Essas fibras podem ser usadas para transmitir sinais, devido à sua condução elétrica e o isolamento existente entre elas proporcionado pela matriz.	[6]
Aeroespacial	Em aplicações que exigem elevadas temperatura, como no nozzle de exaustão das turbinas, são usados compósitos de matriz cerâmica. Nos sistemas de travagem são também empregues carbonetos de silício reforçados com fibras de carbono, devido a temperaturas que atingem 1200°C.	[4], [7]
	Os materiais estruturais de uma aeronave devem aguentar variações de temperatura mantendo as suas propriedades mecânicas. Para esse efeito os materiais compósitos de matriz polimérica têm vindo a substituir a ligas de alumínio.	[8]–[12]
	No telescópio espacial Hubble foi implementada uma antena de 3,6m com matriz de Alumínio 6061 e reforço de Grafite P100. Este material apresenta um coeficiente de expansão térmica, mantendo estabilidade durante manobras no espaço.	[13]
Marítima	Devido à sua leveza, elevada resistência, durabilidade e velocidade de produção, os compósitos são materiais muito utilizados na produção de cascos e estruturas de navios. Compósitos de nano tubos de carbono e epóxidos são os mais favoráveis nesta indústria.	[14]–[16]
	O impacto da água no envelhecimento de materiais em estruturas marítimas afeta todo o tipo de materiais, metais, compósitos e ligas metálicas. No entanto compósitos híbridos de fibras de vidro e fibras de carbono (GCG_2C) ₂ apresentam menor absorção do que os compósitos simples destes materiais.	[17]

Química	<p>Em aplicações que envolve radiação nuclear as fibras de Basalto podem ser aplicadas, devido à sua capacidade de não absorver radiação. Transporte de materiais radioativos ou locais de eliminação de resíduos nucleares podem ser exemplos de aplicações de compósitos reforçados com fibras de Basalto.</p>	[18], [19]
	<p>Tendo em conta a elevada resistência ao impacto e corrosão das tubagens de basalto, estes são um bom substituto para o aço sendo extremamente usados para o transporte de produtos corrosivos, aumentando o tempo de vida destas estruturas cerca de 60 a 80 anos.</p>	[20]
	<p>Na construção civil o uso de fibras de Basalto como reforço do cimento (matriz) aumenta a resistência ao impacto, reduz a diminuição de volume aquando da secagem, aumenta a resistência química, térmica e a dureza, e ainda a estabilidade. Esta melhoria de propriedades está a aumentar o uso de cimento reforçado com basalto para construção de edifícios.</p>	[21]
Outras	<p>De modo a diminuir o impacto do preço de compósitos reforçados com fibras de carbono, foram produzidos compósitos híbridos reforçados de fibras de carbono e fibras de linho. Proporcionando uma redução do preço dos materiais e causando pouco impacto nas propriedades do compósito. Com isto foi desenvolvido um protótipo de um quadro de bicicleta, pesando cerca de 2,1kg , constituído por compósito com 30% de fibras de carbono e 70% de fibras de linho.</p>	[22]

2.2 Compósitos com fibras naturais e aproveitamento de resíduos

Uma vez que o trabalho experimental se vai debruçar sobre compósitos reforçados com fibras e resíduos, é conveniente focar as suas principais características e vantagens do uso dos mesmos.

Tendo um material compósito na sua constituição um elevado número de possibilidades, o aparecimento de vários estudos para desenvolvimento de novas combinações é muito frequente. Dentro desses vários estudos e tendo em conta a preocupação recente com a sustentabilidade do planeta, face à elevada poluição, uma das vertentes de estudo no fabrico de novos materiais é a utilização de resíduos para um aproveitamento e reciclagem de materiais, sempre com vista à diminuição e eliminação de resíduos.

Na 3ª conferencia internacional de materiais compósitos “MECHCOMP3” realizada em 2017 na Universidade de Bolonha [23], foram apresentados vários estudos no campo dos compósitos reforçados com Fibras Naturais alguns desses estudos foram:

- “O uso de compósitos reforçados com fibras naturais como futuro possível material de construção resistente a terremotos”: Nawawi Chouw apresentou esse estudo com a consideração dos elevados preços das fibras sintéticas aplicadas à construção. Com o uso de fibras de linho e coco em conjunto com betão torna-se possível uma redução de peso das estruturas e aumento da resistência mecânica, tudo isto com um baixo custo de material.
- “Desenvolvimento e caracterização de compósitos híbridos verdes de desperdícios têxteis”: De acordo com Mehmet Karahan e Nevin Karahan, 16-17% das fibras de algodão utilizadas na indústria têxtil são desperdiçadas por falta de comprimento e com isto os preços de produtos em algodão tem aumentado devido a esse desperdício. Com o uso dessas fibras de algodão para o fabrico de como reforço de materiais compósitos é possível a diminuição de custos dos compósitos, e a eliminação de resíduos da indústria têxtil.
- “Compósitos reforçados com fibras de coco e partículas de cimento”: Lívia Oliveira et al. estudou o processo de fabricação de um compósito híbrido natural, e a influência do uso de cimento como cargas, e conseguiu concluir que a adição de cargas de cimento (partículas) diminuiu a porosidade do compósito em questão, melhorando conseqüentemente a sua impermeabilidade, com isto torna as fibras mais duradoras, não estando expostas a corrosão. Fica assim a possibilidade de um compósito híbrido natural de baixo custo e elevada durabilidades.

Para além dos estudos apresentados existem muitos outros, o que prova a elevada importância desta área de estudo para um futuro melhor e para um planeta mais verde. Assim sendo a análise de danos neste tipo de compósitos torna-se necessária também pois a utilização destes materiais é um fator crescente na indústria.

2.3 Ligações com materiais compósitos

Em aplicações estruturais é frequentemente necessário o uso de processos de ligação. Existem três tipos de ligações que podem ser empregues nos materiais compósitos [1]:

- Ligações aparafusadas e rebitadas;
- Ligações adesivas;
- Ligações coladas por fusão (aplicadas apenas a materiais com matriz termoplástica).

Como na presente dissertação os materiais utilizados possuem matriz de natureza termoendurecível, este último tipo de ligação apresentado não se abordará, sendo assim apenas aplicáveis as ligações adesivas e as ligações aparafusadas ou rebitadas. Esses dois tipos de ligações apresentam várias vantagens e desvantagens que as diferem aquando do momento de escolha no projeto de estruturas, a Tabela 3 compara as duas apresentando as vantagens e desvantagens das mesmas.

Em casos que exigem manutenção, onde a montagem e desmontagem de peças está envolvida, as ligações mecânicas têm maior uso, e também apresentam maior resistência que as ligações adesivas, com exceção de casos onde têm esforços de fadiga.

Esta dissertação será focada na análise dos danos provenientes da furação de materiais compósitos para a posterior ligação mecânica, com o intuito de entender o comportamento deste processo e as consequências do mesmo.

Tabela 3 - Ligações Aparafusadas e Rebitadas Vs Ligações Adesivas

	Ligações Aparafusadas e Rebitadas	Ligações Adesivas
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Possibilita a desmontagem rápida e repetida de componentes; ▪ Não necessita de preparação prévia das superfícies; ▪ Ciclos térmicos e ambientes húmidos não afetam estas ligações; ▪ Permite inspeção visual para deteção de dano; ▪ Sob solicitações de tração apresenta bom desempenho. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Melhor desempenho à fadiga, proveniente da maior distribuição de cargas; ▪ Amortecimento de vibrações pela natureza viscoelástica do adesivo; ▪ Menor número de peças e peso; ▪ Possibilidade de isolamento térmico e vedação; ▪ Não sujeita a junta a corrosão galvânica; ▪ Maior facilidade de aplicação em superfícies irregulares; ▪ Geralmente mais económicas e rápidas de realizar.

Desvantagens	▪ Interrupção da continuidade das fibras na zona do furo, e consequente diminuição da resistência;	▪ Carece de uma preparação prévia das superfícies;
	▪ Concentração de tensões induzidas pelo furo;	▪ Alguns adesivos possuem ciclos de cura elevados, e necessitam de aplicação de pressão e temperatura. Limitando então o tamanho da peça, devido a equipamentos necessários;
	▪ Aumento de peso da estrutura	▪ Sensibilidade a fatores ambientais;
	▪ Diminuição do pré-esforço de aperto, devido às propriedades viscoelásticas dos polímeros;	▪ Inspeção da qualidade de junta difícil;
	▪ Aparecimento de defeitos originados do processo de furação.	▪ Não permite desmontagem;
		▪ Mau desempenho a solicitações de arrancamento;
		▪ Necessita de controlo rígido e mão-de-obra qualificada;
		▪ Têm riscos associadas à saúde e inflamabilidade.

2.4 Danos em Materiais Compósitos

No que toca a danos em materiais compósitos existem duas categorias que separam esses danos: danos de fabrico, estes danos podem se formar aquando da fase de fabrico destes materiais, e danos em serviço, sendo que estes danos dependem do ambiente e solicitações incidentes sobre o material [24]. Na tabela seguinte mostram-se os danos apresentados por este autor (Tabela 4).

Tabela 4 - Danos de Fabrico e Serviço

Danos de Fabrico	Danos em Serviço
<ul style="list-style-type: none"> • Porosidades; • Impurezas; • Volume incorreto de fibras; • Defeitos de Ligação; • Desalinhamento das Fibras; • Cura incompleta; • Ondulação de fibras; • Fraturas de camadas; • Delaminação; • Defeitos em Fibras. 	<ul style="list-style-type: none"> • Delaminação; • Falhas de Ligação; • Fraturas; • Inclusão de humidade; • Fratura ou empenos de fibras; • Falha da interface fibras/matriz.

Sendo a furação de MC um processo complicado, devido à heterogeneidade, anisotropia, sensibilidade ao calor e características abrasivas de alguns reforços, que tornam esse processo difícil de prever.

O aparecimento de danos é comum aquando da furação, danos como delaminação, arrancamento de fibras, fratura da matriz, formação de poeiras e ainda provoca elevado desgaste da ferramenta.

Na indústria aeronáutica foram reportados que 60% das peças rejeitadas são devidas a delaminação provenientes do processo de Furação [25], sendo este tipo de dano o mais crítico [26], ver Figura 2 [27].

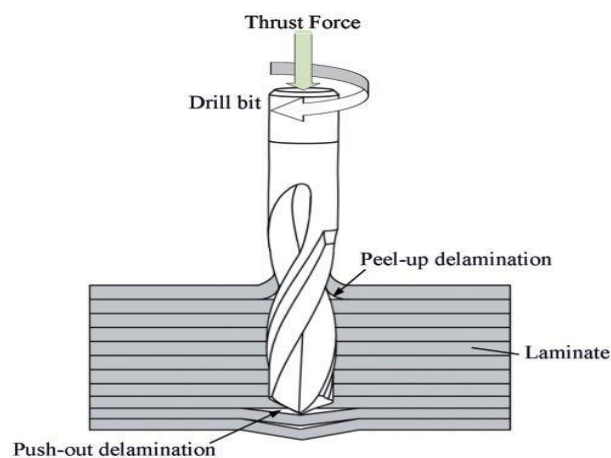


Figura 2 - Delaminação na Furação

Peel-up delamination é o que ocorre nas primeiras camadas do compósito, depois da aresta de corte da broca entrar em contacto com a placa, a força periférica provoca uma força de descasque de baixo para cima que causa esse tipo de delaminação.

Quanto à *push-out delamination*, esta ocorre nas últimas camadas, quando apenas faltam algumas camadas por cortar, como o laminado é muito fino nesse ponto, a resistência do laminado à deformação diminui [28]. Este tipo de delaminação está diretamente relacionado com a Força Axial (*thrust force*) gerada pelo processo de furação. Logo a sua diminuição é importante, contrariamente, é aconselhável o aumento da Força Axial apenas na entrada da peça de modo a diminuir a *Peel-up delamination* [29]. Sendo a *push-out delamination* mais importante e agressiva para a peça, opta-se sempre pela diminuição da Força Axial, quando não é possível variar esta ao longo do processo. Como será possível observar no Subcapítulo 2.5.1 a diminuição desta Força passa pela diminuição do avanço. É ainda importante salientar que Força Axial (FA) e Thrust Force (Fz) são consideradas a mesma grandeza, para o caso da Furação.

2.5 Furação

Como já foi referido, para que se possa efetuar uma ligação aparafusada ou rebitada, na maioria dos casos é usado o processo de furação. Na aplicação deste processo existem várias ferramentas, materiais e parâmetros a ter em conta, que influenciam o decorrer do processo, assim como o seu sucesso. Estes pontos serão abordados nos subcapítulos seguintes.

2.5.1 Parâmetros

No processo de furação, sendo este dentro dos processos de maquinagem, um dos de menor complexidade, os Parâmetros decisivos neste processo são apenas dois: velocidade de corte (V_c) e velocidade de avanço (V_a). Esses parâmetros acabam por ter influência na qualidade do furo, e também na intensidade de defeitos.

A V_c está diretamente relacionada com a velocidade de rotação da árvore (N) como é possível ver na equação a seguir:

Equação 1

$$V_c = \frac{\pi \times D_m \times N}{1000}$$

Muitos autores efetuaram estudos com vista a otimizar os parâmetros e encontrar as melhores condições de processo para o qual os valores de delaminação possam ser minimizados, e proteger a integridade final da peça a fabricar. A Tabela 5 apresenta esses estudos e as conclusões obtidas pelos autores em relação aos parâmetros de furação, no que toca a ferramentas e materiais, no capítulo 2.5.2 serão apresentadas as conclusões em relação a esse ponto. Ainda na Tabela 5, devido a uma questão de preferência e muitas vezes de simplificação, cada autor usa unidades diferentes para a representação de V_a .

Tabela 5 - Estudos sobre a influência de parâmetros

Ref	Parâmetros		Descrição
	N (rpm)	V_a (mm/min)	
[29]	800	15	Neste artigo o autor estudou a influência de vários tipos de V_a e V_c na furação de PRFC. E conseguiu concluir que o aumento de V_a aumenta a FA, e consequentemente o aumento de FA aumenta a <i>Push-out Delamination</i> .
	1000	18	
	1200	20	

[30]	2800	(mm/rot) 0,02 0,06 0,12	<p>No presente artigos os autores testam três tipos de avanço diferentes em PRFC para a mesma velocidade de rotação, e posteriormente determinam a área de delaminação ao redor do furo. O que lhes permite concluir a influência do avanço no processo.</p> <p>A conclusão obtida é de que quanto menor for o avanço, menor é a delaminação gerada no compósito, pois o avanço, é diretamente proporcional à FA exercida no MC.</p>
[31]	600 900 1200	(mm/min) 50 75 100	<p>O autor deste artigo analisou a influencia da FA e do <i>torque</i>. O compósito usado neste estudo foi polimérico reforçado com fibras de aramida.</p> <p>O estudo indica que para minimizar a FA, o melhor caso é com 1200 rpm de Vc e 50 mm/min Va, e para o mínimo valor de torque também se usa os mesmos parâmetros.</p> <p>Assim sendo, o autor conclui que a combinação de elevada Vc e baixa Va reduzem a delaminação nestes compósitos.</p>
[32]	1000 2000 3000	(mm/rot) 0,04 0,06 0,08	<p>Neste estudo o processo de furação foi aplicado a polímeros reforçados com fibras de vidro e sisal (fibras naturais).</p> <p>Para três Vc foram aplicadas três Va para cada e posteriormente feita a comparação de resultados obtidos da medição da FA. Foi concluído nesse estudo que a FA máxima que o compósito de fibras de vidro e sisal aguenta é 326 N e a FA aumenta à medida que aumenta a Va e diminui com o aumento da Vc.</p>
[33]	500 a 2000	(mm/min) 50 a 300	<p>No presente artigo foram estudados os parâmetros aplicados na furação de PRFV, os parâmetros de estudo foram: Va, Vc e ainda a implicação da orientação das fibras.</p> <p>As conclusões obtidas neste estudo foram: para o efeito do avanço os problemas na peça, velocidades elevadas promovem a separação da matriz e das fibras na extremidade do furo de entrada, com valores baixos a delaminação não acontece e para valores elevados na saída do furo, o material é empurrado em vez de</p>

cortado e provoca delaminação; No aumento da Vc a Força Axial sofre uma diminuição, com velocidades inferiores a 500 rpm a ferramenta tem maior dificuldade a cortar, aumentando assim a Força Axial; Relativamente ao ângulo de orientação das fibras, para ângulos inferiores a 30 graus a delaminação é mínima, no entanto quando a orientação das fibras varia muito de camada para camada a delaminação torna-se maior pois a liberdade de movimento aumenta.

		(mm/min)	Os autores puderam estudar a influência de parâmetros de furação em conjunto com a orientação das fibras de camada para camada e tentar ainda ligar os dados obtidos com um modelo matemático de previsão do processo.
	500	50	
	875	112,5	
[34]	1250	175	Foi-lhes possível concluir que baixas Va em conjunto com variação de orientação em relação a posição inicial entre 0-90 graus nas fibras são os parâmetros mais adequados na furação de PRFV.
	1675	237,5	
	2000	300	

Através da informação adquirida pela pesquisa efetuada por diversos autores, foi possível chegar a algumas conclusões em relação aos parâmetros a usar neste processo:

- Devido ao modo de influência do parâmetro da velocidade de corte na Força Axial, e conseqüentemente no efeito de delaminação, o uso de valores elevados para este parâmetro é o mais adequado, pois como permite baixar a delaminação produzida na peça, também permite uma maior rapidez de produção;
- Para a velocidade de avanço é preferível a utilização de valores baixos devido à sua elevada influência direta na delaminação;

Com a análise desses vários artigos foi ainda possível entender que a orientação das fibras, apesar de não ser um parâmetro do processo de furação, tem também influência na delaminação da peça.

2.5.2 Ferramentas e Materiais

Existem vários tipos de geometrias de ferramentas e materiais que podem ser utilizados no processo de furação, a Figura 3 [35] mostra algumas das geometrias utilizadas. Algumas dessas ferramentas podem apresentar outros nomes para além dos referidos.

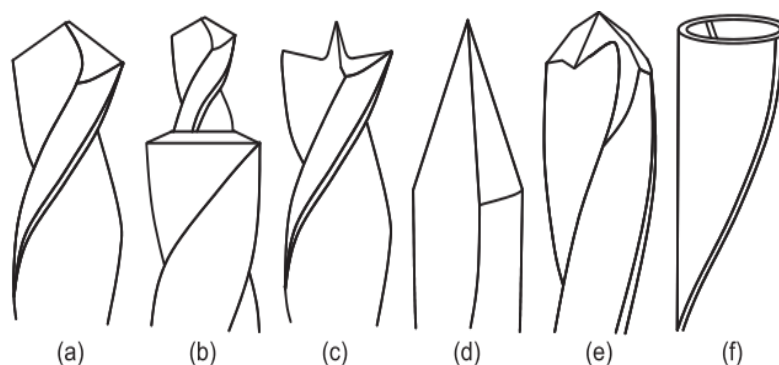


Figura 3 – Esquema de várias geometrias de brocas usadas em materiais compósitos reforçados por fibras: (a) *twist drill*; (b) *step drill*; (c) *brad point drill*; (d) *dagger drill*; (e) *multi-faceted drill*; (f) *core drill*.

Assim como para o estudo de parâmetros de furação, no caso das várias geometrias e parâmetros existentes, também existem muitos estudos acerca da sua influência na furação. Bem como um desenvolvimento de novas ferramentas para o uso em compósitos, sempre em busca de reduzir a delaminação.

Na Tabela 6 serão apresentadas algumas conclusões sobre as ferramentas, de estudos por parte de alguns investigadores na área, alguns destes estudos foram já apresentados no capítulo 2.5.1, no entanto não foram abordadas as conclusões referentes a geometrias de ferramentas.

Tabela 6 - Estudos sobre influencia de Ferramentas

Ref	Ferramentas	Resumo e Conclusões
[30]	<i>Brad</i> <i>Step</i> <i>Twist 85 e 120</i> <i>Step</i> de dentes retos	Neste estudo apresentado anteriormente, para além da análise de parâmetros, foram também usadas 4 geometrias de ferramentas diferentes, e uma delas tem 2 ângulos de ponta distintos. Foi possível aos autores concluir que as geometrias das ferramentas são um fator que tem influência na delaminação provocada pela furação. Assim como ângulos de ponta menores para a mesma geometria provocam menor delaminação.

[36]	<p><i>Twist 135</i> <i>Brad</i> <i>Multi-faceted 118</i></p>	<p>Os autores deste estudo usaram três geometrias de ferramenta diferentes tendo aplicado a cada uma os parâmetros apresentados anteriormente. Com isto concluíram que a geometria <i>Brad</i> produz menos danos que as geometrias <i>twist</i> e <i>multi-faceted</i>, pois a produção de Força Axial por essa geometria é menor.</p>
[31]	<i>Twist 90 e 118</i>	<p>No presente estudo os autores apenas estudaram uma geometria de broca, com variação no angulo de ponta, no entanto o maior fator de variação foi o diâmetro, foram usados diâmetros de 6 mm, 8 mm e 10 mm. Com isto concluíram relativamente à geometria, que para a broca de 90 graus de angulo de ponta o melhor diâmetro é de 6 mm e para a de 118 graus o melhor diâmetro é o de 7 mm. Assim sendo, foi possível entender que para cada diâmetro de furo pretendido, a melhor geometria de broca varia.</p>

Ainda D.Liu et al. [37] apresenta um gráfico de comparação de várias geometrias de corte com a Força Axial relativa a cada uma gerada aquando do processo de furação, o que permite uma melhor comparação da influência das geometrias no processo, Figura 4.

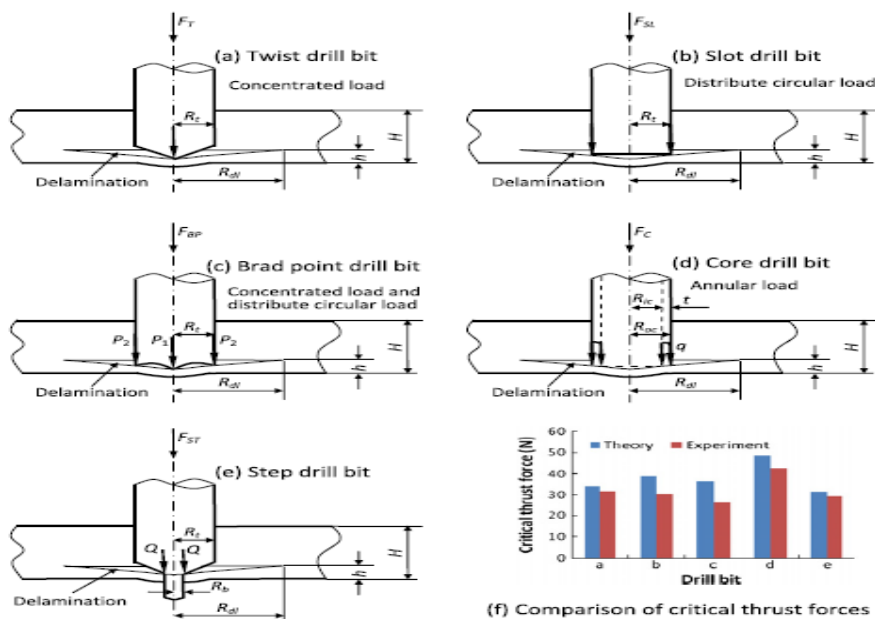


Figura 4 - Comparação da influência de geometria no processo de Furação

Como já foi explicado no Subcapítulo 2.5.1 a Força Axial deve ser o menor possível para que a delaminação também seja baixa. Tendo isso em conta, a pior geometria é a *Core Drill*, e a *melhor é a Step Drill*, este tipo de geometria não apresenta uma abordagem tão agressiva na peça a maquinar, devido à sua progressão no diâmetro, começando com um mais pequeno e progredindo para o diâmetro final, diminuindo então as tensões provocadas durante o processo.

Este último autor apresenta também alguns materiais mais utilizados nas ferramentas para furação de polímeros reforçados com fibras:

- Aços rápidos (HSS);
- Carboneto de Tungstênio (revestido e não revestido);
- Revestida de diamante. Policristalino.



Figura 6 - Broca revestida de diamante



Figura 7 - Brocas de Carboneto de Tungstênio



Figura 5 - Brocas de HSS

A escolha do material para a maquinagem de MC deve ser cuidadosa pois as ferramentas sofrem um rápido e elevado desgaste, isso foi concluído por alguns autores [38], [39]. A natureza anisotrópica destes materiais faz com que a ferramenta atravesse constantemente esforços alternados que ajudam no desgaste, e também existe a possibilidade de reação com a matriz, isto tudo implica então que as ferramentas para trabalhos em compósitos apresentem, de preferência, elevada dureza.

Nos polímeros reforçados com fibras, os possíveis mecanismos de desgaste apresentados são: abrasão, danos de superfície e por vezes adesão, sendo a abrasão o processo mais dominante. Este mecanismo de desgaste é provocado pelas fibras abrasivas dentro da matriz macia que induzem riscos nas ferramentas [37].

De modo a atingir um maior tempo total de vida da ferramenta, visando um uso rentável, e sem submeter a peça a danos provocados pelo desgaste, foram desenvolvidos vários métodos de controlo do desgaste no processo de furação, através de uma monitorização em tempo real e online, automatizando ainda mais o processo. Essa metodologias suportam-se no uso de sistemas de monitorização com recurso a vários sensores que obtêm valores de Força Axial e *torque* durante o processo, que são usados para estimar o grau de desgaste [38,40].

2.6 Técnicas de análise de danos

Em materiais compósitos, à semelhança dos materiais convencionais, existem técnicas de análise, que permitem a obtenção das propriedades dos materiais e possibilitam também uma análise de danos, essas técnicas dividem-se em dois tipos principais: técnicas destrutivas e técnicas não-destrutivas.

No caso de análise de danos em compósitos, as técnicas mais utilizadas para esse efeito são as não-destrutivas, pois não alteram a morfologia da peça, permitindo assim uma análise detalhada da zona de dano. Este tipo de análise apresenta alguns benefícios na utilização a nível industrial [43]:

- Melhoria da caracterização de danos;
- Detecção de danos impercetíveis numa inspeção visual;
- Redução do número de reparações desnecessárias;
- Identificação de danos críticos;
- Apenas necessita de acesso a um dos lados.

De seguida serão enumerados na Tabela 7 os vários métodos de análise não destrutiva aplicados a compósitos e uma breve descrição de alguns processos, para um melhor entendimento das técnicas possíveis de aplicar para estudo de falhas [42,43].

Tabela 7 - Técnicas de Análise Não Destrutivas

Técnicas	Método	Descrição
Sonoras	Ultrassons	A tecnologia de ultrassons para aplicação em análises não destrutivas consiste do uso de ondas sonoras com frequências compreendidas entre os 50 kHz e os 20 MHz, no entanto nos materiais compósitos, devido à sua atenuação, a frequência máxima deve ser de 5 MHz. Na maior parte dos casos com aplicação desta técnica, são enviadas ondas pulsadas e posteriormente intersetadas no seu retorno e uma análise do tempo de viagem (TOF=time-of-flight) permite concluir sobre a existência de falhas ou não nas peças, estipular propriedades. Existem várias técnicas desenvolvidas de aplicação de ultrassons como: <i>Pulse-Echo</i> , <i>Back-Scatter</i> , Transmissão de passagem, Espectroscopia ultrassónica, acustografia.

	Baixas frequências	<p>Este método, ao contrário dos métodos de uso de ultrassons, apoia-se no uso de frequências inferiores a 20 kHz (no caso dos compósitos). Este método é dividido em dois tipos: globais e locais.</p> <p>Ambos os métodos induzem vibrações na peça, e com a análise dos espectros obtidos é possível a caracterização de falhas.</p>
	Emissão Acústica	<p>As técnicas de emissão acústica detetam a degradação de material pela análise continua das ondas produzidas por stress das peças aquando da sua solitação. O posicionamento de sensores acústicos ao longo das peças é crucial para este tipo de análise, e também a sua monitorização continua para possível deteção prévia de falhas.</p>
Térmicas	Termografia	<p>Os métodos termográficos focam-se no estudo dos gradientes de temperatura emitidos pelos provetes de ensaio para detetar a presença de falhas. A presença de falhas causa distúrbios no padrão de temperatura normal das peças, sendo assim possível a sua deteção.</p> <p>Dentro dos métodos termográficos temos a termografia pulsada e a vibro termografia.</p>
Radiográficas	Radiografia	<p>A radiografia consiste num feixe de raios-X que bombardeia a peça de estudo, e a radiação não absorvida pelo provete atinge um alvo sensível à radiação onde imprime uma imagem.</p> <p>Este é dos processos de análise não destrutivos mais utilizados na análise de compósitos, visto que permitem uma obtenção de imagem de falhas nestes materiais, e é um processo relativamente simples de utilização. Este processo possui variantes como: radiografia melhorada e tomografia computacional.</p>
	Tomografia por retrodifusão de Raio-X	<p>Este método aproveita os raios retro difundidos do processo de radiografia permitindo assim ao contrário dos outros processos de radiografia que a análise da peça em estudo seja efetuada apenas de um lado da peça, sem requerer acesso aos dois lados.</p>

O método para análise de danos induzidos por furação a aplicar na presente dissertação será o de Radiografia por Raios-X com contraste. Este método de análise, precedido da imersão da peça num líquido contrastante por um período de dez a quinze minutos, permite a obtenção de imagens da orla de dano formada ao redor do furo, numa escala de cinzentos, que posteriormente possibilita a análise sistemática de imagens por parte de um programa de tratamento de imagens. Esta técnica permite a automatização do processo, facultando também uma coletânea de imagens de danos sobre muitos casos de estudo.

2.6.1 Critérios de avaliação de delaminação

Com base nas imagens obtidas nos meios de análise óticos de MC, surgiu a necessidade de medir e quantificar o dano visível de delaminação. Para tal, ao longo do tempo, vários autores foram propondo equações desenvolvidas para estimar a quantidade de danos de delaminação ao redor de um furo. Essas equações baseiam-se na obtenção de valores de área e diâmetros extraídos dos dados de análise ótica.

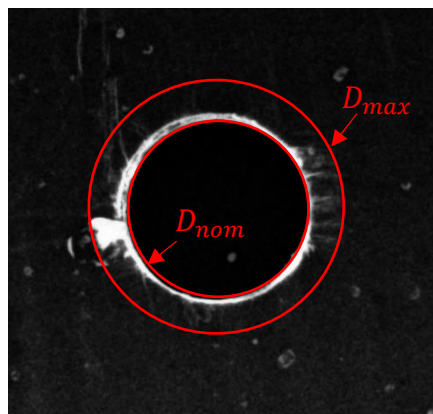


Figura 8 - Imagem de caracterização de delaminação (Raio-x)

O método proposto por Chen [46] usa os valores de Diâmetro máximo (D_{max}) e Diâmetro nominal (D_{nom}) para o cálculo do Fator de Delaminação (F_d) este é um valor adimensional utilizado para quantificar a delaminação na peça, este fator é representado na Equação 2.

Equação 2

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{nom}}$$

No entanto este fator é limitado. Por exemplo, no caso de se possuir duas peças com os valores de D_{max} e D_{nom} iguais, mas com áreas de dano diferentes esta equação não é capaz de distinguir a diferença entre eles, o que torna a técnica imprecisa.

Com vista à correção desta limitação da equação proposta por Chen, Davim et al. propôs outra forma de cálculo do Fator de Delaminação, denominada de Fator de Delaminação Ajustado (F_{da}), este fator é representado pela Equação 3 [47].

Equação 3

$$F_d = \alpha \frac{D_{max}}{D_{nom}} + \beta \frac{A_{max}}{A_o}, \alpha + \beta = 1$$

A Área Máxima (A_{max}) representa o valor de área relativo ao D_{max} da delaminação, na Equação 4 está demonstrado o cálculo da A_{max} . O A_o representa a Área Nominal, ou seja, a área do furo de diâmetro D_{nom} o método de calculo é o mesmo que A_{max} apenas muda o valor do diâmetro.

Equação 4

$$A_{max} = \pi \cdot \frac{D_{max}^2}{4}$$

Os parâmetros α e β fazem referência à importância de cada parâmetro, ou seja, no caso de se evidenciar uma imagem em que o valor da área seja mais relevante que o do diâmetro para o efeito da delaminação, será usado um valor de β maior. Em resumo estes parâmetros são usados para definir o valor de cada parcela da equação.

Outros autores definiram ainda outros fatores para o cálculo da delaminação, fatores como o Fator de Delaminação Equivalente (F_{ed}), este fator foi proposto por Tsao e al. [48] (Equação 5). O cálculo deste fator é algo mais complexo que os anteriores pois envolve valores com maior dificuldade de obtenção, a Figura 9 representa esses parâmetros

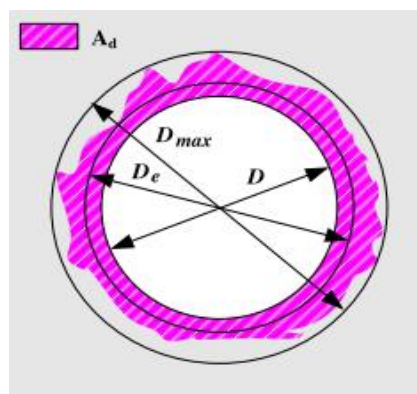


Figura 9 - Representação dos parâmetros para calculo do F_{ed} .

Equação 5

$$D_e = \left(\frac{4(A_d + A_o)}{\pi} \right)^{0.5}$$

Equação 6

$$F_{ed} = \frac{D_e}{D_o}$$

O Fator de Delaminação Equivalente é calculado segundo a Equação 6, onde existe o parâmetro do Diâmetro Equivalente que relaciona a Área de Delaminação com a Área Nominal do furo. Obtendo assim uma abordagem mais precisa que os métodos anteriormente apresentados.

Mehta et al. [49] propôs o critério do Rácio de Dano (D_{RAT}). Este outro método é definido pela razão de área delaminada (A_d) e área nominal (A_o), semelhante à Eq.7, no entanto não apresenta valores percentuais. No estudo realizado por Mehta foram efetuados furos com diferentes tipos de brocas e os resultados estatísticos obtidos pelo mesmo demonstram como já foi apresentado no Subcapítulo 2.5.2 que a geometria de ferramenta influencia a qualidade do processo de furação.

Ainda Faraz et al. [50] propuseram outro método de quantificação de dano, afirmando que o critério de F_d não descreve a delaminação por completo. Visto que a delaminação de algumas fibras apenas pode implicar um D_{max} elevado apesar de a Delaminação na zona circundante do furo ser muito baixa. Com isto em conta, Faraz et al. apresentam outro fator de delaminação, que consiste da relação entre A_d e A_o , a Equação 7 representa este último fator.

Equação 7

$$F_a = \frac{A_d}{A_o} \%$$

Com tudo isto foram apresentados os vários métodos possíveis de qualificação e quantificação de dano, que visa a possibilitar uma comparação de dados entre os diversos ensaios realizados e os ensaios a realizar ao longo da fase experimental deste trabalho.

Para o cálculo de áreas e posterior aplicação das fórmulas apresentadas, será desenvolvido um programa de processamento de imagem como base no software de programação MATLAB, os objetivos desse programa serão:

- Tratamento de Imagem;
- Medição de dano no objeto de estudo;
- Cálculo da área de dano.

Este programa possibilitará o cálculo automático de áreas facilitando assim um processo complexo, permitindo ao utilizador de flexão a ser usado para a obtenção de dados mais fiáveis é o ensaio de flexão a quatro pontos.

O programa terá por base as fórmulas apresentadas anteriormente. As variáveis necessárias para o cálculo do dano serão estipuladas automaticamente pelo mesmo. Apenas com a inserção de alguns dados. Facilitando assim o processo de estudo das Áreas de dano.

2.7 Ensaios Mecânicos

Com o acréscimo de cargas na resina e conseqüente alteração de propriedades da matriz nos materiais compósitos, torna-se necessária uma avaliação de propriedades para uma possível comparação entre materiais com cargas e sem cargas, com o intuito de chegar a uma conclusão acerca das influências da inclusão de cargas nas propriedades finais do material e também da sua influência no processo de furação.

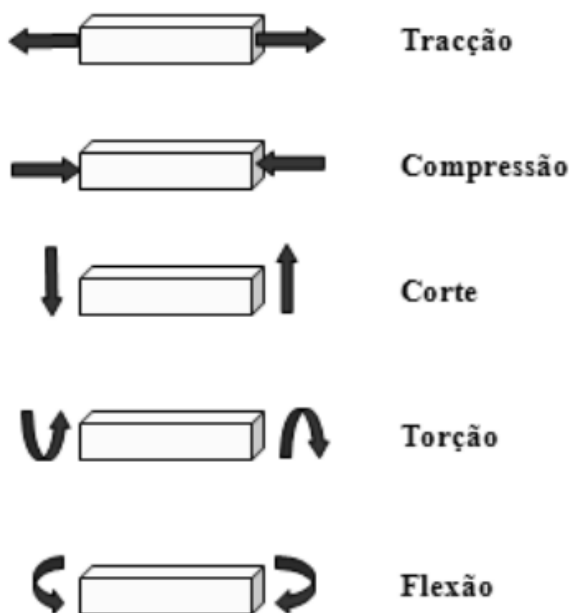


Figura 10 - Tipos de Esforços Fundamentais

Assim sendo há a necessidade de simular solicitações controladas em provetes com a medição de parâmetros para uma possível classificação do material. As solicitações aplicadas a um corpo podem ser simples ou compostas. Sendo que nas simples incluem-se esforços, tais como, a tração, a compressão, o corte, a torção simples e a flexão pura (Figura 10). Já as solicitações compostas são constituídas pela combinação de esforços simples provocando estados de tensão duplos ou triplos [51].

À semelhança dos materiais metálicos, todos os ensaios destrutivos são também aplicados a materiais compósitos, assim sendo estes podem ser submetidos aos seguintes ensaios:

- Ensaio de Tensão
- Ensaio de Compressão
- Ensaio de Flexão (3 ou 4 pontos)
- Ensaio de Impacto

Dentro de cada tipo de Ensaio existem vários procedimentos diferentes de os aplicar, sendo que todos seguem normas específicas que permitem uma padronização dos ensaios para a possível comparação de valores com outros ensaios realizados em diferentes locais, com a garantia de que os parâmetros serão equivalentes.

2.7.1 Ensaio de Flexão

Para a presente Dissertação uma das opções de ensaio é o ensaio de flexão pois tendo em conta a presença de um furo no centro e cada provete a ensaiar este ensaio permite uma localização mais precisa de esforços na área de provete a testar (secção central). Os Ensaios de Flexão são geralmente usados para determinar propriedades como o módulo de flexão e a resistência à flexão dos materiais em estudo [52].

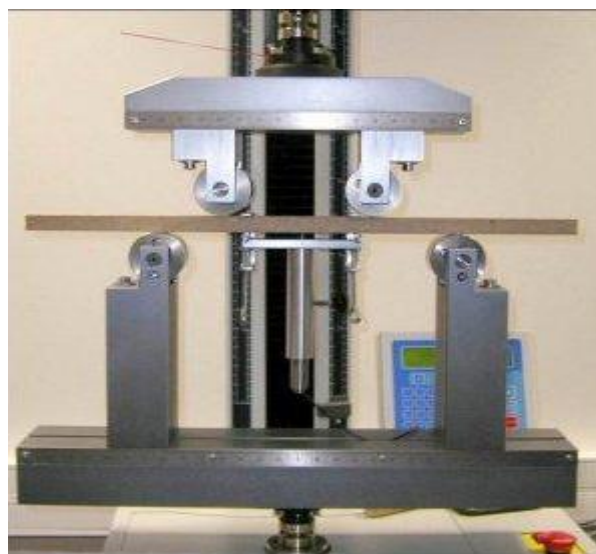


Figura 11 - Exemplo de Ensaio de Flexão

Nesse tipo de ensaio, os provetes são deitados na horizontal sob dois pontos de apoio e de seguida é exercida uma força na secção central com um ou dois pontos de contacto (Figura 11).

Para este tipo de ensaio existem vários modelos de ensaio possíveis de seguir. Os dois mais comuns são o ensaio de flexão a 3 pontos e o ensaio de flexão de 4 pontos, o que é apresentado na figura anterior é o de 4 pontos, que apenas difere do de 3 pontos na aplicação da força, tendo o de 3 pontos apenas um ponto de contacto na aplicação da força.

O ensaio de flexão de 3 pontos é mais adequado para testar uma zona específica da peça pois concentra a aplicação de força num único ponto, enquanto que o de 4 pontos testa toda uma zona do provete. Para o caso em estudo o ensaio de flexão a 4 pontos é mais adequado devido à possibilidade de ensaio de toda a zona furada do provete. Este tipo de ensaio é aplicável a todo o tipo de ensaios que aguentem um pouco de deformação permanente antes de atingir a rotura, pois no caso contrário não seria possível a obtenção de valores precisos para as propriedades a avaliar. Logo não será aplicável a materiais com comportamento frágil quanto à rotura.

2.7.2 Ensaio de Impacto

O ensaio de Impacto é um método experimental de estipular a resistência que um material apresenta a uma carga espontânea aplicada sobre o mesmo, que causa com que este se deforme imediatamente, levando a fratura ou rotura do mesmo.

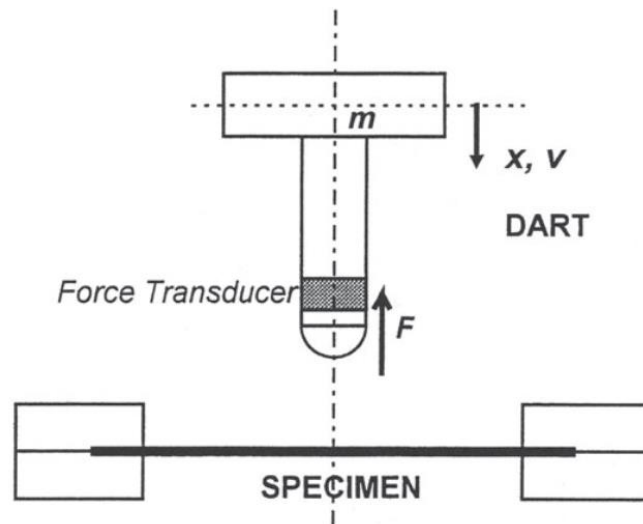
Para a realização deste ensaio, uma amostra do material em estudo é fixada num suporte, com determinada orientação e tamanho e de seguida um pendulo com determinada geometria e peso é largado com trajetória de colisão sobre a mesma (Figura 12). A colisão entre o pendulo e o espécime em estudo resulta na destruição do mesmo. A energia transmitida pelo corpo em movimento e o material em estudo é estipulada, dando assim o valor da energia relativa à resistência do material à colisão.



Figura 12 - Exemplo de Ensaio de Impacto

O propósito de aplicação deste ensaio é a determinação da capacidade de absorção de energia durante o impacto para cada material. Essa energia poderá então ser usada para determinar propriedades como: rigidez, força de impacto, resistência a fratura e resistência ao impacto.

À semelhança do ensaio de flexão, o ensaio de impacto também apresenta vários tipos de ensaio, sendo os três mais comuns: o ensaio de Charpy com entalhe em V, ensaio de Izod e o ensaio de tensão de impacto.



No presente caso de estudo optou-se pelo uso do ensaio de impacto com queda de peso (*Falling weight impact test*). Nesse tipo de ensaio o objeto de estudo é geralmente uma placa plana que receberá o impacto vertical centrado de um peso (*DART*) [53].

Quanto aos materiais em que este ensaio é aplicável, não surgem quase limitações, sendo que este pode ser aplicado a todos os materiais sobre o estado sólido. No entanto alguns podem apresentar comportamentos dúcteis, o que leva a um aumento do peso do pêndulo de modo a proporcionar uma rotura.

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Preparação dos provetes
- 3.2 Análise Experimental

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo irá apresentar uma descrição dos trabalhos realizados no intuito de responder aos objetivos propostos. Este capítulo encontra-se dividido em 2 Subcapítulos diferentes:

- Preparação dos provetes: nesse subcapítulo é descrito todo o processo de produção dos provetes, desde o processo de maquinagem das placas de compósito até à medição dos mesmos;
- Análise Experimental: na análise Experimental são detalhados todos os ensaios a que os provetes obtidos no Subcapitulo referenciado anteriormente foram sujeitos, bem como os resultados obtidos pelos mesmos.

Para cada uma das fases do procedimento experimental será descrito todo o procedimento realizado, bem como os materiais e equipamentos utilizados.

3.1 Preparação dos provetes

A preparação dos provetes visou a obtenção de provetes compostos por vários materiais e a sua furação, de forma a serem posteriormente sujeitos a ensaios mecânicos na zona dos furos.

A produção das placas foi realizada pela Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ, São João del Rei, Minas Gerais, Brazil), parceiros no presente estudo, onde já foram submetidas a um ensaio de impacto para testar a resistência do material. Foram fornecidos dois lotes de 48 placas numeradas, sendo que os materiais das placas são os mesmos para o respetivo numero de cada lote. Apenas variam ao longo das 48 placas, assim sendo a seguinte tabela apresenta a lista de materiais que compõem as placas (os lotes estão divididos em lote B e C). A sigla VVVCC, por exemplo, significa uma sequência de empilhamento de fibras de [Vidro,Vidro,Vidro,Carbono,Carbono].

Tabela 8 - Lista de Composição das Placas

Designação	%V(vm/vr)	Tipo de partículas	Conj.	Seq. de Empilhamento
C1	B1	40/60	Sem partículas	Vidro
C2	B2	40/60	Sem partículas	Carbono
C3	B3	40/60	Sem partículas	VVCC
C4	B4	40/60	Sem partículas	CCVV
C5	B5	40/60	Sem partículas	VCVC
C6	B6	40/60	Sem partículas	CVVC
C7	B7	40/60	Sílica	Vidro
C8	B8	40/60	Sílica	Carbono
C9	B9	40/60	Sílica	VVCC
C10	B10	40/60	Sílica	CCVV
C11	B11	40/60	Sílica	VCVC
C12	B12	40/60	Sílica	CVVC
C13	B13	40/60	Cimento	Vidro
C14	B14	40/60	Cimento	Carbono
C15	B15	40/60	Cimento	VVCC
C16	B16	40/60	Cimento	CCVV
C17	B17	40/60	Cimento	VCVC
C18	B18	40/60	Cimento	CVVC
C19	B19	40/60	Microfibras de Carbono	Vidro
C20	B20	40/60	Microfibras de Carbono	Carbono
C21	B21	40/60	Microfibras de Carbono	VVCC
C22	B22	40/60	Microfibras de Carbono	CCVV
C23	B23	40/60	Microfibras de Carbono	VCVC
C24	B24	40/60	Microfibras de Carbono	CVVC
C25	B25	60/40	Sem partículas	Vidro
C26	B26	60/40	Sem partículas	Carbono
C27	B27	60/40	Sem partículas	VVCC
C28	B28	60/40	Sem partículas	CCVV
C29	B29	60/40	Sem partículas	VCVC
C30	B30	60/40	Sem partículas	CVVC
C31	B31	60/40	Sílica	Vidro
C32	B32	60/40	Sílica	Carbono
C33	B33	60/40	Sílica	VVCC
C34	B34	60/40	Sílica	CCVV
C35	B35	60/40	Sílica	VCVC
C36	B36	60/40	Sílica	CVVC
C37	B37	60/40	Cimento	Vidro
C38	B38	60/40	Cimento	Carbono
C39	B39	60/40	Cimento	VVCC
C40	B40	60/40	Cimento	CCVV
C41	B41	60/40	Cimento	VCVC
C42	B42	60/40	Cimento	CVVC
C43	B43	60/40	Microfibras de Carbono	Vidro
C44	B44	60/40	Microfibras de Carbono	Carbono
C45	B45	60/40	Microfibras de Carbono	VVCC
C46	B46	60/40	Microfibras de Carbono	CCVV
C47	B47	60/40	Microfibras de Carbono	VCVC
C48	B48	60/40	Microfibras de Carbono	CVVC

3.1.1 Maquinagem

Nesta fase noventa e seis placas de materiais compósitos foram submetidas a um processo de maquinagem para corte e furação das mesmas, que permitiram a obtenção dos provetes para a posterior realização de ensaios mecânicos.

O esquema correspondente à maquinagem das placas encontra-se representado na Figura 13.

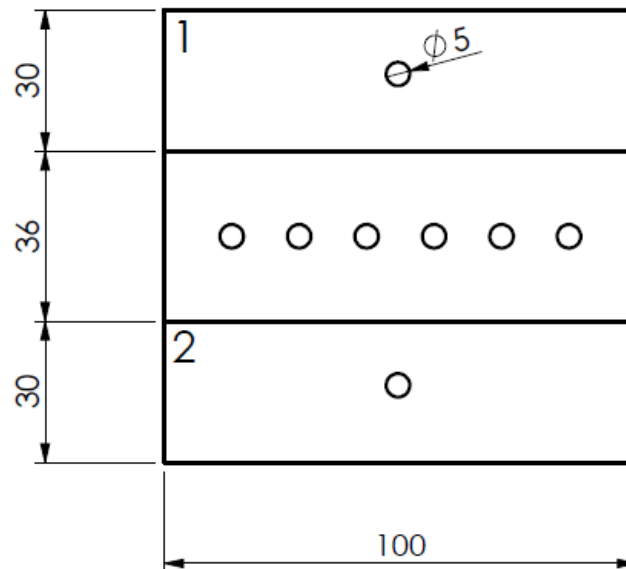


Figura 13 - Esquema de Maquinagem

Como é possível visualizar no esquema deste procedimento as placas foram furadas em três secções diferente e cortadas no intermédio da secção de maneira a obter três provetes por cada placa fornecida. A operação foi levada a cabo na fresa radial, VF-2 da HAAS (ficha técnica em anexo, subcapítulo 5.2.1). O *setup* utilizado neste processo pode ser visualizado na Figura 14.



Figura 14 - Setup de Maquinagem

As ferramentas utilizadas no processo foram sempre de mesma dimensão e material, uma vez que o objetivo é verificar a diferença de propriedades entre vários materiais compósitos submetidos ao processo de furação, sendo que não houve variação de tipo de ferramentas com vista a uma comparação fiável.

Para o corte das placas a ferramenta em uso foi uma fresa radial de 3mm de diâmetro, e para a furação uma broca helicoidal de 5 mm de diâmetro ambas expostas na Figura 15 (Imagens retiradas dos anexos dos subcapítulos 5.2.3 e 5.2.4).



Figura 15 - Broca e Fresa usadas no processo

De modo a garantir a fixação das placas neste processo, recorreu-se ao uso de um gabari de fixação que possui também 4 pinos e um batente para garantir o alinhamento das mesmas (Figura 16).

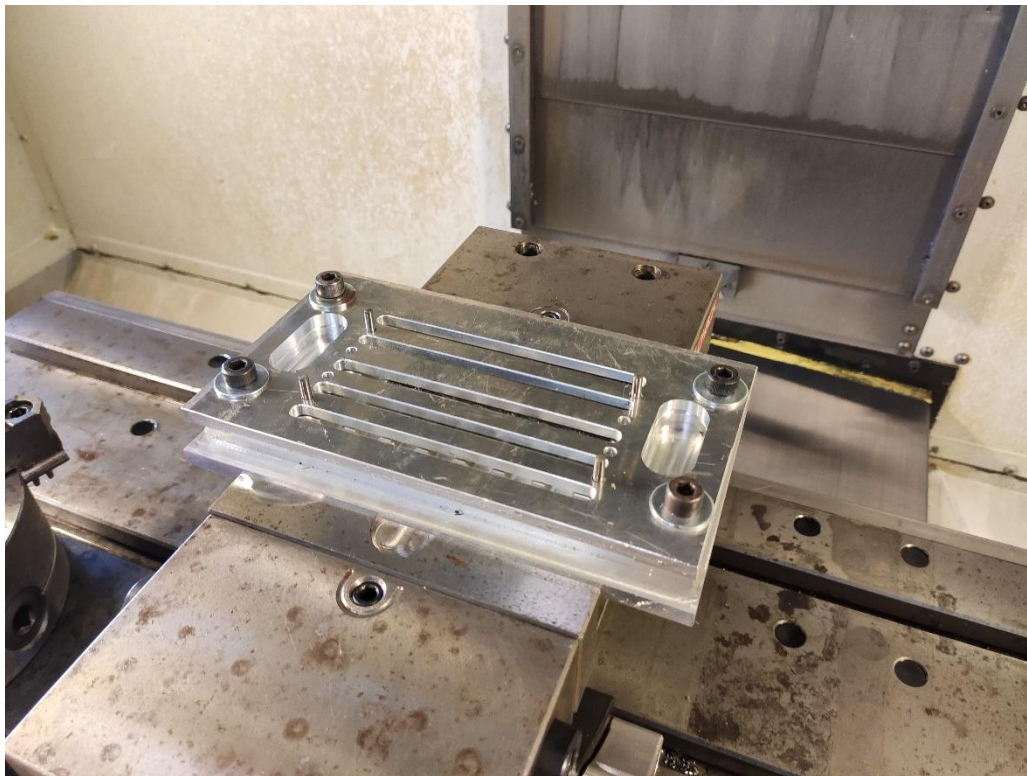


Figura 16 - Gabari de fixação

Para esta fase do projeto foram definidos alguns parâmetros de furação, os quais foram os mesmos para todo o processo de maquinagem dos provetes, uma vez que a variação no estudo ocorre no material constituinte das placas. A Tabela 9 apresenta os parâmetros usados. Os parâmetros foram de acordo com estudos realizados anteriormente [54].

Tabela 9 - Parâmetros de Furação

Velocidade de Rotação	Avanço
1120 rpm	0,05 mm/rot

Ainda durante esta fase recorreu-se à utilização de uma célula de carga, modelo 9171A da Kistler (Figura 17, retirada do anexo do subcapítulo 5.2.5) que permitiu a recolha de dados relativa às forças produzidas durante o processo. Os dados recolhidos serão posteriormente analisados no Capítulo 3.2.3



Figura 17 - Célula de carga

3.1.2 Medição

Devido à diferença geométrica das placas utilizadas, a medidas de largura dos provetes varia, assim sendo, após a fase anterior procedeu-se à medição dos provetes obtidos em três pontos diferentes de cada um utilizando um paquímetro, segundo esquema da Figura 18. A média das medidas obtidas e a designação utilizada para a distinção dos provetes estão explicitas nas Tabela 10 e Tabela 11 seguindo a designação do esquema, sendo a primeira tabela correspondente ao primeiro lote de placas (B) e a segundo ao segundo lote de placas (C).

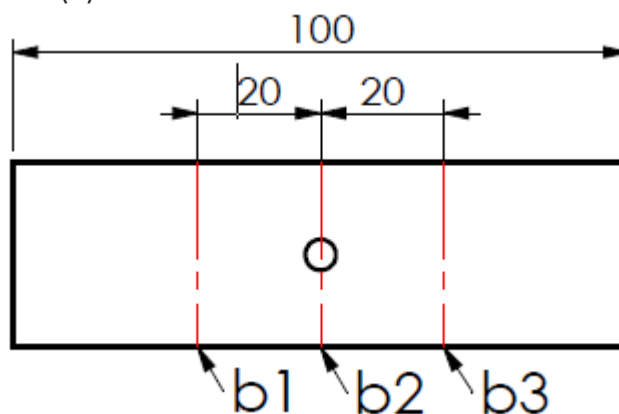


Figura 18 - Esquema de Medição

Equação 8

$$b_{méd} = \frac{b1 + b2 + b3}{3}$$

Tabela 10 - Medições de Largura do 1º lote

Provetes	$b_{méd}$ (mm)	Provetes	$b_{méd}$ (mm)	Provetes	$b_{méd}$ (mm)	Provetes	$b_{méd}$ (mm)
C1	1 29,33 2 33,60	C13	1 30,07 2 33,32	C25	1 27,37 2 34,18	C37	1 29,32 2 32,77
C2	1 29,29 2 33,45	C14	1 33,10 2 33,33	C26	1 30,16 2 31,94	C38	1 29,32 2 32,12
C3	1 28,91 2 -	C15	1 27,46 2 -	C27	1 27,34 2 -	C39	1 29,50 2 32,59
C4	1 29,76 2 -	C16	1 26,91 2 -	C28	1 24,17 2 -	C40	1 29,27 2 32,83
C5	1 29,53 2 33,18	C17	1 30,22 2 32,13	C29	1 29,63 2 32,70	C41	1 29,72 2 32,65
C6	1 29,86 2 33,07	C18	1 29,94 2 32,22	C30	1 30,05 2 32,90	C42	1 31,29 2 31,59
C7	1 30,27 2 32,30	C19	1 30,60 2 -	C31	1 28,85 2 33,18	C43	1 30,12 2 28,17
C8	1 29,35	C20	1 28,11	C32	1 29,28	C44	1 31,42

	2	32,61		2	-		2	32,64		2	29,15
C9	1	30,00	C21	1	26,68	C33	1	28,23	C45	1	27,93
	2	-		2	-		2	-		2	33,86
C10	1	27,62	C22	1	27,26	C34	1	27,99	C46	1	26,53
	2	-		2	-		2	-		2	35,78
C11	1	26,60	C23	1	28,31	C35	1	26,30	C47	1	27,01
	2	32,20		2	33,99		2	36,21		2	35,24
C12	1	30,15	C24	1	30,15	C36	1	29,90	C48	1	27,52
	2	31,84		2	32,76		2	32,23		2	28,58

Tabela 11 - Medições de Largura do 2º lote

Provetes	$b_{méd}$ (mm)	Provetes	$b_{méd}$ (mm)	Provetes	$b_{méd}$ (mm)	Provetes	$b_{méd}$ (mm)				
B1	1	-	B13	1	28,57	B25	1	33,88	B37	1	30,06
	2	-		2	34,76		2	28,13		2	32,03
B2	1	25,88	B14	1	29,97	B26	1	28,64	B38	1	31,00
	2	36,58		2	33,37		2	33,48		2	31,63
B3	1	28,90	B15	1	29,29	B27	1	28,69	B39	1	30,99
	2	34,60		2	33,21		2	33,18		2	31,12
B4	1	29,01	B16	1	28,01	B28	1	28,18	B40	1	32,60
	2	34,01		2	34,35		2	34,19		2	29,47
B5	1	28,29	B17	1	33,93	B29	1	30,11	B41	1	29,93
	2	33,68		2	28,59		2	32,74		2	32,43
B6	1	29,92	B18	1	28,26	B30	1	32,60	B42	1	33,34
	2	30,76		2	33,90		2	30,14		2	29,58
B7	1	28,88	B19	1	34,93	B31	1	36,60	B43	1	31,71
	2	34,00		2	28,15		2	24,91		2	30,36
B8	1	30,16	B20	1	30,17	B32	1	31,49	B44	1	31,00
	2	33,68		2	33,60		2	30,75		2	31,07
B9	1	31,89	B21	1	30,44	B33	1	33,85	B45	1	28,06
	2	30,83		2	32,59		2	28,14		2	34,13
B10	1	35,83	B22	1	30,84	B34	1	32,63	B46	1	31,27
	2	27,07		2	32,11		2	27,72		2	30,93
B11	1	25,64	B23	1	37,25	B35	1	31,15	B47	1	35,43
	2	36,30		2	25,03		2	31,06		2	26,77
B12	1	29,31	B24	1	29,66	B36	1	27,73	B48	1	28,34
	2	29,32		2	33,16		2	28,53		2	33,87

Como é possível visualizar os valores obtidos sofrem de uma grande disparidade entre si, tudo isto devido à falta de coerência geométrica entre as placas fornecidas. No entanto isto não influenciará a veracidade dos dados pois os valores obtidos nos ensaios a realizar serão posteriormente calculados com base nas medições efetuadas antes de ensaio.

3.2 Análise Experimental

Após a produção de provetes para análise iniciou-se a fase de Análise Experimental. Nesta fase os provetes foram submetidos a Ensaio de Flexão a 4 Pontos, foram analisados os dados obtidos de Ensaio de Impacto e ainda os dados extraídos da célula de carga presente na furação dos mesmos e por fim procedeu-se a uma análise Radiográfica da zona furada. Tudo isto no intuito de analisar a influência das cargas aplicadas ao compósito nas propriedades dos materiais de estudo.

3.2.1 Ensaio de Flexão a 4 Pontos

O ensaio de Flexão a 4 Pontos foi realizado em todos os provetes obtidos da preparação, sendo que algumas referências de provetes se encontravam inutilizados devido à falta de coesão entre as fibras e a resina em algumas partes desses provetes, outros devido ao reduzido tamanho das placas que apenas permitiram a produção de apenas um provete, ou seja uma sequência de furação incompleta, por cada placa em vez de dois.

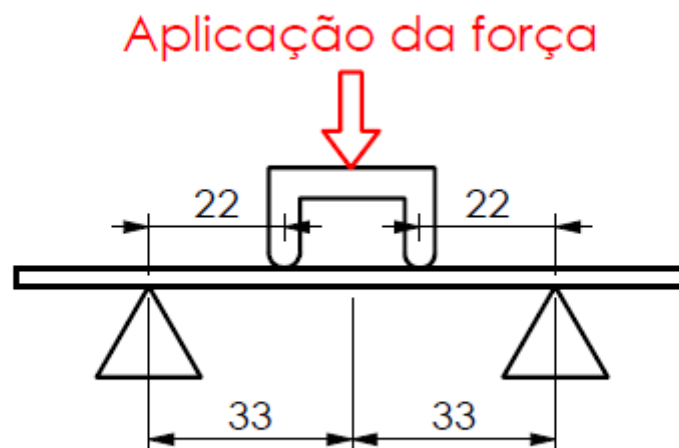


Figura 19 - Esquema de ensaio Flexão 4 Pontos

Os ensaios foram efetuados na máquina de ensaios Shimadzu AG-X Plus 100kN (Figura 20) do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP, ligada ao software Trapezium para a recolha de dados.



Figura 20 - Máquina de Ensaio Shimadzu AG-X Plus

Para o planeamento do ensaio foi seguido o esquema da Figura 20 que providencia uma visualização do ensaio a realizar. Todo o ensaio segue a Norma ISO14125:1988 [55] e segundo a norma a velocidade de aplicação de carga no ensaio para os provetes em estudo é de 9,2 mm/min segundo a Equação 9 e o ensaio é dado por encerrado quando se verifica a queda abrupta da força.

Equação 9

$$v = \frac{\varepsilon' * L^2}{4,7h}, \varepsilon' = 0,01$$

Segundo a Norma recorreu-se à Equação 10 para calcular os valores de Tensão máximos atingidos por cada provete testado e de seguida procedeu-se à construção da Tabela 12 onde estão representados esses valores máximos de tensão média por tipo de Material.

Equação 10

$$\sigma_f = \frac{FL}{bh^2}, h = 1, L = 66$$

Tabela 12 - Valores de tensão médios por Lote

Lote	σ_f méd	Lote	σ_f méd
1	173	25	264
2	470	26	1031
3	147	27	466
4	228	28	426
5	265	29	396
6	306	30	353
7	122	31	241
8	573	32	1029
9	291	33	418
10	236	34	333
11	360	35	444
12	306	36	539
13	87	37	331
14	715	38	957
15	212	39	491
16	289	40	385
17	331	41	478
18	349	42	530
19	79	43	332
20	509	44	1036
21	275	45	534
22	345	46	467
23	394	47	548
24	404	48	596

Como é importante referir, para os cálculos a espessura (h) dos provetes foi considerada de 1 mm pois aquando da produção da mesma o método usado visou manter a espessura igual para todas.



Figura 21 - Provette sujeito a ensaio de flexão

À semelhança da imagem posterior (Figura 21) todos os provetes sujeitos a esse ensaio sofreram a rotura na zona central do furo e com uma direção ao longo da sua secção.

3.2.2 Ensaio de Impacto

Como já referido no subcapítulo 3.1 o ensaio de Impacto foi realizado na Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ, São João del Rei, Minas Gerais, Brazil). Segundo as informações fornecidas os ensaios foram realizados na máquina de ensaios Instron Dynatup 9250HV, e o parâmetro de velocidade de impacto registado para os ensaios foi de 1,025 m/sec, com os objetos de estudo fixos deixando uma superfície sem apoio com uma área de 490 mm². A Tabela 13 apresenta os valores obtidos nos ensaios de Impacto por placa, seguindo a designação apresentada na tabela de caracterização dos materiais.

Tabela 13 - Energia de Impacto por provete

Lote	E imp(J)	Lote	E imp(J)
1	101,17	25	102,53
2	102,43	26	102,05
3	101,20	27	103,31
4	92,56	28	103,70
5	104,43	29	103,74
6	95,41	30	102,88
7	74,52	31	102,91
8	102,04	32	102,00
9	91,89	33	98,21
10	87,94	34	95,07
11	77,36	35	104,23
12	76,48	36	103,63
13	102,37	37	103,22
14	100,13	38	101,06
15	102,36	39	103,13
16	101,74	40	101,96
17	104,72	41	101,14
18	105,14	42	102,39
19	103,26	43	100,26
20	102,98	44	95,63
21	104,82	45	101,10
22	102,67	46	100,18
23	103,93	47	100,42
24	103,235	48	101,797

Os dados foram fornecidos com o intuito de completar a análise dos materiais e possibilitar uma comparação mais fidedigna de valores. Através da coesão destes dados com os dados resultantes dos ensaios realizados pelos autores é possível uma melhor análise.

3.2.3 Medição da *thrustforce*

Como referido no início do Subcapítulo 3.1.1, aquando do processo de maquinagem dos provetes, nomeadamente no processo de furação, recorreu-se ao uso de uma célula de carga (imagem). Esse dispositivo permitiu a recolha de valores de força medidos ao longo dos 3 eixos ortogonais (X,Y,Z).

A célula conectada a um programa criou gráficos que evidenciam a variação das forças ao longo do tempo durante o processo. O gráfico da Figura 22 serve como exemplo para os gráficos gerados pelo programa.

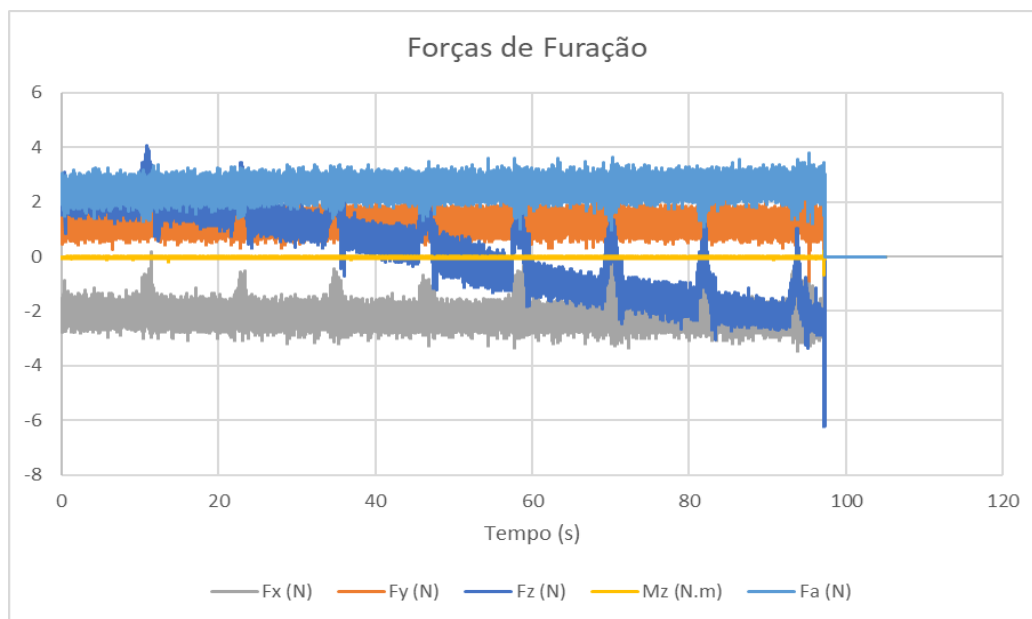


Figura 22 - Gráfico de Forças de Furação

Através da análise da imagem é possível observar 8 picos em cada grupo de dados que são relativos a cada furo realizado ao longo do processo de maquinagem. Pela consulta da pesquisa bibliográfica é possível concentrar-se apenas numa análise das forças em Fz que como já foi concluído são essas as forças influentes no processo de furação e na ocorrência de danos do tipo delaminação na peça.

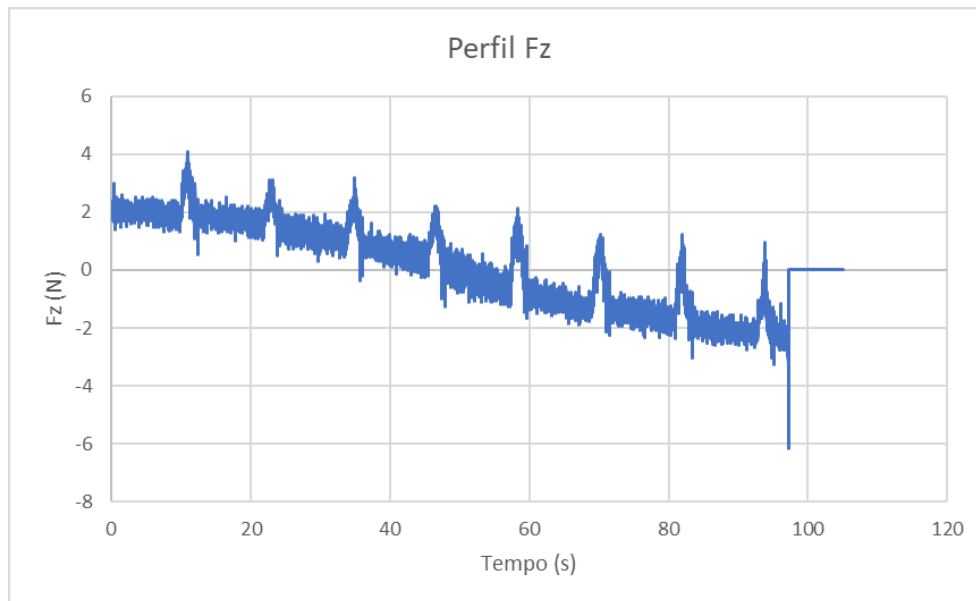


Figura 23 - Gráfico exemplo do perfil Fz

Isolando o gráfico Fz procedeu-se à seleção de dois picos do gráfico, neste caso o primeiro e o último na linha de tempo e ao tratamento desses mesmo picos de modo a nivelar os dois para uma posterior comparação.

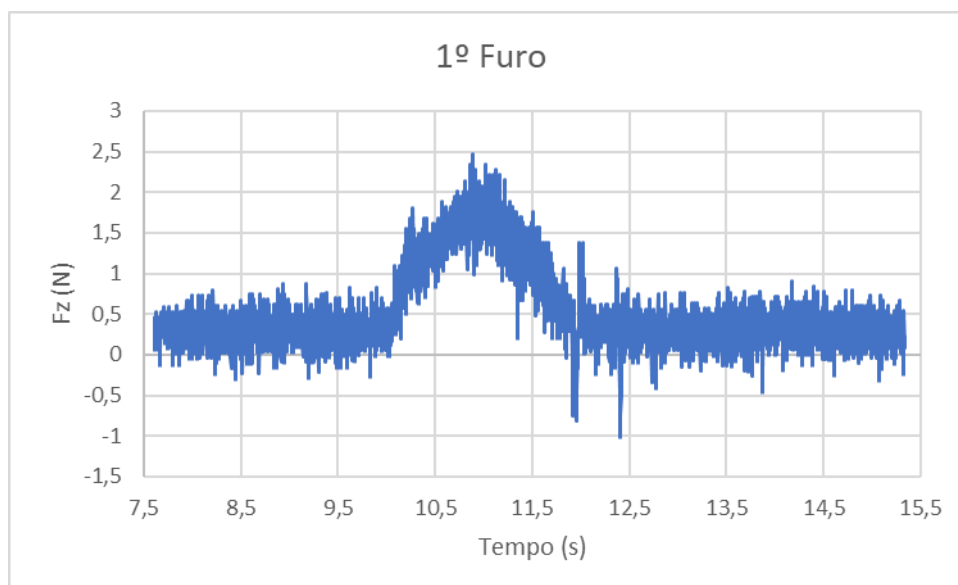


Figura 24 – Primeiro furo retirado do perfil Fz

Para esse tratamento os Picos foram isolados em dois gráficos. A Figura 24 exemplifica um dos picos obtidos de um perfil Fz de furação de uma placa.

Com o gráfico obtido procedeu-se à eliminação do pico de modo a obter apenas um gráfico com os pontos adjacentes (Figura 25).

De seguida foi gerada uma equação da linha de tendência (polinomial de segundo grau) correspondente aos mesmos.

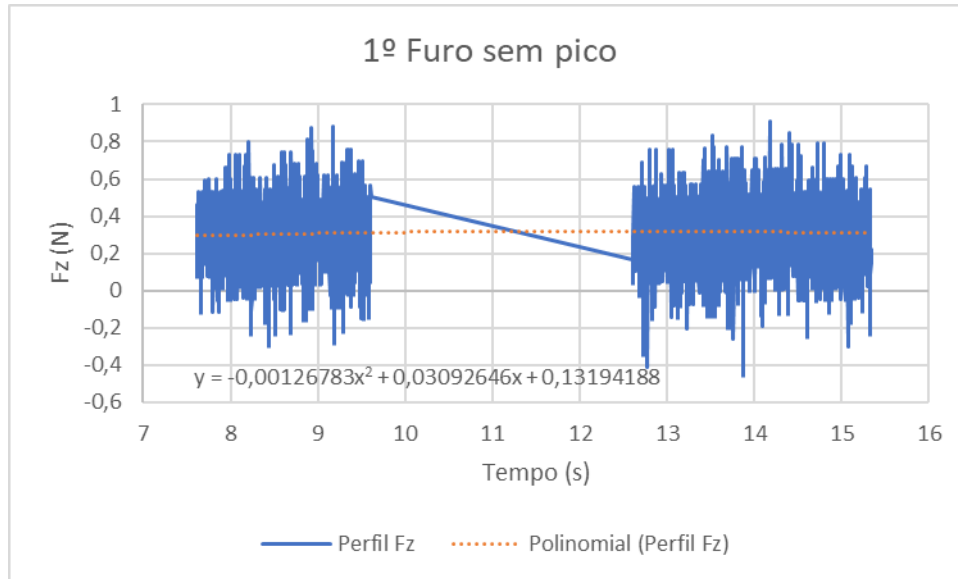


Figura 25 – Criação da Equação da polinomial

Após a obtenção desta equação foram subtraídos a cada ponto do gráfico o valor y obtido pela polinomial para cada momento do ensaio de modo a ajustar o gráfico na origem e permitir nivelar os mesmos.

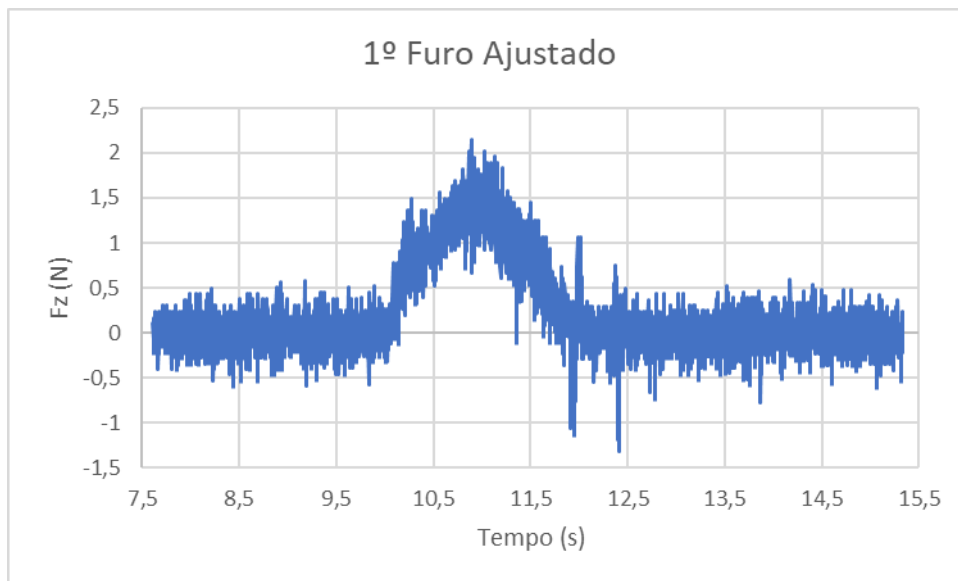


Figura 26 – Primeiro furo ajustado ao eixo y

Repetindo o processo para as 48 placas furadas, procedeu-se de seguida à criação da Tabela 14 que apresenta os valores relevantes de análise que serão tidos em conta nas conclusões a retirar para a realização da presente dissertação.

Tabela 14 - Fz Máximos de cada placa

Placa	1º Fz máx	8º Fz máx	Placa	1º Fz máx	8º Fz máx
1	2,148	3,252	25	2,367	2,921
2	3,363	3,262	26	4,676	5,071
3	2,261	2,352	27	4,303	
4	2,200		28	3,640	4,402
5	3,092	3,612	29	3,109	3,997
6	3,376	3,440	30	3,556	3,888
7	1,995	1,951	31	2,484	3,494
8	3,859	3,386	32	4,493	5,453
9	2,861		33	2,452	3,427
10	3,768		34	3,678	
11	3,382	3,819	35	3,504	3,764
12	3,079	3,290	36	2,572	3,434
13	2,232	2,840	37	2,409	3,074
14	4,457	5,228	38	4,310	5,194
15	3,846		39	3,175	3,633
16	2,836	3,783	40	3,523	3,893
17	3,177	4,250	41	3,589	4,049
18	3,113	4,175	42	3,330	3,788
19	2,218	2,002	43	2,533	3,220
20	2,433	4,203	44	4,273	5,239
21	2,767	3,672	45	3,170	3,956
22	3,473		46	3,552	4,748
23	3,247	3,608	47	3,703	4,932
24	2,755	3,558	48	3,059	3,820

Na tabela encontram-se explícitos todos os valores máximos de Fz obtidos para cada placa no primeiro e último furo realizados no processo.

Algumas das placas não possuem um dos valores devido a problemas de processo ou erros de geometria das placas que não possibilitaram a furação em alguns locais.

No entanto para todas as placas tem pelo menos um furo completo realizado para uma possível comparação entre materiais.

3.2.4 Radiografias

As radiografias com contraste aos furos permitem obter imagens dos danos na periferia dos furos causados por delaminação para que, posteriormente, seja possível quantificar esses danos a partir das imagens obtidas.

Na presente secção descrevem-se as etapas percorridas no tratamento das imagens, com vista à quantificação das áreas de dano à volta dos furos. Este processo possui duas etapas que serão descritas de seguida.

A primeira etapa consiste na imersão dos provetes numa solução de diíodometano (AnalaR NORMAPUR) durante 15 min, este líquido aumenta o contraste na imagem obtida na radiografia, tornando em teoria a zona danificada distinguível do resto da placa.



Figura 27 - Imersão dos provetes

A segunda consiste no processo de Radiografia em si. Este processo foi levado a cabo com recurso ao equipamento de Raio-X Kodak 2100 (Figura 29) do Departamento de engenharia Mecânica do ISEP em conjunto com o sensor Kodak RVG 5100 System (Figura 28) e o programa Kodak Dental Imaging Software que traduz a imagem para um computador.



Figura 28 - Sensor RVG 5100

O tempo de exposição estipulado para cada radiografia foi de 0,05 segundo. Tanto este tempo, como de imersão são devidos a recomendações de experiências realizadas anteriormente.



Figura 29 - Kodak 2100 X-Ray System

Antes do começo da primeira fase foi realizada uma experiência que consistia na radiografia de um provete sem realizar a imersão no líquido de contraste, assim sendo a zona de furo do provete foi colocada sob o sensor e foi realizada a radiografia (Figura 30).

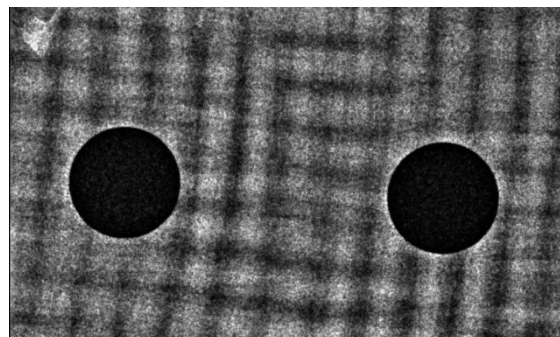


Figura 30 - Imagem de raio-X da zona de Furação

Como é possível observar pelas imagens de raio-X obtidas, as imagens apresentam muito ruído. A aplicação de líquido contrastante veio evidenciar a composição do material compósito, em que por definição os seus constituintes não se misturam e por isso as suas barreiras físicas ficam claramente identificadas, sendo por isso fonte de ruído na imagem. Em consequência a aplicação dos algoritmos de tratamento de imagem fica inviabilizada pois não há uma linha de separação contínua que possa ser identificada como fronteira do dano.

CONCLUSÕES

- 4.1 Análise e discussão de resultados
- 4.2 Conclusões Finais e Recomendações para Trabalhos Futuros

4 Discussão de Resultados e Conclusões

Neste capítulo proceder-se-á à análise dos resultados obtidos neste estudo. Numa primeira parte serão descritos os resultados da delaminação por tipo de furação e, de seguida, os do estudo da relação entre a área de dano e a perda de propriedades mecânicas. Numa segunda parte realizar-se-á a exposição das ilações extraídas da análise aos resultados e serão tecidas algumas considerações para trabalhos a efetuar no futuro.

4.1 Análise e discussão de resultados

Para a análise dos resultados obtidos recorreu-se ao uso de gráficos e análises estatísticas com o auxílio do *software* MS Excel. Através deste género de análise é possível notar a presença ou ausência de relações, tendências e comportamentos entre os diversos materiais e o processo de furação.

4.1.1 Forças durante a Furação

De modo a obter uma análise mais simplificada e de melhor interpretação os valores obtidos para F_z ao longo da furação foram transformados para um gráfico de Barras (Figura 31) onde estão incluídos os valores máximos do primeiro e último furo realizados em cada placa onde isso foi possível, devido a incoerências geométricas nas placas.

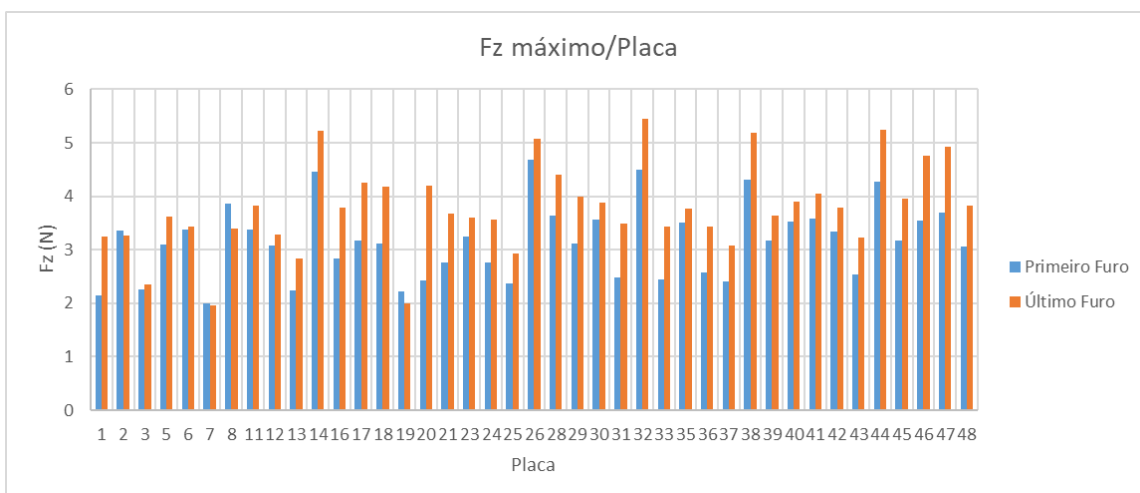


Figura 31 - Gráfico de F_z máximo registado por placa

O intuito dessa análise é entender se ao longo do processo de furação de materiais compósitos existe uma variação relevante da *Thrust Force* (F_z), o que pode provocar alterações significativas do estado da peça. Assim sendo, pela análise do gráfico obtido é possível concluir:

- A força em Z registada no processo de furação sofre um aumento na maioria dos casos, onde a maior variação registada é de 73%, e a menor de -10%, chegando a um aumento médio de 21%;
- O valor de variação nas forças registado é tão pequeno na maioria dos casos que pode chegar quase a ser irrelevante;
- O aumento registado pode significar um aumento de temperatura da ferramenta ou até mesmo um aumento do desgaste da mesma;
- Relações entre o efeito da adição de cargas ou até mesmo alteração do empilhamento e a variação observada em F_z não parecem estar evidentes.

Tendo em conta a baixa espessura das placas utilizadas para este processo e a consequência das baixas forças registadas, os valores registados tornam-se pouco relevantes para se poder indicar conclusões precisas.

4.1.2 Ensaio Flexão 4 Pontos

Para a análise da influência de cargas presentes na matriz dos materiais compósitos foram comparados vários provetes onde se variaram os empilhamentos e a composição da matriz. Para esse efeito os ensaios de impacto e flexão serão os relevantes na conclusão.

A partir dos ensaios de flexão de 4 pontos foi realizada uma comparação entre grupos de materiais, sendo estes apresentados sob a forma de gráficos de barras e com as designações já apresentadas anteriormente.

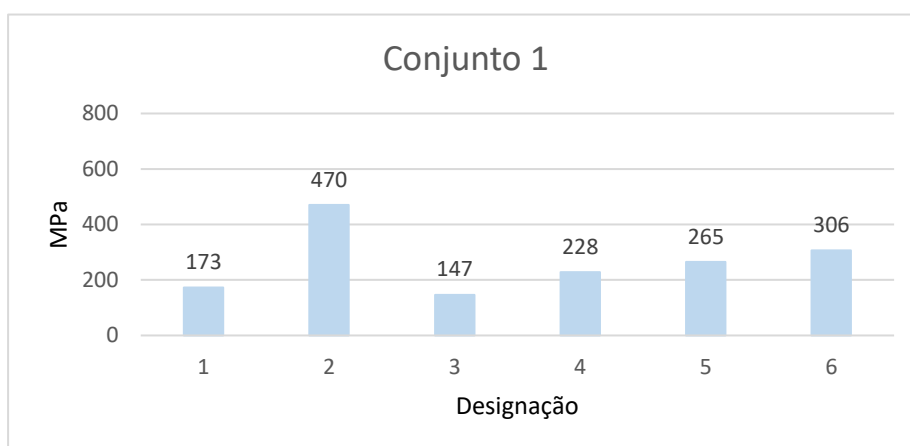


Figura 32 - Gráfico de Tf Conjunto 1

Nesta análise o Conjunto 1 (definido na Tabela 8, assim como os posteriores) de materiais será usado como conjunto de referência para a posterior comparação e análise de influência da variação de empilhamentos e cargas.

A Figura 33 apresenta o gráfico gerado com os valores médios de tensão de flexão máxima obtidos pela análise dos provetes compostos por cada material para esse conjunto.

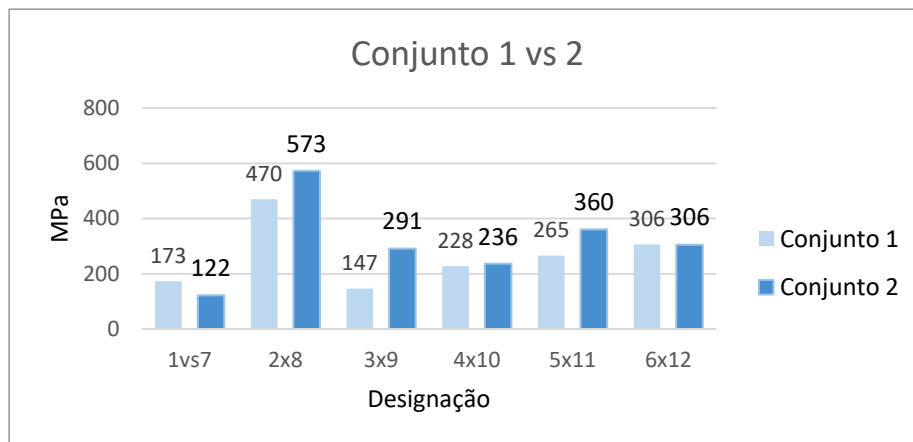


Figura 34 - Gráfico de Tf Conjunto 1 vs 2

Com o acréscimo de partículas de sílica (Figura 34) na matriz de cada placa de compósito ocorreu a alteração de propriedades, algumas dessas placas sofreram uma melhoria na sua resistência mecânica quando submetidas a tensão, enquanto que outras decresceram ou até mesmo mantiveram essa propriedade sem nenhuma variação notável.

Devido à falta de coerência entre os valores obtidos é difícil afirmar que exista uma tendência crescente ou decrescente de propriedades de resistência à flexão com a adição de Sílica.

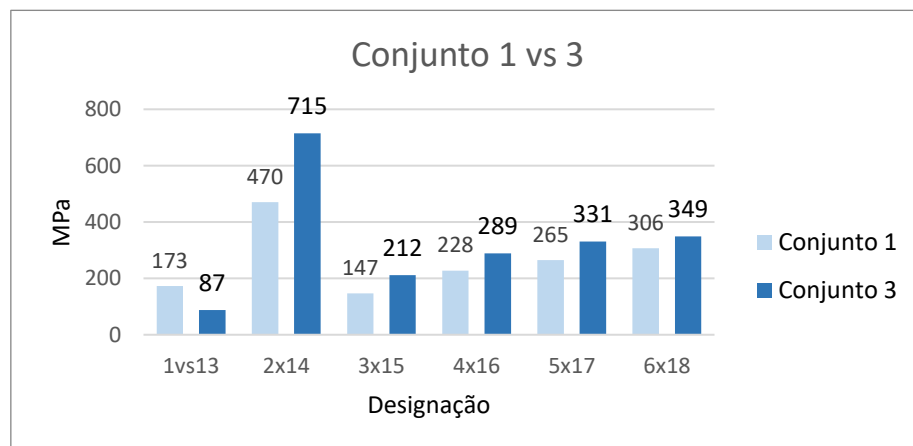


Figura 35 - Gráfico de Tf Conjunto 1 vs 3

A Figura 35 apresenta um gráfico semelhante ao anterior, mas neste caso são adicionadas à matriz partículas de cimento. Mais uma vez o valor de tensão máxima para o primeiro tipo de empilhamento sofre um decréscimo enquanto que em todos os outros empilhamentos se nota uma subida de resistência de flexão. Começa assim a aparecer um padrão visível para a influência dos acréscimos de cargas conjugada com a sequência de empilhamento dos reforços.

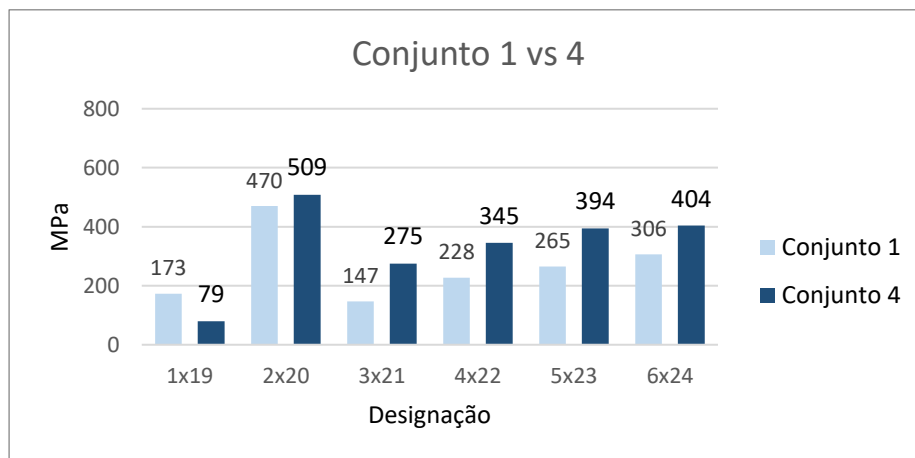


Figura 36- Gráfico de Tf Conjunto 1 vs 4

Agora com um acréscimo de Microfibras de Carbono, é mais uma vez notório um padrão onde obtemos uma descida de resistência do primeiro par de valores e um aumento de todos os pares posteriores.

Tabela 15 - Variação de resistência à Flexão por adição de carga (Fração volúmica 40/60, Ensaio de 4 Pontos)

Conj. Ref. 1	Empilhamento	Carga		
		Sílica	Cimento	Microfibras de Carbono
	Vidro	-29%	-50%	-54%
	Carbono	22%	52%	8%
	VVVCC	99%	45%	88%
	CCVVV	4%	27%	52%
	VCVCV	36%	25%	49%
	CVVVC	0%	14%	32%

Através dos gráficos apresentados foi gerada uma tabela com as percentagens de variação da propriedade a analisar para cada variação de carga (Tabela 15). Todas as placas apresentadas possuem uma fração volúmica de 40/60. Pela análise da tabela e gráficos foi possível obter algumas conclusões:

- No caso de um empilhamento de apenas fibras de vidro o acréscimo de cargas cria um efeito negativo nas propriedades;
- O acréscimo de cargas para todos os tipos de empilhamento no geral, tirando o caso anterior, promove o aumento da resistência à flexão;
- O acréscimo de Microfibras de carbono quando comparado com as outras cargas, aumenta consideravelmente a resistência em todos os casos exceto nos empilhamentos monolíticos (apenas de Carbono ou Vidro);
- Para os empilhamentos VVVCC e VCVCV as melhorias são mais evidentes.

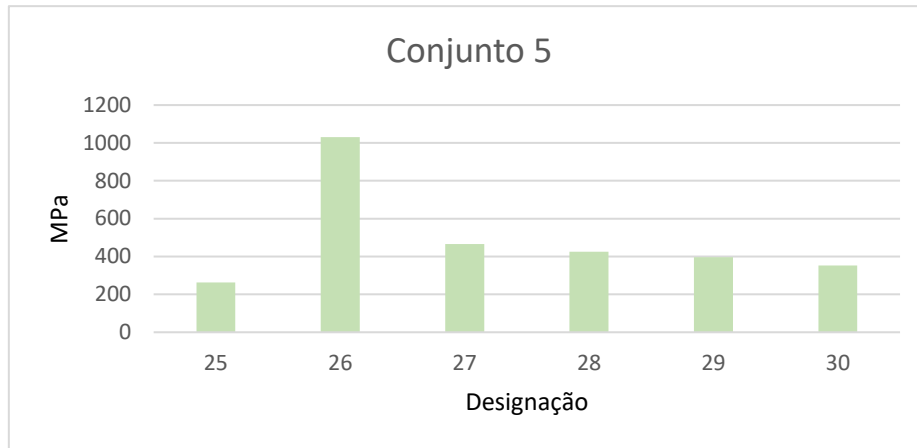


Figura 37 - Gráfico de Tf Conjunto 5

Com a alteração da percentagem volúmica de matriz (vm) de 40% para 60% gerou-se outro conjunto a ser usado como referência (conjunto 5) no qual os empilhamentos se mantêm e a adição de cargas será a mesma.

Tabela 16 - Variação de resistência à Flexão com mudança da fração Volúmica de 40/60 para 60/40 (Ensaio de Flexão de 3 Pontos)

Empilhamento	Vidro	Carbono	VVVCC	CCVVV	VCVCV	CVVVC
Varição	53%	119%	218%	87%	49%	15%

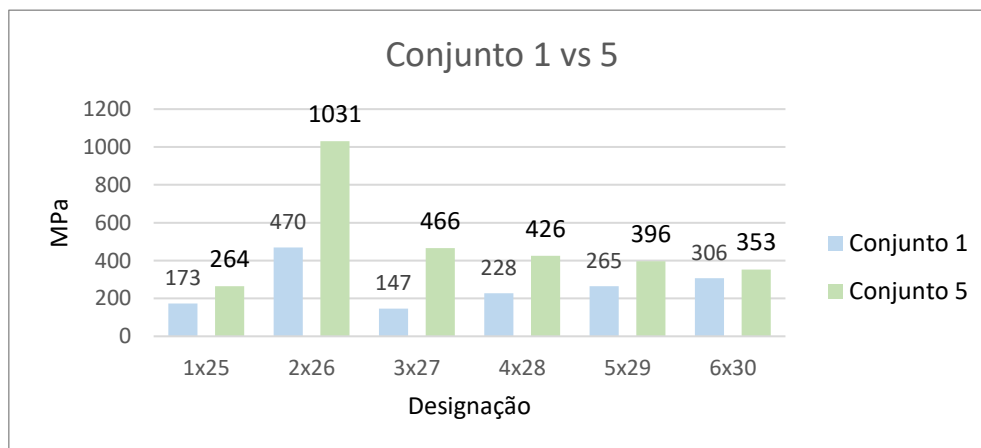


Figura 38 - Gráfico de Tf Conjunto 1 vs 5

Comparando os dois conjuntos de valores de referência pelos valores observados no gráfico da Figura 38 e a variação presente na Tabela 16 é possível observar que ocorreu um aumento da resistência à flexão com o acréscimo da percentagem de resina constituinte das placas de compósito.

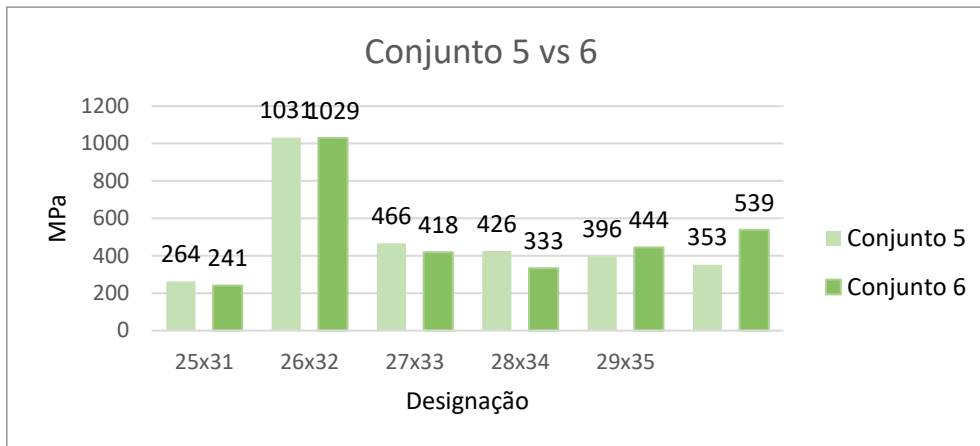


Figura 39 - Gráfico de Tf Conjunto 5 vs 6

Para a presente fração volúmica, quando se procede à adição de sílica como carga na matriz, é de notar que a variação de propriedades é mínima e que na maioria dos casos ocorre o decréscimo da resistência à flexão, apenas os dois últimos tipos de empilhamentos (VCVCV e CVVVC) sofrem um aumento desta resistência.

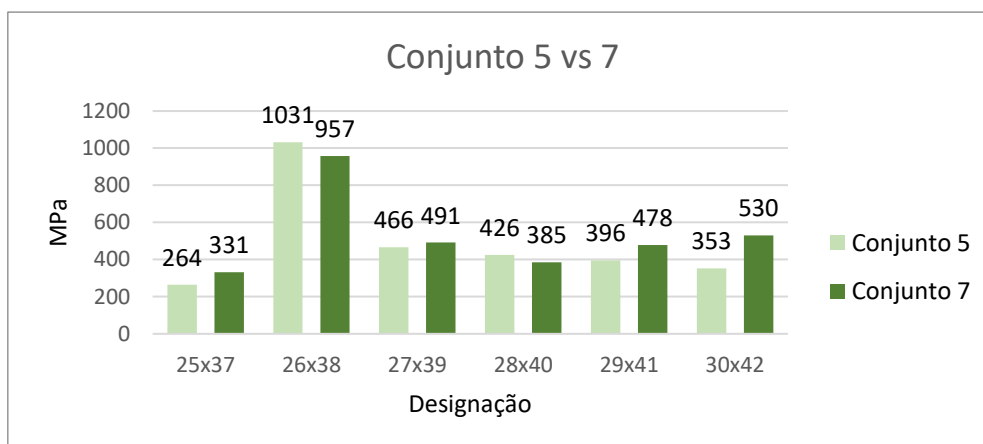


Figura 40 - Gráfico de Tf Conjunto 5 vs 7

Pela análise do gráfico, é possível conferir que a adição de partículas de cimento mantém o comportamento presente no caso anterior (Figura 39), com exceção do empilhamento monolítico de Vidro e da sequência VVCC que adquiriram uma melhoria de resistência. No entanto os valores de variação mantem-se mínimos.

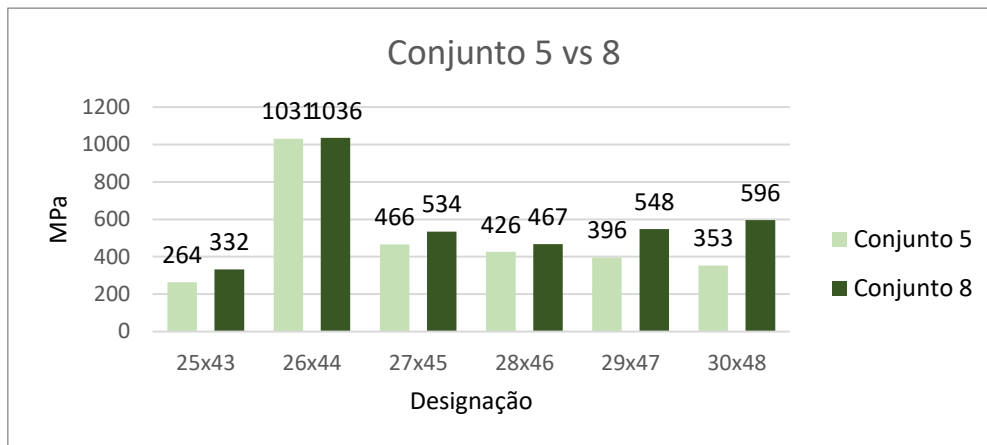


Figura 41 - Gráfico de Tf Conjunto 5 vs 8

Por fim com a adição de Microfibras de Carbono como carga ocorreu uma outra mudança de comportamento, notando-se que para todos os empilhamentos é notória um acréscimo de resistência à flexão por parte dos Compósitos em análise, ainda que pequena (na ordem média dos 26%).

Tabela 17 - Variação de resistência à Flexão por adição de carga (Fração volúmica 60/40, Ensaio de 4 Pontos)

Conj. Ref. 5	Empilhamento	Carga		
		Sílica	Cimento	Microfibras de Carbono
Variação de Tensão de Flexão	Vidro	-9%	26%	26%
	Carbono	0%	-7%	0%
	VVVCC	-10%	5%	15%
	CCVVV	4%	-10%	10%
	VCVCV	6%	21%	38%
	CVVVC	53%	50%	69%

Pelos gráficos posteriormente apresentados foi criada uma tabela com as percentagens de variação da propriedade a analisar para cada variação de carga (Tabela 17) assim como foi feito para as placas com fração volúmica 40/60, no entanto como já referido, para este caso todas as placas apresentam uma fração volúmica 60/40. Através da tabela e dos gráficos foi possível retirar algumas conclusões:

- As variações obtidas pela adição de cargas são pouco significativas, chegando mesmo a ter casos de variação aproximada a 0%;
- O Empilhamento CVVVC é o único que apresenta melhorias significativas em todos os tipos de cargas;
- O reforço torna-se mais importante em para um teor de matriz de 60%, ou seja, a variação da carga não influencia tanto as propriedades do material;
- A adição de Microfibras de Carbono promove a resistência em todos os casos de empilhamento exceto nos casos do compósito monolítico de carbono em que não há alteração;
- O aumento do teor de fibras de 40% para 60% não traz benefícios na resistência à flexão.

4.1.3 Ensaio de Flexão 3 Pontos

O ensaio de Flexão a 3 Pontos, efetuado no local de fabrico das placas como já tinha sido referido, foi realizado previamente à furação das placas, de modo a analisar a influencia das cargas e também com o intuito de reconhecer possíveis padrões semelhantes ao ensaio de flexão a 4 pontos.

Tabela 18 - Valores de tensão de Ensaio de Flexão a 3 Pontos

Designação	Tensão de Flexão (MPa)	Designação	Tensão de Flexão (MPa)
1	218,27	25	239,21
2	332,60	26	479,78
3	225,89	27	479,58
4	236,62	28	398,93
5	309,34	29	396,25
6	345,27	30	234,86
7	227,92	31	296,18
8	390,41	32	489,99
9	305,54	33	441,65
10	368,12	34	273,75
11	351,40	35	439,82
12	356,26	36	306,61
13	226,43	37	258,29
14	315,85	38	494,64
15	231,37	39	463,23
16	243,73	40	394,53
17	301,45	41	405,61
18	318,23	42	347,47
19	213,91	43	250,33
20	323,25	44	502,16
21	249,88	45	404,61
22	259,29	46	382,14
23	369,13	47	396,62
24	364,79	48	335,68

A Tabela 18 apresenta os valores obtidos no ensaio de Flexão a 3 Pontos realizado nos objetos de estudo. Através dessa tabela e tomando o mesmo método de análise do capítulo anterior foram desenvolvidas outras tabelas que evidenciam os valores de variação apresentados para alteração de carga e Fração volúmica.

Tabela 19 - Variação de resistência à Flexão por adição de carga (Fração volúmica 40/60, Ensaio de 3 Pontos)

Conj. Ref. 1	Empilhamento	Variação de Tensão de Flexão	Carga		
			Sílica	Cimento	Microfibras de Carbono
	Vidro		4%	4%	-2%
	Carbono		17%	-5%	-3%
	VVCC		35%	2%	11%
	CCVV		56%	3%	10%
	VCVCV		14%	-3%	19%
	CVVC		3%	-8%	6%

Tabela 20 - Variação de resistência à Flexão com mudança da fração Volúmica de 40/60 para 60/40 (Ensaio de Flexão de 3 Pontos)

Empilhamento	Vidro	Carbono	VVCC	CCVV	VCVCV	CVVC
Variação	10%	44%	112%	69%	28%	-32%

Tabela 21 - Variação de resistência à Flexão por adição de carga (Fração volúmica 60/40, Ensaio de 3 Pontos)

Conj. Ref. 5	Empilhamento	Variação de Tensão de Flexão	Carga		
			Sílica	Cimento	Microfibras de Carbono
	Vidro		24%	8%	5%
	Carbono		2%	3%	5%
	VVCC		-8%	-3%	-16%
	CCVV		-31%	-1%	-4%
	VCVCV		11%	2%	0%
	CVVC		31%	48%	43%

Todas as tabelas apresentadas anteriormente seguiram o método já apresentado no Subcapítulo 4.1.2 e delas foram retiradas algumas conclusões para dois cenários. Primeiro tendo apenas em conta a adição de cargas e a variação da fração volúmica de resina, obteve-se as seguintes conclusões:

- A adição de cargas para a maioria dos casos aumentou a resistência à flexão do material e dentro de todas as variações, a adição de sílica parece mais eficaz;
- Para a Fração volúmica 40/60 a sílica promove sempre o aumento de resistência;
- As variações na adição de cargas são de baixo valor, tendo apenas um caso que passa os 50% (Tabela 19);
- O aumento da fração volúmica de resina aumenta a resistência do compósito tirando no caso do Empilhamento CVVC.

Segundo tendo em conta a análise feita anteriormente para o caso dos provetes furados e comparando os dados obtidos foi possível concluir:

- A adição de cargas promove a resistência à flexão nos provetes após a furação quando em comparação com os provetes não furados;
- O Aumento de resistência por acréscimo de cargas é mais notório nos provetes furados;
- Aumentando a fração volúmica de Resina existe um maior aumento de Resistência à Flexão nos provetes Furados em relação aos provetes não furados;
- Não existe nenhum padrão visível de comportamento semelhante entre os provetes furados e não furados.

4.1.4 Ensaio de Impacto

Para uma fácil interpretação de resultados todos os valores apresentados no Subcapítulo 3.2.2 na Tabela 13 foram traduzidos para dois gráficos (Figura 42 e Figura 43).

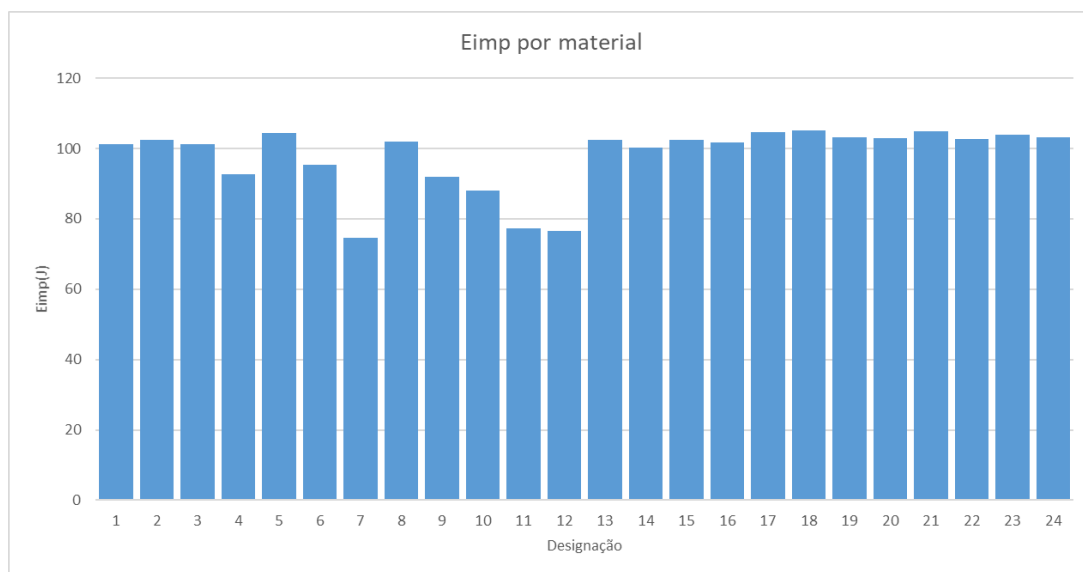


Figura 42 - Gráfico de valores do Ensaio de Impacto (40% vm)

Pela observação do primeiro gráfico, é de notar que os valores rondam os 100J de energia, no entanto existe a exceção de três provetes (7,11 e 12) que apresentam valores um pouco desfasados dos restantes.

Para os três provetes com valores mais desfasados é possível criar uma relação com a sua composição monolítica no que toca ao reforço, sendo que a % de matriz se mantém a mesma para os 3.

Na análise do segundo grupo de valores, torna-se evidente uma maior homogeneidade de valores, mais uma vez a rondar os 100J de energia, no entanto sem valores muito desfasados.

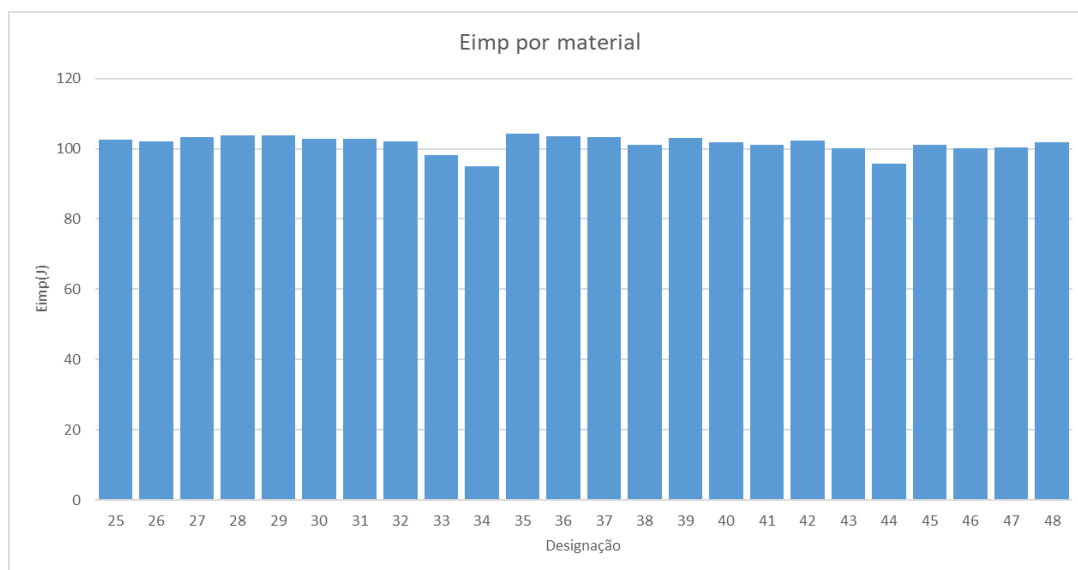


Figura 43 - Gráfico de valores do Ensaio de Impacto (60% vm)

Com isto é possível entender que a influencia da %vm de matriz não influencia os valores de resistência ao impacto.

Com uma gama de valores muito parecidos, não é possível concluir muito acerca do comportamento das cargas adicionadas aos materiais em estudo. Se para o caso de estudo os provetes apresentassem uma maior espessura, provavelmente seriam notórias variações de valores em medida com as várias composições.

Tendo em conta as observações feitas, é possível concluir que a influencia da matriz em relação ao impacto é muito menor que a do reforço, sendo a constituição do mesmo a configuração mais importante para a propriedade em estudo.

4.2 Conclusões Finais e Recomendações para Trabalhos Futuros

Com a realização deste trabalho foi possível atingir alguns dos objetivos propostos, nomeadamente na temática da influência de cargas no fabrico de materiais, provenientes do aproveitamento de resíduos e também da influência das mesmas no processo de furação e propriedades finais de peças sujeitas a furação.

Relativamente ao processo de furação em si, os valores obtidos são de baixa grandeza de valores o que torna as conclusões pouco esclarecedoras, pois não existe uma variação muito notória de valores para a adição de cargas, no entanto confirma-se a teoria de que o aquecimento da ferramenta de corte e o progressivo desgaste promovem a dificuldade do processo, traduzindo-se num aumento da força axial. Para um trabalho futuro seria de grande interesse o aumento da espessura dos objetos de estudo para um possível aumento da grandeza de valores e assim obter dados mais fidedignos e alguma dispersão de valores.

Relativamente à influência das cargas tornou-se evidente que, no que toca a peças furadas, as suas vantagens são notórias relativamente à integridade da peça, também foi possível notar pelas variações positivas e negativas que se houver possibilidade de chegar a um equilíbrio de concentrações entre reforço e matriz em conjunto com as cargas o fabrico de peças com melhor qualidade e uma redução de custos no fabrico de Materiais Compósitos torna-se possível, promovendo também a diminuição de desperdícios provenientes de outros processos. Para um trabalho futuro o estudo deste equilíbrio gerado pela Fração volúmica e incorporação de cargas de modo a obter uma fórmula de fabrico de vários novos materiais é uma possibilidade. Para maior precisão na determinação deste equilíbrio, o Ensaio de Flexão a 4 pontos em provetes não furados, seria uma ótima aplicação.

O processo de radiografia revelou-se um processo que, apesar das suas vantagens, muitas vezes não se torna possível a sua aplicação, faltando então um estudo prévio dos objetos de estudo para a possível aplicação desta técnica. Outra proposta para um projeto futuro é o estudo da aplicação da radiografia de mais diversas formas e até mesmo o desenvolvimento de um método diverso de análise não destrutiva.

Quanto ao Ensaio de Impacto, apesar ser uma técnica utilizada para muitos estudos, este revelou-se uma técnica com falta de sensibilidade, estando grandemente relacionado com a espessura dos provetes em estudo. Tendo a premissa anterior em conta será de interesse a aplicação de outras técnicas a materiais compósitos.

A realização deste projeto permitiu alargar horizontes quanto ao trabalho com materiais compósitos, as vantagens dos mesmos e todas as possibilidades futuras que estes materiais poderão trazer, bem como as implicações da furação destes materiais.

Permitiu também pôr em prática muitos dos conhecimentos adquiridos ao longo de todo um percurso académico e forneceu uma ótima experiência no que toca à aplicação de ensaios destrutivos e não destrutivos, promovendo assim a aquisição de competências numa área muito importante da Engenharia.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5.1 Bibliografia

5.2 Anexos

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5.1 Bibliografia

- [1] M. F. S. F. de M. António G. de Magalhães, Alfredo B. de Moraes, *Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. 2011.
- [2] R. R. Nagavally, "Composite Materials - History, Types, Fabrication Techniques, Advantages, and Applications," *Int. J. Mech. Prod. Eng.*, vol. 5, no. 9, pp. 82–87, 2017.
- [3] R. K. Uyyuru, M. K. Surappa, and S. Brusethaug, "Tribological behavior of Al-Si-SiCp composites/automobile brake pad system under dry sliding conditions," *Tribol. Int.*, vol. 40, no. 2 SPEC. ISS., pp. 365–373, 2007.
- [4] S. Fan, Y. Chuan, L. He, and W. Krenkel, "Progress of Ceramic Matrix Composites," no. October, 2016.
- [5] C. Kong, H. Lee, and H. Park, "Design and manufacturing of automobile hood using natural composite structure," *Compos. Part B Eng.*, vol. 91, pp. 18–26, 2016.
- [6] P. H. Wagh and D. D. Pagar, "Investigation of mechanical and tribological behavior of composite material filled with black epoxy resin and aluminium tri-hydroxide using reinforcement of glass fiber," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2018, 2018.
- [7] S. Vaidyaraman and M. Purdy, "C / SiC Material Evaluation for Aircraft Brake Applications."
- [8] V. K. Sharma, V. Kumar, and R. S. Joshi, "Investigation of rare earth particulate ontribological and mechanical properties of Al-6061alloy composites for aerospace application," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 3504–3516, 2019.
- [9] I. M. Alarifi, "Investigation the conductivity of carbon fiber composites focusing on measurement techniques under dynamic and static loads," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 5, pp. 4863–4893, 2019.
- [10] E. I. Basri *et al.*, "Performance analysis of composite ply orientation in aeronautical application of unmanned aerial vehicle (UAV) NACA4415 wing," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 5, pp. 3822–3834, 2019.
- [11] X. Zhang, Y. Chen, and J. Hu, "Recent advances in the development of aerospace materials," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 97, no. January, pp. 22–34, 2018.
- [12] K. B. Katnam, L. F. M. Da Silva, and T. M. Young, "Bonded repair of composite

- aircraft structures: A review of scientific challenges and opportunities,” *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 61, pp. 26–42, 2013.
- [13] S. Rawal and B. Al, “Metal-Matrix Composites for,” no. April, pp. 14–17, 2001.
- [14] V. Fiore, G. Di Bella, and A. Valenza, “Glass-basalt/epoxy hybrid composites for marine applications,” *Mater. Des.*, vol. 32, no. 4, pp. 2091–2099, 2011.
- [15] A. P. Mouritz, E. Gellert, P. Burchill, and K. Challis, “Review of advanced composite structures for naval ships and submarines,” *Compos. Struct.*, vol. 53, no. 1, pp. 21–42, 2001.
- [16] D. Verma and K. L. Goh, *Natural fiber-reinforced polymer composites: application in marine environments*. Elsevier Ltd, 2019.
- [17] D. K. Jesthi and R. K. Nayak, “Improvement of mechanical properties of hybrid composites through interply rearrangement of glass and carbon woven fabrics for marine application,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 168, no. March, pp. 467–475, 2019.
- [18] S. Baştürk, H. Uyanik, and Z. Kazanci, “An analytical model for predicting the deflection of laminated basalt composite plates under dynamic loads,” *Compos. Struct.*, vol. 116, no. 1, pp. 273–285, 2014.
- [19] R. Li, Y. Gu, G. Zhang, Z. Yang, M. Li, and Z. Zhang, “Radiation shielding property of structural polymer composite: Continuous basalt fiber reinforced epoxy matrix composite containing erbium oxide,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 143, pp. 67–74, 2017.
- [20] V. Dhand, G. Mittal, K. Y. Rhee, S. J. Park, and D. Hui, “A short review on basalt fiber reinforced polymer composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 73, pp. 166–180, 2015.
- [21] R. Ralegaonkar, H. Gavali, P. Aswath, and S. Abolmaali, “Application of chopped basalt fibers in reinforced mortar: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 164, pp. 589–602, 2018.
- [22] A. Amiri, T. Krosbakken, W. Schoen, D. Theisen, and C. A. Ulven, “Design and manufacturing of a hybrid flax/carbon fiber composite bicycle frame,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part P J. Sport. Eng. Technol.*, vol. 232, no. 1, pp. 28–38, 2018.
- [23] A. J. M. Ferreira, E. Viola, F. Tornabene, and N. Fantuzzi, *MECHCOMP 3, 3rd International Conference on Mechanics of Composites*, 3RD ed. SOCIETA EDITRICE ESCULAPIO, 2017.
- [24] R. A. Smith, “MATERIAL SCIENCE AND ENGINEERING-VOL-III, Composites Defects and Their Detection,” vol. III, pp. 103–146, 2009.
- [25] M. Altin Karataş and H. Gökkaya, “A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials,” *Def. Technol.*, vol. 14, no. 4, pp. 318–326, 2018.
- [26] F. Lissek, J. Tegas, and M. Kaufeld, “Damage quantification for the machining of

- CFRP: An introduction about characteristic values considering shape and orientation of drilling-induced delamination," *Procedia Eng.*, vol. 149, no. June, pp. 2–16, 2016.
- [27] M. Saeedifar, M. Fotouhi, and M. Ahmadi Najafabadi, "Investigation of push-out delamination using cohesive zone modelling and acoustic emission technique," *J. Compos. Mater.*, vol. 50, no. 25, pp. 3577–3588, 2016.
- [28] N. Z. Karimi, H. Heidary, J. Yousefi, S. Sadeghi, and G. Minak, "Experimental investigation on delamination in nanocomposite drilling," *FME Trans.*, vol. 46, no. 1, pp. 62–69, 2018.
- [29] H. M. Teng and C. C. Tsao, "The effect of thrust force in drilling composite materials using step core-ball drill," *MATEC Web Conf.*, vol. 185, pp. 0–5, 2018.
- [30] D. J. S. GONCALVES, L. M. P. DURÃO, V. H. C. de ALBUQUERQUE, J. M. R. S. TAVARES, and A. M. BAPTISTA, "Avaliação de ferramentas na furação de laminados compósitos," *Ciência Tecnol. dos Mater.*, vol. 23, no. 1/2, pp. 114–118, 2011.
- [31] A. Anarghya *et al.*, "Thrust and torque force analysis in the drilling of aramid fibre-reinforced composite laminates using RSM and MLPNN-GA," *Heliyon*, vol. 4, no. 7, p. e00703, 2018.
- [32] R. Manickam and A. Gopinath, "Measurement and analysis of thrust force in drilling sisal-glass fiber reinforced polymer composites," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 197, no. 1, 2017.
- [33] T. V. Rajamurugan, K. Shanmugam, S. Rajakumar, and K. Palanikumar, "Modelling and analysis of thrust force in drilling of GFRP composites using response surface methodology (RSM)," *Procedia Eng.*, vol. 38, pp. 3757–3768, 2012.
- [34] T. V. Rajamurugan, K. Shanmugam, and K. Palanikumar, "Mathematical model for predicting thrust force in drilling of GFRP composites by multifaceted drill," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 6, no. 10, pp. 5316–5324, 2013.
- [35] V. Schulze, C. Becke, K. Weidenmann, and S. Dietrich, "Machining strategies for hole making in composites with minimal workpiece damage by directing the process forces inwards," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 3, pp. 329–338, 2011.
- [36] N. Koboević, M. Jurjević, and Ž. Koboević, "Influence of cutting parameters on thrust force, drilling torque and delamination during drilling of carbon fibre reinforced composites," *Teh. Vjesn.*, vol. 19, no. 2, pp. 391–398, 2012.
- [37] D. F. Liu, Y. J. Tang, and W. L. Cong, "A review of mechanical drilling for composite laminates," *Compos. Struct.*, vol. 94, no. 4, pp. 1265–1279, 2012.
- [38] G. Caprino, I. De Iorio, L. Nele, and L. Santo, "Effect of tool wear on cutting forces in the orthogonal cutting of unidirectional glass fibre-reinforced plastics," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 27, no. 5, pp. 409–415, 1996.

- [39] K. Turan, M. O. Kaman, and M. Gur, "Progressive failure analysis of laminated composite plates with two serial pinned joints," *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 22, no. 10, pp. 839–849, 2015.
- [40] A. Caggiano, P. Centobelli, L. Nele, and R. Teti, "Multiple Sensor Monitoring in Drilling of CFRP/CFRP Stacks for Cognitive Tool Wear Prediction and Product Quality Assessment," *Procedia CIRP*, vol. 62, pp. 3–8, 2017.
- [41] A. Caggiano, F. Napolitano, L. Nele, and R. Teti, "Multiple Sensor Monitoring for Tool Wear Forecast in Drilling of CFRP/CFRP Stacks with Traditional and Innovative Drill Bits," *Procedia CIRP*, vol. 67, pp. 404–409, 2018.
- [42] A. Caggiano and L. Nele, "Artificial neural networks for tool wear prediction based on sensor fusion monitoring of CFRP/CFRP stack drilling," *Int. J. Autom. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 275–281, 2018.
- [43] N. Aeronautics, "Method of Non-Destructive Evaluation of Composites."
- [44] Z. Zhang and M. Richardson, "Nondestructive Testing of Composite Materials," *Handb. Multiph. Polym. Syst.*, vol. 1, pp. 777–796, 2011.
- [45] S. Gholizadeh, "A review of non-destructive testing methods of composite materials," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 1, pp. 50–57, 2016.
- [46] W. C. Chen, "Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 37, no. 8, pp. 1097–1108, 1997.
- [47] J. P. Davim, J. C. Rubio, and A. M. Abrao, "A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 67, no. 9, pp. 1939–1945, 2007.
- [48] C. C. Tsao, K. L. Kuo, and I. C. Hsu, "Evaluation of a novel approach to a delamination factor after drilling composite laminates using a core-saw drill," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 59, no. 5–8, pp. 617–622, 2012.
- [49] M. Mehta, T. J. Reinhart, and A. H. Soni, "Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr composite laminates," *Mach. Compos. Mater. Symp. ASM Mater. Week*, no. 7, pp. 113–126, 1992.
- [50] A. Faraz, D. Biermann, and K. Weinert, "Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 49, no. 15, pp. 1185–1196, 2009.
- [51] J. Carreira and A. Correia da Cruz, "Ensaio Mecânicos," *ISQ*, no. Ensaio Mecânicos, 1992.
- [52] "Test Resources." [Online]. Available: <https://www.testresources.net/>. [Accessed: 30-Aug-2020].
- [53] L. Warnet and P. E. Reed, "Falling Weight Impact Testing Principles," pp. 66–70, 1999.

-
- [54] P. Silva, J. E. Matos, and L. M. P. Durão, "Analysis of damage outcome in the strength of polymer composite materials," *J. Compos. Mater.*, vol. 53, no. 4, pp. 547–560, 2019.
- [55] "ISO 14125:1998, Fibre-reinforced plastic composites — Determination of flexural properties, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland."

5.2 Anexos

5.2.1 Ficha técnica HASS Vf-2



Plano Parque Empresarial - Pavilhão 300/400
Rua de Batel - 4485-253 - Guilhabreu - Portugal
TEL: +351 229 351 850 FAX: +351 229 351 851
Móvel: 505 108 378 EMAIL: asales@asales.pt
GPS: 41° 17'05,51" N 8° 37' 43,71" W

ESPECIFICAÇÕES STANDARD **VF-2**

MÁQUINA

Altura (max)	2654mm
Largura (max)	2357mm
Comprimento	2789mm
Abertura da porta	902mm
Peso	5.670Kg
Ar necessário	113litros @ 6,9bar
Cabina completa	chapa de aço GA 14

MESA

Largura	356mm
Comprimento	914mm
Peso máximo sobre a mesa ...	1361Kg
Rasgos em Tê	16mm
Distância centros dos rasgos ...	80mm

CURSOS

Máximo em X	762mm
Máximo em Y	406mm
Máximo em Z	508mm
Distância da árvore à mesa	102mm – 610mm
100% de medições 3D dão garantia de geometria precisa da máquina.	

PRECISÃO (Um eixo)

Posicionamento	±0.0051mm
Repetição	±0.0025mm

ÁRVORE

Nariz	ISO 40
Velocidade	0 a 10.000 rpm
Rolamentos	ABEC Class 7
Binário	102Nm @ 1,400 rpm
Orientação	Electrónica

ARMAZÉM DE FERRAMENTAS TIPO REVOLVER LATERAL COM BRAÇO TROCADOR

Totalmente cabinado	
Capacidade	24 + 1
Tipo de ferramenta	ISO 40 DIN69871A/B
Diâmetro máximo ferramenta ..	89mm (em todo o carrossel)
Peso máximo da ferramenta	5,4Kg (em todo o carrossel)
Tipo de trocador ferramenta	Totalmente eléctrico, bidireccional

*Especificações são relativas ao armazém trocador standard.

www.sales.pt

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



Plano Parque Empresarial - Pavilhão 300/400
Rue de Batel - 4485-253 - Cullabreu - Portugal
TEL +351 228 351 850 FAX +351 228 351 851
MPE 505 108 378 EMAIL asales@asales.pt
GPS 41° 17'05,51" N 8° 37' 43,71" W

TEMPOS MÉDIOS DE TROCA DE FERRAMENTA

Ferramenta a ferramenta 2,8 segundos
Apara a apara 3,6 segundos

AVANÇOS

Rápido em X, Y, Z 25,4m/min.
Máximo em corte 16,5m/min.

MOTORES

Árvore:

Potência máxima 15KW (20CV)

Avanços eixos:

X, Y 3,7KW
Z 5,5KW
Força bloqueio em X e Y 11.343Nm
Força bloqueio em Z 18.683Nm

MESA ROTATIVA E BASCULANTE CNC HAAS TRT 160

Directamente comandada pelo 4º e 5º eixo simultâneos (eixos B e A) do controlador do Centro de Maquinagem HAAS VF-2

Especificações:

- Ø prato rotativo: 160mm
- Dimensões máximas da peça (comprimento x largura): inserível numa circunferência de 215,9mm para poder rodar a 360º no plano do prato
- Inclinação máxima à esquerda e à direita no eixo A "tilting": +/-120º
- Carga máxima sobre prato: 68Kg
- Binário de rotação: eixo B: 203Nm e eixo A: 285Nm
- Servo motores de 0,7kW (1CV) tanto no eixo B como no eixo A ambos sem escovas
- Prato com 6 ranhuras T a 60º
- Velocidade variável: 0,001º/seg. a 80º/seg. no eixo B e 0,001º/seg. a 60º/seg. no eixo A
- Peso: 181,4Kg
- Accionamento pneumático do travão (pressão máx. 8,3bar)
- Força de prisão do travão: eixo B: 136Nm e eixo A: 271Nm @ 6,9bar
- Precisão arc/seg : +/-15
- Repetição arc/seg : +/-10
- Resolução: 0,001º
- Rotação máxima por passo: 999,999º
- Especificações técnicas e manuais em língua portuguesa



TRT 160CNC

www.asales.pt

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

5.2.2 Diodo



Product Specification

Material	25633.186
Material description	DIODOMETHANE
Grade	AnalAR NORMAPUR
CAS Number	75-11-6
Molecular formula	CH ₂ I ₂
Molecular mass	257.84

Characteristics	Specifications
Assay (on anhydrous substance)	Min. 99.4 %
Acidity	Max. 0.003 meq/g
Density (20°C)	3.318 → 3.322
Solidification point	5.6 → 6.2 °C

Signature

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

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

Isabelle Hély, Head of Laboratory - Diarr
VWR International S.A.S., Z.I. de Lougenac, FR-45250 Sarré,
France

5.2.3 Catálogo de escolha da Fresa

VHM-Schaftfräser

4 Schneiden, lange Ausführung

**Solid carbide end-mill**

4 flutes, long design

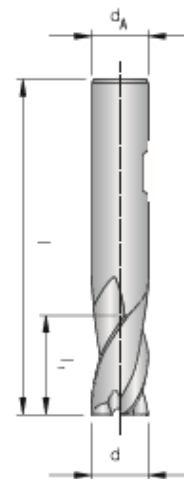


AF

AF50141-... / AF60141-...

Schaft / Shank DIN 6535HA / HB	d	d _A	l ₁	l
AF50141-020*	2,0	3,0	7,0	38
AF60141-030	3,0	6,0	8,0	57
AF60141-035	3,5	6,0	10,0	57
AF60141-040	4,0	6,0	11,0	57
AF60141-045	4,5	6,0	11,0	57
AF60141-050	5,0	6,0	13,0	57
AF60141-060	6,0	6,0	13,0	57
AF60141-070	7,0	8,0	16,0	63
AF60141-080	8,0	8,0	19,0	63
AF60141-090	9,0	10,0	19,0	72
AF60141-100	10,0	10,0	22,0	72
AF60141-120	12,0	12,0	26,0	83
AF60141-140	14,0	14,0	26,0	83
AF60141-160	16,0	16,0	32,0	92
AF60141-180	18,0	18,0	32,0	92
AF60141-200	20,0	20,0	38,0	104

Toleranz / Tolerance	
Fräser / Mill	0
Schaft / Shank	h6



* Zylinderschaft nach DIN 6535HA ohne Mitnahmfleche

* Cylindrical shank to DIN 6535HA, no flat

● = Hauptanwendung / Main application
○ = Nebenanwendung / Suitable

Alle Angaben in mm / Dimensions in mm

ARNO®-Werkzeuge | VHM-/PM-HSS Werkzeuge | Solid carbide-/PM-HSS Tools **47**

5.2.4 Catálogo de escolha da Broca

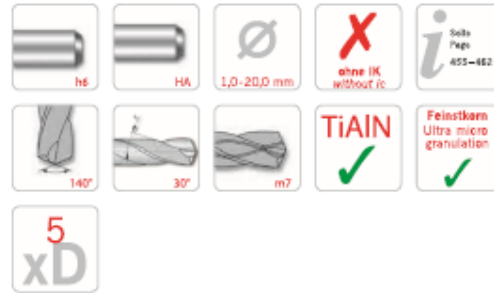
Vollhartmetall-Spiralbohrer

Mittellange Ausführung, ohne Innenkühlung



Solid carbide drills

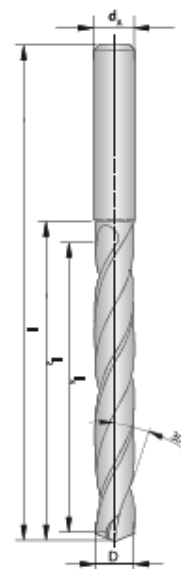
Mid-length design, without through tool coolant



Ausführung 5 x D / Execution 5 x D

Bezeichnung Designation	D m7	d ₁ h6	l	l ₁	l ₂
SP0010-0050 VHM/TIALN	1,00	3,00	55,0	8	5,00
SP0011-0055 VHM/TIALN	1,10	3,00	55,0	12	5,50
SP0012-0060 VHM/TIALN	1,20	3,00	55,0	12	6,00
SP0013-0065 VHM/TIALN	1,30	3,00	55,0	12	6,50
SP0014-0070 VHM/TIALN	1,40	3,00	55,0	12	7,00
SP0015-0075 VHM/TIALN	1,50	3,00	55,0	16	7,50
SP0016-0080 VHM/TIALN	1,60	3,00	55,0	16	8,00
SP0017-0085 VHM/TIALN	1,70	3,00	55,0	16	8,50
SP0018-0090 VHM/TIALN	1,80	3,00	55,0	16	9,00
SP0019-0095 VHM/TIALN	1,90	3,00	55,0	16	9,50
SP0020-0100 VHM/TIALN	2,00	4,00	57,0	21	10,00
SP0021-0105 VHM/TIALN	2,10	4,00	57,0	21	10,50
SP0022-0110 VHM/TIALN	2,20	4,00	57,0	21	11,00
SP0023-0115 VHM/TIALN	2,30	4,00	57,0	21	11,50
SP0024-0120 VHM/TIALN	2,40	4,00	57,0	21	12,00
SP0025-0125 VHM/TIALN	2,50	4,00	57,0	21	12,50
SP0026-0130 VHM/TIALN	2,60	4,00	57,0	21	13,00
SP0027-0135 VHM/TIALN	2,70	4,00	57,0	21	13,50
SP0028-0140 VHM/TIALN	2,80	4,00	57,0	21	14,00
SP0029-0145 VHM/TIALN	2,90	4,00	57,0	21	14,50
SP0030-0150 VHM/TIALN	3,00	6,00	66,0	28	15,00
SP0031-0155 VHM/TIALN	3,10	6,00	66,0	28	15,50
SP0032-0160 VHM/TIALN	3,20	6,00	66,0	28	16,00
SP0033-0165 VHM/TIALN	3,30	6,00	66,0	28	16,50
SP0034-0170 VHM/TIALN	3,40	6,00	66,0	28	17,00
SP0035-0175 VHM/TIALN	3,50	6,00	66,0	28	17,50
SP0036-0180 VHM/TIALN	3,60	6,00	66,0	28	18,00
SP0037-0185 VHM/TIALN	3,70	6,00	66,0	28	18,50
SP0038-0190 VHM/TIALN	3,80	6,00	74,0	36	19,00
SP0039-0195 VHM/TIALN	3,90	6,00	74,0	36	19,50
SP0040-0200 VHM/TIALN	4,00	6,00	74,0	36	20,00
SP0041-0205 VHM/TIALN	4,10	6,00	74,0	36	20,50
SP0042-0210 VHM/TIALN	4,20	6,00	74,0	36	21,00
SP0043-0215 VHM/TIALN	4,30	6,00	74,0	36	21,50
SP0044-0220 VHM/TIALN	4,40	6,00	74,0	36	22,00
SP0045-0225 VHM/TIALN	4,50	6,00	74,0	36	22,50
SP0046-0230 VHM/TIALN	4,60	6,00	74,0	36	23,00
SP0047-0235 VHM/TIALN	4,70	6,00	74,0	36	23,50
SP0048-0240 VHM/TIALN	4,80	6,00	82,0	44	24,00
SP0049-0245 VHM/TIALN	4,90	6,00	82,0	44	24,50
SP0050-0250 VHM/TIALN	5,00	6,00	82,0	44	25,00
SP0051-0255 VHM/TIALN	5,10	6,00	82,0	44	25,50

SP



5.2.5 Ficha técnica da Célula de Carga

Force



4-component Dynamometer (RCD)

Type 9171A...

Rotating – for measuring cutting forces in heavy machining

The rotating 4-component dynamometer (RCD) Type 9171A... permits the measurement of the forces and the on a rotating tool. It is mounted in the machine spindle instead of a common tool holder. Energy and measured values are transmitted on a non-contact basis, preventing wear.

- Cutting force measurement on the rotating tool
- 4-component measurement: F_x , F_y , F_z as well as M_z
- up to max. 12 000 min^{-1}
- Forces measurable up to 30 kN
- Non-contact data transmission
- Internal cutting fluid supply possible
- Available for conventional machine spindle interfaces
- Several tool adapters available
- High run-out accuracy and balancing quality
- Complete measuring system



Description

The complete measuring system comprises a rotor, stator, connecting cable and signal conditioner. The spindle type on the machine tool determines which rotor version is required. The spindle adapter is also exchangeable. The same applies to the tool adapters. The piezoelectric 4-component sensor, four charge amplifiers and the digital transmission electronics are integrated into the rotor. It measures the radial forces F_x and F_y , axial force F_z as well as torque M_z .

Digitized measuring signals to the stator, the range selection of the charge amplifiers and the power supply are transmitted without contact. The stator is fastened to the machine tool with a gap of a few millimeters.

The signal conditioner is the interface to the following data acquisition system. It is responsible for the power supply and the control of the system. Settings of measuring ranges as well as settings at the low-pass filter are performed manually at the signal conditioner or via the serial interface. The measuring signals are available as analog ± 10 Volt signal. Either the DynoWare software from Kistler, or compatible data acquisition software, can be used to record the data.

Application

A rotating dynamometer is used to measure the three orthogonal forces F_x , F_y and F_z as well as torque M_z during cutting production processes, especially during milling and drilling. A rotating dynamometer enables:

- Recording of the mechanical load during the cutting process
- Analysis of the wear process
- Optimization of cutting parameters
- Calculation of material-specific constants (e.g. the specific cutting force)
- Optimization of tool geometry and coating
- Verification of cutting simulations

The forces and the torque are measured close to the cutting edge of the tool. This allows the active force vector on single flute tools to be measured directly. Due to the newly developed piezoelectric sensor located in the rotor, it is possible to record highly dynamic signals.

9171A_003-155d-08.19

Page 1/8

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

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

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

KISTLER

measure. analyze. innovate.

Advantages of a rotating Dynamometer

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

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

Technical data

Rotor Type 9171Axxx0

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

9171A_003-155d-08.19

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

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

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

Signal conditioner Type 5238B...

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

Page 2/8

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

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

5.2.6 Ficha técnica Shimadzu

Universal Testing Machines

AUTOGRAPH Precision Universal Tester

AGX-V Series *New*



By expanding the guaranteed precision range to 1/2000 of full scale, a wide range of test forces can be measured with a single load cell. The autotuning function was further enhanced and strain control performance was improved. By registering the jig space using the new intelligent crosshead function, jig space can be changed via a smart controller or dedicated software, which prevents collisions between the jigs due to operating errors.

Capacity	Table-top model: 10N to 50kN, Floor model: 20kN to 600kN		
Testing speed	AGX-10kNVD	0,0005 to 3,000 mm/min	
	AGX-50kNVD	0,0005 to 1,500 mm/min	
	AGX-100kNV	0,00005 to 1,500 mm/min	
	AGX-50/300kNV	0,00005 to 720 mm/min	
	AGX-600/600kNV	0,00005 to 540 mm/min	
Test force measurement accuracy	High-accuracy type	10N to 300kN	Accurate to within $\pm 0,5$ % of indicated test force (for forces ranging from 1/1000 to 1/100 of the load cell capacity rating) Accurate to within $\pm 0,3$ % of indicated test force (for forces ranging from 1/100 to 1/1 of the load cell capacity rating)
		500kN, 600kN	Accurate to within $\pm 0,5$ % of indicated test force (for forces ranging from 1/500 to 1/1 of the load cell capacity rating)
	Wide ranging type	50N to 300kN	Accurate to within ± 1 % of indicated test force (for forces ranging from 1/2000 to 1/1000 of the load cell capacity rating) Accurate to within $\pm 0,5$ % of indicated test force (for forces ranging from 1/1000 to 1/100 of the load cell capacity rating) Accurate to within $\pm 0,3$ % of indicated test force (for forces ranging from 1/100 to 1/1 of the load cell capacity rating)
		10N to 300kN (select one)	Accurate to within ± 1 % of indicated test force (for forces ranging from 1/1000 to 1/1 of the load cell capacity rating)
	500kN to 600kN	Accurate to within ± 1 % of indicated test force (for forces ranging from 1/500 to 1/1 of the load cell capacity rating)	

AUTOGRAPH Table-Top Precision Universal Tester

AGS-X Series



Combining all necessary functions in a compact design, this high-performance, cost-efficient testing machine has been developed for low-capacity strength evaluations. Increase testing efficiency using dedicated data processing software (TRAPEZIJM LITE X).

Load capacity	1 N to 10 kN (11 types)
Test speed	0,001 to 1,000 mm/min (Stepless)
Test force accuracy	Within $\pm 0,5$ % of display test force (for 1/1 to 1/500 of load cell capacity)

Micro AUTOGRAPH

MST-I



Utilize the MST-I to evaluate the strength of small test samples such as electronic parts, micro-devices and fine wire. A high-precision drive system and measurement system allows very small test forces and displacements to be measured and controlled, enabling various types of data to be obtained. An X-Y stage and a microscope are provided to enable easy positioning and observation of the sample.

Test force measuring range	2 mN to 2 kN
Drive resolution	HR type: 5 nm, HS type: 20 nm
Displacement display resolution capability	20 nm
Test speed	HR type: 0,0012 to 30 mm/min, HS type: 0,0048 to 120 mm/min

Compact Tabletop Tester

EZ-X Series



This easy-to-use, compact, stylish frame incorporates enhanced functions, enabling tests to be carried out with good efficiency.

	EZ4X	EZ4X	EZ4X HS
Load capacity	500 N	5 kN	2 kN
Test speed	0,001 to 1,000 mm/min	0,001 to 2,000 mm/min	0,001 to 2,000 mm/min
Return speed	1,500 mm/min	3,000 mm/min	3,000 mm/min

Test force measurement accuracy	High-precision type	$\pm 0,5$ % of indicated value (range from 1/500 to 1/1 of the load cell capacity). Complies with JIS B7721 class 0,5, ISO 7500-1 class 0,5, EN 10002-2 grade 0,5, and ASTM E4
	Standard-precision type	± 1 % of indicated value (range from 1/500 to 1/1 of the load cell capacity). Complies with JIS B7721 class 1, ISO 7500-1 class 1, EN 10002-2 grade 1, and ASTM E4

Chromatography System
Mass Spectrometry System
Spectroscopy System
Life Science System
New and Future Analysis System
Professional Measurement System
New Technology and Innovation System
Specialized Measurement System